

中文图书分类号: TU391

UDC: 624

学 校 代 码: 10005



硕 士 专 业 学 位 论 文

PROFESSIONAL MASTER DISSERTATION

MASTER DISSERTATION

论 文 题 目: 3D 打印不锈钢材性及短柱有限元模拟
方法研究

论 文 作 者: 黄雅楠

专 业 类 别 / 领 域: 建筑与土木工程

指 导 教 师: 杨璐 教授

论 文 提 交 日 期: 2022. 6. 11

UDC: 624
中文图书分类号: TU391

学校代码 10005
学号: S201904231

北京工业大学硕士专业学位论文

(全日制)

题 目 3D 打印不锈钢材性及短柱有限元模拟方法研究

英文题目 RESEARCH ON MATERIAL PROPERTIES OF
3D PRINTED STAINLESS STEEL AND FINITE
ELEMENT METHOD OF STUB COLUMNS

论 文 作 者: 黄雅楠

专业类别/领域: 建筑与土木工程

研 究 方 向: 钢结构

申 请 学 位: 工程硕士专业学位

指 导 教 师: 杨璐 教授

所 在 单 位: 城市建设学部

答 辩 日 期:

授予学位单位: 北京工业大学

独 创 性 声 明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的科研成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京工业大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签 名： 黄雅楠

日 期：2022 年 5 月 22 日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解北京工业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

签 名： 黄雅楠

日 期：2022 年 5 月 22 日

导师签名： 杨璐

日 期：2022 年 5 月 22 日

摘 要

近年来, 3D 打印技术得到了国内外学者的广泛关注, 在多个领域得到快速发展, 然而在建筑工程领域起步较晚。建筑工程建造方式长期受限于传统的建造工具及建造技术, 往往无法实现过于复杂形式结构的实际建造, 并且传统的施工技术过于粗犷, 会对环境造成严重的破坏, 造成巨大的资源消耗和浪费, 不符合绿色环境发展理念。随着时代的发展, 建筑 3D 打印技术应运而生, 其数字化、自动化的建造方式将为建筑行业带来翻天覆地的变革, 对于解决传统建筑行业的问题具有重要意义。因此, 本文对 3D 打印不锈钢材料及短柱力学性能展开研究, 包括电弧增材制造 (Wire and Arc Additive Manufacturing, WAAM) 不锈钢的材料力学性能、WAAM 构件表面粗糙几何轮廓表征方式以及 WAAM 圆管短柱有限元建模方法的研究。本文的研究工作主要包括以下几个方面:

(1) 开展了 216 个 WAAM 不锈钢光滑和粗糙试样的单轴拉伸试验。采用 12 组工艺参数加工 WAAM 316L 不锈钢板, 重点考虑送丝速度和焊接速度的影响, 并从钢板上沿与焊缝方向成 0° 、 45° 和 90° 三个方向切取材性试样, 分为光滑试样和粗糙试样两类, 共对 216 个材性试样进行单轴拉伸试验, 得到应力-应变曲线, 基于材性试验结果提出 WAAM 316L 不锈钢材料本构模型。

(2) 提出一种对 WAAM 构件粗糙轮廓的表征方法。首先通过 3D 激光扫描获得 12 块 WAAM 316L 不锈钢板的三维模型, 截取三个截面提取轮廓线坐标信息, 通过移动平均值滤波的方法去除板件本身的弯曲变形, 提出一种用正弦半波来表征 WAAM 构件粗糙表面形貌的方法。

(3) 提出 WAAM 不锈钢短柱受压性能有限元模拟方法。根据已有参考文献中 WAAM 不锈钢圆管短柱试验, 进行有限元模拟。将提出的正弦半波表征方法引入到有限元模拟中, 采用四种不同的建模方法进行模拟, 并将有限元模拟结果与试验结果对比, 提出最准确适用的有限元建模方法。

关键词: 3D 打印; 电弧增材制造; 各向异性; 轮廓表征; 有限元模拟

Abstract

In recent years, 3D printing technology has been widely concerned by scholars at home and abroad. It developed rapidly in many fields, but started late in the field of construction engineering. Limited by traditional construction tools and technology for a long time, the method of construction engineering is often unable to realize the actual construction of complex structures. Moreover, the traditional construction technology is too rough, which will cause serious damage to the environment, resulting in huge resource consumption and waste, and does not conform to the concept of green environmental development. With the development of the times, architectural 3D printing technology emerges at the historic moment. Its digital and automatic construction method will bring earth-shaking changes to the construction industry, which is of great significance to solve the problems of the traditional construction industry. Therefore, the mechanical properties of 3D printed stainless steel materials and components are studied in this thesis, including the material properties of WAAM stainless steel, the characterization of rough geometric contour and the finite element modeling method. The following sections are involved in this thesis:

(1) Uniaxial tensile tests are carried out on 216 WAAM stainless steel smooth and rough specimens. Mainly considering the influence of wire feeding speed and welding speed, 12 groups of process parameters are used to process WAAM 316L stainless steel plates. Material specimens are cut from the steel plates along with the direction of the weld into 0° , 45° and 90° , divided into smooth specimens and rough specimens two categories. Moreover, Uniaxial tensile tests are carried out on 216 WAAM stainless steel smooth and rough specimens, and stress-strain curves are obtained.

(2) A method to characterize rough contours of WAAM components is proposed. Firstly, the 3D models of WAAM 316L stainless steel plates are obtained by 3D laser scanning, and the coordinate information of contour lines is extracted by cutting three sections. The bending deformation of the plates is removed by moving average filtering method, and a method of sinusoidal half wave is proposed to characterize the rough surface of WAAM members.

(3) The finite element simulation method of WAAM stainless steel stub column is proposed. According to the WAAM stainless steel tube stub column tests in the existing references, the finite element simulation is carried out. The sinusoidal half wave

characterization method is applied to finite element simulation. Four different modeling methods are used to simulate, moreover, the simulation results are compared with the experimental results. The most accurate and suitable finite element modeling method is proposed.

Keywords: 3D printing, wire and arc additive manufacturing, anisotropic, contour characterization method, finite element simulation

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 选题背景与意义.....	1
1.2 3D 打印金属结构概述.....	3
1.2.1 3D 打印原理及发展历程.....	3
1.2.2 3D 打印材料及工程应用.....	6
1.2.3 3D 打印技术.....	7
1.3 国内外研究现状.....	13
1.3.1 电弧增材制造工艺研究.....	13
1.3.2 3D 打印金属材性研究.....	14
1.3.3 3D 打印金属构件力学性能研究.....	15
1.3.4 3D 打印金属结构力学性能研究.....	16
1.4 目前研究的不足.....	16
1.5 本文的研究内容.....	17
第 2 章 工艺参数对 WAAM 成形不锈钢材料力学性能的影响.....	19
2.1 WAAM 不锈钢板的加工与制备.....	19
2.1.1 试验材料.....	19
2.1.2 增材制造系统.....	19
2.1.3 冷金属过渡增材制造工艺参数.....	22
2.2 材性试验.....	24
2.2.1 材性试件取样.....	24
2.2.2 材性试样尺寸.....	25
2.2.3 试验加载装置.....	25
2.2.4 粗糙材性试样横截面积的测定.....	26
2.3 WAAM 不锈钢材料的各向异性.....	30
2.4 光滑材性试样与粗糙材性试样对比.....	40
2.5 工艺参数对力学性能的影响.....	47
2.6 WAAM 316L 不锈钢材料本构模型.....	48
2.7 本章小结.....	52
第 3 章 WAAM 成形构件几何形貌的表征.....	53

3.1 3D 激光扫描	53
3.1.1 3D 激光扫描原理	53
3.1.2 3D 激光扫描仪	55
3.1.3 3D 扫描工作流程	56
3.2 数据处理	57
3.2.1 截面数据的获取	57
3.2.2 移动平均值滤波	59
3.2.3 特征点提取	59
3.3 轮廓表征方法	60
3.4 本章小结	62
第 4 章 WAAM 不锈钢圆管短柱轴心受压有限元模拟方法	63
4.1 有限元模型的建立	63
4.1.1 几何模型的建立	63
4.1.2 材性参数	64
4.1.3 单元选择和网格划分	65
4.1.4 边界条件和加载方式	66
4.1.5 几何初始缺陷的引入	66
4.2 有限元建模方法的验证	68
4.2.1 等效光滑模型的建立	68
4.2.2 四种有限元建模方法	69
4.2.3 有限元模拟结果对比	69
4.3 本章小结	73
结论与展望	75
本文主要结论	75
展望	76
参 考 文 献	77
攻读硕士学位期间发表的学术论文与科研情况	83
致 谢	85

第 1 章 绪论

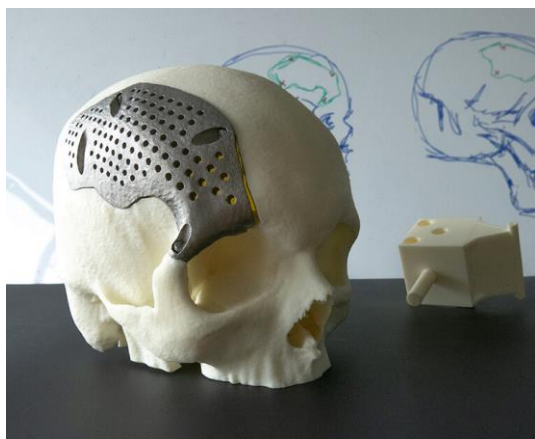
1.1 选题背景与意义

长期以来,建筑工程建造方式受限于传统的建造工具及建造技术。其一,对于一些建筑工程师天马行空的想象力,受限于实际施工条件,往往无法实现过于复杂形式结构的实际建造;其二,传统的施工技术过于粗犷,且会对环境造成严重的破坏,造成了巨大的资源消耗和浪费,不符合绿色环境发展理念。然而随着时代的发展,建筑结构的形式不再局限于传统简单规则的结构,进一步迈向造型新颖独特的新型建筑结构;并且基于绿色环境发展理念,传统高能耗的生产方式难以为继,建筑行业需要寻找新的建造方式。建筑 3D 打印技术应运而生,其数字化、自动化的建造方式将为建筑行业带来翻天覆地的变革,对于解决传统建筑行业的问题具有重要意义。建筑 3D 打印有利于缩短工期、降低劳动强度,采用机械替代人工,降低工人施工作业危险;节约资源,与传统的减材制造方式相比,3D 打印在制造过程中产生的副产品更少、浪费更少;设计灵活,能够实现个性化定制,对于传统建造技术难以实现的复杂特殊结构,可采用 3D 打印技术加以实现,并且可以根据客户的需求,按需打印,实时打印^{[1][2]}。

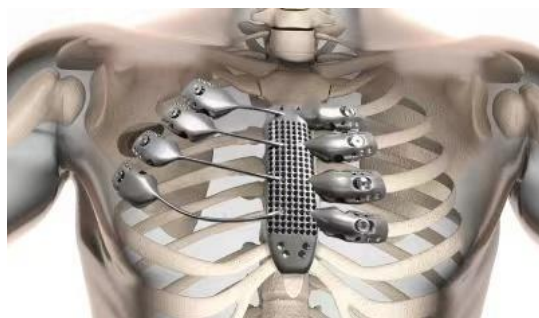
近年来,3D 打印技术受到越来越多的关注,成为最为热点的技术之一,对制造业的发展产生颠覆性的影响。英国杂志《经济学人》在《第三次工业革命》一文中认为 3D 打印是第三次工业革命的重要标志之一。美国《时代》周刊将 3D 打印列为“美国十大增长最快的工业”。我国国务院于 2015 年印发的《中国制造 2025》、三部委于 2015 年印发的《国家增材制造产业发展推进计划(2015-2016 年)》、十二部门于 2017 年印发的《增材制造产业发展行动计划(2017-2020)》、六部委于 2020 年印发的《增材制造标准领航行动计划(2020-2022 年)》文件中都提到了要大力发展 3D 打印技术。

3D 打印又称增材制造,与传统的加工制造方式相比,具有快速制造、节约材料、造型灵活等特点。目前 3D 打印在医疗、航空航天、汽车制造等领域已取得了较好的发展,如图 1-1 所示。在建筑工程领域,3D 打印技术也得到了一定的应用,如图 1-2 所示,Apis Cor 公司为迪拜市政府建造了一座两层的 3D 打印行政大楼;清华大学徐卫国团队在上海智慧湾科创园完成了一座长 26.3m、宽 3.6m 的 3D 打印混凝土步行桥;荷兰 MX3D 公司建造了世界上第一座 3D 打印不锈钢步行桥,将被安装在阿姆斯特丹的一条运河上;Arup 公司设计制造了拓

扑优化后的钢结构节点。



a) 3D 打印头盖骨



b) 3D 打印肋骨



c) 3D 打印载人飞船引擎



d) 3D 打印航空零件

图 1-1 3D 打印应用（图片来源于网络）

Fig. 1-1 3D printing application



a) 3D 打印迪拜政府大楼



b) 3D 打印混凝土桥



c) MX 3D 不锈钢步行桥



d) ARUP 不锈钢节点

图 1-2 3D 打印在建筑工程领域应用（图片来源于网络）

Fig. 1-2 Application of 3D printing in construction engineering

1.2 3D 打印金属结构概述

21 世纪以来,3D 打印迅速发展,并逐步走向成熟,展现出巨大的发展潜力,在多个领域得到广泛关注。本节主要概述 3D 打印原理、3D 打印的起源与发展、3D 打印材料及工程应用和 3D 打印技术。

1.2.1 3D 打印原理及发展历程

3D 打印又称增材制造,是以三维模型数据为基础,通过材料堆积的方式制造零件或实物的工艺,与传统的减材制造(如车、铣、刨、磨等)相比,增材制造是一种自下而上材料累积的制造工艺。其基本原理是首先通过计算机建立三维模型,然后将三维模型切片成逐层的截面数据,并将截面数据信息传送到 3D 打印机,由打印机根据切片数据的信息进行打印,如图 1-3 所示。建筑 3D 打印的具体过程^[3]包括:1) 三维模型建立与近似处理。通过参数化建模软件(Revit、Rhino 等)直接建模,或采用逆向工程(如三维扫描)根据点云构造模型的方式创建三维模型,然后将三维模型导出成特定的文件格式,如 STL 格式,以备后续处理;2) 模型切片与路径规划。将三维模型导入建筑 3D 打印数控系统,系统将对模型进行分层切片处理,并按照切片后得到的截面信息,规划打印喷嘴的运行路径,生成机械运动指令;3) 层片的加工与叠加。打印喷头按照规划好的路径进行打印,层层累加,得到最终的 3D 打印建筑产品。

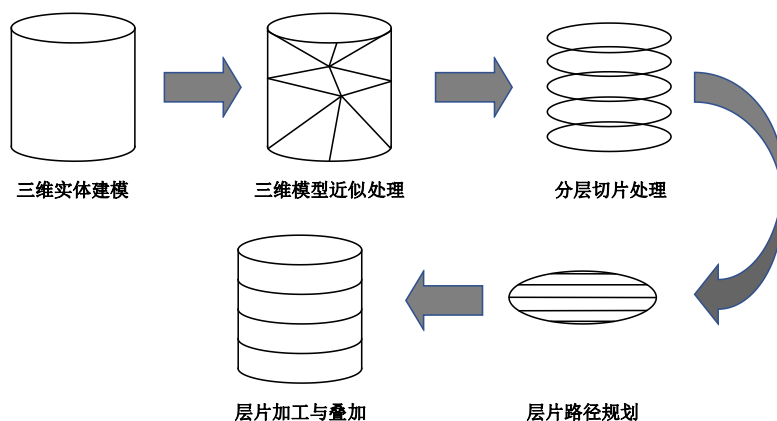


图 1-3 增材制造基本原理

Fig. 1-3 Basic principles of additive manufacturing

3D 打印的思想起源于 19 世纪末的照片雕塑^[4]和地貌成形技术^[5]。1860 年，威莱姆在法国申请了名为“照片雕塑”的专利，如图 1-4 所示，在威莱姆工作室的圆形大厅中，24 个控制台放置 24 台照相机，人们在圆盘舞台上摆出姿势，每 15 度就会被记录下一张影像，根据 24 张轮廓照片切割出 24 块木片，组装起来便形成一个雕像。与如今 3D 打印自下而上的叠层方式不同，切割出的木片是以纵向中线为轴旋转排列而成。1892 年，Joseph Blanthier 发明了用蜡板叠层的方法制作等高线地形图的技术，在一系列蜡板上压印地形等高线，然后对蜡板进行切割，将每一层蜡板堆叠起来并进行平滑处理。

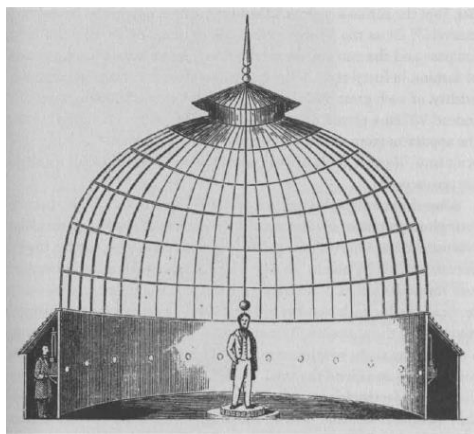


图 1-4 照片雕塑（图片来源于网络）

Fig. 1-4 Photo sculpture

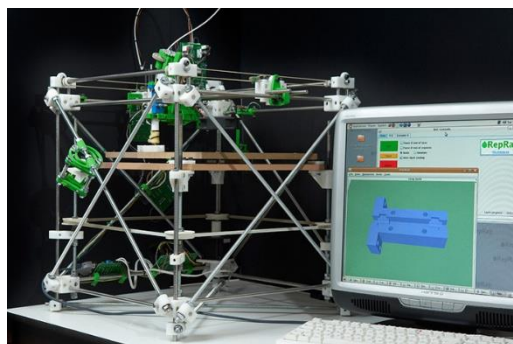
自 20 世纪 90 年代中期开始，涌现了一系列 3D 打印技术。1983 年，Charles Hull 发明了光固化成形技术（SLA），并于 1986 年申请专利，同年，Charles Hull 在加利福尼亚州成立了 3D Systems 公司，致力于光固化技术商业化，目前 SLA 技术被公认为世界上研究最深入、应用最早的一种 3D 打印方法。1988 年，美国学者 Scott Crump 成功研制熔融沉积成型技术（FDM），该技术通过将热塑性材

料加热熔化后逐层累积，构造出部件，并创立 Stratasys 公司。1989 年，美国德克萨斯大学 Carl Dechard 教授提出了选择性激光烧结技术（SLS），该技术使用的材料非常广泛，可用于加工石蜡、陶瓷、金属等多种材料。1995 年，德国 Fraunhofer 学院首次提出选择性激光熔化技术（SLM），与 SLS 技术相比，SLM 技术成形工件致密度更高，可用于加工多种金属材料。1925 年，美国西屋电器 Baker 申请了一项专利：以电弧为热源，采用逐层堆焊的方法制造金属工件，被视为电弧增材制造技术（WAAM）的起源；1988 年，英国诺丁汉大学 Spencer 等人提出熔化极气体保护焊（GMAW）三维焊接成形方法，利用机器人控制金属零件的成形过程。

21 世纪以来，3D 打印技术蓬勃发展，在多个领域都取得了巨大的进步。如图 1-5 所示，2000 年，科学家研制成功世界上第一个 3D 打印肾脏；2005 年，巴斯大学 Adrian Bowyer 博士建立 RepRap 项目，该项目由一台自动复制的 3D 打印机组成，可实现 3D 打印 3D 打印机，该项目的目标是使工业生产变得大众化；2008 年，第一个 3D 打印假肢得到医疗应用；2011 年，世界上首款 3D 打印汽车 Urbee 面世；2019 年，以色列一个团队利用取自病人自身的人体组织，打印出了全球第一个完整的心脏。



a) 3D 打印肾脏



b) RepRap 项目



c) Urbee 汽车



d) 3D 打印心脏

图 1-5 3D 打印的发展（图片来源于网络）

Fig. 1-5 Development of 3D printing

1.2.2 3D 打印材料及工程应用

3D 打印材料是 3D 打印技术发展的重要物质基础，材料的发展决定着 3D 打印的应用前景。目前，3D 打印材料主要包括工程塑料、光敏树脂、陶瓷材料和金属材料等，这些材料都是针对专门的 3D 打印设备和 3D 打印工艺而研制的，其形态一般包括粉末状、丝状、液体状等。其中被广泛使用的 3D 打印金属材料包括：钛合金、镍合金、铝合金和铁基合金等。

(1) 钛合金

钛合金具有强度高、耐高温、耐腐蚀、以及生物相容性好等优点，被广泛应用于生物医学、航空航天、化工等领域，其中 Ti-6Al-4V (TC4) 是最早也是最广泛应用于金属增材制造技术的合金^[6]。已有学者分别对选择性激光熔化^[7]、电子束选区熔化^[10]、电弧增材制造^[11]等技术成形的 Ti-6Al-4V 合金展开研究。钛被称为“亲生物”金属，由于其生物相容性非常好，在医用金属领域应用非常广泛，如今应用到钛合金 3D 打印技术的主要是骨科和牙科。2015 年西安空军军医大学为一名胸骨肿瘤患者成功实施了 3D 打印钛合金胸骨植入手术；西北工业大学与中国商用飞机有限公司合作，为国产大飞机 C919 打印了长达 3 米的中央翼缘条，是大型钛合金结构件，如图 1-6 所示。



图 1-6 国产大飞机 C919 中央翼缘条

Fig. 1-6 The center flange of the large aircraft C919

(2) 镍合金

镍基合金是指在 $650^{\circ}\text{C} \sim 1000^{\circ}\text{C}$ 高温下有较高强度与一定抗氧化腐蚀能力的一类合金，被广泛应用于航空航天、石油化工、船舶等领域，常用的 3D 打印镍合金牌号有 Inconel 718 和 Inconel 625。3D 打印的镍基合金常被用于制备航空发动机中的涡轮盘、涡轮叶片等热端部件，美国俄勒冈州的 Metal Technology (MTI) 公司为 NASA 旗下的 Johnson 太空中心生产 Inconel 718 合金部件，如图 1-7 所示。



图 1-7 Inconel 718 部件

Fig. 1-7 Inconel 718 part



图 1-8 AlSi7Mg 天线支撑结构

Fig. 1-8 AlSi7Mg Antenna support structure

(3) 铝合金

铝合金密度低、比强度高、比刚度高、耐腐蚀性好、抗疲劳性较高，是一类理想的轻量化材料^[12]，但由于其易氧化、高反射性和高导热性等特点，增大了选择性激光熔化技术制造的难度^[13]。目前选择性激光熔化技术采用的铝合金牌号多为 AlSi10Mg、AlSi7Mg、AlSi9Cu3 等。此外，相关学者对电弧增材制造技术成形铝合金构件进行了研究^[14]，使用的材料多为变形铝合金，常用牌号有 5356、4043 等。韩国通讯卫星 Koreasat-5A 和 Koreasat-7 采用选择性激光熔化技术制造的 AlSi7Mg 天线支撑结构，与传统制造技术相比，重量减轻 22%，成本节约 30%，如图 1-8 所示。

(4) 铁基合金

铁基合金由于具有生产成本低、应用范围广等优点，在金属 3D 打印领域得到广泛关注，常用材料包括不锈钢（304、316 等）、工具钢、模具钢等，其中不锈钢以其耐空气、蒸汽、水等弱腐蚀介质和酸、碱、盐等化学浸蚀性介质腐蚀而得到广泛应用，且具有较高的性价比，得到了一些学者的重点关注^[17]。Arup 公司^[20]设计研发的拓扑优化的不锈钢节点，采用选择性激光烧结技术制造，与原始节点相比质量减轻了 75%，并且外形更加美观，如图 1-2（d）所示。荷兰 MX3D 公司采用电弧增材制造技术，以 308LSi 奥氏体不锈钢丝为打印材料，利用 6 轴机械臂打印了一座跨度为 12 米的不锈钢步行桥^[21]，是世界上第一座 3D 打印钢桥，将被安装在阿姆斯特丹的一条运河上，如图 1-2（c）所示。

1.2.3 3D 打印技术

金属增材制造的热源可分为有激光、电子束、电弧三种，金属增材制造技术主要分为粉末床熔合技术（Powder Bed Fusion, PBF）和定向能量沉积技术（Directed Energy Deposition, DED）两大类^[22]，如图 1-9 所示。

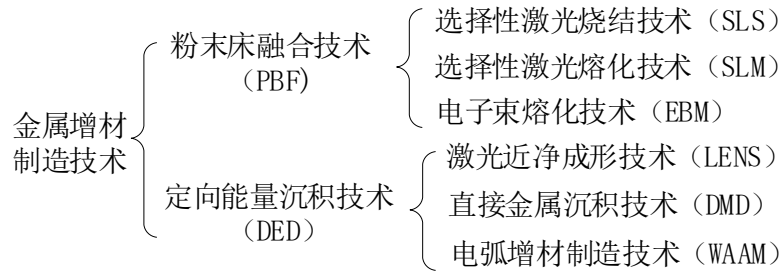


图 1-9 金属增材制造技术分类

Fig. 1-9 Metal additive manufacturing technology classification

(1) 选择性激光烧结技术

选择性激光烧结技术 (Selective Laser Sintering, SLS) 于 1989 年由美国得克萨斯大学 Dechard 提出, 其基本工作步骤为: 首先在工作台上铺一层粉末, 将粉末预热到接近熔点, 使用激光在该层截面上按计算机的控制有选择地进行烧结, 重复铺粉、烧结的过程, 直到整个模型成型, 如图 1-10 所示。1992 年美国 DTM 公司将 SLS 技术带入市场, 随后德国 EOS 公司也将 SLS 技术应用于市场。SLS 技术可加工石蜡、陶瓷、金属等多种材料, 用途广泛, 工艺简单, 但成品密度较差, 表面较粗糙, 力学性能较差。

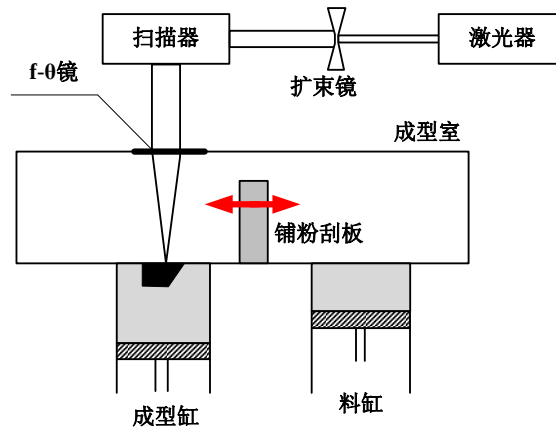


图 1-10 SLS 技术原理图

Fig. 1-10 Principle of SLS technology

(2) 选择性激光熔化技术

选择性激光熔化技术 (Selective Laser Melting, SLM) 于 1995 年由德国 Fraunhofer 学院提出, 并在 2002 年研究成功, 该技术是在 SLS 技术的基础上提出的, 两者的主要差别在于 SLS 技术不要求每层金属粉末被激光束完全熔化, 而 SLM 技术要求金属粉末必须完全熔化, 再通过冷却凝固成形, 因此 SLM 技术制造的金属零件致密度更高^[23]。SLM 技术集成了 SLS 技术的工艺优点, 逐层充分熔化金属粉末, 在惰性气体保护下冷却成形, 以防金属粉末与其他气体发生反应影响成形件的性能。SLM 技术成形件尺寸精度高、表面光滑、致密度高,

成形过程中存在的主要问题是球化效应以及翘曲变形与裂纹^[24]，并且，SLM 设备昂贵，工艺参数复杂，成形部件尺寸受到限制。目前德国、英国、日本等国家已经对 SLM 技术展开了研究，其中德国在此方面的研究最为深入，已有多家 SLM 设备制造商，如 EOS 公司、MCP 公司、Concept Laser 公司。我国对该技术的研究发展相对比较缓慢，主要研发力量集中在一些高校，如北航、华南理工、华中科技大学等。工程应用方面，美国航天公司 Space X 开发载人飞船 Super Draco 的过程中，利用了 SLM 技术制造的引擎。

（3）电子束熔化技术

电子束熔化技术（Electron Beam Melting, EBM）与 SLS、SLM 技术相似，区别在于将热源由激光换成了电子束，在真空环境中，利用高能快速的电子束选择性地熔化金属粉末，层层堆积直至整个零件成型。EBM 技术具有能量利用率高、无反射、真空环境无污染等优点，缺点是成本较高、打印零件尺寸有限、成形过程中会产生很强的 X 射线，需要采取有效的保护措施。2003 年，瑞典 Arcam 公司推出了全球第一台 EBM 打印设备 EBM-S12，随后又推出了多种不同型号的设备。清华大学林峰教授团队申请了我国最早的 EBM 成形设备专利，并开发了我国第一台实验室用 EBM 成形设备^[25]。

（4）电弧增材制造技术

电弧增材制造技术（Wire and Arc Additive Manufacturing, WAAM）可追溯到 1925 年美国西屋电器 Baker 申请的一项专利^[26]：以电弧为热源，采用逐层堆焊的方法制造金属工件。WAAM 技术是基于逐层堆积原理，以熔化极惰性气体保护焊接（MIG）、钨极惰性气体保护焊接（TIG）以及等离子体焊接电源（PA）等焊机产生的电弧为热源，以焊丝为填充材料，在程序控制下，根据三维数字模型由线-面-体逐层堆积出金属零件。与其他增材制造技术相比较，WAAM 成形部件整体均为焊缝，组织和化学成分均匀，且具有成形速度快、沉积效率高、成本较低等优点；与 SLM 技术相比，WAAM 技术的成形构件尺寸不受设备限制，尤其适用于大尺寸、复杂形状构件的快速成形，但是成形精度较差。1988 年英国诺丁汉大学 Spencer 等人提出了熔化极气体保护焊（GMAW）三维焊接成形方法^[27]，利用机器人控制金属零件的成形过程。1992 年 Ouyang 等^[28]采用变极性 TIG 焊接堆积成形 5356 铝合金构件。英国 Cranfield 大学采用 WAAM 技术制作了一个长 6m、重 300kg 的双面翼梁^[29]，如图 1-11 所示，认为 WAAM 技术可比传统制造技术节省费用达 70%，且可大大缩短大、中型结构制品的交货时间。荷兰 MX3D 公司采用 WAAM 技术制造了世界上第一座 3D 打印钢桥，如图 1-2（c）所示。



图 1-11 Cranfield 3D 打印机翼

Fig. 1-11 Cranfield 3D printing wings

冷金属过渡（Cold Melting Transfer, CMT）技术是由奥地利 Fronius 公司提出的一种新型焊接工艺，与传统的 MIG 焊接相比，CMT 技术具有高熔敷率、低热输入、弧长控制精确和飞溅小等特点，因此 CMT 技术常被用于焊接厚度较薄的板件，焊接板厚最低可达 0.3mm ^[30]。CMT 技术通过外加回抽力的方式促进熔滴发生短路过渡，同时改变了电流和电压的波形，短路瞬间电流几乎为零，限制了焊接热输入。CMT 技术在熔滴变化过程中大概分为四个步骤，如图 1-12 所示：1）电弧产生，焊丝在熔化的状态下，向熔池过渡；2）焊丝端部的熔滴与熔池接触的瞬间，电弧立即熄灭，焊接电流降低；3）焊丝在回抽力的作用下进行缩回运动，帮助熔滴分离，此时几乎没有电流流通，熔滴顺利过渡；4）焊丝继续送丝，实现“高温-低温-高温”的轮换过程。

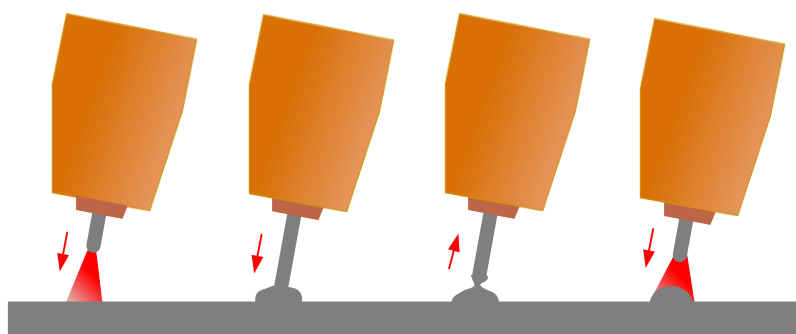


图 1-12 CMT 技术熔滴变化过程

Fig. 1-12 CMT technology droplet change process

此外，还有一些常被应用于塑料、光敏树脂等材料的 3D 打印技术，如熔融沉积成型技术、光固化成型技术等。

（1）熔融沉积成型技术

熔融沉积成型技术（Fused Deposition Modeling, FDM）是将丝状材料，如热塑性塑料、蜡或金属的熔丝加热为熔融流体后从喷嘴挤出，按照预定轨迹和速率将熔融流体堆积成型，从而凝固成型为工件，如图 1-13 所示。FDM 工艺材料利用率高，成本低，适用于多种材料，但精度低，不适用于制造复杂工件，表面质

量差。

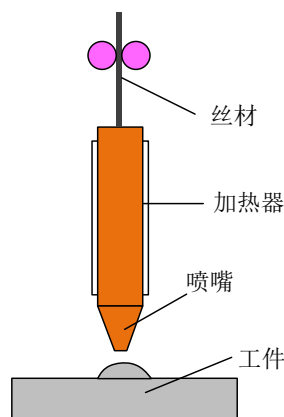


图 1-13 FDM 技术原理图

Fig. 1-13 Principle of FDM technology

(2) 光固化成形技术

光固化成形技术（Stereo Lithography Apparatus, SLA）的原理是以液态光敏树脂为原料，紫外激光在计算机的控制下以工件各分层截面的轮廓为轨迹，使被扫描区的树脂薄层发生光聚合反应，从而形成一个薄层截面。该层固化完毕后，工作台向下，再敷上一层新的液态树脂，新固化的一层牢固地粘合在前一层上，此过程重复执行，直至整个零件制造完毕，如图 1-14 所示。SLA 工艺精度较高，表面质量好，材料利用率高，但可适用的材料有限，材料价格较昂贵。

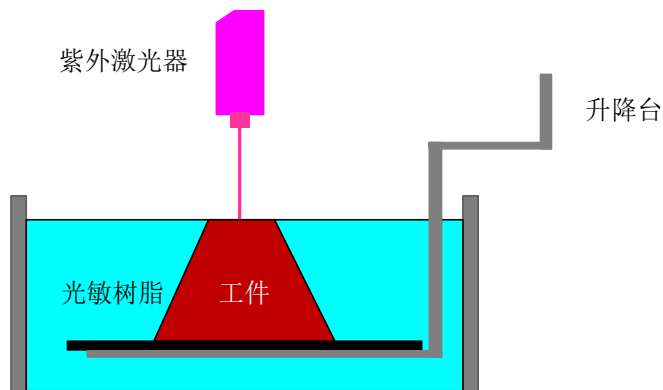


图 1-14 SLA 技术原理图

Fig. 1-14 Principle of SLA technology

近些年来，在建筑工程非金属材料领域，也涌现了一系列 3D 打印技术，如轮廓工艺、D 型工艺和混凝土打印等。

(1) 轮廓工艺

2001 年，美国南加州大学教授 Khoshnevis^[31]提出“轮廓工艺（Contour Crafting, CC）”，其原理是通过机械挤出膏糊状的建筑材料，从而一层一层地将墙壁打印出来，如图 1-15 所示。Khoshnevis 教授正在研究如何利用该技术在月球上建造太空基地，此项研究得到了美国国家航空航天局（NASA）的支持。



图 1-15 轮廓工艺

Fig. 1-15 Contour Crafting

(2) D 型工艺

2007 年, 英国 Monolite 公司意大利工程师 Dini^[32]提出了一种通过喷挤粘结剂来选择性胶凝硬化逐层砂砾粉末, 从而实现堆积成型的方法, 称为 D 型工艺 (D-shape), 如图 1-16 所示。



图 1-16 D 型工艺

Fig. 1-16 D-shape

(3) 混凝土打印

2008 年, 英国拉夫堡大学 Buswell 教授提出了“混凝土打印 (Concrete Printing)”技术^[33], 通过挤出混凝土拌合物实现分层打印、逐层叠加, 最终完成结构构件或整体建筑的成形; 不同于轮廓工艺, Concrete Printing 技术一次性打印整体截面, 而不是先打印轮廓后内部填充。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 电弧增材制造工艺研究

电弧增材制造技术与激光增材制造技术相比成形精度较低,这是由于电弧的成性位置由焊枪、焊丝及机器人的位置共同决定,而激光的位置由振镜控制。因此一些学者对电弧增材制造成形质量进行研究。Ayarkwa^[34]研究发现影响 WAAM 构件成形形貌的主要因素是送丝速度与焊接速度的比值。柏久阳^[14]等提出了工艺参数(焊接电流、焊接速度、送丝速度、层间温度)与焊道宽度尺寸预测模型,并且试验发现影响焊道宽度的主要因素有焊接电流、焊接速度和层间温度。王晓光^[35]等对冷金属过渡电弧增材制造成形的 316L 奥氏体不锈钢单道多层薄壁件,不同焊接参数下成型宽度、侧面成形误差、沉积有效率及显微组织的变化进行研究。结果表明,316L 不锈钢 CMT 成形时,影响成形精度的主要因素是送丝速度、焊接速度和热输入。从保强等^[36]研究发现合理控制过程特征参数(电弧热输入、送丝速度、运动速度、保护气体流量等)可实现对铝合金内部气孔及成型尺寸的有效控制。卜星等^[37]设计了电弧增材制造成形系统,建立数学模型预测铝合金单道焊缝的成型尺寸,并通过金属零件成型试验验证系统可行性。高福洋等^[38]采用 Ti6321A 焊丝进行电弧增材制造,研究焊枪姿态和摆动参数等工艺参数对成形的影响。结果表明,随着焊枪姿态由推焊变到拉焊,焊缝熔宽变小,余高变高。赵昀等^[39]采用 CMT 技术成形薄壁结构件,研究工艺参数对成形形貌的影响,发现送丝速度对熔覆层尺寸的影响最为显著。方学伟等^[40]采用 2319 铝合金焊丝和 CMT 电弧增材制造技术,恒定送丝速度和不同焊接速度得到 6 组单层焊道,采用标准曲线对截面轮廓进行拟合,提出了一种单层多道斜顶搭接模型。郭亚轩等^[41]研究了成形方式、成形电流、成形速度、冷却时间等工艺参数对 5B06 变形铝合金电弧增材制造成形的影响,结果表明:成型电流、成形速度是多层单道电弧增材制造的重要影响因素;并且适当的层间停留时间可有效提高成形表面精度。杨壮等^[42]通过数学建模进行算法优化实现对厚壁结构件成形宽度及高度的预测,提高成形件尺寸精度,并引入单焊道成形尺寸神经网络预测模型,实现焊接参数的最佳选择。

焊接工艺参数是影响增材制造成形件工艺性能和力学性能的关键因素,因此学者对工艺参数与力学性能之间的关系展开研究。任香会等^[43]进行不同填充度的不锈钢冷金属过渡电弧增材制造试验,开展不同位置的拉伸试验并分析端口形貌和微观组织,结果表明水平方向屈服强度和抗拉强度均高于垂直方向。刘奋成等^[19]研究了电弧堆焊快速成形材料的微观组织和力学性能,结果表明, MIG 堆焊成形 316L 不锈钢的强度和塑性指标均高于热轧和铸造不锈钢性能指标。张炼

等^[44]采用不同焊接工艺参数（焊接电流、焊接速度）进行 316 不锈钢 TIG 电弧增材制造单道多层墙体，研究最佳工艺参数下墙体的显微组织和硬度，发现焊接电流与焊接速度保持正相关关系有助于获得良好的墙体成形。王秋雨等^[45]采用 ER5356 铝合金焊丝和 TIG 电弧增材制造技术开展试验，研究焊接电流和预热温度对成形的影响，结果表明热输入对铝合金的成形影响较大，在优化参数下得到的实体件表面光滑，无裂纹、气孔等明显缺陷。闻章鲁等^[46]研究了焊接电流、焊接速度对 TIG 电弧增材成形高氮钢直壁体的成形质量及力学性能的影响，结果表明：直壁体构件的强度和塑性均接近热轧和铸造性能指标，焊接速度对结构件的整体力学性能影响较为显著。

1.3.2 3D 打印金属材料性能研究

在 PBF 制造钢材材料性能研究方面，Tolosa^[47]、Mertens^[48]、Meier^[49]等学者对 PBF 技术制造的 316L 不锈钢材料展开研究，对不同成形角度的试样进行单轴拉伸试验，并与传统制造方式进行对比，发现与基板垂直方向的屈服强度和抗拉强度低于水平方向，与基板水平方向的抗拉强度高于传统制造 316L 不锈钢的抗拉强度。Buchanan^[50]等对 PBF 制成的 PH1 和 316L 不锈钢试样进行单轴拉伸试验，并对 316L 不锈钢试样进行单轴压缩试验，观察到 316L 不锈钢的条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ （受拉和受压两种状态下）和抗拉强度 σ_u 随材料生成角度的增大而减小，PH1 不锈钢的条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 大概保持不变，抗拉强度 σ_u 随材料生成角度增大而减小。Laleh^[51]等研究发现 SLM 技术制成的 316L 不锈钢具有较高的硬度和抗点蚀性能，但耐腐蚀性较低，认为这种现象可能与 SLM 技术导致 316L 不锈钢微观结构中存在小孔有关。佟鑫等^[52]采用 SLM 技术制造 304L 不锈钢，并研究了不同成形角度对力学性能的影响，结果表明成形角度对屈服强度和抗拉强度影响不显著，对断后伸长率影响显著，分析认为当粉末质量较高、SLM 工艺参数足够优化时，可以实现良好的冶金结合，因此对于不同角度成形的 304L 不锈钢的强度影响不大，但对塑性影响较大。周玥丞和赵阳^[53]分别采用两种 SLM 生产设备制备了两种厚度、五个方向的共 48 个 316L 不锈钢试样，通过拉伸试验获得其基本力学性能，试样的弹性模量范围为 172.61 ~ 215.55 GPa，屈服强度为 446.90 ~ 583.47 MPa，极限强度为 576.22 ~ 734.43 MPa，延伸率为 20.69% ~ 49.56%，不同设备、不同厚度和不同方向制样的力学性能表现出较为明显的差异。

在 WAAM 制造钢材材料性能研究方面，Gardner 等^[54]采用与 MX3D 不锈钢桥相同的材料（308LSi）和打印参数制造板件，制备了两类试样——WAAM 打印粗糙试样和加工后光滑试样，两类试样分别在板件上以与层方向成 0°、45° 和 90° 的方向提取，进行拉伸试验研究，试验结果表明材料具有各向异性，且 WAAM 成形粗糙试样由于几何形状的影响，弹性模量和强度指标均低于光滑试

样。Kyvelou 等^[55]对 WAAM 成形不锈钢(308LSi)进行材性试验,结果表明 WAAM 不锈钢材性很大程度上取决于几何尺寸,并给出了关键力学性能指标的表达式。Laghi 等对 WAAM 成形粗糙试样和加工后光滑试样进行拉伸试验,结果表明几何尺寸不规则可能会诱导 WAAM 不锈钢材料的各向异性^[56];并且对 WAAM 成形 308LSi 材性试样打磨后进行拉伸试验,以降低表面粗糙对材性造成的影响,结果表明打磨后材料具有各向异性^[57]。Cunningham 等^[58]对采用层间冷却 WAAM 技术制造 316LSi 材料的性能展开研究,结果表明较高的热输入导致弹性模量降低,并且较高的层间温度可用来减少残余应力引起的基板变形。Joosten^[59]采用 WAAM 技术对与竖直方向呈 0° 、 30° 和 60° 制成的 308LSi 和 316LSi 不锈钢圆棒进行拉伸试验,结果表明抗拉强度与成形角度呈明显的负相关性,抗拉强度平均值达到 611MPa。Haden 等^[60]对 WAAM 制造的 304 不锈钢和 ER70S 碳素钢试样进行拉伸试验,结果表明 WAAM 制造的 304 不锈钢屈服强度高于锻造屈服强度(仅进行了焊接方向的试样拉伸),WAAM 制造的 ER70S 碳素钢屈服强度和锻造制造相近,并且沿焊接方向和垂直焊缝方向的屈服强度没有明显差异。Bartsch 等^[61]对 WAAM G3Si1 金属材料进行疲劳试验和有限元研究。

1.3.3 3D 打印金属构件力学性能研究

Buchanan 等^[50]对 PBF 制成 316L 不锈钢方形空心截面短柱进行轴压试验,并将试验结果与 EN 1993-1-4 和 CSM 设计方法进行比较,结果表明现有设计方法可适用于 PBF 制造 SHS 短柱。Zhang 等^[62]对 PBF 制成 316L 不锈钢圆形空心截面短柱进行轴压试验研究和数值模拟,并将结果与 EN 1993-1-4 和连续强度法(CSM)进行比较,认为两种方法均适用于 PBF 制造 CHS 短柱,并且 CSM 方法更加准确。Yan 等^[63]采用 H13 钢材和 PBF 技术制造方形、矩形和圆形空心截面短柱,进行轴压试验,结果表明现有美国规范、澳大利亚与新西兰标准以及欧洲规范都可以保守地预测其设计强度。He 等^[64]采用 SLM 技术制造三分叉不锈钢节点,进行轴压试验和数值模拟,对该节点的承载性能进行分析。Gardner 等^[65]采用 WAAM 技术制造了与 MX3D 桥关键构件相似比例的矩形空心截面(SHS)和圆形空心截面(CHS)短柱,通过短柱轴压试验对 MX3D 桥关键构件的受压性能进行了评估,并认为 WAAM 成形截面与热轧和冷成形相比几何形状变化较大,有必要对其制定具体的设计规范。Kyvelou 等^[66]对 WAAM 不锈钢方管短柱进行轴压试验,并将试样结果与欧规、美规和连续强度法进行比较。Joosten^[59]和 Bolderen^[67]分别对 WAAM 制造不锈钢杆件和钢管进行受压屈曲试验研究,并且提出稳定系数曲线。

Galjaard 等^[20]以张拉整体结构中现有结构节点为基础,通过拓扑优化设计新型节点,并进行材料、成本和结构特性方面的讨论。Laghi 等^[68]结合拓扑优化设

计与 WAAM 技术, 实现了斜交网格柱的制造。Feucht 和 Lange^[69]采用拓扑优化和 WAAM 技术制造了新型结构连接件和工字梁加劲肋。陈敏超等^[70]对空间结构节点进行单工况和多工况下的拓扑优化设计, 讨论了优化参数对优化结果的影响, 并利用熔融沉积制造技术 (FDM) 完成采用聚乳酸材料的节点打印。赵阳等^[71]将连续体结构的拓扑优化技术引入索杆张力结构的节点设计, 并对其关键拓扑特征进行提取与重建模, 得到受力合理、形式新颖且富有设计美感的节点, 并采用 FDM 和 SLM 技术进行实际制造。杜文凤等^[72]针对分叉型铸钢节点质量过大、应力分布不均衡和生产制造技术落后等问题, 进行了结构拓扑优化设计及 3D 打印制造一体化研究, 讨论了优化参数对结果的影响, 得到分叉型铸钢节点最优拓扑模型, 并应用 FDM 和 SLM 技术制造拓扑优化节点的缩尺模型。

1.3.4 3D 打印金属结构力学性能研究

Gardner 等^[54]对 MX3D 不锈钢桥进行了不同施工阶段的现场结构加载试验, 试验同时考虑了垂直荷载和水平荷载情况, 并基于 CAD 文件导入的几何尺寸与材性试验获得的本构关系建立了全桥有限元模型, 有限元分析结果表明该桥满足设计荷载下的承载要求。Lange 等^[73]采用 WAAM 技术, 在德国达姆施塔特现场打印了一座钢桥, 通过数值模拟验证了该桥的承载能力。杜文凤^[74]和胡庆杰^[75]等对单层网壳结构的拓扑优化设计进行研究。

1.4 目前研究的不足

通过对已有国内外相关研究的研究成果进行归纳分析, 总结现有研究仍存在以下几个方面的不足:

(1) WAAM 不锈钢材料力学性能方面研究较少。目前关于电弧增材制造成形不锈钢材料的研究多集中于微观组织的研究, 在力学性能方面的研究少有涉及。

(2) 针对 WAAM 不锈钢材料各向异性的研究较少。电弧增材制造由于工艺的特殊性, 使得加工成形的不锈钢材料具有各向异性, 现有关于 WAAM 不锈钢材料各向异性的研究较少。

(3) 单道多层焊缝几何轮廓的表征方法很少。目前对于 WAAM 工艺成形尺寸的研究多集中于单道单层焊缝的成形尺寸, 以及焊缝宽度和高度的预测, 少有关于单道多层焊缝的成形尺寸表征方法。

(4) 构件层面上的研究很少。现有对于 3D 打印金属结构力学性能的研究, 材料层面的研究较多, 在构件层面的研究很少。

1.5 本文的研究内容

综合分析现有研究现状与研究不足,本文针对电弧增材制造不锈钢材料和构件力学性能进行研究,技术路线如图 1-17 所示,具体研究内容如下:

(1) 工艺参数对 WAAM 成形不锈钢材料力学性能的影响。考虑送丝速度和焊接速度两个工艺参数,采用 12 组工艺参数分别加工 WAAM 316L 不锈钢板,并从钢板上沿与焊缝方向成 0° 、 45° 和 90° 三个方向切取材性试样,分为光滑试样和粗糙试样两类,共对 216 个材性试样进行单轴拉伸试验。主要研究 WAAM 不锈钢材料的各向异性、表面粗糙对材性的影响以及工艺参数对力学性能的影响等。

(2) WAAM 成形构件几何形貌的表征。由于 WAAM 成形构件表面并非光滑,其成形过程实际上是层层焊缝进行累加,具有一定的规律性,因此提出用一种对 WAAM 构件轮廓的表征方法。首先通过 3D 激光扫描获得 12 块板件的三维模型,截取三个截面提取轮廓线坐标信息,通过移动平均值滤波的方法去除板件本身的弯曲变形,提出一种用正弦半波来表征 WAAM 构件粗糙表面形貌的方法。

(3) WAAM 不锈钢短柱有限元模拟。根据已有参考文献中的试验结果,将本文提出的正弦半波表征 WAAM 构件粗糙表面形貌的方法引入到有限元模拟中,将四种不同的有限元建模方法得到的模拟结果与试验结果进行对比,证明有限元建模方法的合理性。

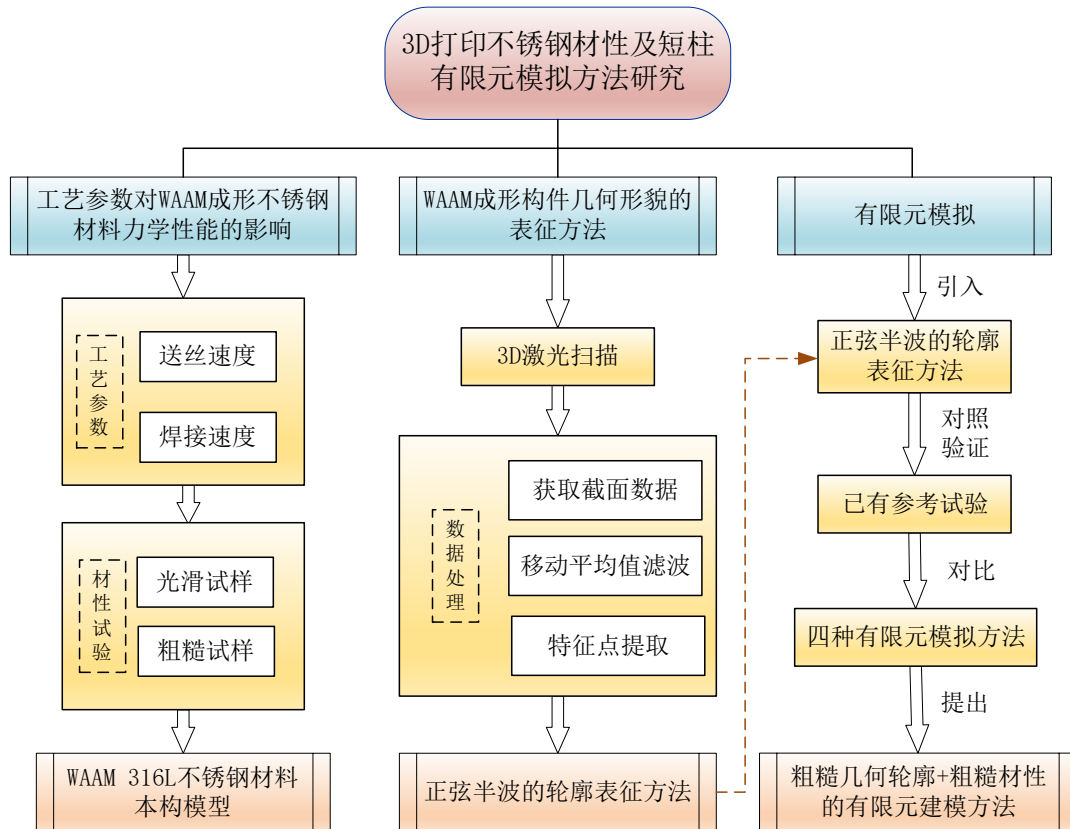


图 1-17 技术路线图

Fig. 1-17 Research frame

第 2 章 工艺参数对 WAAM 成形不锈钢材料力学性能的影响

本章采用 12 组焊接工艺参数加工 WAAM 316L 不锈钢板，重点考虑送丝速度和焊接速度两个工艺参数。从 WAAM 钢板上沿与焊缝方向成 0° 、 45° 和 90° 三个方向切取材性试样，分为光滑试样和粗糙试样两类，共对 216 个材性试样进行单轴拉伸试验，研究 WAAM 成形不锈钢材料的各向异性、粗糙几何形状对材性的影响以及工艺参数对材料力学性能的影响等。

2.1 WAAM 不锈钢板的加工与制备

本次试验加工 12 块 WAAM 316L 不锈钢板，对应 12 种不同的工艺参数，重点考虑 4 种送丝速度（3m/min、4m/min、5m/min 和 6m/min）和 3 种焊接速度（8mm/s、10mm/s 和 12mm/s），在南京英尼格玛公司 Arcman 600 电弧增材制造系统上进行加工。

2.1.1 试验材料

试验所采用的焊丝材料为伊萨 OK Autrod 316L 不锈钢焊丝，直径为 1mm，其中 L 代表超低碳的含义，焊丝化学组成成分由生产厂商提供，见表 2-1 所示。316 不锈钢的碳含量在 0.08 % 以下，316L 不锈钢的碳含量在 0.03 % 以下，由于钢材的含碳量越低，其焊接性能越好，因此采用 316L 不锈钢焊丝有利于获得更好的焊接质量。基板采用碳钢板，尺寸为 $400\text{mm} \times 40\text{mm} \times 30\text{mm}$ ，试验前先用打磨机和砂纸对基板进行打磨，去除表面的氧化层和锈迹，并用丙酮擦拭表面油污，以去除杂质对试验的干扰。试验中所使用的保护气体为 97.5%Ar+2.5%CO₂，送气速度为 20L/min，焊丝干伸长为 12mm。

表 2-1 316L 不锈钢焊丝化学成分质量百分数（%）

Tab. 2-1 The mass fraction of chemical composition of 316Lstainless steel wire (%)								
牌号	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	N
316L	0.01	1.7	0.4	12.0	18.2	2.6	0.10	0.04

2.1.2 增材制造系统

增材制造系统主要由机械臂、焊接电源、送丝机、增材控制软件以及焊接工作台等部分组成。本批 WAAM 316L 不锈钢板的加工制造采用的是南京英尼格玛公司的 Arcman 600 增材制造系统，如图 2-1 所示，在设备外部笼罩着一个保护仓，主要是为了防止在焊接过程中弧光射伤人眼，并且减少外界环境对保护气体

气流的干扰，为电弧增材制造营造一个更好的焊接环境。图 2-2 为打开仓门后的内部设备图。

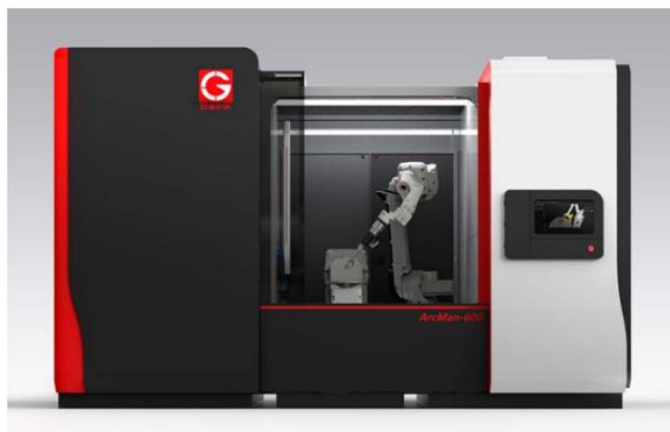


图 2-1 南京英尼格玛 Arcman 600

Fig. 2-1 Nanjing ENIGMA Arcman 600



图 2-2 内部设备图

Fig. 2-2 Diagram of internal equipment

(1) 增材制造机器人

本试验采用的机器人是 ABB IRB2400 系列，如图 2-3 所示。IRB2400 机器人具有一系列不同配置，能够贴合各类生产需求，尽可能提高弧焊、加工、上下料等应用的生产效率，是一款专用的高性能机器人，适用于精度要求非常苛刻的加工应用工艺。该系列的所有型号机器人均可采用倒置安装，并且采用紧凑型设计，易于安装。机器人坚固耐用，零部件数量已减至最少，可靠性高、维护间隔时间长。



图 2-3 ABB IRB 2400L 机械臂

Fig. 2-3 ABB IRB 2400L mechanical arm



图 2-4 CMT 4000 Advance 焊机

Fig. 2-4 CMT 4000 Advance welding machine

(2) 焊接电源

本试验所采用的是奥地利福尼斯公司的 CMT 4000 Advanced 数字化焊机, 如图 2-4 所示, 能够提供 CMT、CMT+Pulse、CMT+Advance、CMT+Pulse+Advance 四种焊接方法, 可以根据材料自身的特点来选取合适的焊接模式, 使整个电弧增材制造成形系统的材料应用范围更广泛。冷金属过渡技术 (CMT) 是由福尼斯公司开发的一种新型焊接技术, 具有高熔敷率、低热输入、弧长控制精确和飞溅小等特点, 与传统的 MIG/MAG 焊接技术相比, 更加适用于增材制造。其工作原理是在焊接过程中, 当熔滴与基板发生短路时, 焊机立即将短路信号发送给送丝机, 送丝机接收信号后停止送丝并回抽焊丝, 熔滴在回抽力的作用下过渡到熔池中, 熔滴在过渡时短路电流几乎为零, 并且短路时间很短, 因此热输入很小, 熔滴在过渡时飞溅很小。采用 CMT 技术进行加工时, 可实现“一元化控制”, 即焊接电流、焊接电压与送丝速度具有一定的相关性, 在焊机内设置好焊丝类别、焊丝直径、保护气体等参数后, 仅通过调控送丝速度便可以相应地调整焊接电流和焊接电压。

(3) 增材控制软件

Arcman 600 设备中所集成的增材控制软件是 lungoPNT 3.0 软件, 适用于电弧增材制造系统, 具有分层切片、路径规划、工艺管理、项目任务管理等基本功能, 同时还具有变位机协同、激光清洗、3D 相机等高级功能, 图 2-5 为软件界面图。此软件的操作主要包括三个流程: 硬件配置流程、项目操作流程和异常处理流程。硬件配置流程包括相关硬件设备的检查和参数配置等操作; 项目操作流程包括整个增材项目的过程, 直到实现模型的增材成型; 异常处理流程包括在增材任务中发生异常中断应执行的操作。其中项目操作流程具体包括: 1) 将模型导入软件中, 同时配置打印工艺库; 2) 在布局中设置工件坐标; 3) 在工作台上设置工件坐标; 4) 调整工件到合适的打印位置; 5) 新增项目, 选择对应工作组,

打开布局图；6) 创建任务和任务参数配置；7) 任务仿真，在布局图中生成填充路径，通过仿真检查填充路径是否有效；8) 任务启动前，先暂时关闭弧焊功能，检查机器人运行是否正常；9) 开启弧焊功能，启动增材任务。

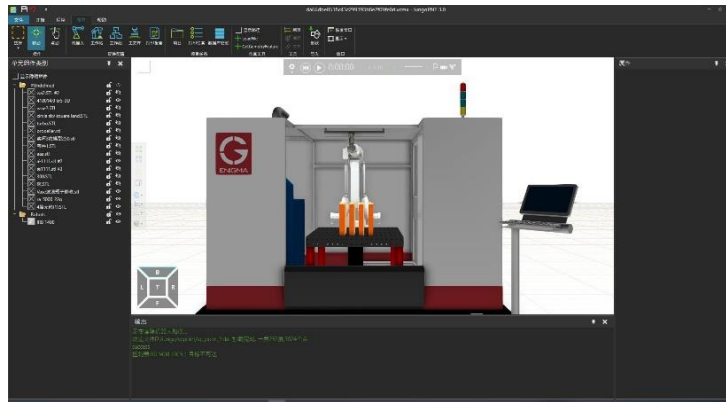


图 2-5 lungoPNT 3.0 软件界面

Fig. 2-5 lungoPNT 3.0 software interface

2.1.3 冷金属过渡增材制造工艺参数

由于冷金属过渡技术可采用“一元化控制”，即通过调整送丝速度便可调整相应的焊接电流和焊接电压，因此，本试验方案主要考虑送丝速度和焊接速度（即机械臂移动速度）两个关键因素。并且考虑到焊缝层间温度的影响，参考相关文献^[76]，当层间温度为 50℃ 和 150℃ 时，堆覆层之间的边界清晰、平滑，成形性好，堆覆效果最好，因此本试验中将层间温度控制在 150℃，每一道焊缝打印完成后，等待层间温度降低到 150℃ 以下时，再打印下一道焊缝。共设计了 12 组工艺参数组合，考虑四种送丝速度和三种焊接速度，如表 2-2 所示，表格中对 12 块不同工艺参数组合所打印的 WAAM 钢板进行编号，其中第一位数字表示焊接速度，分别表示焊接速度为 8mm/s、10mm/s 和 12mm/s，第二位数字表示送丝速度，分别表示送丝速度为 3m/min、4m/min、5m/min 和 6m/min。

采用表 2-2 中的 12 组工艺参数打印 WAAM 316L 不锈钢板件，为了节约打印时间和打印成本，把焊接速度相同的四块钢板设为一组，同时进行加工，如图 2-6 所示，并且利用夹具将基板固定在焊接工作台上，目的是为了保证焊接过程中电弧的精准对位，并且防止基板因焊接热输入而发生变形。并且，本次加工沉积方式采用“一”字形单向往复单道多层沉积方式，如图 2-7 所示。WAAM 成形不锈钢板尺寸长 350mm，高 300mm，焊缝宽度与焊接工艺参数有关，共加工 12 块 WAAM 钢板，如图 2-8 所示。

表 2-2 电弧增材制造工艺参数

Tab. 2-2 Wire and arc additive manufacturing process parameters

编号	焊接电流 I/A	焊接电压 U/V	送丝速度 $V_1/(m \cdot \min^{-1})$	焊接速度 $V_2/(mm \cdot s^{-1})$
8-3	66	17.1	3	8
8-4	86	18.0	4	
8-5	105	18.7	5	
8-6	124	19.2	6	
10-3	66	17.1	3	10
10-4	86	18.0	4	
10-5	105	18.7	5	
10-6	124	19.2	6	
12-3	66	17.1	3	12
12-4	86	18.0	4	
12-5	105	18.7	5	
12-6	124	19.2	6	



a) 四块板同时加工



b) 加工完成

图 2-6 WAAM 316L 不锈钢板加工过程

Fig. 2-6 WAAM 316L stainless steel plate processing

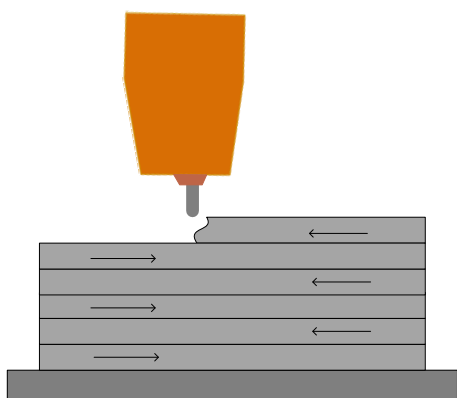


图 2-7 往复沉积示意图

Fig. 2-7 Diagram of reciprocating deposition



图 2-8 WAAM 316L 不锈钢板

Fig. 2-8 WAAM 316L stainless steel plate

2.2 材性试验

从加工的 12 块 WAAM 316L 不锈钢板上切取材性试样，分为粗糙试样和光滑试样两类，共计 216 个材性试样，进行单轴拉伸试验。并且由于粗糙试样横截面积难以测定，采用排水法和游标卡尺测量的方法测其横截面积，并进行对比。

2.2.1 材性试件取样

对于 12 种不同焊接工艺参数所加工的 12 块 WAAM 316L 不锈钢板件，在每块钢板上沿着与焊缝方向（沉积方向）成 0° 、 45° 和 90° 三个方向，采用线切割的方式切取材性试样，如图 2-9 所示，线切割是通过浸在工作液中的两个电极之间脉冲放电产生电蚀作用进行高精度切割的方法，属于冷切割，没有附加的热量输入。并且，将试样分为粗糙试样和光滑试样两类，其中光滑试样是将直接切取下来的粗糙试样的表面在磨床上磨平制成，如图 2-10 所示。材性试样如图 2-11 所示。

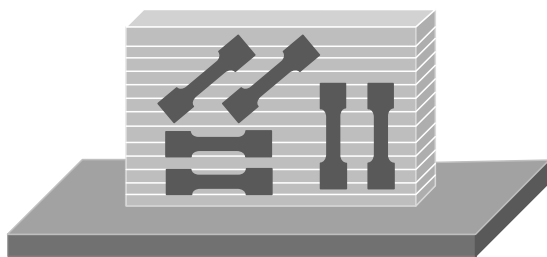


图 2-9 材性试样取样

Fig. 2-9 Cut specimens for material tests



图 2-10 粗糙试样打磨

Fig. 2-10 Rough specimen grinding



a) 三个角度所切取的材性试样



b) 粗糙试样与光滑试样

图 2-11 材性试样

Fig. 2-11 Material specimens

表 2-3 为每块 WAAM 316L 不锈钢板上切取的材性试样数量，从每块 WAAM 钢板上分别切取 9 个粗糙试样和 9 个光滑试样，包括 0° 方向粗糙和光滑试样各 3

个、45°方向粗糙和光滑试样各 3 个、90°方向粗糙和光滑试样各 3 个，共计 18 个材性试样。

表 2-3 每块 WAAM 316L 不锈钢板切取材性试样数量（个）

Tab. 2-3 Number of material specimens for each WAAM 316L stainless steel

切取试样方向	粗糙试样	光滑试样	共计
0°	3	3	6
45°	3	3	6
90°	3	3	6
共计	9	9	18

2.2.2 材性试样尺寸

根据国家规范《金属材料 拉伸试验 第 1 部分：室温实验方法》（GB/T 228.1-2010）的要求^[77]，设计材性试样尺寸。所有光滑和粗糙材性试样尺寸均采用平行段宽度为 10mm、长度为 60mm，总长 124mm 的比例试样，试验前按照 $L_0=5.65\sqrt{S_0}$ 的长度标记原始标距的位置，以便后续搭接引伸计，材性试样尺寸如图 2-12 所示。

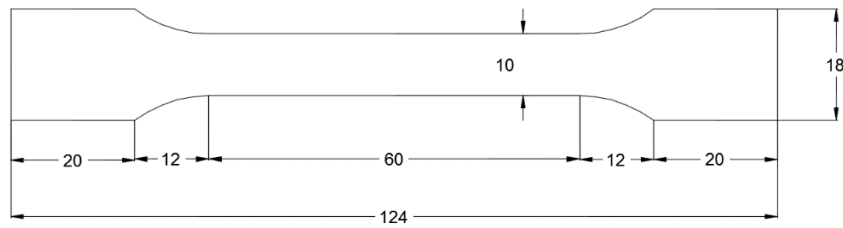


图 2-12 材性试样尺寸图（mm）

Fig. 2-12 Dimension diagram of material specimen (mm)

2.2.3 试验加载装置

单轴拉伸试验在北京工业大学工程力学试验室进行，采用的试验机为德国进口 Zwick/Roell Z100 型拉伸试验机，最大吨位为 10t，并配有可自动调节量程的平均引伸计，精度等级为 1 级，引伸计按照 $L_0=5.65\sqrt{S_0}$ 的原始标距进行夹持，试验装置如图 2-13 所示。在试验开始之前，在试验系统中输入标距段内横截面的宽度和厚度，修改好引伸计的夹持长度，以便后续计算机直接将荷载-位移关系计算转化为应力-应变关系。



图 2-13 单轴拉伸试验装置

Fig. 2-13 Uniaxial tensile test machine

试验按照《金属材料 拉伸试验 第 1 部分：室温试验方法》(GB/T 228.1-2010)的相关规定^[77]进行加载，加载过程中，由计算机自动采集仪记录试验全过程应力-应变曲线，应力是根据轴向荷载与试样标距段内横截面积的比值计算得出，应变是根据标距段的变形量与原始标距的比值计算得出。并对试验数据进行处理得到试件弹性模量 E 、名义屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 、抗拉强度 σ_u 、断后伸长率 ε_f 等力学性能指标。其中弹性模量 E 根据应力-应变曲线中弹性段的斜率计算得出；屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 为残余应变为 0.2% 时对应的应力值；抗拉强度 σ_u 为应力-应变曲线中的应力最大值；断后伸长率 ε_f 是试样断裂时，标距段内伸长量与原始标距的百分比。共对 216 个材性试样进行单轴拉伸试验和数据处理。

2.2.4 粗糙材性试样横截面积的测定

对于光滑材性试样，其横截面尺寸可直接采用电子游标卡尺测得，但对于粗糙材性试样，由于其表面凹凸不平，难以采用电子游标卡尺直接测得其横截面积。目前相关文献中^[54]采用三种方法来测量粗糙材性试样横截面积，分别是采用游标卡尺测量、排水法（阿基米德原理）和 3D 激光扫描三种方法。采用游标卡尺测量的方法是在材性试样标距段内多个不同位置分别测量试样厚度，取平均值作为有效厚度。排水法是根据阿基米德原理，通过重力与浮力的差值反算试样体积，从而根据体积除以试样底面积计算得到有效厚度。3D 激光扫描是根据试样扫描后得到的点云文件，经过一系列数据处理得到多个标距段横截面的坐标信息，计算每个横截面的面积，取平均值作为有效横截面积。考虑到游标卡尺测量的方法误差较大，3D 激光扫描的方法成本过高，过于繁琐，因此本文采用静水力学天平，依据阿基米德原理进行试样横截面积的测定，如图 2-14 所示，并采用游标卡尺进行测量，对比两种测量方法的测量误差。



图 2-14 静水力学天平

Fig. 2-14 Hydrostatic balance

依据阿基米德原理,采用静水力学天平测量粗糙材性试样有效横截面积的具体操作如下:

- (1) 首先将试样放置电子秤上面的托盘上,记录其在空气中的质量 $m_{\text{空}}$;
- (2) 将静水力学天平下方水桶中盛满水,将试样放置在下方吊篮中并浸没于水中,待读数稳定后,记录其在水中的质量为 $m_{\text{水}}$;
- (3) 基于阿基米德原理,推导出公式 $V = (m_{\text{空}} - m_{\text{水}}) / \rho_{\text{水}}$,根据公式计算试样体积;
- (4) 计算试样底面积,并利用公式 $t_{\text{eff}} = V / A_{\text{底}}$,计算试样有效厚度。

表 2-4、2-5、2-6 和 2-7 分别列举了 10-3、10-4、10-5 和 10-6 四块 WAAM 316L 不锈钢板所取粗糙试样通过排水法测定有效厚度 t_{eff} 的结果,其中表格中每个试样的编号含义为第一位数字表示焊接速度,第二位数字表示送丝速度,AB 代表 As-Built,即 WAAM 成形板件具有的粗糙表面特征,0°、90°和 45°代表试样切取方向与焊缝方向(沉积方向)的夹角,最后一位数字代表平行试样的编号。

表 2-4 10-3 粗糙试样排水法测定结果

Tab. 2-4 Results of 10-3 rough specimen determined by drainage method

试样编号	$m_{\text{空}}/\text{g}$	$m_{\text{水}}/\text{g}$	V/mm^3	t_{eff}/mm
10-3-AB-0°-1	51.2	44.3	6900	4.26
10-3-AB-0°-2	51	44.5	6500	4.01
10-3-AB-0°-3	50.3	43.7	6600	4.07
10-3-AB-90°-1	53.3	46.6	6700	4.13
10-3-AB-90°-2	53.1	46.3	6800	4.19
10-3-AB-90°-3	52.9	46.2	6700	4.13
10-3-AB-45°-1	52.5	45.6	6900	4.26
10-3-AB-45°-2	52.5	45.7	6800	4.19
10-3-AB-45°-3	52.3	45.4	6900	4.26

表 2-5 10-4 粗糙试样排水法测定结果

Tab. 2-5 Results of 10-4 rough specimen determined by drainage method

试样编号	$m_{\text{空}}/\text{g}$	$m_{\text{水}}/\text{g}$	V/mm^3	t_{eff}/mm
10-4-AB-0° -1	63.7	55.6	8100	5.00
10-4-AB-0° -2	64.8	56.4	8400	5.18
10-4-AB-0° -3	62.9	54.8	8100	5.00
10-4-AB-90° -1	64.1	55.9	8200	5.06
10-4-AB-90° -2	63.5	55.3	8200	5.06
10-4-AB-90° -3	64.0	55.7	8300	5.12
10-4-AB-45° -1	64.8	56.4	8400	5.18
10-4-AB-45° -2	64.5	56.2	8300	5.12
10-4-AB-45° -3	64.4	56.2	8200	5.06

表 2-6 10-5 粗糙试样排水法测定结果

Tab. 2-6 Results of 10-5 rough specimen determined by drainage method

试样编号	$m_{\text{空}}/\text{g}$	$m_{\text{水}}/\text{g}$	V/mm^3	t_{eff}/mm
10-5-AB-0° -1	80.5	70.1	10400	6.42
10-5-AB-0° -2	77.6	67.5	10100	6.23
10-5-AB-0° -3	76.9	67	9900	6.11
10-5-AB-90° -1	79.1	68.9	10200	6.29
10-5-AB-90° -2	78.6	68.4	10200	6.29
10-5-AB-90° -3	77.1	67.1	10000	6.17
10-5-AB-45° -1	77.1	67.3	9800	6.04
10-5-AB-45° -2	76.9	67.1	9800	6.04
10-5-AB-45° -3	75.6	65.9	9700	5.98

表 2-7 10-6 粗糙试样排水法测定结果

Tab. 2-7 Results of 10-6 rough specimen determined by drainage method

试样编号	$m_{\text{空}}/\text{g}$	$m_{\text{水}}/\text{g}$	V/mm^3	t_{eff}/mm
10-6-AB-0° -1	69.1	59.8	9300	5.74
10-6-AB-0° -2	68.1	59.4	8700	5.37
10-6-AB-0° -3	68.1	59.2	8900	5.49
10-6-AB-90° -1	68.6	59.6	9000	5.55
10-6-AB-90° -2	69.4	60.2	9200	5.67
10-6-AB-90° -3	69.2	60.3	8900	5.49
10-6-AB-45° -1	68.8	59.8	9000	5.55
10-6-AB-45° -2	68.9	59.8	9100	5.61
10-6-AB-45° -3	68.8	59.8	9000	5.55

并且采用电子游标卡尺测量粗糙试件试样标距段的厚度,大致在试样标距段内前、中、后三个位置分别测量厚度,记为 t_1 、 t_2 和 t_3 ,取平均值作为试样厚度 t_{mean} ,并与排水法测得的有效厚度 t_{eff} 进行比较。表 2-8、2-9、2-10 和 2-11 分别为 10-3、10-4、10-5 和 10-6 四组试样采用电子游标卡尺的测量结果,并通过比较两种测量方法的测量结果发现,与排水法测量结果相比,采用游标卡尺测量粗糙试件的厚度会略高 3%,这是因为粗糙试件的表面是凹凸起伏、不平整的,采用游标卡尺进行测量只能测到凸起部分的厚度,因此测量结果偏大,同时也可以说明板件本身表面的凹凸起伏程度不大。

表 2-8 10-3 粗糙试样游标卡尺测量结果

Tab. 2-8 Results of 10-3 rough specimen determined by vernier caliper

试样编号	t_1/mm	t_2/mm	t_3/mm	$t_{\text{mean}}/\text{mm}$	$t_{\text{mean}}/t_{\text{eff}}$
10-3-AB-0°-1	4.33	4.21	4.32	4.29	1.007
10-3-AB-0°-2	4.13	4.25	4.19	4.19	1.045
10-3-AB-0°-3	4.04	4.12	4.11	4.09	1.005
10-3-AB-90°-1	4.38	4.32	4.38	4.36	1.055
10-3-AB-90°-2	4.40	4.16	4.33	4.30	1.026
10-3-AB-90°-3	4.39	4.23	4.37	4.33	1.048
10-3-AB-45°-1	4.57	4.46	4.30	4.44	1.042
10-3-AB-45°-2	4.59	4.42	4.39	4.47	1.067
10-3-AB-45°-3	4.32	4.27	4.33	4.31	1.012

表 2-9 10-4 粗糙试样游标卡尺测量结果

Tab. 2-9 Results of 10-4 rough specimen determined by vernier caliper

试样编号	t_1/mm	t_2/mm	t_3/mm	$t_{\text{mean}}/\text{mm}$	$t_{\text{mean}}/t_{\text{eff}}$
10-4-AB-0°-1	5.24	5.14	5.30	5.23	1.046
10-4-AB-0°-2	5.40	5.35	5.29	5.35	1.033
10-4-AB-0°-3	5.16	5.19	5.21	5.19	1.038
10-4-AB-90°-1	5.08	5.25	5.23	5.19	1.026
10-4-AB-90°-2	5.35	5.20	5.47	5.34	1.056
10-4-AB-90°-3	5.30	5.21	5.34	5.28	1.031
10-4-AB-45°-1	5.40	5.26	5.16	5.27	1.017
10-4-AB-45°-2	5.33	5.37	5.38	5.36	1.047
10-4-AB-45°-3	5.27	5.36	5.33	5.32	1.051

表 2-10 10-5 粗糙试样游标卡尺测量结果

Tab. 2-10 Results of 10-5 rough specimen determined by vernier caliper

试样编号	t_1/mm	t_2/mm	t_3/mm	$t_{\text{mean}}/\text{mm}$	$t_{\text{mean}}/t_{\text{eff}}$
10-5-AB-0° -1	6.70	6.67	6.77	6.71	1.045
10-5-AB-0° -2	6.47	6.53	6.43	6.48	1.040
10-5-AB-0° -3	6.27	6.49	6.48	6.41	1.049
10-5-AB-90° -1	6.36	6.44	6.20	6.33	1.006
10-5-AB-90° -2	6.32	6.56	6.32	6.40	1.017
10-5-AB-90° -3	6.41	6.59	6.10	6.37	1.032
10-5-AB-45° -1	6.35	6.31	6.45	6.37	1.055
10-5-AB-45° -2	6.26	6.37	6.31	6.31	1.045
10-5-AB-45° -3	6.31	6.28	6.36	6.32	1.057

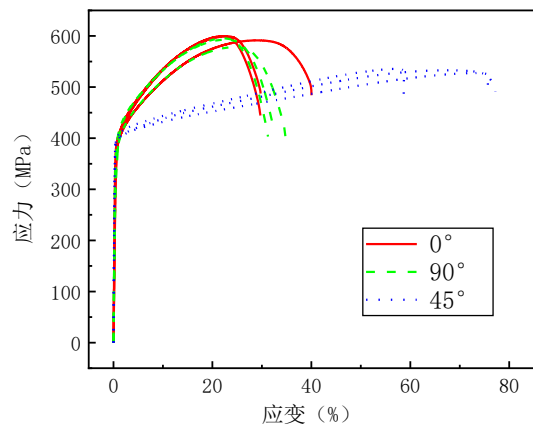
表 2-11 10-6 粗糙试样游标卡尺测量结果

Tab. 2-11 Results of 10-6 rough specimen determined by vernier caliper

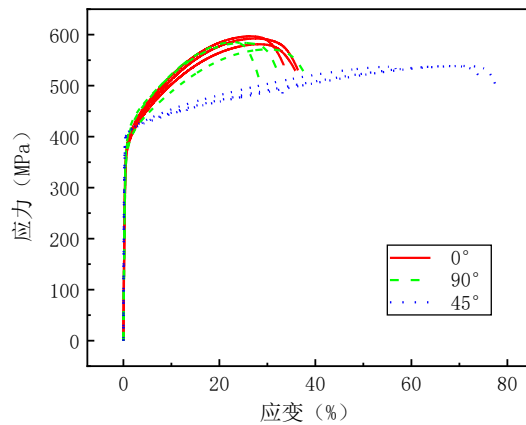
试样编号	t_1/mm	t_2/mm	t_3/mm	$t_{\text{mean}}/\text{mm}$	$t_{\text{mean}}/t_{\text{eff}}$
10-6-AB-0° -1	5.72	5.80	5.75	5.76	1.003
10-6-AB-0° -2	5.51	5.66	5.54	5.57	1.037
10-6-AB-0° -3	5.59	5.63	5.45	5.56	1.013
10-6-AB-90° -1	5.53	5.52	5.61	5.55	1.000
10-6-AB-90° -2	5.76	5.70	5.62	5.66	1.004
10-6-AB-90° -3	5.69	5.70	5.70	5.70	1.038
10-6-AB-45° -1	5.66	5.68	5.67	5.67	1.022
10-6-AB-45° -2	5.64	5.62	5.63	5.63	1.004
10-6-AB-45° -3	5.57	5.66	5.61	5.61	1.011

2.3 WAAM 不锈钢材料的各向异性

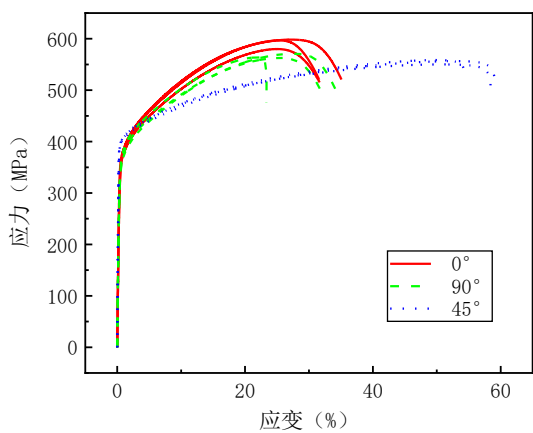
对于 12 块采用不同焊接工艺参数组合打印的 WAAM 316L 不锈钢板，沿着与焊缝沉积方向成 0°、45°和 90°三个方向切割材性试样，进行单轴拉伸试验，所有光滑材性试样的应力-应变曲线如图 2-15 所示。从图中可以看出每种工艺参数下打印的 WAAM 不锈钢板均表现出明显的各向异性。除 10-3 和 12-3 两组工艺参数外，其他 10 组工艺参数打印的钢板均表现为与焊缝平行方向的试样强度最高，垂直于焊缝方向的试样次之，与焊缝成 45°方向的试样强度最低；并且可以明显看出与焊缝成 45°方向的试样伸长率远远高于其他两个方向。



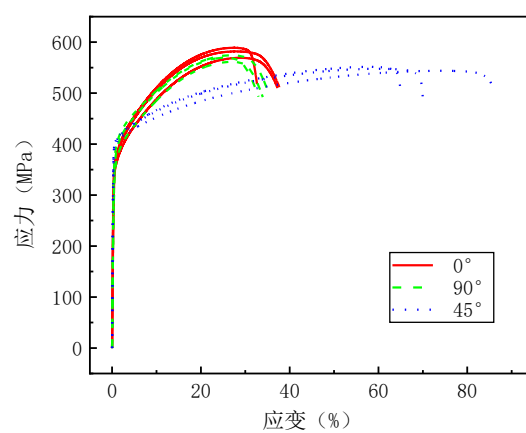
a) 8-3



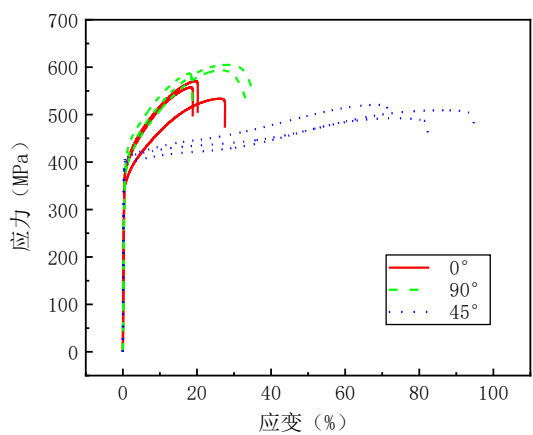
b) 8-4



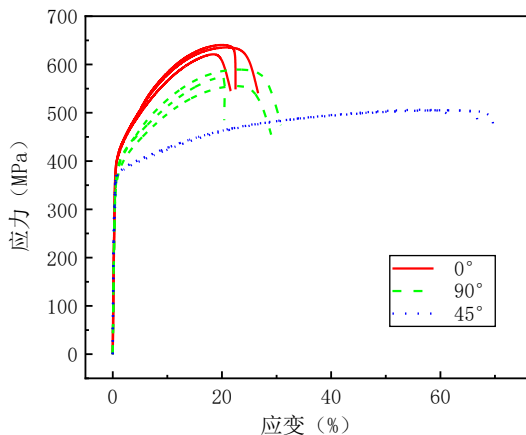
c) 8-5



d) 8-6



e) 10-3



f) 10-4

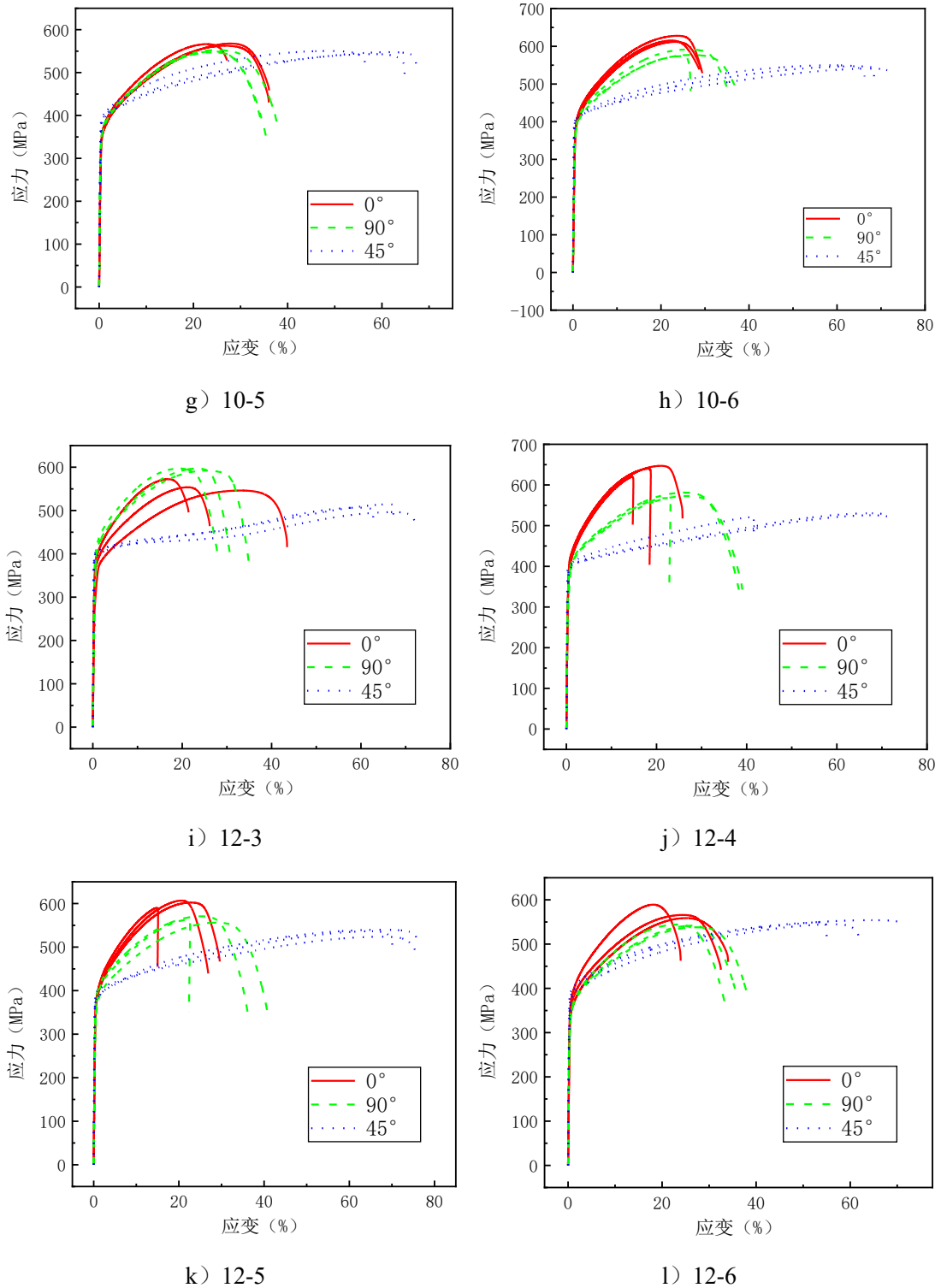


图 2-15 光滑材性试样应力-应变曲线

Fig. 2-15 Stress-strain curves of smooth material specimen

汇总 12 组工艺参数打印的 108 个光滑材性试样的单轴拉伸试验结果于表 2-12 至表 2-23, 其中试样编号中 M 代表 **Machined**, 即粗糙试样经磨床机加工后得到的光滑试样, 并且给出弹性模量 E_0 、屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 、抗拉强度 σ_u 和断后伸长率 ε_f 四个材性指标。

表 2-12 8-3 光滑材性试样单轴拉伸试验结果

Tab. 2-12 Results of uniaxial tensile test for 8-3 smooth material specimens

试样编号	弹性模量 E_0 /GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	抗拉强度 σ_u /MPa	断后伸长率 ε_t /%
8-3-M-0°-1	83.94	359.51	599.62	21.46
8-3-M-0°-2	108.28	383.95	599.41	22.36
8-3-M-0°-3	74.25	378.16	591.40	28.47
8-3-M-90°-1	76.70	342.32	595.75	21.49
8-3-M-90°-2	110.89	373.54	593.01	22.18
8-3-M-90°-3	104.40	355.70	578.46	24.28
8-3-M-45°-1	153.84	387.02	527.51	72.82
8-3-M-45°-2	157.92	397.17	535.67	56.94
8-3-M-45°-3	162.92	389.96	532.91	67.33

表 2-13 8-4 光滑材性试样单轴拉伸试验结果

Tab. 2-13 Results of uniaxial tensile test for 8-4 smooth material specimens

试样编号	弹性模量 E_0 /GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	抗拉强度 σ_u /MPa	断后伸长率 ε_t /%
8-4-M-0°-1	114.01	341.72	592.48	27.02
8-4-M-0°-2	101.85	352.25	581.29	23.29
8-4-M-0°-3	100.07	367.35	596.87	25.93
8-4-M-90°-1	96.81	348.44	571.39	29.50
8-4-M-90°-2	103.81	363.42	585.77	22.10
8-4-M-90°-3	95.45	377.21	583.90	24.27
8-4-M-45°-1	192.60	394.70	538.65	70.32
8-4-M-45°-2	228.09	385.94	537.24	54.84
8-4-M-45°-3	243.75	395.10	538.45	67.66

表 2-14 8-5 光滑材性试样单轴拉伸试验结果

Tab. 2-14 Results of uniaxial tensile test for 8-5 smooth material specimens

试样编号	弹性模量 E_0 /GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	抗拉强度 σ_u /MPa	断后伸长率 ε_t /%
8-5-M-0°-1	105.48	346.96	580.02	24.56
8-5-M-0°-2	105.69	343.96	596.87	24.73
8-5-M-0°-3	108.75	360.01	598.34	26.39
8-5-M-90°-1	112.53	346.37	563.95	26.30
8-5-M-90°-2	111.80	336.75	562.76	25.94
8-5-M-90°-3	111.90	342.64	570.91	27.05
8-5-M-45°-1	204.68	388.33	558.56	49.53
8-5-M-45°-2	210.61	391.39	556.59	52.36
8-5-M-45°-3	170.44	395.39	550.21	50.22

表 2-15 8-6 光滑材性试样单轴拉伸试验结果

Tab. 2-15 Results of uniaxial tensile test for 8-6 smooth material specimens

试样编号	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_t/\%$
8-6-M-0°-1	123.10	343.50	569.25	28.43
8-6-M-0°-2	127.80	351.95	581.86	27.62
8-6-M-0°-3	100.70	343.85	588.96	26.86
8-6-M-90°-1	106.33	342.66	569.70	24.93
8-6-M-90°-2	96.50	326.03	561.57	26.78
8-6-M-90°-3	120.12	353.65	574.39	26.60
8-6-M-45°-1	156.54	389.32	543.85	72.95
8-6-M-45°-2	168.25	393.54	551.59	57.21
8-6-M-45°-3	167.62	394.01	547.81	59.96

表 2-16 10-3 光滑材性试样单轴拉伸试验结果

Tab. 2-16 Results of uniaxial tensile test for 10-3 smooth material specimens

试样编号	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_t/\%$
10-3-M-0°-1	105.35	373.29	570.70	20.06
10-3-M-0°-2	104.44	366.92	581.46	18.08
10-3-M-0°-3	114.5	357.33	597.76	19.17
10-3-M-90°-1	94.68	382.95	587.54	22.56
10-3-M-90°-2	83.35	380.26	583.20	22.24
10-3-M-90°-3	113.61	354.30	593.94	26.06
10-3-M-45°-1	112.98	394.95	502.53	72.68
10-3-M-45°-2	194.12	400.70	514.23	86.16
10-3-M-45°-3	228.55	388.08	520.70	68.20

表 2-17 10-4 光滑材性试样单轴拉伸试验结果

Tab. 2-17 Results of uniaxial tensile test for 10-4 smooth material specimens

试样编号	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_t/\%$
10-4-M-0°-1	100.26	391.51	624.12	20.75
10-4-M-0°-2	105.02	388.12	640.42	23.43
10-4-M-0°-3	107.73	384.63	635.33	22.07
10-4-M-90°-1	101.93	344.01	573.59	21.50
10-4-M-90°-2	106.36	333.69	555.47	21.86
10-4-M-90°-3	115.29	344.76	589.46	22.59
10-4-M-45°-1	228.45	368.39	505.16	60.22
10-4-M-45°-2	173.84	370.92	506.33	56.07
10-4-M-45°-3	178.25	371.35	505.25	60.59

表 2-18 10-5 光滑材性试样单轴拉伸试验结果

Tab. 2-18 Results of uniaxial tensile test for 10-5 smooth material specimens

试样编号	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_t/\%$
10-5-M-0°-1	117.29	340.69	562.78	26.26
10-5-M-0°-2	112.43	348.26	566.49	22.11
10-5-M-0°-3	90.24	348.83	567.80	27.27
10-5-M-90°-1	140.20	341.27	547.17	31.07
10-5-M-90°-2	144.81	329.52	549.61	30.82
10-5-M-90°-3	137.16	347.63	552.40	31.38
10-5-M-45°-1	175.10	343.86	547.77	61.23
10-5-M-45°-2	137.92	382.29	543.20	58.04
10-5-M-45°-3	188.45	389.28	550.47	47.89

表 2-19 10-6 光滑材性试样单轴拉伸试验结果

Tab. 2-19 Results of uniaxial tensile test for 10-6 smooth material specimens

试样编号	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_t/\%$
10-6-M-0°-1	101.82	374.12	611.71	22.68
10-6-M-0°-2	90.96	379.95	615.30	21.49
10-6-M-0°-3	87.95	384.49	627.91	22.8
10-6-M-90°-1	94.77	362.62	591.70	25.58
10-6-M-90°-2	100.86	374.03	577.16	26.33
10-6-M-90°-3	97.92	365.89	573.89	23.75
10-6-M-45°-1	185.88	397.08	547.08	64.20
10-6-M-45°-2	217.03	401.68	549.87	59.17
10-6-M-45°-3	172.18	397.74	540.97	67.41

表 2-20 12-3 光滑材性试样单轴拉伸试验结果

Tab. 2-20 Results of uniaxial tensile test for 12-3 smooth material specimens

试样编号	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_t/\%$
12-3-M-0°-1	82.82	336.32	546.23	32.33
12-3-M-0°-2	113.00	359.78	553.84	20.56
12-3-M-0°-3	137.95	364.63	572.50	20.36
12-3-M-90°-1	87.18	383.39	597.39	22.70
12-3-M-90°-2	98.10	349.83	592.33	24.76
12-3-M-90°-3	110.73	397.22	597.29	18.87
12-3-M-45°-1	184.00	388.20	514.75	65.90
12-3-M-45°-2	178.19	396.77	506.76	59.19
12-3-M-45°-3	176.58	400.76	496.43	66.54

表 2-21 12-4 光滑材性试样单轴拉伸试验结果

Tab. 2-21 Results of uniaxial tensile test for 12-4 smooth material specimens

试样编号	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_f/\%$
12-4-M-0°-1	101.54	384.89	619.90	21.98
12-4-M-0°-2	103.45	382.54	647.02	20.38
12-4-M-0°-3	105.64	395.81	640.14	22.44
12-4-M-90°-1	122.43	369.42	568.15	21.56
12-4-M-90°-2	100.37	379.71	581.40	25.46
12-4-M-90°-3	91.44	332.13	572.73	26.17
12-4-M-45°-1	127.16	381.21	525.57	67.30
12-4-M-45°-2	123.45	392.15	530.50	66.63
12-4-M-45°-3	205.79	398.66	520.75	61.59

表 2-22 12-5 光滑材性试样单轴拉伸试验结果

Tab. 2-22 Results of uniaxial tensile test for 12-5 smooth material specimens

试样编号	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_f/\%$
12-5-M-0°-1	100.38	374.11	590.12	22.22
12-5-M-0°-2	96.37	367.93	602.39	22.20
12-5-M-0°-3	110.19	371.00	606.89	20.16
12-5-M-90°-1	108.24	340.26	556.29	28.40
12-5-M-90°-2	107.93	377.30	570.79	24.72
12-5-M-90°-3	94.52	353.88	562.66	21.23
12-5-M-45°-1	210.24	371.88	536.5	64.47
12-5-M-45°-2	144.85	391.34	523.87	67.31
12-5-M-45°-3	198.10	373.04	539.93	67.45

表 2-23 12-6 光滑材性试样单轴拉伸试验结果

Tab. 2-23 Results of uniaxial tensile test for 12-6 smooth material specimens

试样编号	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_f/\%$
12-6-M-0°-1	100.23	338.43	558.82	24.45
12-6-M-0°-2	105.44	357.03	565.93	23.84
12-6-M-0°-3	102.41	365.16	589.19	22.47
12-6-M-90°-1	139.79	324.44	541.86	25.76
12-6-M-90°-2	116.65	325.46	538.28	26.78
12-6-M-90°-3	142.92	308.80	544.39	22.72
12-6-M-45°-1	180.41	386.63	549.40	53.40
12-6-M-45°-2	170.83	373.87	554.11	63.84
12-6-M-45°-3	191.81	370.61	544.90	56.05

对每种工艺参数每个成形角度的三个平行试样的材性指标取平均值，汇总于表 2-24 至表 2-35。

表 2-24 8-3 光滑材性试样参数均值

Tab. 2-24 Mean parameters of 8-3 smooth material specimens

角度	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_t/\%$
8-3-M-0°	88.82	373.87	596.81	24.10
8-3-M-90°	97.33	357.19	589.07	22.65
8-3-M-45°	158.23	391.38	532.03	65.70

表 2-25 8-4 光滑材性试样参数均值

Tab. 2-25 Mean parameters of 8-4 smooth material specimens

角度	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_t/\%$
8-4-M-0°	105.31	353.77	590.21	25.41
8-4-M-90°	98.69	363.02	580.35	25.29
8-4-M-45°	221.48	391.91	538.11	64.27

表 2-26 8-5 光滑材性试样参数均值

Tab. 2-26 Mean parameters of 8-5 smooth material specimens

角度	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_t/\%$
8-5-M-0°	106.64	350.31	591.74	25.23
8-5-M-90°	112.08	341.92	565.87	26.43
8-5-M-45°	195.24	391.70	555.12	50.70

表 2-27 8-6 光滑材性试样参数均值

Tab. 2-27 Mean parameters of 8-6 smooth material specimens

角度	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_t/\%$
8-6-M-0°	117.20	346.43	580.02	27.64
8-6-M-90°	107.65	340.78	568.55	26.10
8-6-M-45°	164.14	392.29	547.75	63.37

表 2-28 10-3 光滑材性试样参数均值

Tab. 2-28 Mean parameters of 10-3 smooth material specimens

角度	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_t/\%$
10-3-M-0°	108.10	365.85	583.31	19.10
10-3-M-90°	97.21	372.50	588.23	23.62
10-3-M-45°	178.55	394.58	512.49	75.68

表 2-29 10-4 光滑材性试样参数均值

Tab. 2-29 Mean parameters of 10-4 smooth material specimens

角度	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_t/\%$
10-4-M-0°	104.34	388.09	633.29	22.08
10-4-M-90°	107.86	340.82	572.84	21.98
10-4-M-45°	193.51	370.22	505.58	58.96

表 2-30 10-5 光滑材性试样参数均值

Tab. 2-30 Mean parameters of 10-5 smooth material specimens

角度	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_t/\%$
10-5-M-0°	106.65	345.93	565.69	25.21
10-5-M-90°	140.72	339.47	549.73	31.09
10-5-M-45°	167.16	371.81	547.15	55.72

表 2-31 10-6 光滑材性试样参数均值

Tab. 2-31 Mean parameters of 10-6 smooth material specimens

角度	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_t/\%$
10-6-M-0°	93.58	379.52	618.31	22.42
10-6-M-90°	97.85	367.51	580.92	25.22
10-6-M-45°	191.70	398.83	545.97	63.59

表 2-32 12-3 光滑材性试样参数均值

Tab. 2-32 Mean parameters of 12-3 smooth material specimens

角度	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_t/\%$
12-3-M-0°	111.26	353.58	557.52	24.42
12-3-M-90°	98.67	376.81	595.67	22.11
12-3-M-45°	179.59	395.24	505.98	63.88

表 2-33 12-4 光滑材性试样参数均值

Tab. 2-33 Mean parameters of 12-4 smooth material specimens

角度	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_t/\%$
12-4-M-0°	103.53	387.75	635.69	21.98
12-4-M-90°	104.75	360.42	574.09	24.40
12-4-M-45°	152.13	390.67	525.61	65.17

表 2-34 12-5 光滑材性试样参数均值

Tab. 2-34 Mean parameters of 12-5 smooth material specimens

角度	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_t/\%$
12-5-M-0°	102.31	371.01	599.80	21.53
12-5-M-90°	103.56	357.15	563.25	24.78
12-5-M-45°	184.40	378.75	533.43	66.41

表 2-35 12-6 光滑材性试样参数均值

Tab. 2-35 Mean parameters of 12-6 smooth material specimens

角度	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_t/\%$
12-6-M-0°	102.69	353.54	571.31	23.59
12-6-M-90°	133.12	319.57	541.51	25.09
12-6-M-45°	181.02	377.04	549.47	57.76

通过汇总光滑材性试样试验结果可以发现,与焊缝方向成 0° 和 90° 方向的试样弹性模量 E_0 较为接近, 45° 方向的试样弹性模量 E_0 明显高于其他两个方向; 45° 方向试样的屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 高于其他两个方向; 0° 方向试样的抗拉强度最高, 90° 方向次之, 45° 方向强度最低, 10-3 和 12-3 两组试验结果除外, 分析原因: 这两组工艺参数在加工 WAAM 不锈钢板时, 由于板件弯曲变形较大, 加工中途焊枪按照预定坐标行进时, 无法对正位置, 因此停止打印, 又另外加工一小块 WAAM 钢板, 以满足试验取样需求, 与焊缝成 0° 方向的材性试样是从另外加工的小块 WAAM 钢板上进行取材, 与其他两个方向所取试样并非取自同一块 WAAM 钢板, 可能对试验结果造成影响。 0° 和 90° 方向试样的断后伸长率 ε_f 较为接近, 45° 方向的 ε_f 明显高于其他两个方向。

表 2-36 各成形角度屈服强度 (MPa)

Tab. 2-36 Yield strength at each forming angle (MPa)					
工艺参数	0°	90°	45°	$90^\circ/0^\circ$	$45^\circ/0^\circ$
8-3	373.87	357.19	391.38	0.9554	1.0468
8-4	353.77	363.02	391.91	1.0261	1.1078
8-5	350.31	341.92	391.70	0.9760	1.1182
8-6	346.43	340.78	392.29	0.9837	1.1324
10-3	365.85	372.50	394.58	1.0182	1.0785
10-4	388.09	340.82	370.22	0.8782	0.9540
10-5	345.93	339.47	371.81	0.9813	1.0748
10-6	379.52	367.51	398.83	0.9684	1.0509
12-3	353.58	376.81	395.24	1.0657	1.1178
12-4	387.75	360.42	390.67	0.9295	1.0075
12-5	371.01	357.15	378.75	0.9626	1.0209
12-6	353.54	319.57	377.04	0.9039	1.0665
平均值		--		0.9708	1.0647

表 2-36 对 12 组工艺参数光滑试样各成形角度的屈服强度进行汇总, 发现 90° 方向试样的屈服强度略低于 0° 方向, 相差 2.92%, 较为接近; 45° 方向试样的屈服强度高于 0° 方向, 相差 6.47%。表 2-37 对 12 组工艺参数光滑试样各成形角度抗拉强度进行汇总, 发现 0° 方向试样抗拉强度最高, 90° 方向次之, 相差 3.42%, 45° 方向抗拉强度最低, 与 0° 方向相差 10.01%。

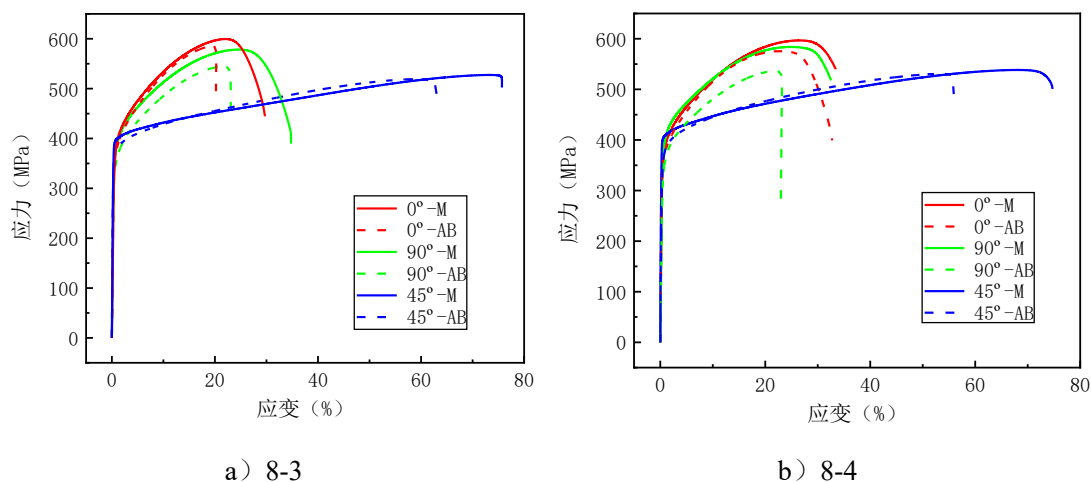
表 2-37 各成形角度抗拉强度 (MPa)

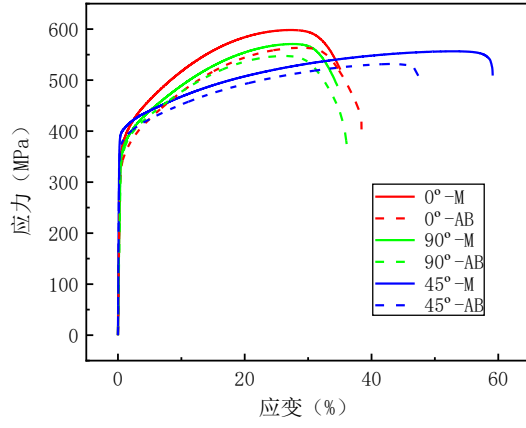
Tab. 2-37 Tensile strength at each forming angle (MPa)

工艺参数	0°	90°	45°	90°/0°	45°/0°
8-3	596.81	589.07	532.03	0.9870	0.8915
8-4	590.21	580.35	538.11	0.9833	0.9117
8-5	591.74	565.87	555.12	0.9563	0.9381
8-6	580.02	568.55	547.75	0.9802	0.9444
10-3	583.31	588.23	512.49	1.0084	0.8786
10-4	633.29	572.84	505.58	0.9045	0.7983
10-5	565.69	549.73	547.15	0.9718	0.9672
10-6	618.31	580.92	545.97	0.9395	0.8830
12-3	557.52	595.67	505.98	1.0684	0.9076
12-4	635.69	574.09	525.61	0.9031	0.8268
12-5	599.80	563.25	533.43	0.9391	0.8893
12-6	571.31	541.51	549.47	0.9478	0.9618
平均值		--		0.9658	0.8999

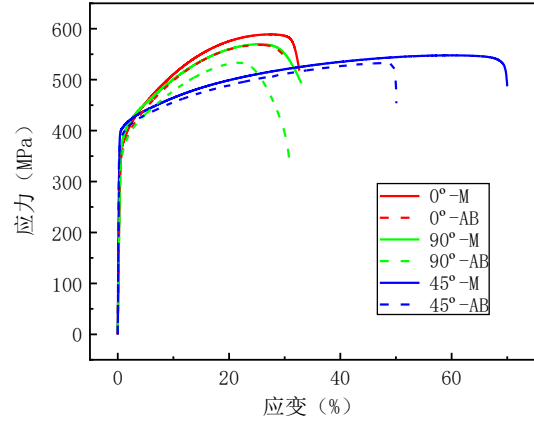
2.4 光滑材性试样与粗糙材性试样对比

本文采用 12 组工艺参数加工 WAAM 316L 不锈钢板, 切取材性试样, 将试样分为两类: 粗糙材性试样和光滑材性试样, 通过单调拉伸试验获得应力-应变曲线, 以探讨 WAAM 技术直接加工成形的粗糙表面对材性造成的影响。12 组工艺参数下粗糙和光滑材性试样应力-应变曲线如图 2-16 所示。

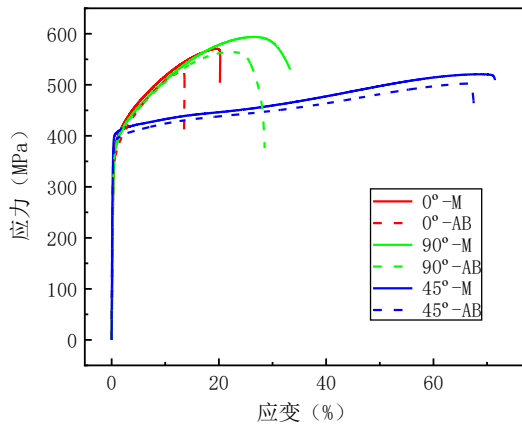




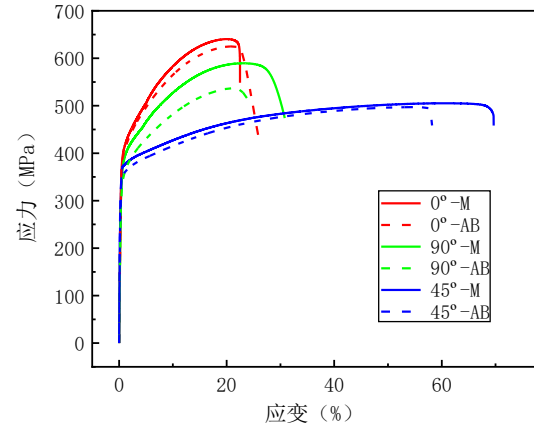
c) 8-5



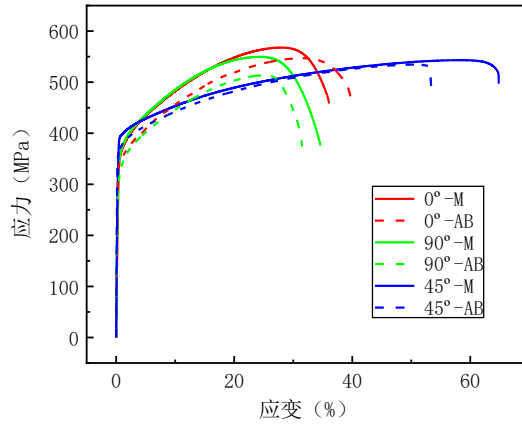
d) 8-6



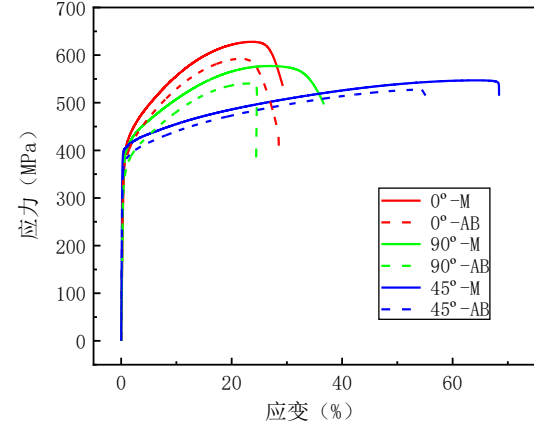
e) 10-3



f) 10-4



g) 10-5



h) 10-6

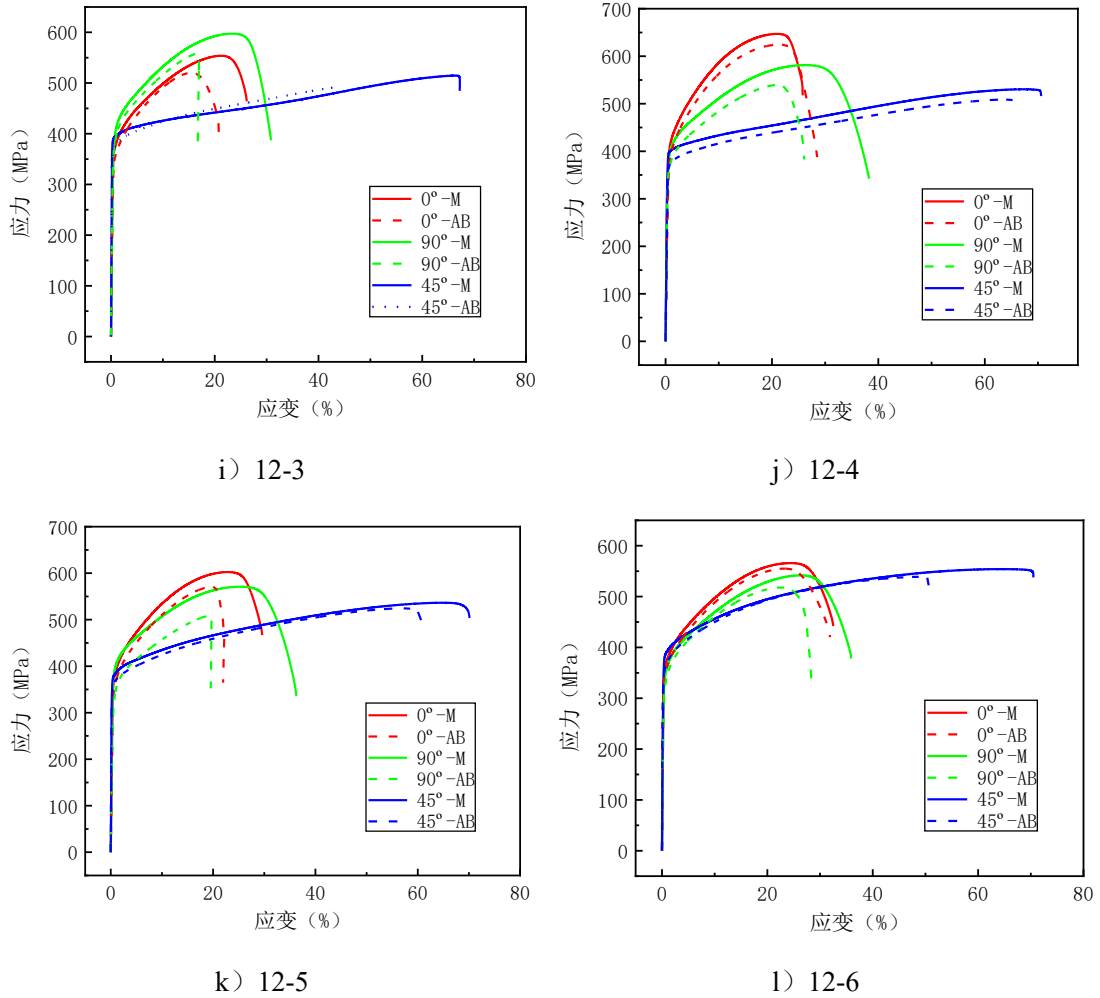


图 2-16 粗糙与光滑材性试样应力-应变曲线

Fig. 2-16 Stress-strain curves of rough and smooth material specimens

从图 2-16 中可以看出, 光滑试样的强度和伸长率均高于粗糙试样, 这是因为 WAAM 技术直接成形得到的粗糙表面凹凸起伏不平, 会造成应力集中, 对试样的力学性能产生影响。汇总粗糙和光滑材性试样材性试验结果于表 2-38 至表 2-49。

表 2-38 8-3 粗糙和光滑材性试样试验结果

Tab. 2-38 Results of material test for 8-3 rough and smooth material specimens

编号	弹性模量 E_0 /GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	抗拉强度 σ_u /MPa	断后伸长率 ε_t /%
8-3-M-0°	88.82	373.87	596.81	24.10
8-3-AB-0°	111.26	365.21	591.14	18.98
8-3-M-90°	97.33	357.19	589.07	22.65
8-3-AB-90°	96.01	340.36	561.41	22.15
8-3-M-45°	158.23	391.38	532.03	65.70
8-3-AB-45°	197.40	363.65	512.95	59.64

表 2-39 8-4 粗糙和光滑材性试样试验结果

Tab. 2-39 Results of material test for 8-4 rough and smooth material specimens

编号	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_f/\%$
8-4-M-0°	105.31	353.77	590.21	25.41
8-4-AB-0°	107.43	347.43	568.09	24.02
8-4-M-90°	98.69	363.02	580.35	25.29
8-4-AB-90°	89.63	315.77	546.91	23.03
8-4-M-45°	221.48	391.91	538.11	64.27
8-4-AB-45°	163.91	355.01	533.01	52.04

表 2-40 8-5 粗糙和光滑材性试样试验结果

Tab. 2-40 Results of material test for 8-5 rough and smooth material specimens

编号	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_f/\%$
8-5-M-0°	106.64	350.31	591.74	25.23
8-5-AB-0°	97.09	338.52	577.06	24.75
8-5-M-90°	112.08	341.92	565.87	26.43
8-5-AB-90°	98.13	338.08	545.47	24.76
8-5-M-45°	195.24	391.70	555.12	50.70
8-5-AB-45°	193.02	370.02	547.27	42.07

表 2-41 8-6 粗糙和光滑材性试样试验结果

Tab. 2-41 Results of material test for 8-6 rough and smooth material specimens

编号	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_f/\%$
8-6-M-0°	117.20	346.43	580.02	27.64
8-6-AB-0°	109.58	334.67	572.14	25.44
8-6-M-90°	107.65	340.78	568.55	26.10
8-6-AB-90°	73.93	328.51	527.57	25.32
8-6-M-45°	164.14	392.29	547.75	63.37
8-6-AB-45°	178.08	367.56	539.16	52.05

表 2-42 10-3 粗糙和光滑材性试样试验结果

Tab. 2-42 Results of material test for 10-3 rough and smooth material specimens

编号	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_f/\%$
10-3-M-0°	108.10	365.85	583.31	19.10
10-3-AB-0°	114.33	348.07	530.97	17.32
10-3-M-90°	97.21	372.50	588.23	23.62
10-3-AB-90°	98.80	353.45	558.19	23.31
10-3-M-45°	178.55	394.58	507.49	75.68
10-3-AB-45°	188.90	374.39	510.78	64.24

表 2-43 10-4 粗糙和光滑材性试样试验结果

Tab. 2-43 Results of material test for 10-4 rough and smooth material specimens

编号	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_f/\%$
10-4-M-0°	104.34	388.09	633.29	22.08
10-4-AB-0°	96.83	385.23	625.57	20.79
10-4-M-90°	107.86	340.82	572.84	21.98
10-4-AB-90°	104.31	338.35	552.30	21.21
10-4-M-45°	193.51	370.22	505.58	58.96
10-4-AB-45°	163.09	348.50	501.20	49.81

表 2-44 10-5 粗糙和光滑材性试样试验结果

Tab. 2-44 Results of material test for 10-5 rough and smooth material specimens

编号	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_f/\%$
10-5-M-0°	106.65	345.93	565.69	25.21
10-5-AB-0°	107.78	343.59	559.64	22.56
10-5-M-90°	140.72	339.47	549.73	31.09
10-5-AB-90°	98.11	314.79	518.25	29.14
10-5-M-45°	167.16	371.81	547.15	55.72
10-5-AB-45°	199.51	368.66	538.18	48.97

表 2-45 10-6 粗糙和光滑材性试样试验结果

Tab. 2-45 Results of material test for 10-6 rough and smooth material specimens

编号	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_f/\%$
10-6-M-0°	93.58	379.52	618.31	22.42
10-6-AB-0°	106.89	358.22	586.99	21.20
10-6-M-90°	97.85	367.51	580.92	25.22
10-6-AB-90°	76.51	340.57	545.71	23.27
10-6-M-45°	191.70	398.83	545.97	63.59
10-6-AB-45°	165.96	362.16	522.00	56.46

表 2-46 12-3 粗糙和光滑材性试样试验结果

Tab. 2-46 Results of material test for 12-3 rough and smooth material specimens

编号	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_f/\%$
12-3-M-0°	111.26	340.24	557.52	24.42
12-3-AB-0°	103.66	340.94	537.67	17.96
12-3-M-90°	98.67	376.81	595.67	22.11
12-3-AB-90°	87.28	360.62	550.96	16.09
12-3-M-45°	179.59	395.24	505.98	63.88
12-3-AB-45°	156.12	338.68	480.59	58.51

表 2-47 12-4 粗糙和光滑材性试样试验结果

Tab. 2-47 Results of material test for 12-4 rough and smooth material specimens

编号	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_f/\%$
12-4-M-0°	103.53	387.75	635.69	21.98
12-4-AB-0°	95.11	358.91	624.49	21.15
12-4-M-90°	104.75	360.42	574.09	24.40
12-4-AB-90°	107.04	358.92	551.24	21.87
12-4-M-45°	152.13	390.67	525.61	65.17
12-4-AB-45°	160.66	371.15	513.35	62.80

表 2-48 12-5 粗糙和光滑材性试样试验结果

Tab. 2-48 Results of material test for 12-5 rough and smooth material specimens

编号	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_f/\%$
12-5-M-0°	102.31	371.01	599.80	21.53
12-5-AB-0°	91.33	352.66	582.28	19.41
12-5-M-90°	103.56	357.15	563.25	24.78
12-5-AB-90°	99.93	315.86	520.87	22.86
12-5-M-45°	184.40	378.75	533.43	66.41
12-5-AB-45°	206.73	360.15	519.32	59.13

表 2-49 12-6 粗糙和光滑材性试样试验结果

Tab. 2-49 Results of material test for 12-6 rough and smooth material specimens

编号	弹性模量 E_0/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_u/MPa	断后伸长率 $\varepsilon_f/\%$
12-6-M-0°	102.69	364.39	571.31	23.59
12-6-AB-0°	105.17	341.61	559.94	21.87
12-6-M-90°	133.12	319.57	541.51	25.09
12-6-AB-90°	101.48	305.67	517.30	24.11
12-6-M-45°	181.02	377.04	549.47	57.76
12-6-AB-45°	215.25	343.14	535.30	57.19

通过汇总 12 组工艺参数成形的粗糙和光滑材性试样试验结果可以发现, 粗糙和光滑试样的弹性模量 E_0 较为接近, 光滑试样的屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 和抗拉强度 σ_u 均高于粗糙试样, 光滑试样的断后伸长率 ε_f 也高于粗糙试样, 主要是由于粗糙试样几何形状不规则的影响。

表 2-50 对 12 组工艺参数各成形角度粗糙和光滑试样的屈服强度进行汇总, 发现粗糙试样屈服强度均低于光滑试样, 0°方向上平均相差 3.51 %, 90°方向上平均相差 5.29%, 45°方向上平均相差 6.88%。

表 2-50 粗糙和光滑试样屈服强度 (MPa)

Tab. 2-50 Yield strength of rough and smooth specimens (MPa)

编号	光滑			粗糙			粗糙/光滑		
	0°	90°	45°	0°	90°	45°	0°	90°	45°
8-3	373.87	357.19	391.38	365.21	340.36	363.65	0.9768	0.9529	0.9291
8-4	353.77	363.02	391.91	347.43	315.77	355.01	0.9821	0.8698	0.9058
8-5	350.31	341.92	391.70	338.52	338.08	370.02	0.9663	0.9888	0.9447
8-6	346.43	340.78	392.29	334.67	328.51	367.56	0.9661	0.9640	0.9370
10-3	365.85	372.50	394.58	348.07	353.45	374.39	0.9514	0.9489	0.9488
10-4	388.09	340.82	370.22	385.23	338.35	348.50	0.9926	0.9928	0.9413
10-5	345.93	339.47	371.81	343.59	314.79	368.66	0.9932	0.9273	0.9915
10-6	379.52	367.51	398.83	358.22	340.57	362.16	0.9439	0.9267	0.9081
12-3	353.58	376.81	395.24	340.94	360.62	338.68	0.9643	0.9570	0.8569
12-4	387.75	360.42	390.67	358.91	358.92	371.15	0.9256	0.9958	0.9500
12-5	371.01	357.15	378.75	352.66	315.86	360.15	0.9505	0.8844	0.9509
12-6	364.39	319.57	377.04	341.61	305.67	343.14	0.9663	0.9565	0.9101
平均值				--			0.9649	0.9471	0.9312
				--				0.9477	

表 2-51 对 12 组工艺参数各成形角度粗糙和光滑试样的抗拉强度进行汇总, 发现粗糙试样的抗拉强度均低于光滑试样, 0°方向上平均相差 2.92%, 90°方向上平均相差 5.44%, 45°方向上平均相差 2.28%, 90°粗糙试样抗拉强度下降最为显著。

表 2-51 粗糙和光滑试样抗拉强度对比 (MPa)

Tab. 2-51 Tensile strength of rough and smooth specimens (MPa)

编号	光滑			粗糙			粗糙/光滑		
	0°	90°	45°	0°	90°	45°	0°	90°	45°
8-3	596.81	589.07	532.03	591.14	561.41	512.95	0.9905	0.9530	0.9641
8-4	590.21	580.35	538.11	568.09	546.91	533.01	0.9625	0.9424	0.9905
8-5	591.74	565.87	555.12	577.06	545.47	547.27	0.9752	0.9639	0.9859
8-6	580.02	568.55	547.75	572.14	527.57	539.16	0.9864	0.9279	0.9843
10-3	583.31	588.23	512.49	530.97	558.19	510.78	0.9103	0.9489	0.9967
10-4	633.29	572.84	505.58	625.57	552.30	501.20	0.9878	0.9641	0.9913
10-5	565.69	549.73	547.15	559.64	518.25	538.18	0.9893	0.9427	0.9836
10-6	618.31	580.92	545.97	586.99	545.71	522.00	0.9493	0.9394	0.9561
12-3	557.52	595.67	505.98	537.67	550.96	480.59	0.9644	0.9249	0.9498
12-4	635.69	574.09	525.61	624.49	551.24	513.35	0.9824	0.9602	0.9767
12-5	599.80	563.25	533.43	582.28	520.87	519.32	0.9708	0.9248	0.9735
12-6	571.31	541.51	549.47	559.94	517.30	535.30	0.9801	0.9553	0.9742
平均值				--			0.9708	0.9456	0.9772
				--				0.9645	

2.5 工艺参数对力学性能的影响

本文选定了 12 组工艺参数分别加工 12 块 WAAM 316L 不锈钢板，以探究工艺参数对力学性能的影响，主要考虑两个工艺参数的影响，包括送丝速度 V_1 和焊接速度 V_2 ，将不同工艺参数下光滑试样 0° 方向的屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 和抗拉强度 σ_u 汇总于图 2-17 和图 2-18。

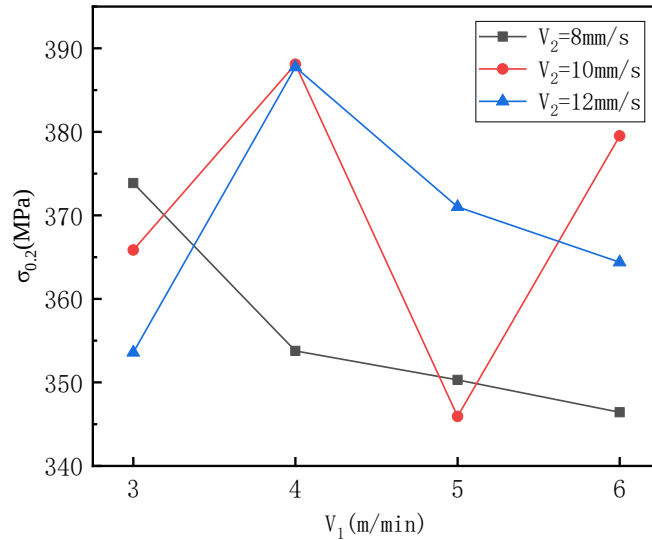


图 2-17 不同工艺参数光滑试样屈服强度

Fig. 2-17 Yield strength of smooth specimens with different process parameters

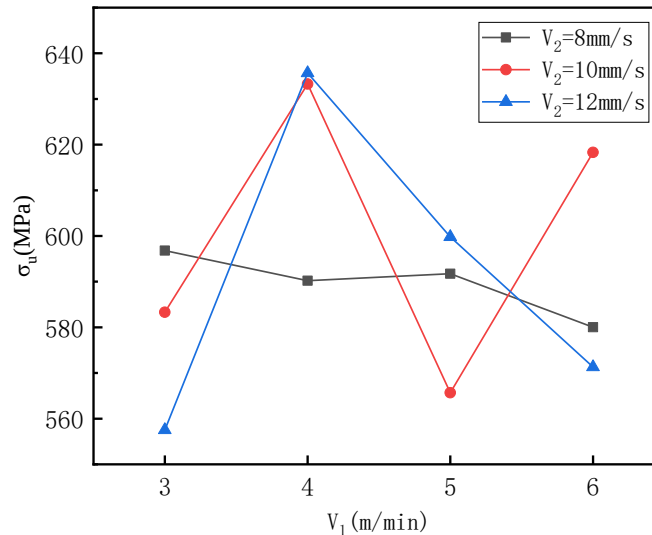


图 2-18 不同工艺参数光滑试样抗拉强度

Fig. 2-18 Tensile strength of smooth specimens with different process parameters

从上图中可以发现，焊接速度为 8mm/s 时，随着送丝速度的增大，屈服强度和抗拉强度大致呈下降趋势。焊接速度为 10mm/s 和 12mm/s 时，送丝速度为 4m/min 时屈服强度和抗拉强度最大。12 组工艺参数对应的屈服强度和抗拉强度

存在一定的离散性,不同工艺参数下加工的材料力学性能有所差异,但总体来说屈服强度处于 340MPa~390MPa 之间,抗拉强度处于 550MPa~640MPa 之间。其中 10-4 和 12-4 两种工艺参数下 WAAM 316L 不锈钢的强度较高。根据试验结果,未发现材料强度与两种工艺参数(送丝速度和焊接速度)之间的明确关系,因此建议在加工 WAAM 结构构件的同时,制备材性试样,确保在相同工艺参数条件下进行,以此获取材料力学性能,更为准确。

2.6 WAAM 316L 不锈钢材料本构模型

不锈钢材料与普通碳素钢材料的力学性能相比,其最大的特点在于应力-应变关系呈明显的非线性,且各向异性,因此精确描述不锈钢材料本构关系是研究不锈钢构件受力及稳定性分析等工作的基础。目前已有大量学者对不锈钢材料的本构关系进行研究,通常用于描述不锈钢等非线性材料应力-应变关系采用的是 Ramberg 和 Osgood 提出的应力-应变模型^[78],该模型经 Hill 进一步修正^[79],公式如下:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (2-1)$$

$$n = \ln 20 / \ln (\sigma_{0.2} / \sigma_{0.01}) \quad (2-2)$$

其中 E_0 为弹性模量, n 为应变硬化系数, $\sigma_{0.2}$ 为名义屈服强度, $\sigma_{0.01}$ 为塑性应变为 0.01% 的应力。

当材料应变发展较大时, Ramberg-Osgood 模型往往会高估材料的应变硬化效应,不能准确拟合试验曲线,因此 Mirambell 和 Real 提出两阶段建议模型^[80],该模型已被欧洲不锈钢结构设计规范 EN 1993-1-4 采用,公式如下:

$$\varepsilon = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right), \sigma \leq \sigma_{0.2} \\ \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \varepsilon_u \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_u - \sigma_{0.2}} \right)^m + \varepsilon_{0.2}, \sigma_{0.2} \leq \sigma \leq \sigma_u \end{array} \right\} \quad (2-3)$$

其中 $E_{0.2}$ 为对应于 $\sigma_{0.2}$ 时的切线模量,参数 $m=1+3.5\sigma_{0.2}/\sigma_u$ 。

Gardner 和 Nethercort 对较大应变下 Ramberg-Osgood 模型做出进一步修正^[81],提出用 $\sigma_{1.0}$ 代替 σ_u ,公式如下:

$$\varepsilon = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right), \sigma \leq \sigma_{0.2} \\ \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \left(0.008 - \frac{\sigma_{1.0} - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} \right) \times \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_{1.0} - \sigma_{0.2}} \right)^{n'_{0.2,1.0}} + \varepsilon_{0.2}, \sigma_{0.2} \leq \sigma \leq \sigma_u \end{array} \right\} \quad (2-4)$$

其中 $n'_{0.2,1.0}$ 为 $\sigma_{0.2}$ 和 $\sigma_{1.0}$ 之间应力-应变曲线的应变硬化系数。

Quach 等^[82]在前人的研究基础上提出三阶段建议模型，公式如下：

$$\varepsilon = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n, \sigma \leq \sigma_{0.2} \\ \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \left(0.008 - \frac{\sigma_{1.0} - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} \right) \times \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_{1.0} - \sigma_{0.2}} \right)^{n'_{0.2,1.0}}, \sigma_{0.2} \leq \sigma \leq \sigma_{2.0} \\ \frac{\sigma - a}{b \mp \sigma}, \sigma > \sigma_{2.0} \end{array} \right\} \quad (2-5)$$

$$a = \sigma_{2.0}(1 \pm \varepsilon_{2.0}) - b\varepsilon_{2.0} \quad (2-6)$$

$$b = \frac{\sigma_u(1 \pm \varepsilon_u) - \sigma_{2.0}(1 \pm \varepsilon_{2.0})}{\varepsilon_u - \varepsilon_{2.0}} \quad (2-7)$$

本文采用 Mirambell 和 Real 提出的两阶段建议模型，根据材性试验所得应力-应变曲线进行拟合，从而得到本构模型参数，表 2-52 为不同工艺参数下光滑材性试样本构模型参数，表 2-53 为不同工艺参数下粗糙材性试样本构模型参数。图 2-19 列举了其中四组工艺参数下光滑材性试样试验曲线与拟合曲线的对比图，可以看出拟合曲线与试验曲线吻合较好。

表 2-52 光滑材性试样本构模型参数

Tab. 2-52 Model parameters of smooth material specimens

编号	成形角度	E_0/GPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_u/MPa	ε_u	n	m
8-3	0°	88.82	373.87	596.81	0.1934	14.16	2.22
	45°	97.33	357.19	589.07	0.1885	9.22	2.59
	90°	158.23	391.39	532.03	0.5992	13.20	1.63
8-4	0°	105.31	353.77	590.21	0.2236	8.86	2.42
	45°	98.69	363.02	580.35	0.2099	9.44	2.35
	90°	221.48	391.91	538.10	0.5919	8.50	1.98
8-5	0°	106.64	350.31	591.74	0.2130	8.13	2.26
	45°	112.08	341.92	565.87	0.2108	6.03	2.32
	90°	195.24	391.70	555.12	0.4385	17.13	2.61
8-6	0°	117.20	346.43	580.02	0.2266	7.89	2.41
	45°	107.65	340.78	568.55	0.2213	5.41	2.52
	90°	164.14	392.29	547.75	0.5540	10.35	2.66
10-3	0°	108.10	365.85	583.31	0.1410	7.44	2.20
	45°	97.21	372.50	588.23	0.1795	5.12	2.18
	90°	178.55	394.58	512.49	0.7389	12.59	1.18
10-4	0°	104.34	338.09	633.29	0.1588	9.05	1.99
	45°	107.86	340.82	572.84	0.1809	5.87	2.37
	90°	193.51	365.97	505.58	0.5384	12.79	3.04
10-5	0°	106.65	345.93	565.69	0.2156	8.97	2.13
	45°	140.72	339.47	549.73	0.1848	8.84	2.33
	90°	167.16	371.81	547.15	0.4921	8.44	2.60

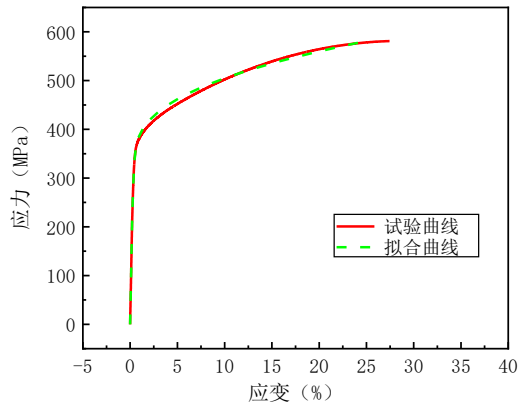
10-6	0°	93.58	379.52	618.31	0.1899	6.79	2.23
	45°	97.85	367.51	580.92	0.2076	12.31	2.37
	90°	191.70	398.83	545.97	0.5484	28.79	2.19
12-3	0°	111.26	353.58	557.52	0.1947	7.18	2.21
	45°	98.67	376.81	595.67	0.1825	10.25	2.47
	90°	179.59	395.24	505.98	0.5861	57.33	1.21
12-4	0°	103.53	387.75	635.69	0.1461	8.26	2.17
	45°	104.75	360.42	574.09	0.2064	10.32	2.45
	90°	152.13	390.67	525.61	0.5335	22.81	1.58
12-5	0°	102.31	371.01	599.8	0.1568	13.12	2.07
	45°	103.56	357.15	563.25	0.2107	8.90	2.32
	90°	184.40	378.75	533.43	0.5835	21.05	2.09
12-6	0°	102.69	353.54	571.31	0.1838	14.43	2.08
	45°	133.12	319.57	541.51	0.2104	9.14	2.49
	90°	181.02	357.11	547.47	0.5118	12.22	2.91

表 2-53 粗糙材性试样本构模型参数

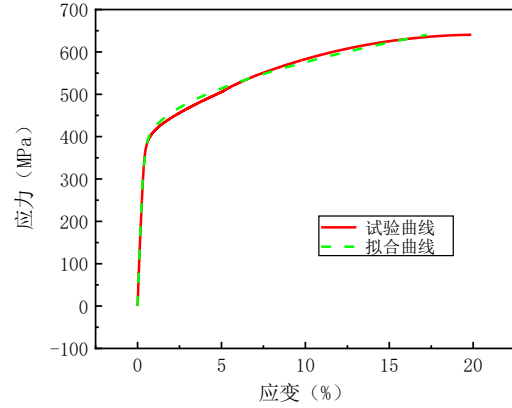
Tab. 2-53 Model parameters of rough material specimens

编号	成形角度	E_0/GPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_u/MPa	ε_u	n	m
8-3	0°	111.26	365.21	591.14	0.1485	12.63	2.15
	45°	96.01	340.36	561.42	0.1871	8.90	2.35
	90°	197.40	363.65	512.95	0.5517	17.17	2.02
8-4	0°	115.93	350.06	570.61	0.1833	19.64	2.40
	45°	89.63	315.77	546.91	0.1989	6.66	2.72
	90°	163.91	355.01	533.01	0.4735	11.02	2.66
8-5	0°	97.09	338.52	577.06	0.2105	10.62	2.29
	45°	98.13	338.08	545.47	0.2075	15.53	2.41
	90°	193.02	370.02	547.27	0.3542	22.61	2.60
8-6	0°	109.58	334.67	572.14	0.2076	10.3	2.48
	45°	73.93	328.51	527.57	0.2052	17.71	2.48
	90°	178.08	367.56	539.16	0.4653	12.45	2.78
10-3	0°	114.33	348.07	530.97	0.1429	18.5	2.05
	45°	98.8	353.45	558.19	0.1880	14.31	2.34
	90°	188.90	374.39	510.78	0.6229	11.91	1.65
10-4	0°	96.83	385.23	625.57	0.1488	27.88	2.63
	45°	104.31	338.35	552.30	0.1814	10.06	2.32
	90°	163.09	348.50	501.20	0.4308	14.20	2.59
10-5	0°	107.78	343.59	559.64	0.1560	36.74	2.79
	45°	98.11	314.79	518.25	0.2473	10.65	2.31
	90°	199.51	368.66	358.18	0.4251	18.46	2.41

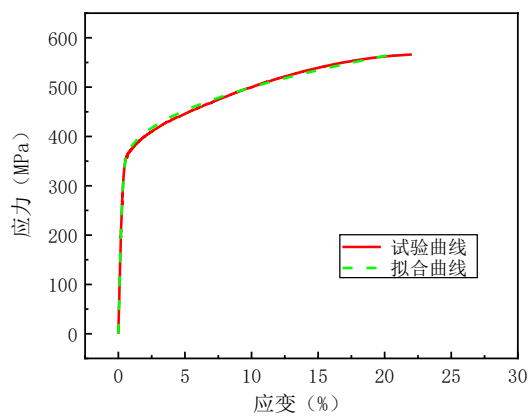
10-6	0°	106.89	358.22	586.99	0.1702	12.98	2.26
	45°	76.51	340.57	545.71	0.1936	9.86	2.41
	90°	165.96	362.16	522.00	0.5129	13.75	2.32
12-3	0°	103.66	340.94	537.67	0.1483	9.05	2.10
	45°	87.28	360.62	550.96	0.1367	13.18	2.12
	90°	156.12	338.68	480.59	0.5789	11.21	2.26
12-4	0°	95.11	358.91	624.49	0.1734	6.60	2.56
	45°	107.04	358.92	551.24	0.1839	12.13	2.15
	90°	160.66	371.15	513.35	0.5843	27.45	1.77
12-5	0°	91.33	352.66	582.28	0.1543	16.83	2.20
	45°	99.93	315.86	520.87	0.1990	8.09	2.38
	90°	206.73	360.15	519.32	0.5339	18.87	2.05
12-6	0°	105.07	341.61	559.94	0.1938	13.44	2.15
	45°	101.48	305.67	517.30	0.2003	10.80	2.47
	90°	215.25	343.14	535.30	0.4991	13.43	2.82



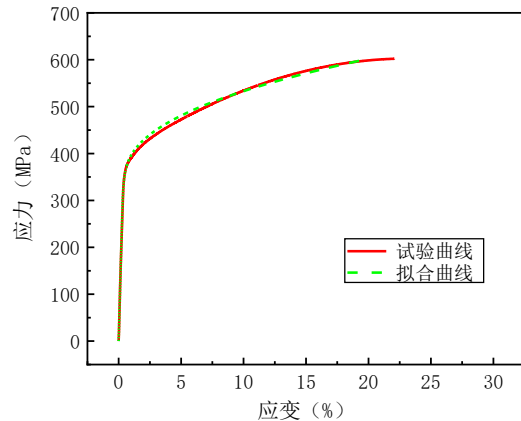
a) 8-4



b) 10-4



c) 10-5



d) 12-5

图 2-19 光滑材性试样拟合曲线与试验曲线对比

Fig. 2-19 Comparison of fitting stress-strain curve and measured curve of smooth material specimens

2.7 本章小结

本章中主要介绍了不同工艺参数下 12 块 WAAM 316L 不锈钢板的加工过程、粗糙和光滑材性试样的单轴拉伸试验以及 WAAM 不锈钢材料材料力学性能。主要工作包括粗糙材性试样横截面积的测定,通过材性试验结果探究 WAAM 不锈钢材料的各向异性、对比粗糙与光滑试样材性差异以及工艺参数对力学性能的影响,主要得到以下结论:

(1) 采用排水法和游标卡尺两种方法测定粗糙材性试样的横截面积,对比两种方法的测量结果,发现与排水法相比,游标卡尺的测量结果会略高 3%。

(2) 光滑材性试样试验结果表明:与焊缝方向成 0° 和 90° 方向的试样弹性模量 E_0 较为接近,成 45° 方向的试样弹性模量 E_0 明显高于其他两个方向; 45° 方向试样的屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 高于其他两个方向; 0° 方向试样的抗拉强度最高, 90° 方向次之, 45° 方向强度最低。

(3) 对比粗糙和光滑材性试样的试验结果发现,粗糙和光滑试样的弹性模量 E_0 较为接近,光滑试样的屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 、抗拉强度 σ_u 和断后伸长率 ε_f 均高于粗糙试样,主要是由于几何形状不规则导致的应力集中造成的影响。

(4) 不同工艺参数下水平方向光滑试样的屈服强度和抗拉强度存在一定的离散性,但总体来说屈服强度处于 $340\text{MPa}\sim 390\text{MPa}$ 之间,抗拉强度处于 $550\text{MPa}\sim 640\text{MPa}$ 之间。

(5) 采用两阶段 R-O 模型对光滑和粗糙材性试验结果进行拟合,拟合结果较好,并给出不同工艺参数下 WAAM316L 不锈钢材料的本构模型参数。

第 3 章 WAAM 成形构件几何形貌的表征

WAAM 成形构件表面凹凸起伏不平,其成形过程可看作层层焊缝进行累加,具有一定的规律性,因此本章提出一种对 WAAM 成形构件粗糙几何轮廓进行表征的方法。首先通过 3D 激光扫描获得 12 块 WAAM 钢板的三维模型,沿与基板垂直方向截取三个截面,提取截面两侧轮廓线坐标信息,通过移动平均值滤波的方法去除板件本身的弯曲变形,提出一种用正弦半波来表征 WAAM 构件粗糙表面形貌的方法。

3.1 3D 激光扫描

三维激光扫描技术是二十世纪九十年代中期开始出现的一项技术,是继 GPS 空间定位系统之后的又一项测绘技术突破。利用高速激光扫描测量的方法,大面积高分辨率、快速地获取被测物体表面的三维坐标信息,可以大量采集点位信息,建立被测物的三维模型。本文采用双目型蓝光三维扫描仪对 12 块 WAAM 316L 不锈钢板进行扫描。

3.1.1 3D 激光扫描原理

三维激光扫描系统主要由三维激光扫描仪、计算机、电源供应系统、支架以及系统配套软件构成。三维激光扫描仪内部主要包含激光测距系统和激光扫描系统,同时集成有电荷耦合元件 (CCD) 和仪器内部控制和校正系统。目前市场上有许多不同类型的三维激光扫描系统,每个制造商都具有自己独特的专利技术,但从工作原理上来分,激光测距系统可分为脉冲测距法、相位测距法和激光三角法三类^[83]。

(1) 脉冲测距法

脉冲测距法是一种高速激光测时测距技术。其工作原理是:扫描仪发出激光脉冲信号,经旋转棱镜射向被测物,仪器接收并记录被测物反射回的脉冲信号,利用测定脉冲信号往返的时间差来间接计算被测物的距离,如图 3-1 所示,测距公式为式 (3-1):

$$S = \frac{c \cdot \Delta_t}{2} \quad (3-1)$$

式中, S 表示测量距离, c 表示光速, Δ_t 表示脉冲信号往返的时间差。

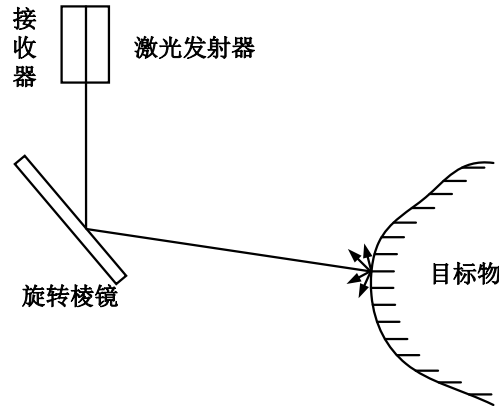


图 3-1 脉冲测距法原理

Fig. 3-1 Principle of pulse ranging method

脉冲测距法适用于超长距离的距离测量，测距范围可以达到几百米甚至上千米的距离，测量精度主要受到脉冲计数器工作频率和激光源脉冲宽度的限制，可以达到米数量级。

（2）相位测距法

相位测距法的工作原理是：基于无线电波段的频率，对激光束进行幅度调制，并测定调制光往返一次产生的相位差，然后依据调制光波长来换算相位差代表的距离，即间接测定激光往返时间差，如图 3-2 所示，测距公式为式（3-2）：

$$S = \frac{c}{2} \left(\frac{\Delta\phi}{2\pi f} \right) \quad (3-2)$$

式中， $\Delta\phi$ 表示传播一次的相位差， f 表示脉冲频率。

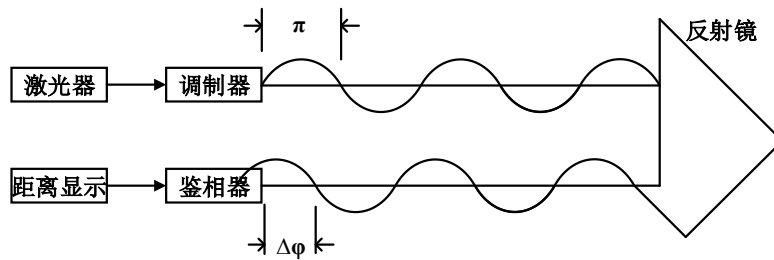


图 3-2 相位测距法原理

Fig. 3-2 Principle of phase ranging method

相位测距法的测量范围比较小，通常限制在 100m 以内，与脉冲测距法相比，精度较高，可以达到毫米级。

（3）激光三角测距法

激光三角测距法是基于三角形几何关系求得被测物的距离，三角构成包括激光发射器、目标反射点和电荷耦合元件（CCD）。其工作原理是：根据发射到被测物的信号与反射到 CCD 元件的信号之间的夹角，以及激光发射器与 CCD 元件

之间的基线长度来计算被测物的距离，如图 3-3 所示。

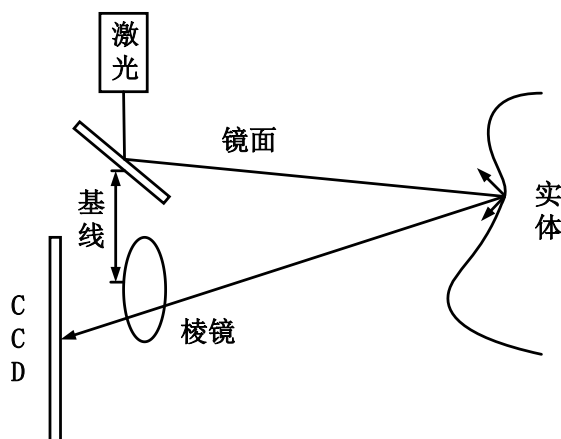


图 3-3 激光三角测距法

Fig. 3-3 Laser triangle ranging

激光三角测距法测距范围一般在几十米以内，主要应用于工业测量和逆向工程重建中，精度可以达到亚毫米级。

3.1.2 3D 激光扫描仪

本文所采用的是南科三维双目型蓝光三维扫描仪 NanKe3D-BI，如图 3-4 所示，其光源为蓝光 LED，扫描精度为 $0.01\text{mm}\sim 0.03\text{mm}$ ，如图 3-4 所示。该扫描仪采用蓝色光栅扫描技术，扫描时不受环境光源干扰，可直接扫描被测物反光面及暗面，操作更加便捷。蓝光作为单一色彩的光源，波长在 $380\sim 450\text{nm}$ 之间，期间 $380\sim 410$ 波段的蓝光被称为高能蓝光。由于自然光中蓝光的成分少，波长短、能量高等特性，因此蓝光三维扫描仪的抗环境光干扰性相对于白光三维扫描仪要强大很多，使得其能够在复杂的环境中正常使用，精度明显高于白光三维扫描仪。蓝光比白光的穿透性更强，在复杂的环境光下，能有效穿透复杂光来提高光源的强度。不用对扫描工件表面做亚光处理，对表面清洁程度要求较低，不过相比于白光三维扫描仪的价格，蓝光三维扫描仪的价格略高。

在扫描前清理所有 WAAM 316L 不锈钢板件的表面，用酒精擦拭其表面，并在其表面喷涂一层均匀的白色显像剂，为了确保工件表面对扫描蓝光呈现漫反射，同时增加工件自身颜色的对比度，还能避免因表面的金属光泽、刮痕以及反光等对扫描结果产生的负面影响。并且，还在喷涂白色显像剂的工件表面贴上圆形标志点，为了使多次扫描获得的点云数据可以完整地拼接在一起，如图 3-5 所示。



图 3-4 双目型蓝光三维扫描仪

Fig. 3-4 Binocular blue ray 3D scanner



图 3-5 3D 激光扫描

Fig. 3-5 3D laser scanning

3.1.3 3D 扫描工作流程

目前已有多种被广泛使用的 3D 扫描模型处理软件，如 Geomagic studio、Magics 等，但从工作流程上来说大致类似，如图 3-6 所示，具体包括以下几个步骤：

1) 点云数据预处理。主要包括点云采集、拼接、去噪、精简等步骤，以获得高质量点云。三维激光扫描仪所采集到的原始点云数据需要转换格式，才能在相应的软件中进行后续处理，然而直接采集到的点云数据必然存在一些噪声，比如环境噪点、拼接时的重复噪点等，因此应首先对点云数据进行预处理来减少噪点，缩减点云的数量。

2) 三维网格模型建立。对预处理后的点云数据进行三角化，形成一个近似扫描模型表面的三角网，这个三角网便构成了具有被扫描物体表面特征的一个三维模型。

3) 三维模型后处理。由于现场扫描条件或者扫描操作不够细致全面等因素的影响，部分区域的点云密度不够或者缺少数据点，会导致孔洞、杂乱三角形、钉状物等问题，需要对模型进行漏洞修补、模型平滑简化等操作。

4) 纹理贴图。对三维模型进行纹理贴图，最大程度地还原被扫描物体的纹理信息，使模型更加逼真地表现出实物的原貌。

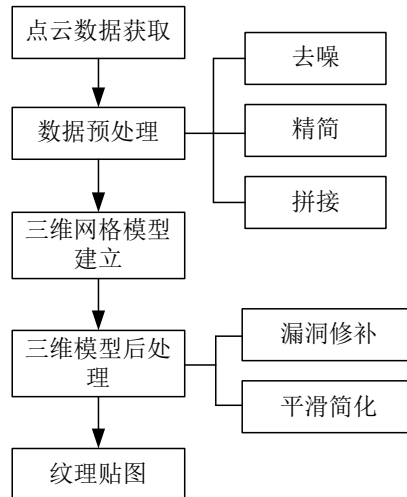


图 3-6 3D 扫描工作流程

Fig. 3-6 3D scanning process

3.2 数据处理

本节中对三维激光扫描获得的三维模型进行数据处理，首先在 WAAM 钢板三维模型上截取三个截面，获取截面两侧轮廓线的坐标信息，然后采用移动平均值滤波的方法过滤掉 WAAM 钢板本身的弯曲变形，得到修正后的轮廓曲线，提取极大值点和极小值点。

3.2.1 截面数据的获取

通过 3D 激光扫描获得 12 块 WAAM 316L 不锈钢板件的初始模型，并且在 Geomagic Studio 软件中进行后期处理，包括去除噪点、细化网格等操作，图 3-7 为 10-5 板件扫描后得到的三维模型。对于每块 WAAM 不锈钢板，分别从扫描模型的中部和距中部 100mm 处，沿垂直于基板方向截取三个截面，获取截面两侧轮廓的坐标信息，如图 3-8 所示。

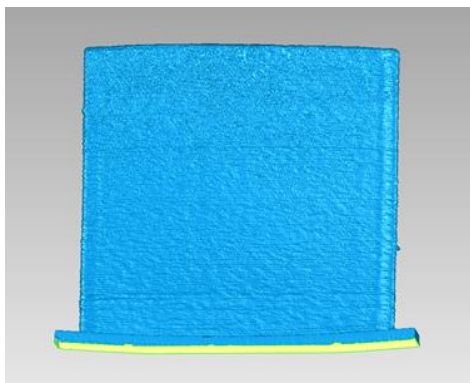


图 3-7 三维扫描模型图

Fig. 3-7 3D scanning model

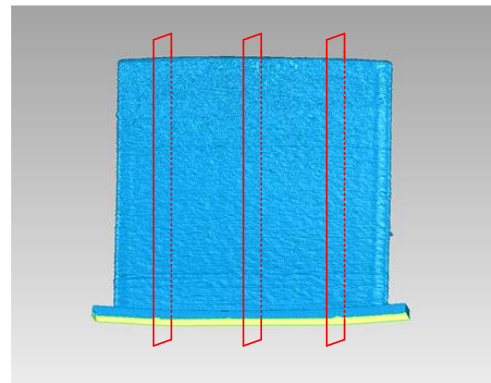


图 3-8 截取位置示意图

Fig. 3-8 The position of interception

图 3-9、3-10、3-11 和 3-12 分别为 10-5、10-6、12-5 和 12-6 四块 WAAM 316L 不锈钢板中部截面的两侧轮廓图，其中横坐标是沿着钢板的高度方向，纵坐标是沿着钢板的厚度方向。从图中可以看出，WAAM 钢板发生了不同程度的弯曲变形，分析其原因主要包括两点：1) 在加工过程中由于热输入很大，基板发生变形，导致继续焊接时，熔滴向某一侧流淌并凝固，累积下来便形成了钢板的弯曲变形；2) 钢板两侧存在温度差，导致残余应力的产生，并发生残余变形。每块钢板沿三个截面进行截取，每个截面包含内外两条轮廓线，因此从每块钢板上可获取六条轮廓线数据，以便后续分析板件表面凹凸起伏的几何轮廓特征。

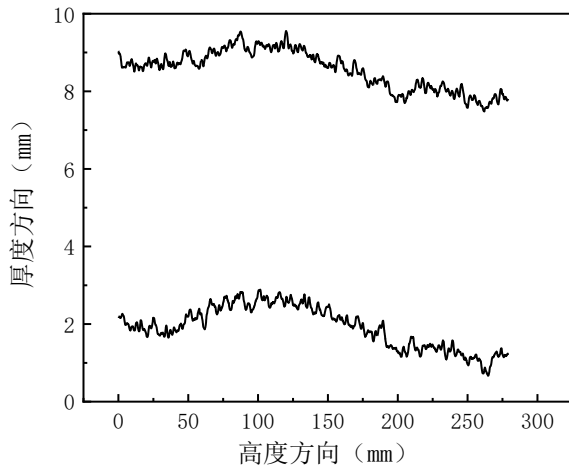


图 3-9 10-5 WAAM 钢板中部截面

Fig. 3-9 Middle section of 10-5 WAAM steel plate

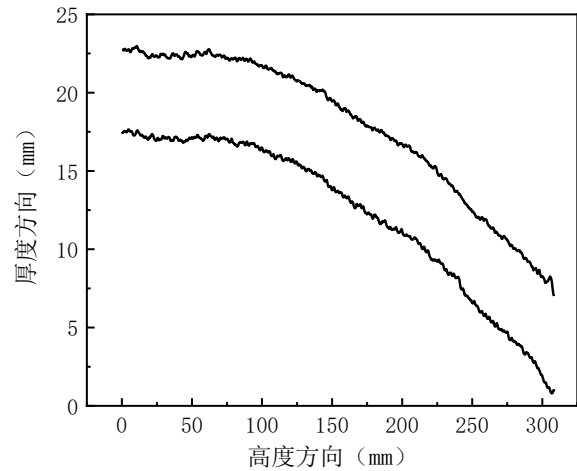


图 3-10 10-6 WAAM 钢板中部截面

Fig. 3-10 Middle section of 10-6 WAAM steel plate

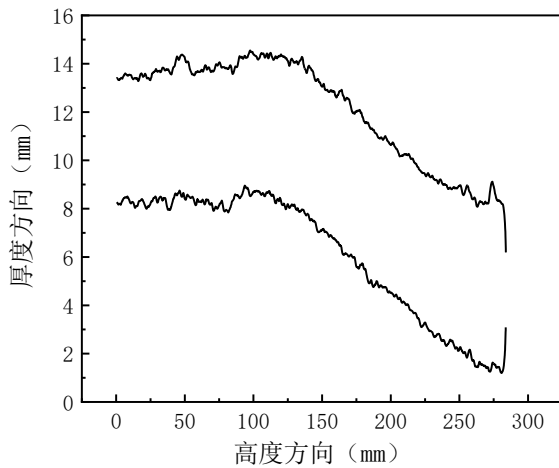


图 3-11 12-5 WAAM 钢板中部截面

Fig. 3-11 Middle section of 12-5 WAAM steel plate

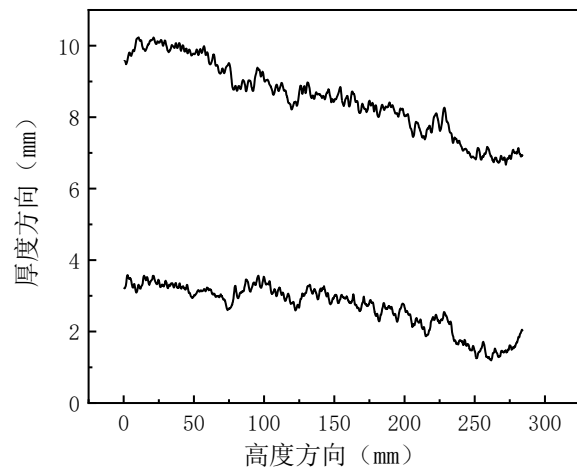


图 3-12 12-6 WAAM 钢板中部截面

Fig. 3-12 Middle section of 12-6 WAAM steel plate

3.2.2 移动平均值滤波

移动平均值是指采用逐项递进的方法,将序列中的若干项数据进行算术平均所得到的一系列平均数。移动平均值滤波基于统计原理,将连续的采样数据看成一个固定的长度为 N 的队列,在新的一次测量后,上述队列的首项数据去掉,其余 $N-1$ 个数据依次前移,并将新的采样数据插入,作为新队列的尾;然后对整个队列进行算术运算,并将其结果作为本次测量的结果。根据计算方法的不同,常用的移动平均值滤波包括算术平均值滤波、加权移动平均值滤波和指数移动平均值滤波等。

由于采用电弧增材制造所加工的钢板会发生不同程度的弯曲变形,因此采用移动平均值滤波的方法对 WAAM 钢板的轮廓线进行滤波,其目的是为了忽略掉 WAAM 钢板本身的弯曲变形,得到其表面凹凸不平的几何特征。对于每一条轮廓线都采用移动平均值滤波的方法进行处理,在 origin 软件中调用 `movavg` 函数来计算轮廓数据的移动平均值,数据间隔取所有数据点数量的十分之一,即若轮廓线数据共包含 5000 个数据点,则取 500 作为数据间隔进行计算。图 3-13 为 10-5 板件中部截面轮廓线进行移动平均值计算的结果,其中黑色实线为 3D 扫描所获得的原始轮廓线,红色虚线为移动平均值曲线。并且将原始轮廓线基于移动平均值进行修正,即用原始轮廓线数据减去移动平均值数据,图 3-14 为修正后的轮廓曲线。

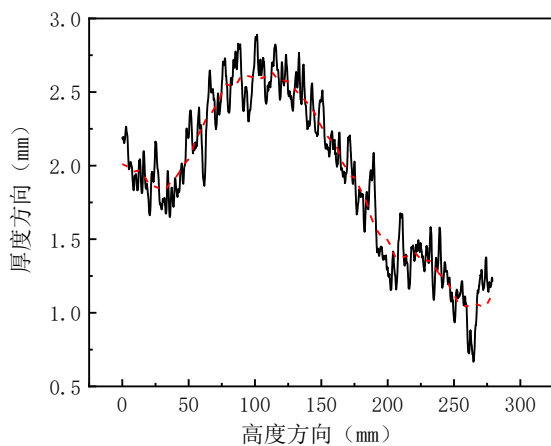


图 3-13 移动平均值滤波

Fig. 3-13 Moving average filtering

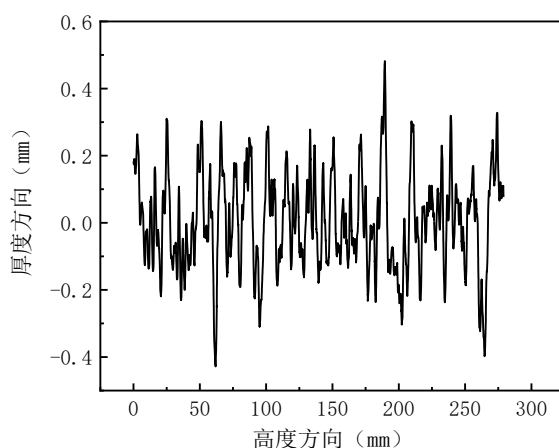


图 3-14 修正后轮廓曲线

Fig. 3-14 The profile curve after filtering

3.2.3 特征点提取

将扫描得到的原始的轮廓曲线基于移动平均值进行修正后,可以观察到修正后的轮廓曲线是高低起伏、不平整的,可以基本上反映出 WAAM 板件表面凹凸不平的几何特征。对于修正后的曲线,进行特征点的提取,特征点具体包括曲线上的极大值点和极小值点。采用 Origin 软件中的寻峰操作来提取修正后轮廓曲

线上的极值点，对于极大值点，直接采用寻峰操作提取峰值点；对于极小值点，先将轮廓曲线的纵坐标转化成相反数，使得转化后曲线的峰值点即为轮廓曲线的极小值点的相反数，并且输出极值点的点坐标信息以便后续分析。图 3-15 为在 Origin 软件中对修正后轮廓曲线进行寻峰操作，图中红色实心点所标记的即为识别到的峰值点。

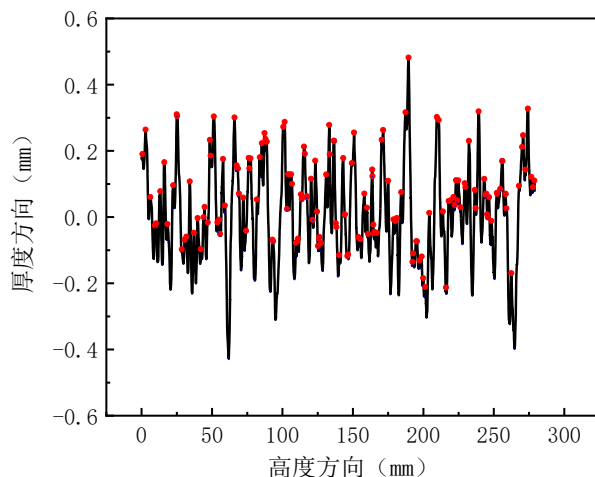


图 3-15 Origin 中进行寻峰

Fig. 3-15 The peak search operation in Origin

3.3 轮廓表征方法

电弧增材制造工艺实质上类似于堆焊，即一道一道焊缝层层累积，堆叠出最终的成品工件，其表面凹凸不平的形状类似于层层焊缝形状的累加，因此其形状具有一定的规律性和周期性，考虑可以通过表征每道焊缝的形状，叠加起来便形成 WAAM 板实际的表面凹凸不平的几何形状。图 3-16 是 WAAM 316L 钢板表面细节图，图 3-17 为 10-5 WAAM 钢板中部截面轮廓局部放大图，从图中可以看出焊缝的形状与三角函数正弦半波的形状比较相近，因此本文提出采用正弦半波的函数形式来表征 WAAM 钢板表面轮廓凹凸起伏不平的几何特征。



图 3-16 WAAM 316L 钢板表面细节图

Fig. 3-16 Detail drawing of WAAM 316L steel plate surface

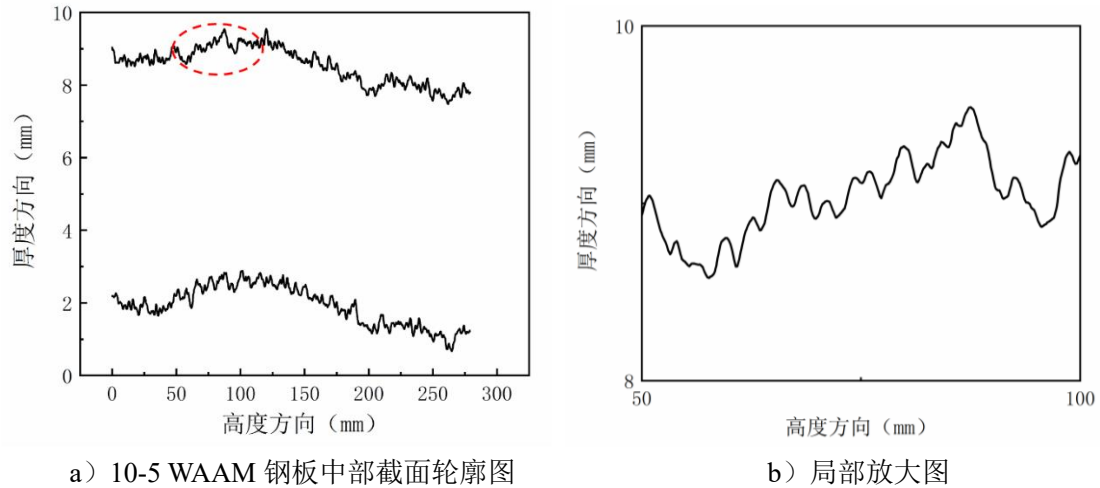


图 3-17 10-5 WAAM 钢板中部截面轮廓局部放大图

Fig. 3-17 Enlarged view of central section outline of 10-5 WAAM steel plate

采用正弦半波的轮廓表征方法，示意图如图 3-18 所示，图中标记的红点为极值点（极大值点和极小值点），正弦半波公式如（3-3）所示：

$$F(x) = A \sin\left(\frac{\pi}{B} x\right) \quad (3-3)$$

式中， A 表示幅值， B 表示周期。

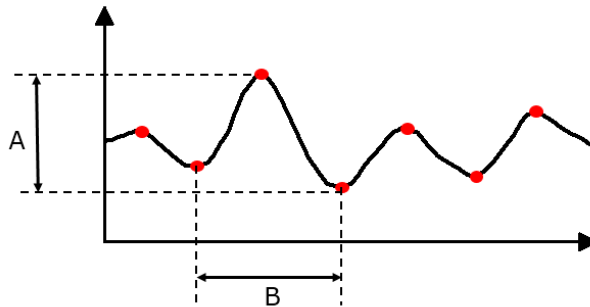


图 3-18 正弦半波轮廓表征示意图

Fig. 3-18 Schematic diagram of sinusoidal half wave contour characterization

正弦半波轮廓表征公式中的幅值 A 和周期 B 两个常数项根据前面所提取的特征点来确定。对于不同工艺参数加工的每一块 WAAM 316L 不锈钢板，提取六条轮廓线上所有的极大值点和极小值点，其中极大值点纵坐标和极小值点纵坐标平均值的差值作为幅值 A ，极小值点横坐标差值的平均值作为周期 B 。对 12 组工艺参数所加工的 12 块 WAAM 316L 不锈钢板均采用此方法进行轮廓表征，并给出幅值 A 和周期 B 的汇总，并且计算了平均值和标准差，可以看到幅值和周期的标准差分别为 0.0368 和 0.1092，标准差都偏小，说明数据的离散程度较低，因此后文中进行有限元模拟时，采用幅值和周期的平均值来表征 WAAM 不锈钢圆管短柱的几何轮廓。

表 3-1 WAAM 316L 不锈钢板轮廓汇总

Tab. 3-1 Summary of WAAM 316L stainless steel plat profiles

编号	幅值 A (mm)	周期 B (mm)
8-3	0.1189	1.7236
8-4	0.1413	1.8270
8-5	0.2047	1.9636
8-6	0.1909	1.9362
10-3	0.0936	1.9181
10-4	0.1098	1.8207
10-5	0.1224	1.8590
10-6	0.1352	1.7709
12-3	0.1240	1.8135
12-4	0.0753	1.6339
12-5	0.1560	1.9166
12-6	0.1373	2.0235
平均值	0.1341	1.8506
标准差	0.0368	0.1092

3.4 本章小结

本章对 WAAM 316L 不锈钢板件进行 3D 激光扫描以及一系列数据处理，提出一种正弦半波的轮廓表征方法，主要得到以下结论：

（1）由于基板变形、残余应力等因素的影响，WAAM 钢板会发生不同程度的弯曲变形。为了获得 WAAM 构件表面轮廓特征，采用移动平均值滤波的方法，过滤掉钢板自身的弯曲变形。

（2）电弧增材制造过程的实质是层层焊缝的累加，WAAM 构件的表面可观察到焊缝的形状，因此提出采用正弦半波的函数形式来表征 WAAM 构件表面凹凸起伏不平的轮廓特征。

（3）提取 12 块 WAAM 316L 不锈钢板修正后轮廓线上的极值点，根据本文提出的正弦半波轮廓表征方法对 12 块 WAAM 钢板的轮廓进行表征。

第 4 章 WAAM 不锈钢圆管短柱轴心受压有限元模拟方法

随着计算机技术的快速发展,有限元分析迅速发展到许多科学技术领域。有限元分析不受时间、空间、经济条件和偶然误差等因素的影响,也不受计算规模的限制,能够全面反映研究对象的应力和应变状态。本章根据已有参考文献中的 WAAM 不锈钢圆管短柱轴心受压试验,采用 ABAQUS 软件对其进行数值模拟,通过对比四种不同的建模方法,提出最合理准确的有限元建模方法。

4.1 有限元模型的建立

在 ABAQUS 软件 CAE 界面中执行几何建模、划分网格、特性设置、装配、定义分析步、相互作用、载荷边界、提交运算和后处理等操作,建立 WAAM 不锈钢圆管短柱有限元模型,并进行屈曲分析,引入几何非线性和材料非线性等因素的影响,主要步骤包括:

- 1) 创建几何模型;
- 2) 设置材性参数、划分网格、施加载荷和边界条件等;
- 3) 采用 BUCKLE 分析步进行屈曲模态分析;
- 4) 引入低阶屈曲模态,作为非线性屈曲分析中的几何初始缺陷;
- 5) 进行非线性静力分析。

4.1.1 几何模型的建立

由于 WAAM 构件表面形状凹凸起伏不平,因此考虑到有限元模型的精确性,将第三章中所提出的正弦半波轮廓表征方法引入到几何建模中。通过 Python 语句将正弦半波曲线引入到 ABAQUS 软件中,可画出一条正弦半波曲线作为 WAAM 不锈钢管短柱的轮廓线,通过分段函数来定义连续的正弦半波形状,其中正弦半波的幅值和周期采用第三章中所得到的 WAAM 不锈钢板幅值和周期的平均值:幅值 A 为 0.1341,周期 B 为 1.8506。Python 语句中首先根据所定义的函数形式,按照 0.2mm 的间隔画出连续正弦半波上的坐标点,然后将点连成线,便构成了一条连续的正弦半波曲线,以此作为 WAAM 圆管的表面轮廓。并且在几何建模中假设管壁内外两侧的形状是对称的,通过对称操作可得到管壁截面形状如图 4-1 所示,将管壁绕中心轴旋转一周,即可得到 WAAM 不锈钢圆管的几何模型,如图 4-2 所示。

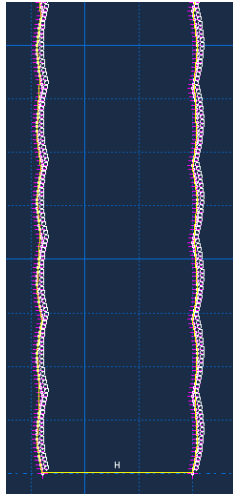


图 4-1 管壁截面形状

Fig. 4-1 Shape of tube wall section



图 4-2 WAAM 圆管几何建模

Fig. 4-2 WAAM tube geometry modeling

参考文献中对五种不同尺寸的 WAAM 不锈钢圆管短柱进行轴压试验^[65], 如表 4-1 所示, 根据欧洲不锈钢设计规范 EN 1993-1-4 中受压构件的截面分类标准, 五种截面尺寸中包含一个一类截面、一个三类截面和三个四类截面, 每种尺寸试件设置一个重复试验, 并给出轴压试验结果。

表 4-1 WAAM 圆管短柱轴压试验结果

Tab. 4-1 Results of WAAM tube axial compression test

试件编号	欧规截面分类等级	承载力 N_u (kN)	轴向位移 δ (mm)
C-105×8-355	1	942.8	37.78
C-105×8-355-R	1	728.9	21.08
C-140×3.5-560	3	482.1	6.22
C-140×3.5-560-R	3	442.5	4.48
C-170×3.5-580	4	530.8	4.33
C-170×3.5-580-R	4	563.8	4.55
C-260×3.5-1020	4	664.3	4.05
C-260×3.5-1020-R	4	692.7	4.71
C-320×3.5-1180	4	849.2	5.16
C-320×3.5-1180-R	4	858.0	5.63

4.1.2 材性参数

本文根据已有参考文献中的 WAAM 不锈钢圆管短柱轴心受压试验, 建立有限元模型以验证本文有限元建模方法的正确性与准确性。表 4-2 和表 4-3 为参考文献中所给出的材性参数, 表 4-2 为粗糙试样的材性试验结果, 表 4-3 为光滑试样材性试验结果, 试验中采用了两种厚度 (3.5mm 和 8mm) 的 WAAM 不锈钢材料。根据给出的材性参数, 按照两阶段 Ramberg-Osgood 模型计算工程应力-应变

曲线，如式（4-1）所示，并且根据转换公式（4-2），将工程应力-应变曲线转换成真实应力-塑性应变曲线。

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right), & \sigma \leq \sigma_{0.2} \\ \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \varepsilon_u \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_u - \sigma_{0.2}} \right)^m + \varepsilon_{0.2}, & \sigma_{0.2} \leq \sigma \leq \sigma_u \end{cases} \quad (4-1)$$

$$\begin{cases} \sigma_{true} = \sigma(1 + \varepsilon) \\ \varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon) - \sigma_{true} / E \end{cases} \quad (4-2)$$

表 4-2 不同角度粗糙材性试样试验结果

Tab. 4-2 Results of different angle rough material specimens

厚度 (mm)	角度 θ (°)	E (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	ε_u	σ_u (MPa)	n	m
3.5	0	134700	340	0.271	560	18.0	2.2
	45	188700	348	0.255	574	10.4	2.3
	90	90700	263	0.116	451	7.0	2.6
8	0	135600	326	0.324	536	26.3	2.4
	45	201200	351	0.255	560	12.0	2.3
	90	107200	270	0.103	422	6.0	2.5

表 4-3 不同角度光滑材性试样试验结果

Tab. 4-3 Results of different angle smooth material specimens

角度 θ (°)	E (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	ε_u	σ_u (MPa)	n	m
0	143900	358	0.309	577	17.5	2.4
45	215400	403	0.364	622	15.5	2.3
90	138400	333	0.296	550	7.4	2.7

考虑到轴压试验中材料主要受力方向是沿与焊缝成 90° 的方向，因此按照 90° 方向材性试样的材性参数输入到 ABAQUS 中，粗糙材性按照表 4-2 中对应材性参数进行取值计算，光滑材性按照表 4-3 中对应材性参数进行取值计算。在材性输入时采用弹性段和塑性段分段输入的方式，在屈服强度之前认为材料处于理想弹性阶段，输入相应的弹性模量 E 和泊松比 ν ，在塑性段按照真实应力-塑性应变曲线对应值输入。

4.1.3 单元选择和网格划分

有限元方法的基本思想是将结构离散化，即对连续体进行离散化，利用简化几何单元来近似逼近连续体，然后根据变形协调条件综合求解。所以有限元网格划分一方面要考虑对物体几何形状的精准描述，另一方面也要考虑变形梯度的准确描述。为了正确、合理地建立有限元模型，需考虑网格数量、网格密度、单元阶次、单元形状等因素的影响。WAAM 不锈钢管有限元模型选用的是八节点线

性减缩积分格式的三维实体单元（C3D8R），与完全积分单元相比，线性减缩积分单元仅在单元中心包括一个积分点，在弯曲荷载下不易发生剪切自锁现象，对位移的求解结果比较精确，网格存在扭曲变形时，分析精度也不会受到太大影响。在进行网格划分时，在 WAAM 管厚度方向采用局部布种，划分为 4 个单元。并且对于同一种尺寸的 WAAM 钢管，当采用不同建模方法进行建模时，采用相同的网格划分方式，以消除网格划分对有限元计算结果的影响。网格划分如图 4-3 所示。

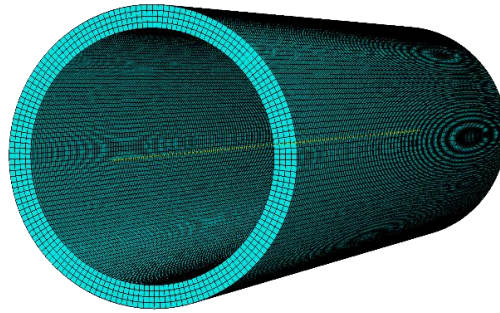


图 4-3 有限元网格划分模型图

Fig. 4-3 Finite element mesh generation model

4.1.4 边界条件和加载方式

WAAM 钢管轴压试验中的加载方式是一端固接，另一端仅在轴向方向上进行加载，因此在有限元模型创建时，采用一端固定（ $U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3$ ）、另一端只有轴向位移（ $U1=U3=UR1=UR2=UR3$ ）的边界条件。在钢管的上下两个端面形心处分别设置两个参考点 RP1 和 RP2，与上下两个端面耦合，如图 4-4 所示，约束 6 个自由度，使参考点和钢管端面具有相同的刚体运动，在加载时，直接将边界条件定义在参考点上，如图 4-5 所示。

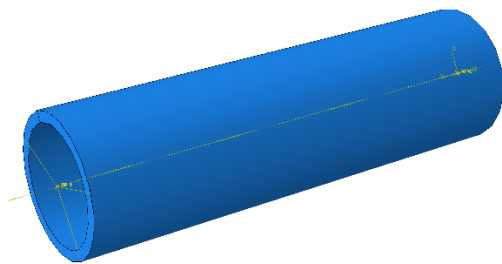


图 4-4 参考点耦合

Fig. 4-4 Reference point coupling

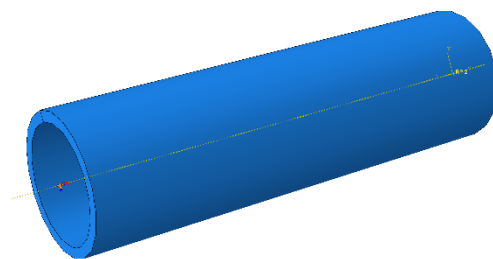


图 4-5 边界条件

Fig. 4-5 The boundary conditions

4.1.5 几何初始缺陷的引入

钢结构构件在制作、运输和安装过程中，不可避免地会产生与设计模型之间的几何偏差，即初始几何缺陷。初始几何缺陷会对构件的性能造成影响，如降低构件的承载力，缺陷过大会影响构件的连接和安装。因此，对构件进行几何初始

缺陷量测, 将其引入到有限元模拟中, 对更精确地进行有限元模拟具有重要意义。目前常用于测量初始几何缺陷的工具包括经纬仪、水平仪、钢尺、卷尺、三维激光扫描仪等。在有限元模拟中引入局部初始缺陷的方法有如下两种: 第一种方法是引入屈曲模态作为初始缺陷, 首先进行线性屈曲分析, 通过施加微小荷载得到屈曲模态, 然后通过调整节点坐标的方式, 将低阶屈曲模态作为非线性屈曲分析的初始几何缺陷, 随后进行非线性屈曲分析; 另一种方法是通过对构件进行整体扫描得到构件的三维模型, 输入到有限元软件中, 作为构件的初始缺陷, 进行非线性屈曲分析。

本文基于参考文献中的 WAAM 不锈钢构件进行有限元模拟, 由于参考文献中未进行几何初始缺陷量测, 因此, 本文采用引入屈曲模态作为初始缺陷的方法, 在有限元模型中引入几何初始缺陷。参考相关文献^[84], 在进行焊接不锈钢圆管短柱有限元模拟时, 建议采用 $0.2t$ 的几何初始缺陷幅值, 考虑到 WAAM 技术加工的钢管与传统方式加工的钢管, 如热轧钢管、焊接钢管等相比, 几何缺陷幅值必定偏大, 因此对于 $C-105 \times 8-355$ 、 $C-140 \times 3.5-560$ 和 $C-170 \times 3.5-580$ 三种尺寸的钢管, 设定其初始缺陷幅值为 $0.4t$ 。对于 $C-260 \times 3.5-1020$ 和 $C-320 \times 3.5-1180$ 两种尺寸的钢管, 由于钢管长度较长, 且厚度较小, 在加工过程中, 势必会产生更大的几何缺陷, 因此设定其初始缺陷幅值为 $0.8t$ 。对于四种不同的有限元建模方法, 采用相同的初始缺陷引入方法和相同的初始缺陷幅值。具体操作步骤为: 首先进行线性屈曲分析, 得到低阶屈曲模态; 然后修改关键字, 通过 `*IMPERFECTION` 命令更新模型节点的几何坐标, 将几何初始缺陷引入到模型上; 随后进行非线性屈曲分析。图 4-6 列举了 $C-170 \times 3.5-580$ 和 $C-320 \times 3.5-1180$ 两种尺寸构件的一阶屈曲模态。

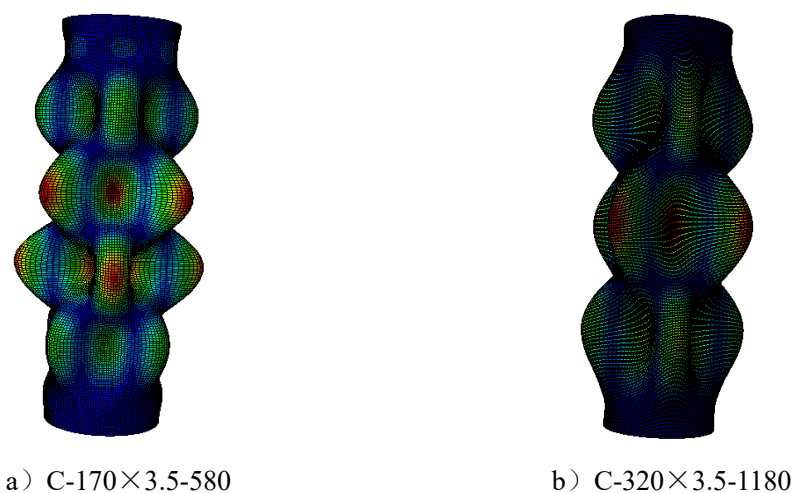


图 4-6 屈曲模态

Fig. 4-6 The buckling modes

4.2 有限元建模方法的验证

本节将粗糙几何形状转换为等效光滑几何形状，并且根据粗糙和等效光滑几何形状以及粗糙和光滑试样的材性参数，两两组合，提出四种建模方法，将有限元计算结果与试验结果进行比较，提出最合理准确的建模方法。

4.2.1 等效光滑模型的建立

上文通过引入连续正弦半波的轮廓表征方法，较为精确地对 WAAM 钢管表面凹凸起伏不平的几何特征进行模拟，除此之外，本文同时对由粗糙几何形状换算而来的光滑形状钢管进行模拟，从而对比何种建模方法更为准确。为了建立等效光滑圆管模型，需求得粗糙几何模型的等效厚度。图 4-7 为粗糙几何形状圆管表面的一个正弦半波，计算一个正弦半波的等效面积 S_{eff} ，如式（4-3）所示，并用等效面积除以周期长度即可求得等效厚度，如式（4-4）所示，由式可知，等效厚度 t_{eff} 与正弦半波的幅值 a 有关，与周期 b 无关。

$$S_{eff} = \int_0^b a \sin\left(\frac{\pi}{b}x\right) dx = \frac{2ab}{\pi} \quad (4-3)$$

$$t_{eff} = \frac{2ab}{\pi} / b = \frac{2a}{\pi} \quad (4-4)$$

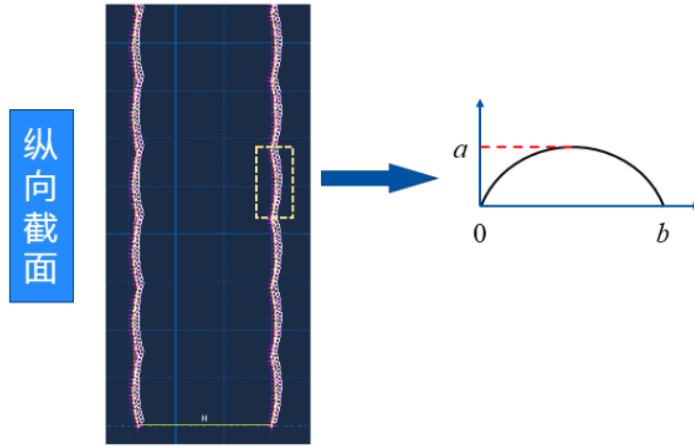


图 4-7 粗糙几何形状

Fig. 4-7 Rough geometry

根据式（4-4）可以将具有正弦半波的粗糙几何形状的圆管截面厚度换算为等效厚度，从而在进行等效光滑模型建模时，忽略粗糙几何形状的影响，直接建模为具有光滑表面的有限元模型，并同时考虑了正弦半波部分的等效厚度。

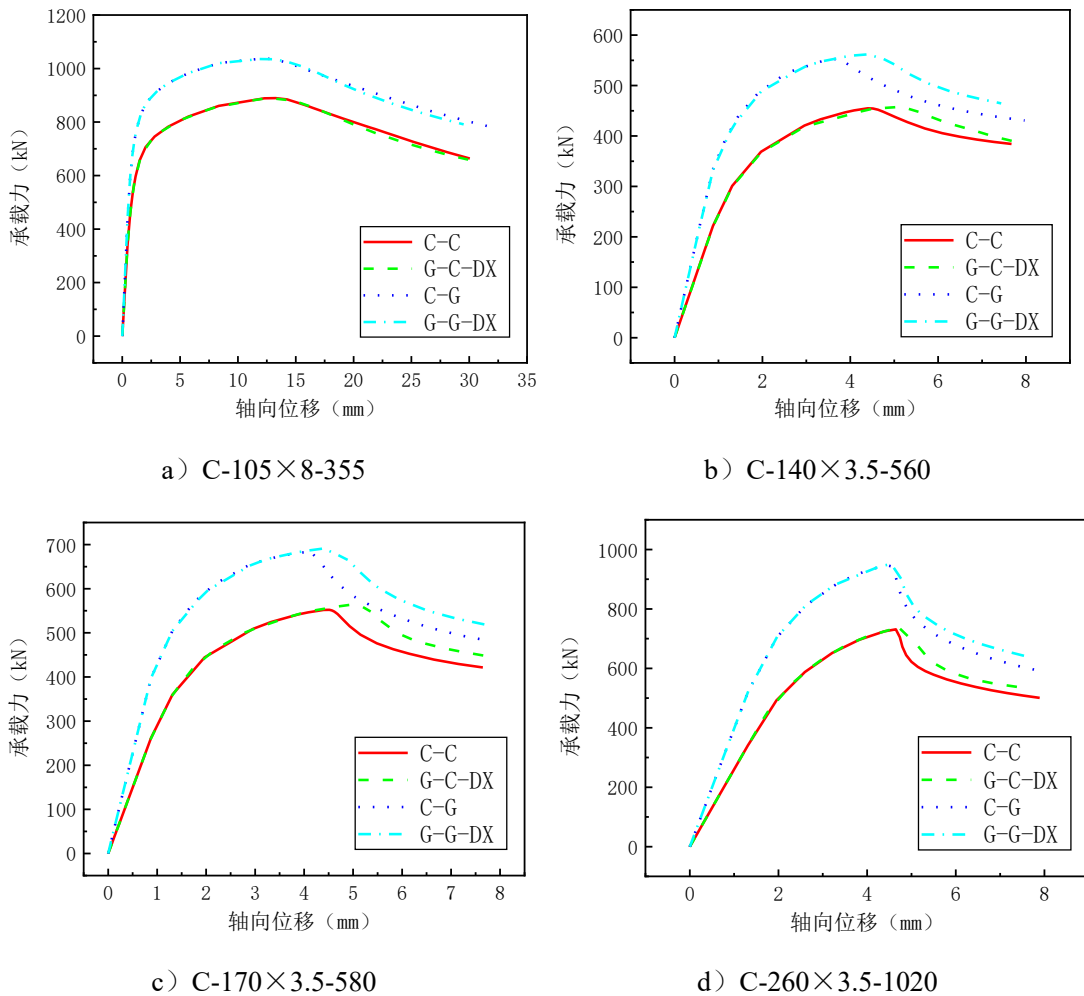
4.2.2 四种有限元建模方法

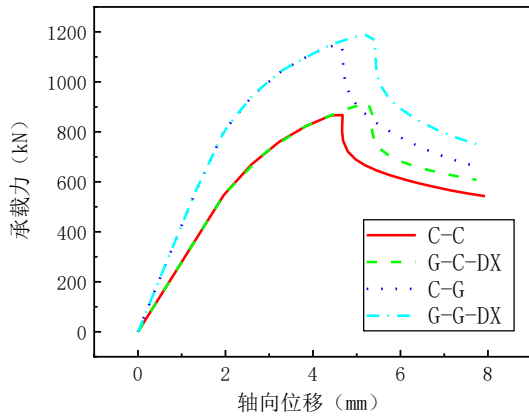
为了探究何种建模方法能够更加适用于 WAAM 圆管短柱轴压模拟，采用四种方法进行有限元模拟，包括粗糙和光滑的几何形状与粗糙和光滑试样材性的两两组合，其中粗糙几何形状指的是根据第三章提出的正弦半波轮廓表征方法建立的粗糙几何表面形状，光滑几何形状根据粗糙几何形状换算而来；粗糙和光滑试样的材性参数如表 4-2 和 4-3，四种建模方法具体如下：

- (1) G-G-DX：等效光滑几何形状和光滑试样材性组合；
- (2) G-C-DX：等效光滑几何形状和粗糙试样材性组合；
- (3) C-C：粗糙几何形状和光滑试样材性组合；
- (4) C-C：粗糙几何形状和粗糙试样材性组合。

4.2.3 有限元模拟结果对比

根据参考文献中的相关试验，对于试验中每一种尺寸的 WAAM 不锈钢圆管短柱，分别采用上述四种方法进行建模，并在 ABAQUS 中进行非线性屈曲分析，得到荷载-位移曲线如图 4-8 所示，并汇总四种方法的计算结果如表 4-4 所示。





e) C-320×3.5-1180

图 4-8 四种方法模拟结果

Fig. 4-8 Simulation results of four methods

表 4-4 四种方法模拟承载力结果 (kN)

Tab. 4-4 Bearing capacity results of four methods (kN)

试件编号	N _{C-C}	N _{G-C-DX}	N _{C-G}	N _{G-G-DX}	N _{G-C-DX} /N _{C-C}	N _{G-G-DX} /N _{C-G}
C-105×8-355	889.59	887.76	1038.19	1037.26	0.9979	0.9991
C-140×3.5-560	454.82	457.21	553.46	561.80	1.0053	1.0151
C-170×3.5-580	552.14	563.78	682.60	691.08	1.0211	1.0124
C-260×3.5-1020	731.30	737.98	945.45	949.65	1.0091	1.0045
C-320×3.5-1180	867.48	916.42	1150.96	1191.34	1.0564	1.0351

根据有限元计算结果可以看出, 对于 C-105×8-355 构件, 属于一类截面, 径厚比较小, 当采用同一种材性参数进行模拟时, 即采用粗糙试样材性或光滑试样材性, 采用粗糙几何形状和等效光滑几何形状模拟的承载力计算结果大致接近, 说明采用粗糙几何形状对有限元计算结果的影响不大。对于其他 4 种尺寸的构件, 分别属于三类截面和四类截面, 当采用同一种材性参数进行模拟时, 采用等效光滑几何形状所得到的承载力均大于粗糙几何形状所得到的承载力, 说明粗糙几何形状对有限元计算结果造成影响, 相对于等效光滑几何形状来说, 承载力计算结果较小一些。并且, 对于同一尺寸构件, 当采用相同几何形状进行模拟时, 光滑材性的模拟结果明显高于粗糙材性的模拟结果, 这是由于受几何形状不规则的影响, 粗糙试样的材性明显低于光滑试样的材性。

上文表 4-1 中给出了 WAAM 不锈钢圆管短柱的轴压试验结果, 从中可以发现, 对于同一种尺寸的构件进行重复试验时, 试验结果存在一定差距, 尤其对于 C-105×8-355 构件, 承载力相差 22.7%, 其他 4 种尺寸构件, 承载力平均相差 5%。将每种构件试验结果取平均值, 并以此与有限元计算结果进行对比, 如图 4-9 所示, 可以看出, C-C 模拟方法即采用粗糙几何形状和粗糙试样材性组合的模拟方法与试验结果最为贴近。图 4-10 为 C-170×3.5-580 和 C-260×3.5-1020 两种

尺寸构件在采用 C-C 模拟方法时的破坏模式图。

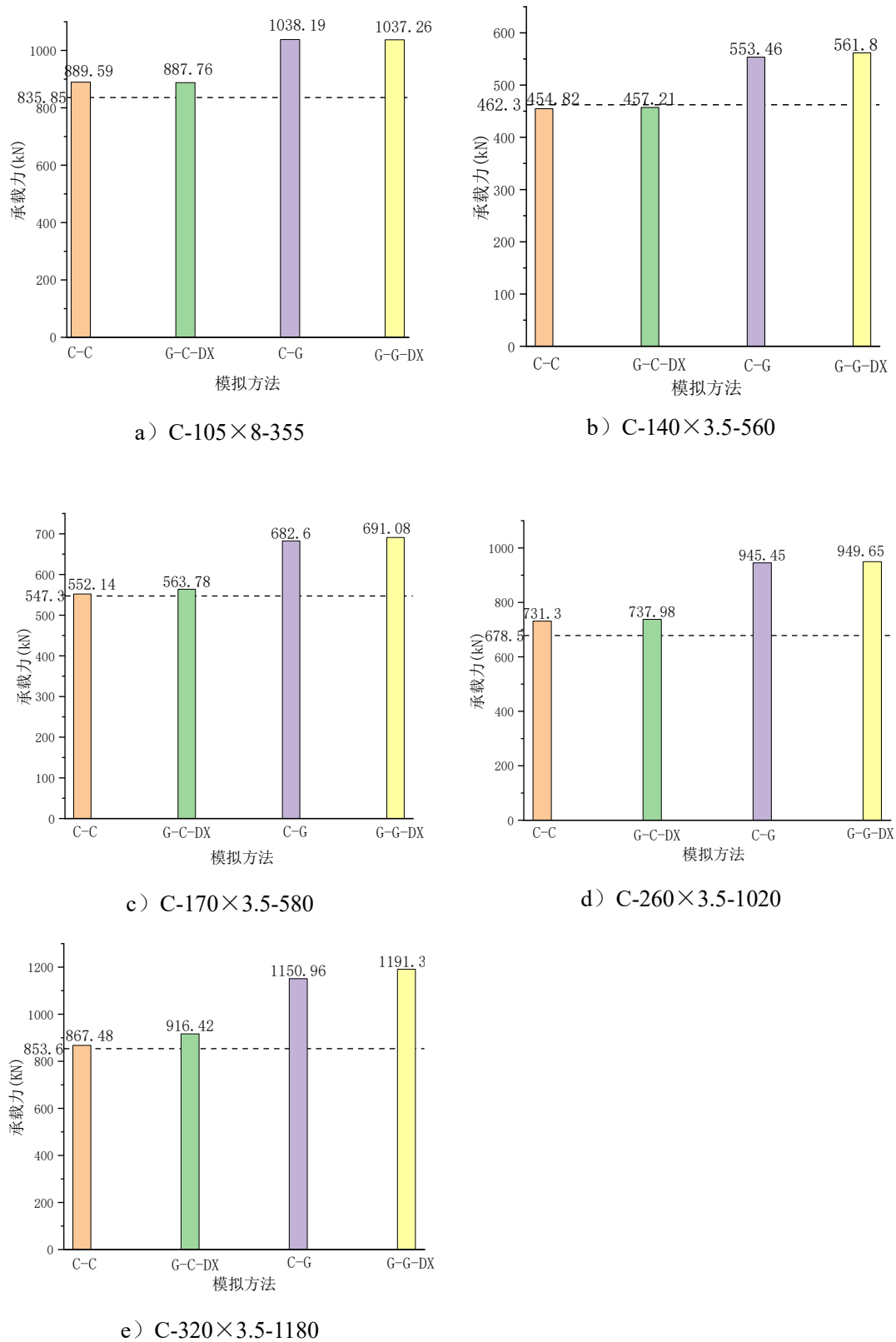
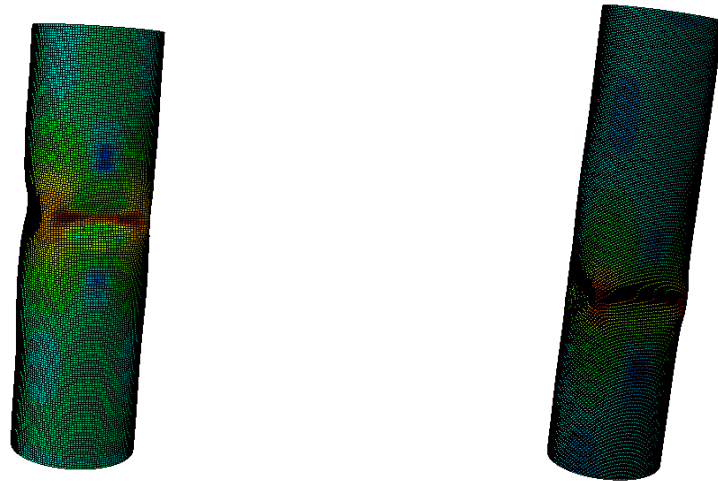


图 4-9 四种模拟方法与试验对比

Fig. 4-9 Four simulation methods compared with the test



a) C-170×3.5-580

b) C-260×3.5-1020

图 4-10 C-C 模拟方法短柱破坏模式

Fig. 4-10 Failure mode of stub column under C-C simulation method

表 4-5 四种有限元方法承载力与试验对比

Tab. 4-5 Comparison of four finite element methods with test

试件编号	有限元模拟承载力 (kN)				有限元与试验承载力相比			
	N_{C-C}	N_{G-C-DX}	N_{C-G}	N_{G-G-DX}	$\left \frac{N_{C-C} - N_{test}}{N_{test}} \right $	$\left \frac{N_{G-C-DX} - N_{test}}{N_{test}} \right $	$\left \frac{N_{C-G} - N_{test}}{N_{test}} \right $	$\left \frac{N_{G-G-DX} - N_{test}}{N_{test}} \right $
C-105×8-355	889.59	887.76	1038.19	1037.26	6.43%	6.21%	24.21%	24.10%
C-140×3.5-560	454.82	457.21	553.46	561.80	1.62%	1.10%	19.72%	21.52%
C-170×3.5-580	552.14	563.78	682.60	691.08	0.88%	3.01%	24.72%	26.27%
C-260×3.5-1020	731.30	737.98	945.45	949.65	7.78%	8.77%	39.34%	39.96%
C-320×3.5-1180	867.48	916.42	1150.96	1191.34	1.63%	7.36%	34.84%	39.57%
平均值		--			3.67%	5.29%	28.57%	30.28%

表 4-5 将四种方法有限元计算结果与试验结果进行对比,发现采用 C-C 方法进行有限元模拟最为准确,承载力平均相差 3.67%,表明采用粗糙几何形状和粗糙材性的组合适用于对 WAAM 圆管短柱进行有限元模拟,证明此种方法是可行的; G-C-DX 方法有限元计算结果与试验值平均相差 5.29%,在误差允许的条件下,也可以采用该方法进行有限元模拟,即采用等效光滑几何形状和粗糙材性的组合,该方法的优势在于无需引入粗糙几何形状,建模操作更为简单方便;其他两种方法采用的是光滑材性,与试验承载力结果相比误差较大,无法适用。

4.3 本章小结

本章根据已有参考文献中的 WAAM 不锈钢圆管短柱轴压试验，采用 ABAQUS 软件建立相应的有限元模型，提出四种建模方法，并与试验结果进行对比，主要得到以下结论：

（1）通过 Python 语句将第三章中提出的正弦半波曲线引入到 ABAQUS 软件中，可建立具有粗糙几何形状的有限元模型。

（2）根据等效厚度原则，建立与粗糙有限元模型对应的等效光滑有限元模型，采用四种方法进行有限元模拟，包括粗糙和光滑的几何形状与粗糙和光滑试样材性的两两组合。

（3）通过计算具有正弦半波轮廓特征粗糙圆管的等效厚度发现，等效厚度与正弦半波的幅值有关，与周期无关。

（4）对比四种有限元建模方法发现，采用粗糙几何形状和粗糙试样材性组合的模拟方法最为准确，适用于对 WAAM 不锈钢圆管短柱进行有限元分析。

（5）考虑到采用粗糙几何形状的有限元建模过程较为复杂，在误差允许的条件下，也可采用等效光滑几何形状和粗糙材性组合的建模方法，操作更为简单方便。

结论与展望

本文主要结论

本文主要研究电弧增材制造不锈钢材料及构件力学性能,进行了一系列的试验研究、数值模拟计算和理论分析。主要内容为:1)进行了216个WAAM不锈钢光滑和粗糙材性试样的单轴拉伸试验,获得其应力-应变曲线;2)3D激光扫描WAAM不锈钢板件,提出一种对WAAM构件粗糙轮廓的表征方法;3)根据已有参考文献中的WAAM不锈钢圆管短柱试验,进行有限元模拟分析。主要的研究结论如下:

(1)通过WAAM不锈钢光滑试样单轴拉伸试验发现,与焊缝方向成 0° 和 90° 方向的试样弹性模量 E_0 较为接近,成 45° 方向的试样弹性模量 E_0 明显高于其他两个方向; 45° 方向试样的屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 高于其他两个方向; 0° 方向试样的抗拉强度最高, 90° 方向次之, 45° 方向强度最低。

(2)对比粗糙和光滑材性试样的试验结果发现,粗糙和光滑试样的弹性模量 E_0 较为接近,光滑试样的屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 、抗拉强度 σ_u 和断后伸长率 ε_f 均高于粗糙试样,主要是由于几何形状不规则导致的应力集中造成的影响。

(3)不同工艺参数下水平方向光滑试样的屈服强度和抗拉强度存在一定的离散性,但总体来说屈服强度处于 $340\text{MPa}\sim 390\text{MPa}$ 之间,抗拉强度处于 $550\text{MPa}\sim 640\text{MPa}$ 之间。

(4)通过对WAAM 316L不锈钢板件进行3D激光扫描以及移动平均值滤波等数据处理工作,提出一种正弦半波的轮廓表征方法,并采用此方法对12块WAAM钢板的轮廓进行表征。

(5)根据已有参考文献中的WAAM不锈钢圆管短柱轴压试验,采用四种建模方法进行有限元分析,并与试验结果进行对比。提出粗糙几何形状和粗糙材性组合的模拟方法最为准确,但考虑到粗糙几何形状建模过程较为复杂,在误差允许的条件下,也可采用等效光滑几何形状和粗糙材性组合的模拟方法,操作更为简单易行。

展望

目前 3D 打印技术在建筑工程领域相关研究和应用较少，尚处于起步阶段，尤其是钢结构领域，在本文所做的工作基础之上，未来的研究工作还可以从以下几个方面进行开展：

（1）本课题仅研究 WAAM 316L 不锈钢材料的力学性能，目前已有多种不锈钢焊丝被广泛应用于电弧增材制造技术，比如 304、308 奥氏体不锈钢焊丝等，对于其他 WAAM 不锈钢材料力学性能需进一步研究。

（2）目前在构件层面上开展 WAAM 不锈钢管的相关试验非常有限，为了探究 WAAM 成形构件的力学性能，需进一步开展更多相关试验。

（3）由于 WAAM 成形构件表面粗糙，几何形状不规则，因此如何更加准确合理地对其进行有限元分析，相关研究目前很少，还需进一步开展相关研究；

（4）由于 WAAM 成形金属构件形状不规则，初始缺陷较多，现有设计方法无法完全适用，有必要对其进行进一步的研究。

（5）拓扑优化技术与 3D 打印技术相结合在复杂节点的设计与建造方面具有独特的优势，在满足力学性能要求的基础上，节约成本，造型美观，对未来建筑业的数字化发展具有重要意义，值得进一步研究。

参考文献

- [1] Buchanan C, Gardner L. Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges[J]. Engineering Structures, 2019, 180(FEB.1): 332-348.
- [2] 冯鹏, 张汉青, 孟鑫淼, 等. 3D 打印技术在工程建设中的应用及前景[J]. 工业建筑, 2019, 49(12):154-165+194.
- [3] 丁烈云, 徐捷, 覃亚伟, 等. 建筑 3D 打印数字建造技术研究应用综述[J]. 土木工程与管理学报, 2015, 32(03):1-10.
- [4] Sobieszek R A. Sculpture as the Sum of Its Profiles: Francois Willeme and Photosculpture in France, 1859-1868[J]. The Art Bulletin, 1980, 62(4):617—30.
- [5] Blanthier J E. Manufacture of Contour Relief-Maps[P]. Google Patents <https://patents.google.com/patent/US473901A/en>. 1892.
- [6] 李昂, 刘雪峰, 俞波, 等. 金属增材制造技术的关键因素及发展方向[J]. 工程科学学报, 2019, 41(02):159-173.
- [7] Facchini L, Magalini E, Robotti P, et al. Ductility of a Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting of prealloyed powders[J]. Rapid Prototyping Journal, 2010, 16(6): 450-459.
- [8] Vilaro T, Colin C, Bartout J D. As-Fabricated and Heat-Treated Microstructures of the Ti-6Al-4V Alloy Processed by Selective Laser Melting[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2011, 42(10): 3190-3199.
- [9] 李晓丹, 李长富, 刘艳梅, 等. 选区激光熔化 Ti-6Al-4V 钛合金的拉伸断裂行为研究[J]. 稀有金属, 2021, 45(03): 279-287.
- [10] Hrabe N, Quinn T. Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) fabricated using electron beam melting (EBM), Part 2: Energy input, orientation, and location[J]. Materials Science and Engineering, 2013, 573(jun.20): 271-277.
- [11] 张飞奇, 陈文革, 田美娇. Ti-6Al-4V 丝材电弧增材制造钛合金的组织与性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(06): 1890-1895.
- [12] 陈双, 吴甲民, 史玉升. 3D 打印材料及其应用概述[J]. 物理, 2018, 47(11): 715-724.
- [13] 郑增, 王联凤, 严彪. 3D 打印金属材料研究进展[J]. 上海有色金属, 2016, 37(01): 57-60.
- [14] 柏久阳, 王计辉, 林三宝, 等. 铝合金电弧增材制造焊道宽度尺寸预测[J]. 焊接学报, 2015, 36(09): 87-90+117.
- [15] 黄丹, 朱志华, 耿海滨, 等. 5A06 铝合金 TIG 丝材-电弧增材制造工艺[J]. 材料工程, 2017, 45(03):66-72.
- [16] 蒋旗, 张培磊, 刘志强, 于治水, 史海川. 冷金属过渡加脉冲电弧增材制造 4043 铝合金薄壁件的组织和拉伸性能[J]. 机械工程材料, 2020, 44(01):57-61.
- [17] 李皓轩. 增材制造不锈钢进展研究[C]. 中国力学学会、浙江大学. 中国力学大会论文

- 集(CCTAM 2019). 中国力学学会、浙江大学:中国力学学会, 2019: 527-535
- [18] 尹凡. 不锈钢电弧增材制造成形工艺研究及尺寸精度控制[D]. 南京理工大学, 2017.
- [19] 刘奋成, 贺立华, 黄春平, 等. 316L 不锈钢电弧堆焊快速成形工艺及组织性能研究[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2013, 27(04):1-5.
- [20] Galjaard S, Hofman S, Ren S. New Opportunities to Optimize Structural Designs in Metal by Using Additive Manufacturing[J]. *Advances in Architectural Geometry*, 2014, 79-93
- [21] MX3D. MX3D Bridge[EB/OL]. <https://mx3d.com/projects/mx3d-bridge/>
- [22] 黄雅楠, 杨璐, 李笑林. 3D 打印金属结构研究进展与展望[C]//中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会第 17 届 (ISSF-2021) 学术交流会暨教学研讨会论文集, 2021: 170-174.
- [23] Wu P, Wang J, Wang X. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry[J]. *Automation in Construction*, 2016, 68:21-31.
- [24] 蒲以松, 王宝奇, 张连贵. 金属 3D 打印技术的研究[J]. *表面技术*, 2018, 47(03): 78-84.
- [25] 林峰, 颜永年, 闫占功, 等. 一种电子束选区同步烧结工艺及三维分层制造设备[P]. 中国北京, 1648802. 2005-08-03
- [26] Baker R. Method of making decorative articles: United States Patent No.1533300[P]. 1925.
- [27] Spencer J D, Dickens P M, Wykes C M. Rapid prototyping of metal parts by three- dimensional welding[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 1998, 212(3), 175–182.
- [28] Ouyang J H, Wang H, Kovacevic R. Rapid prototyping of 5356-aluminum alloy based on variable polarity gas tungsten arc welding: Process control and microstructure[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2002, 17(1): 103-124.
- [29] 孙世杰. 英国克兰菲尔德大学使用增材制造技术制作大型金属结构件[J]. *粉末冶金工业*, 2017, 27(02): 46.
- [30] 贾剑平, 毕凯强, 刘丹, 等. 冷金属过渡技术的研究现状与展望[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(01):6-8+5.
- [31] Khoshnevis B, Carlson A, Leach N, et al. Contour Crafting Simulation Plan for Lunar Settlement Infrastructure Buildup[C]//Earth and Space 2012. California:American Society of Civil Engineers, 2012:1458-1467.
- [32] Cesaretti G, Dini E, De Kestelier X, et al. Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 93: 430-450.
- [33] Buswell R A, Soar R, Gibb A G, et al. Freeform Construction: Mega-Scale Rapid Manufacturing for Construction[J]. *Automation in Construction*, 2007, 16(2): 224–231.
- [34] Ayarkwa K F, Williams S, Ding J, et al. Investigation of pulse advance cold metal transfer on aluminium wire arc additive manufacturing[J]. *Investigation Journal of Rapid Manufacturing*, 2015, 5(1): 44.
- [35] 王晓光, 刘奋成, 方平, 等. CMT 电弧增材制造 316L 不锈钢成形精度与组织性能分析[J]. *焊接学报*, 2019, 40(05): 100-106+165-166.
- [36] 从保强, 苏勇, 齐铂金, 等. 铝合金电弧填丝增材制造技术研究[J]. *航天制造技术*,

- 2016(03): 29-32+37.
- [37] 卜星, 程远, 沈泳华, 等. 基于冷金属过渡的电弧增材制造成形系统[J]. 工业技术创新, 2017, 04(04): 38-43.
- [38] 高福洋, 赵文光, 高奇, 等. 电弧增材制造成形工艺影响因素研究[J]. 材料开发与应用, 2017, 32(02): 59-63.
- [39] 赵昀, 卢振洋, 陈树君, 等. 薄壁结构冷金属过渡增材制造工艺优化[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(08): 82-89.
- [40] 方学伟, 白浩, 姚云飞, 等. 冷金属过渡电弧增材制造多道搭接工艺研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(01):141-147.
- [41] 郭亚轩, 胡洋, 步贤政, 等. 5B06 铝合金电弧增材制造工艺参数对成形质量的影响[J]. 焊接技术, 2018, 47(01): 25-28.
- [42] 杨壮, 王天琪, 李亮玉, 等. 厚壁结构件电弧增材制造成形方法及工艺[J]. 焊接学报, 2019, 40(10): 100-105+165.
- [43] 任香会, 王磊磊, 董春林, 等. 304 不锈钢冷金属过渡电弧增材制造组织及力学性能[J]. 焊接, 2019(09): 44-48+67.
- [44] 张炼, 张兆栋, 刘黎明. 316 不锈钢 TIG 电弧增材制造成形规律研究[J]. 焊接技术, 2018, 47(04): 10-14.
- [45] 王秋雨, 杨可, 徐先宜, 等. 铝合金电弧增材制造成形工艺与性能研究[J]. 电焊机, 2018, 48(09):76-80.
- [46] 闻章鲁, 周琦, 余进. 高氮钢电弧增材制造工艺及组织性能研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(23): 235-238.
- [47] Tolosa I, Garcíandía F, Zubiri F, et al. Study of mechanical properties of AISI 316 stainless steel processed by “selective laser melting”, following different manufacturing strategies[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 51(5-8), 639–647.
- [48] Mertens A, Reginster S, Contrepolis Q, et al. Microstructures and Mechanical Properties of Stainless Steel AISI 316L Processed by Selective Laser Melting[J]. Materials Science Forum, 2014, 783-786, 898–903.
- [49] Meier H, Haberland C. Experimental studies on selective laser melting of metallic parts[J]. Materialwiss Werkstofftech, 2008, 39(9), 665–670.
- [50] Buchanan C, Matilainen V P, Salminen A, et al. Structural performance of additive manufactured metallic material and cross-sections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 136: 35-48.
- [51] Laleh M, Hughes A E, Xu W, et al. Unexpected erosion-corrosion behavior of 316L stainless steel produced by selective laser melting[J]. Corrosion Science, 2019, 155: 67-74.
- [52] 佟鑫, 张雅娇, 黄玉山, 等. 选区激光熔化 304L 不锈钢的组织结构及力学性能分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(05): 1615-1621.
- [53] 周玥丞, 赵阳. 增材制造技术制备 316L 不锈钢的拉伸性能[J]. 土木工程学报, 2020, 53(10):26-35.

- [54] Gardner L, Buchanan C, Kyvelou P, et al. Testing and verification of the world's first metal 3D printed bridge[C]. Proceedings of the 9th International Conference on Steel and Aluminium Structures ICSAS19, UK, Bradford, 2019.
- [55] Kyvelou P, Slack H, Mountanou D D, et al. Mechanical and microstructural testing of wire and arc additively manufactured sheet material[J]. Materials & Design, 2020, 192.
- [56] Laghi V, Palermo M, Gasparini G, et al. Experimental results for structural design of Wire-and-Arc Additive Manufactured stainless steel members[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 167: 105858.
- [57] Laghi V, Palermo M, Tonelli L, et al. Tensile properties and microstructural features of 304L austenitic stainless steel produced by wire-and-arc additive manufacturing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(9):3693-3705.
- [58] Cunningham C R, Wang J, Dhokia V, et al. Characterisation of austenitic 316LSi stainless steel produced by wire arc additive manufacturing with interlayer cooling[C]// Solid Freeform Fabrication 2019: Proceedings of the 30th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference Reviewed Paper. 2019.
- [59] Joosten S K. Printing a stainless steel bridge: An exploration of structural properties of stainless steel additive manufactures for civil engineering purposes[D]. Delft: Delft University of Technology, 2015.
- [60] Haden C V, Zeng G, Carter F M, et al. Wire and arc additive manufactured steel: Tensile and wear properties[J]. Additive Manufacturing, 2017, 16, 115–123.
- [61] Bartsch H, Kühne R, Citarelli S, et al. Fatigue analysis of wire arc additive manufactured (3D printed) components with unmilled surface[J]. Structures, 2021(31): 576-589.
- [62] Zhang R, Gardner L, Buchanan C, et al. Testing and analysis of additively manufactured stainless steel CHS in compression[J]. Thin-Walled Structures, 2020, 159.
- [63] Yan J, Chen M, Quach W, et al. Mechanical properties and cross-sectional behavior of additively manufactured high strength steel tubular sections[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 144.
- [64] He P, Du W, Wang L, et al. Additive Manufacturing and Mechanical Performance of Trifurcated Steel Joints for Architecturally Exposed Steel Structures[J]. Materials, 2020, 13(8).
- [65] Gardner L, Kyvelou P, Buchanan C. Testing OF Wire and ARC Additively Manufactured Tubular Sections[C]// Proceedings of the 17th International Symposium on Tubular Structures(ISTS17). 2019.
- [66] Kyvelou P, Huang C, Gardner L, et al. Structural Testing and Design of Wire Arc Additively Manufactured Square Hollow Sections[J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147(12): 04021218.
- [67] Bolderen G S. Exploration of stability of 3D-Printed steel members[D]. Delft: Delft University of Technology, 2017.
- [68] Laghi V, Palermo M, Gasparini G, et al. Computational design and manufacturing of a half-

- scaled 3D-printed stainless steel diagrid column[J]. Additive Manufacturing, 2020, 36.
- [69] Feucht T, Lange J. 3-D-Printing with Steel: Additive Manufacturing of Connection Elements and Beam Reinforcements[C]// IABSE Symposium 2019 Guimarães: Towards a Resilient Built Environment - Risk and Asset Management. 2019.
- [70] 陈敏超, 赵阳, 谢亿民. 空间结构节点的拓扑优化与增材制造[J]. 土木工程学报, 2019, 52(02): 1-10.
- [71] 赵阳, 陈敏超, 王震. 面向增材制造的索杆结构节点拓扑优化设计[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(03): 58-68.
- [72] 杜文凤, 张帆, 王龙轩, 等. 分叉型铸钢节点的拓扑优化和 3D 打印一体化研究[A]. 天津大学、天津市钢结构学会. 第二十届全国现代结构工程学术研讨会论文集[C]//天津大学、天津市钢结构学会: 全国现代结构工程学术研讨会学术委员会, 2020:6.
- [73] Lange J, Feucht T, Erven M. 3D printing with steel - Additive Manufacturing for connections and structures[J]. Steel Construction, 2020, 13:144-153.
- [74] 杜文凤, 刘琦, 王龙轩, 等. 单层球面网壳的拓扑优化形态及受力性能研究[C]//天津大学、天津市钢结构学会: 全国现代结构工程学术研讨会学术委员会, 2018:7.
- [75] 胡庆杰, 李清朋, 武岳. 基于单元编码的单层网壳结构拓扑优化方法[J]. 空间结构, 2020, 26(02):19-26+63.
- [76] 郭一飞, 王克鸿. CMT 增材制造层间温度影响规律试验研究[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(04): 54-57.
- [77] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中华人民共和国建设部. GB/T 228-2010. 中华人民共和国国家标准-金属材料室温拉伸试验方法[S]. 中国标准出版社, 2010.
- [78] Ramberg W, Osgood W R. Determination of stress-strain curves by three parameters. Technical Note No. 503[R]. Washington DC, USA: National Advisory Committee on Aeronautics (NACA), 1941.
- [79] Hill H N. Determination of stress-strain relations from the offset yield strength values, Technical Note No. 927[R]. Washington DC, USA: National Advisory Committee for Aeronautics, 1944.
- [80] Mirambell E, Real E. On the calculation of deflections in structural stainless steel beams: an experimental and numerical investigation[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2000, 54(1): 109-133.
- [81] Gardner L, Nethercot D A. Experiments on stainless steel hollow sections—Part 1: Material and cross-sectional behaviour[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(9): 1291-1318.
- [82] Quach W M, Teng J G, Chung K F. Three-stage full-range stress-strain model for stainless steels[J]. Journal of Structural Engineering ASCE, 2008, 134(9): 1518-1527.
- [83] 王潇潇. 地面三维激光扫描建模及其在建筑物测绘中的应用[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [84] 柳子涵. 不锈钢轴心受压圆管局部稳定承载性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2021.

攻读硕士学位期间发表的学术论文与科研情况

一、发表学术论文

- [1] 黄雅楠, 杨璐, 李笑林. 3D 打印金属结构研究进展与展望[C]//中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会第 17 届 (ISSF-2021) 学术交流会暨教学研讨会论文集, 2021: 170-174.
- [2] 李笑林, 杨璐, 许镇, 黄雅楠, 代鹏. 建筑结构安全智能化监测研究现状及展望[J]. 土木工程与管理学报, 2021, 38(05): 152-164.

致 谢

时光荏苒，三年时光转瞬即逝。回首过往，心中不禁五味杂陈，时间教会我们成长，感恩一切经历，感恩生活，感恩身边所有人对我的帮助与支持。

首先感谢杨璐老师三年来对我的指导与帮助，在科研方面，老师目光长远，紧跟热点，勇于创新；在生活方面，老师待人儒雅随和，谦逊有礼，对学生更是充满仁爱与包涵。三年来，拜读于杨老师门下，耳濡目染，受益匪浅，得此良师，实属吾幸！

感谢卜宜都老师对我的帮助，在我遇到科研问题时，卜老师悉心解答，生活中更如姐姐般温暖和蔼，十分感激。

感谢课题组的大家庭一路以来对我科研和生活上的帮助，感谢尹飞、宁克洋、代鹏、彭磊、范俊伟、马跃飞、李志林、朱振兴、柳子涵、李笑林、梁耀华等师兄师姐，感谢辛全才、庞旭然、冯紫科、王凌云、张允、孙兆林、贾兆琪、田和伟、范敬钊、郭玉莹、林子倩、李星霞、李道恒等师弟师妹，感谢我的同门韩亚威和冈毅，在我科研和生活上遇到问题时，很感谢大家热情地对我伸出援手，三年来与大家一起走过，留下了许多美好的回忆。

最后感谢我的父母一直以来对我所有决定的全力支持，尊重我的每一个选择，感谢你们的付出与陪伴！