



## 增材制造高强度钢的研究与应用进展

刘 雨, 王长军, 王春旭, 刘振宝, 褚韦涵, 梁剑雄  
(钢铁研究总院有限公司特殊钢研究院, 北京 100081)

**摘 要:** 高强度钢的增材制造已成为金属增材制造领域发展的主要方向之一, 首先, 对增材制造金属材料与技术的研究进展与前沿动态进行了追踪, 分别对低合金超高强度钢、高合金超高强度钢以及高强度不锈钢三种类型高强度钢重点牌号的相关研究进行分析, 详细总结了各种典型高强度钢的制粉和打印工艺、热处理工艺以及组织性能等方面的相关工作。其次, 重点关注了国内外增材制造高强度钢的典型应用和主要研究成果。针对目前高强度钢增材制造领域标准体系建设的不足, 在专用合金的正向设计与研发、大尺寸高精度与智能化装备发展以及标准体系建设三个方面提出了相关建议。基于对增材制造高强度钢的研究与应用进展的分析, 提出了领域重点关注方向以及相关技术进一步发展的趋势, 以助于促进增材制造高强度钢的工业化推广应用。

**关键词:** 增材制造; 高强度钢; 制备工艺; 微观组织; 力学性能

**DOI:** 10. 20057/j. 1003-8620. 2023-00128 **中图分类号:** TG136. 3

## Progress in Research and Applications of Additive Manufacturing of High-Strength Steels

Liu Yu, Wang Changjun, Wang Chunxu, Liu Zhenbao, Chu Weihang, Liang Jianxiong  
(Research Institute of Special Steels, Central Iron & Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China)

**Abstract:** Additive manufacturing (AM) of high-strength steels has become one of the main technological directions in the field of metal additive manufacturing. Firstly the research progress and frontier dynamics of AM metallic materials and technologies are traced, the relevant studies on the key grades of three types high-strength steels has been analyzed respectively, including low alloy ultrahigh-strength steels, high alloy ultrahigh-strength steels and stainless high-strength steels, the relative works on powder metallurgy, printing process, heat treatment, microstructure and mechanical properties of various typical high strength steel have been summarized in detail. Secondly it focuses on the typical applications and main achievements of AM high-strength steels at home and abroad. Furthermore, in view of current shortcomings in the development of the system establishment of AM high-strength steels, relevant suggestions are put forward in three aspects including the forward design and research of special alloys, the development of large-scale high-precision and intelligent facilities, and the system construction of standards. Based on the analysis of research and application progress of AM high-strength steels, the focus of key areas direction and the further development trend of relevant technologies are proposed, in order to further promote the industrial application of AM high-strength steel.

**Key Words:** Additive Manufacturing (AM); High Strength Steels; Manufacturing Processes; Microstructure; Mechanical Properties

增材制造 (additive manufacturing), 又称 3D 打印 (3D printing), 基于所建立的三维数值模型, 通过逐层堆积和精细控制材料成型, 实现复杂结构零部件制造的过程, 具有制造周期短、整体利用率高、综合成本低、打印精度高、智能设计自由度可控等优点。随着国内高精尖产业的快速发展, 加速了产品的推新和升级换代, 致使研制周期不断缩短, 结构复杂性和制造难度不断提高, 传统的制造技术逐渐难以满足要求。因此, 增材制造技术在复杂结构异

形部件制备与修复方面展示出其独特的优势。针对高强度钢在航空航天、海洋运输、核电能源等领域的应用, 与增材制造工艺相结合而快速制备, 逐渐成为领域的研究热点。欧美等发达国家纷纷将其列入国家战略, 同时被《中国制造 2025》定为重要发展方向<sup>[1-2]</sup>。

### 1 增材制造金属材料的前沿动态

金属增材制造是目前增材制造领域技术研发和产业发展最为迅速、工业应用最为广泛的方向。

**基金项目:** 钢铁研究总院自主投入基金项目 (No. 21T62450ZD)

**作者简介:** 刘 雨 (1990—), 男, 博士, 工程师; **E-mail:** liuyu@nercast.com; **收稿日期:** 2023-06-21

**通信作者:** 王长军 (1984—), 男, 博士, 正高级工程师; **E-mail:** wangchangjun@nercast.com

基于金属制粉、3D 打印等装备技术的逐渐成熟,适用于增材制造的金属材料主要包括结构钢、工具钢、钛合金、高温合金、铝合金等,目前比较成熟的牌号有 Inconel 718、Inconel 625、316L、Ti-6Al-4V 和 AlSi10Mg 等。针对装备服役的特殊要求,各类金属牌号的增材制造研发工作逐渐具有定制化特色,包括激光熔覆修复、梯度材料设计、拓扑结构优化等方面,已实现异种金属的复合打印以及结构减重设计。高强度钢由于其成型性好、性能优异以及成本可控等优势,是近些年来金属增材制造技术发展的典型代表之一,主要包括 300M、Aermet 100、17-4PH、18Ni300 等牌号。

近几年,金属材料增材制造技术的应用研究进展迅速,同时,在新材料设计与制备上也有较大进展,如图 1 所示,其技术思路可以为传统金属牌号的成分设计以及工艺优化提供借鉴。南航顾冬冬教授团队于 2021 年 5 月在《Science》上发表关于激光金属增材制造研究的综述性论文<sup>[3]</sup>,提出了“材料-结构-性能”一体化增材制造(MSPI-AM)的整体设计理念。新加坡南洋理工大学于 2021 年 3 月发表在《Progress in Materials Science》的综述文章,系统地阐述了利用增材制造技术进行原位合金化的创新技术理念,其研究结果表明原位合金化具有快速设计和验证新合金的潜力,同时能够进一步丰富增材制造材料与工艺的材料库<sup>[4]</sup>。清华大学联合卡内基梅隆大学等通过第三代高能 X 射线原位高速成像技

术,通过定量勾勒出微小孔隙边界,完成了 P-V 图中缺失的部分,揭示了微气孔的根本起源及其在 LPBF 过程中的运动,阐明了粉末效应对微气孔的作用机理<sup>[5]</sup>。德国马克思普朗克研究所设计了一种专用合金-Fe<sub>19</sub>Ni<sub>5</sub>Ti,通过调整打印工艺参数达到快速淬火和循环退火的工艺效果,进行马氏体转变以及元素扩散配分的精确控制,利用打印工艺所制备出的大马士革钢具有复相微观组织和优异的力学性能<sup>[6]</sup>。

## 2 国内外在增材制造高强度钢领域的进展分析

高强度钢一般是室温屈服强度超过 1 180 MPa 的结构钢,需要具备良好的塑韧性和高屈强比,主要用于制造承受高应力的结构部件,其在航空航天、核电能源等方面具有广泛应用<sup>[7-8]</sup>。高强度钢增材制造技术的发展,是增材制造特种金属发展中的主要领域之一。近 10 年来,随着国内重大科学和工程装备技术的快速发展,有力地促进了增材制造高强度钢新技术的迭代研发。根据高强度钢的合金含量,可将其类型划分为低合金超高强度钢、高合金超高强度钢和高强度不锈钢的增材制造三大类,以下分别对 3 种类型高强度钢的制粉和打印工艺<sup>[9-13]</sup>、热处理工艺<sup>[12-14]</sup>以及组织性能<sup>[13-14]</sup>等进行分析总结。

### 2.1 低合金超高强度钢的增材制造

在低合金超高强度钢增材制造的研究方面,相关研究者<sup>[9, 13-14]</sup>对其打印后热处理态的组织状态

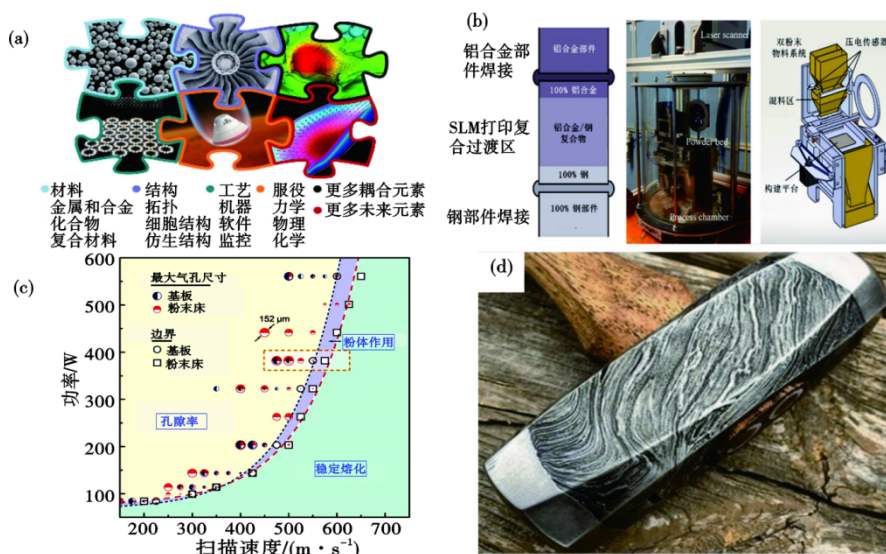


图 1 增材制造金属材料与技术的前沿进展:(a)“材料-结构-性能”一体化增材制造,(b)增材制造原位合金化,(c)完善后增材制造 P-V 区域图,(d)3D 打印大马士革钢

Fig. 1 Frontier progress of AM metallic materials and technologies: (a) material-structure-performance integrated AM, (b) in-situ alloying in AM, (c) improved P-V space for AM, (d) high-strength Damascus steel by AM

以及力学性能进行了分析总结,具有代表性的是 300M<sup>[15-18]</sup>、AF9628<sup>[19-23]</sup>和 4340 钢<sup>[24-25]</sup>,其打印态的组织主要为马氏体和贝氏体,部分存在少量的碳化物和渗碳体。相关打印成型及其后热处理工艺见表 1。董翠等<sup>[15]</sup>是国内较早开展对 300M 钢的激光快速成型研究,采用激光熔化沉积的工艺,制备出的 300M 钢为快速凝固胞状树枝晶,打印态显微组织在沉积高度上存在显著差异,中、上部为马氏体和贝氏体(M-B)复相组织,中、下部为无碳化物贝氏体和岛状马氏体/奥氏体(B-M-A)复相组织,底部为马氏体和贝氏体回火态(Tempered M-B)的复相组织。Rahman-Rashid 等<sup>[16]</sup>采用 300M 钢的激光熔覆修复工艺,通过功率为 1 000 W 的激光再加热后处理(laser reheat post-treatment, LPHT)作为熔覆后的热处理手段,实现了马氏体、残余奥氏体以及 M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>

碳化物的成分分配,有效地对修复部件中的微观组织进行局部调控。Jing 等<sup>[17]</sup>采用 2 000 W 高功率 SLM 工艺进行 300M 钢样件的快速制备,通过优化工艺参数,在沉积速率为 17.28 mm<sup>3</sup>/s 的快速打印工艺下,样件致密度达到 99.9% 以上,相对于焊接件和锻件,其冲击韧性大幅度提升。Jelis 等<sup>[24-25]</sup>采用 SLM 工艺制备出 4340 钢的试验件,并对比分析了原粉和回收粉体、打印样件与基板垂直角度对组织性能的影响,制备出的打印件与锻件进行相同热处理后的力学性能相当。美国空军实验室联合得克萨斯农工大学<sup>[20-21]</sup>联合研发了针对 AF9628 超高强度钢的气雾化制粉和 SLM 成型工艺,所得粉体球形度较好,试验件打印态的抗拉强度和伸长率分别为 1 400 MPa 和 11%,其力学性能是目前报道的高强度钢打印态里相对较高的,粉体形貌以及微观组织表

表 1 低合金超高强度钢的增材制造工艺及后热处理汇总

Table 1 Summary of AM process and post-heat treatment of low alloy ultrahigh-strength steels

牌号	打印工艺	打印参数	后热处理工艺	力学性能
300M <sup>[15]</sup>	LMD	激光功率 3 000 W 光斑直径 5 mm 扫描速率 6 mm/s 沉积层厚度 0.5 mm	未热处理	硬度:回火态 M-B 46HRC B-M-A 53HRC B-M 58HRC
300M <sup>[16]</sup>	LPHT	激光功率 2 000 W 光斑直径 2 mm 扫描速率 350 mm/min 粉体填充速率 7 g/min 单道次沉积长度 40 mm	采用功率 1 000 W 激光 后热处理	硬度: 回火马氏体 590 ~ 680HV 残余奥氏体 410 ~ 500HV
300M <sup>[17]</sup>	SLM	激光功率 2 000 W 扫描速率 400 mm/min 层厚 120 ~ 180 μm 扫描间距 180 μm	未热处理	屈服强度 1 058 ~ 1 120 MPa 抗拉强度 1 149 ~ 1 217 MPa 伸长率 11.8% ~ 12.65%
4340 <sup>[24]</sup>	SLM	扫描速率 600 mm/s 激光功率 170 W 光斑直径 0.1 mm,层厚 20 μm 扫描条宽 10 mm 能量密度 141.7 J/mm <sup>3</sup>	900 °C 均质化 1 h→空冷→816 °C 固溶 1 h→水淬→190 °C 时效 2 h	屈服强度 1 303 ~ 1 310 MPa 抗拉强度 1 372 MPa 伸长率 16% ~ 17%
4340 <sup>[25]</sup>	SLM	扫描速率 700 mm/s 激光功率 185 W 光斑直径 0.1 mm,层厚 20 μm 扫描条宽 4 mm, 能量密度 132 J/mm <sup>3</sup>	593 °C 去应力 1 h→900 °C 均质化 1 h→炉冷至 650 °C→空冷→816 °C 固溶 1 h→油淬→190 °C 双时效 2 h	屈服强度 1 407 ~ 1 496 MPa 抗拉强度 1 903 ~ 1 924 MPa 伸长率 12% ~ 15% K <sub>JIC</sub> 52.9 ~ 54.3 MPa·m <sup>1/2</sup>
AF9628 <sup>[20]</sup>	SLM	激光功率 175 W 扫描速率 1 000 mm/min 层厚 37 μm,扫描间距 70 μm 能量密度 67.6 J/mm <sup>3</sup>	未热处理	屈服强度 1 060 ~ 1 100 MPa 抗拉强度 1 310 ~ 1 430 MPa 伸长率 9.79% ~ 10.89%
30CrMnSiA <sup>[26]</sup>	SLM	激光功率 170 ~ 200 W 光斑直径 135 mm 层厚 30 μm,扫描间距 130 μm 能量密度 43.59 ~ 63.12 J/mm <sup>3</sup>	未热处理	硬度 521 ~ 530HV 抗拉强度 1 530 MPa
DT300 <sup>[27]</sup>	SLM	激光功率 150 ~ 350 W 扫描速率 300 ~ 2 300 mm/min 层厚 40 μm,光斑直径 100 μm 扫描间距 50 ~ 130 μm 能量密度 37.88 ~ 138.89 J/mm <sup>3</sup>	未热处理	屈服强度 1 309 MPa 抗拉强度 1 636 MPa 伸长率 19.79%



过在 18Ni300 的基体中加入 80NiCoCrAlY-12SiC-4Mo-4Cu 强化相,匹配 520 °C 时效处理,保证强塑性的同时将表面硬度提升到了 585HV。Hong 等<sup>[35]</sup>研究了 18Ni300 钢经常规热处理后,采用时效氮化处理,将表面硬度提高到 1 000HV,显著提高了表层的耐磨性能。H13 模具钢由于其高的淬透性、优异的抗热裂能力以及耐磨损能力,其打印态微观组织为铁素体、马氏体、残余奥氏体以及碳化物的复相组织。Telasang 等<sup>[48]</sup>研究了 H13 钢熔覆后热处理工艺(激光辅助表面加热和回火处理)对微观组织、析出相、晶粒尺寸、微观应变以及残余应力的影响。研究表明,采用连续/脉冲模式激光熔覆后,进行激光辅助加热或回火处理,通过保留了表面残余压应力将表面硬度提高了 45%。Joshi 等<sup>[49]</sup>开发了三维多物理场耦合模型,分析了 H13 钢在定向能量沉积循

环加热过程中的热力学和动力学,采用实验和计算集成的方法分析微观结构-性能的演变过程。Oliveira 等<sup>[50]</sup>研究了 H13 钢的微观结构对其弯曲性能的影响,研究表明,随着能量密度的增加,蜂窝组织中残留奥氏体的数量和孔隙率降低,采用 400 J/mm<sup>3</sup>打印功率所获得的致密度和弯曲应力值最高。

高合金超高强度钢增材制造的开发,通常面向高应力载荷和复杂结构等特殊应用场景,由于增材制造技术具备个性化定制的优势,为常规熔铸锻成型所面临的技术瓶颈提供了新的解决思路。高合金超高强度钢的增材制造工艺及后热处理汇总表 2。另外,高合金超高强度钢原材料成本较高,无论从成本角度,还是从研发周期角度,高合金超高强度钢增材制造的技术开发能够实现整体研发成本的合理控制。

表 2 高合金超高强度钢的增材制造工艺及后热处理汇总

Table 2 Summary of AM process and post-heat treatment of high alloy ultrahigh-strength steels

牌号	打印工艺	打印参数	后热处理工艺	力学性能
Aermet 100 <sup>[39]</sup>	LMD	激光功率 6 000 ~ 8 000 W 扫描速率 12 ~ 20 mm/s 光斑直径 6 ~ 8 mm 单层沉积厚度 0.5 ~ 0.8 mm 送粉速率 6.5 ~ 7.5 g/min	未热处理	屈服强度 (1 062±10)MPa 抗拉强度 (1 583±38)MPa 断后伸长率 10.8% ~ 13.8% 断面收缩率 28.1% ~ 44.7% 硬度 498 ~ 522HV
Aermet 100 <sup>[40]</sup>	LMD	激光功率 3 500 ~ 3 700 W 扫描速率 200 mm/min 光斑直径 2.5 mm 单层沉积厚度 0.5 mm	1 200 °C 均质化 2 h → 炉冷 → 900 °C 正火 1 h → 空冷 → 680 °C 退火 16 h → 空冷 → 885 °C 固溶 1 h → 油淬空冷 → -73 °C 深冷 1 h → 回温至室温 → 482 °C 时效 5 h → 空冷	屈服强度 (1 753±4)MPa 抗拉强度 (1 935±5)MPa 断后伸长率 10.1% ~ 14.5% 断面收缩率 56% ~ 62.4% 硬度 (39 ~ 40)HRC
Aermet 100 <sup>[41]</sup>	LMD	激光功率 8 300 ~ 8 400 W 送粉速率 1 500 ~ 1 600 g/h 光斑直径 6.5 ~ 7.5 mm 扫描速率 800 ~ 1 000 mm/min	(1 000 ~ 1 300) °C / (100 ~ 120) MPa 热等静压 2 ~ 4 h → (620 ~ 750) °C 时效 16 h	残余应力 173 ~ 186 MPa
Aermet 100 <sup>[42]</sup>	LMD	激光功率 6 000 ~ 8 000 W 光斑直径 6 ~ 8 mm 扫描速率 15 ~ 20 mm/s 重叠率 30% ~ 45%, 层厚 0.5 ~ 0.8 mm 送粉速率 6.5 ~ 7.5 g/min	(1 100 ~ 1 300) °C / 135 MPa → 热等静压 3 h → 炉冷 → 680 °C 退火 16 h → 空冷 → 885 °C 固溶 1 h → 油淬 → -196 °C 深冷 1 h → 回温至室温 → 482 °C 时效 5 h → 空冷	屈服强度 (1 830±6)MPa 抗拉强度 (2 020±9)MPa 断后伸长率 13% ~ 13.4% 断面收缩率 61.6% ~ 65.2%
AF1410 <sup>[45]</sup>	LAM	激光功率 8 000 W 扫描速率 1 000 mm/min 光斑直径 5 mm 送粉速率 1 250 g/min 单层沉积厚度 2 mm	1 200 °C 均质化 3 h → 900 °C 正火 1 h → 680 °C 退火 6 h → 860 °C 淬火 6 h → -73 °C 深冷 1 h → 510 °C 回火 5 h	屈服强度 (1 488 ~ 1 518)MPa 抗拉强度 (1 602 ~ 1 638)MPa 断后伸长率 12.1% ~ 13.6% 断面收缩率 68.1% ~ 71.0%
AF1410 <sup>[46]</sup>	LAM	激光功率 8 000 W 光斑直径 5 mm 扫描速率 1 000 mm/min 送粉速率 1 250 g/min 单层沉积厚度 2 mm	1 200 °C / 140 MPa 热等静压 3 h → 900 °C 正火 1 h → 680 °C 退火 8 h, 空冷 → 860 °C 固溶 1 h, 油淬 → -73 °C 深冷 1 h, 回温至室温 → 505/515 °C 时效 5 h	屈服强度 (1 588.0±5.7)MPa 抗拉强度 (1 768.0±8.5)MPa 断后伸长率 13.3% ~ 14.7% 断面收缩率 66.4% ~ 67.6%
NASA HR <sup>[53]</sup>	DED	激光功率 350 ~ 2 620 W 扫描速率 1 016 ~ 762 mm/min 送粉速率 15 ~ 27 g/min	980 ~ 1 065 °C 去应力 1.5 ~ 3 h → 1 165 °C 均质化 3 ~ 12 h → 980 ~ 1 065 °C 固溶 1 ~ 3 h → 690/621 °C 双时效 16 h	屈服强度 (540±4)MPa 抗拉强度 (1 060±3)MPa 断后伸长率 38% ~ 40%
18Ni300 <sup>[28]</sup>	SLM	激光功率 120 ~ 600 W 扫描速率 150 mm/min 层厚 30 μm, 光斑直径 180 μm 扫描间距 112 μm	460 ~ 510 °C 时效 1 ~ 8 h	屈服强度 (1 998±32)MPa 抗拉强度 (2 217±73)MPa 断后伸长率 1.34% ~ 1.86% 硬度 57.9 ~ 58.1HRC

续表

牌号	打印工艺	打印参数	后热处理工艺	力学性能
18Ni300 <sup>[29]</sup>	SLM	激光功率 200 W, 层厚 40 $\mu\text{m}$ 光斑直径 75 $\mu\text{m}$ , 扫描间距 80 $\mu\text{m}$	815 $^{\circ}\text{C}$ 淬火 30 min $\rightarrow$ 460 ~ 600 $^{\circ}\text{C}$ 时效 10 min ~ 14 d	屈服强度 (1 870.3 $\pm$ 53.8)MPa 抗拉强度 (1 956.9 $\pm$ 54.2)MPa 断后伸长率 1.75% ~ 2.39%
18Ni300 <sup>[30]</sup>	LMD	激光功率 800 W 扫描速率 600 mm/min 光斑直径 1 700 $\mu\text{m}$ , 层厚 420 $\mu\text{m}$ 扫描间距 900 $\mu\text{m}$ , 能量密度 112 J/mm <sup>3</sup>	480 $^{\circ}\text{C}$ 时效 10 min ~ 50 h	硬度 375 ~ 575HV
18Ni300 <sup>[31]</sup>	SLM	激光功率 180 W, 扫描速率 600 mm/s 层厚 30 mm, 扫描间距 105 mm 能量密度 2.85 J/mm <sup>2</sup>	480 $^{\circ}\text{C}$ 时效 5 h	屈服强度 (1 953.0 $\pm$ 87)MPa 抗拉强度 (2 216.1 $\pm$ 156)MPa 断后伸长率 2.7% ~ 3.5% $K_{IC}$ 75.6 MPa $\cdot\text{m}^{1/2}$ $\Delta K_{th}$ 5.6 MPa $\cdot\text{m}^{1/2}$
18Ni300 <sup>[32]</sup>	SLM	基体: 激光功率 500 W 层厚 20 ~ 100 $\mu\text{m}$ , 扫描间距 50 mm 扫描速率 800 ~ 2 500 mm/s 强化相: 激光功率 1 100 kW 扫描速率 3 ~ 7.5 mm/s, 光斑直径 17mm	460 ~ 520 $^{\circ}\text{C}$ 时效 1 ~ 6 h	抗拉强度 1 930 MPa 断后伸长率 5.0% 硬度 585HV
18Ni300 <sup>[34]</sup>	SLM	激光功率 285 W 扫描间距 110 $\mu\text{m}$ 扫描速率 960 mm/s	900 $^{\circ}\text{C}$ 固溶 2 h $\rightarrow$ 480 $^{\circ}\text{C}$ 时效 4 h $\rightarrow$ 空冷 $\rightarrow$ 480 $^{\circ}\text{C}$ /500 MPa 氮化处理 4 h (70% $\text{H}_2$ + 30% $\text{N}_2$ )	表面硬度 700 ~ 1 000HV
18Ni250 <sup>[36, 38]</sup>	SLM	激光功率 240 ~ 280 W 扫描间距 90 ~ 130 $\mu\text{m}$ 扫描速率 500 ~ 900 mm/s 层厚 30 mm	未热处理	屈服强度 1 053 MPa 抗拉强度 1 159 MPa 断后伸长率 13.5% 断面收缩率 71%
18Ni300 <sup>[37]</sup>	SLM	激光功率 250 W, 扫描间距 75 $\mu\text{m}$ 扫描速率 1 000 mm/s, 层厚 50 mm 光斑直径 80 $\mu\text{m}$	510 $^{\circ}\text{C}$ 时效 6 h	屈服强度 (1 942.4 $\pm$ 42.1)MPa 抗拉强度 (1 984.2 $\pm$ 21.0)MPa 硬度 585.8 ~ 604HV 冲击韧性 (22.62 $\pm$ 0.63)J/cm <sup>2</sup>
H13 <sup>[48]</sup>	激光熔覆	连续型 能量密度 100 ~ 167 J/mm <sup>2</sup> 铺粉密度 9.5 ~ 22 mg/mm <sup>2</sup> 脉冲型 能量密度 133 J/mm <sup>2</sup> 铺粉密度 13.3 mg/mm <sup>2</sup> 脉冲频率 12.5 ~ 30 Hz	未热处理	表面硬度 500 ~ 700HV
H13 <sup>[49]</sup>	L-DED	扫描间距 0.6 mm, 激光功率 350 W 扫描速度 5.8 ~ 14.8 mm/s 能量密度 30 ~ 77 J/mm <sup>2</sup> , 光斑直径 1 mm	未热处理	硬度 540 ~ 720HV
H13 <sup>[50]</sup>	SLM	激光功率 350 ~ 400 W, 层厚 30 $\mu\text{m}$ 扫描间距 90 ~ 105 $\mu\text{m}$ 扫描速度 200 ~ 600 mm/s 能量密度 216 ~ 634.9 J/mm <sup>3</sup>	未热处理	硬度 637 ~ 679HV <sub>0.5</sub>

### 2.3 高强度不锈钢的增材制造

对高强度不锈钢增材制造工艺的开发, 关注较多的是马氏体沉淀硬化不锈钢 17-4PH<sup>[57-62]</sup>、15-5PH<sup>[63]</sup> 以及马氏体时效不锈钢 PH13-8Mo<sup>[64-66]</sup>。打印态马氏体不锈钢的微观组织对成分和冷却速率有较大依赖性, 因此, 主要关注点是打印工艺气氛控制和后热处理工艺对组织性能的作用。Yu<sup>[62]</sup>、LeBrun<sup>[58]</sup> 和 Wang<sup>[61]</sup> 分别分析了工艺参数、固溶和时效处理对 17-4PH 马氏体不锈钢的奥氏体含量的影响, 其中热处理工艺采用 (1 040 ~ 1 050)  $^{\circ}\text{C}$  固溶 + (480 ~ 620)  $^{\circ}\text{C}$  时效, 实现对组织性能的调控。Murr 等<sup>[57]</sup> 研究了氩气和氮气气氛对 17-4PH 粉末以及 SLM 工艺成型后组织状态的影响, 结果表明, 氩气气雾化和 SLM 工艺分别制备的粉体/块体基体为马氏体 ( $\alpha$ -Fe), 氮气气雾化

和 SLM 工艺分别制备的粉体/块体基体为奥氏体 ( $\gamma$ -Fe)。Pasebani 等<sup>[59]</sup> 对比分析了采用水雾化和气雾化手段制备 17-4PH 马氏体不锈钢粉体对 SLM 成型后组织状态的影响, 分析得出气雾化粉末制备后均为马氏体单一相, 而水雾化粉末制备后均为马奥双相组织。Nezhadfar 等<sup>[60]</sup> 采用氮气气氛诱导出更高含量的残余奥氏体用于细化晶粒, 从而使熔池加深、气孔减少, 显著改善了高循环状态下的轴向疲劳性能。Rafi 等<sup>[63]</sup> 研究了 15-5PH 马氏体不锈钢的疲劳性能, 发现其疲劳裂纹主要从表面萌生。稀土微合金化方面的研究, 无论从材料本身角度还是从增材制造角度, 近些年都获得了广泛关注。Wang 等<sup>[64-66]</sup> 采用 Ce、Y 等稀土元素进行 PH13-8Mo 高强度不锈钢的微合金化研究, 超高强度不锈钢钢粉末形貌及微区

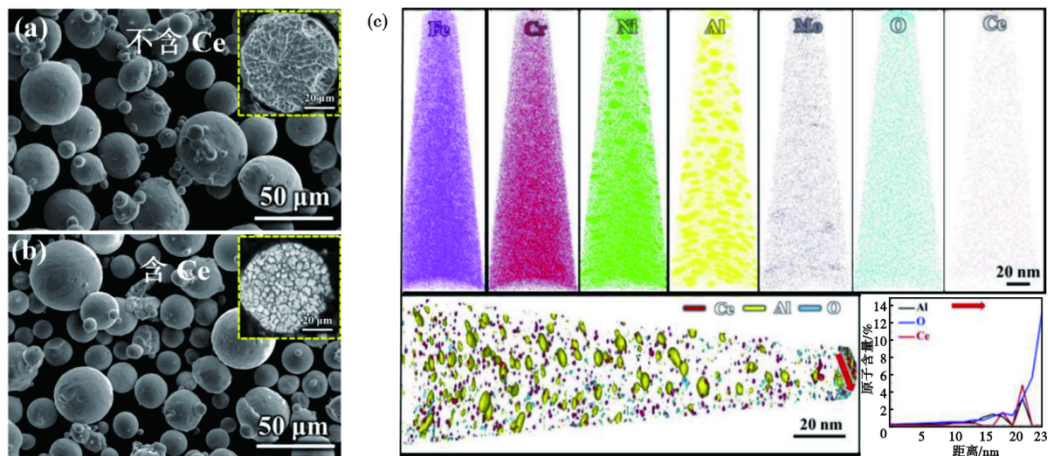


图4 PH13-8Mo 超高强度不锈钢粉末形貌及微区元素分布图<sup>[6]</sup>: (a) 未添加Ce的粉体形貌, (b) Ce 稀土微合金化后粉体形貌, (c) 打印件析出相的APT表征

Fig. 4 Powder morphology and micro elements distribution of PH13-8Mo steel<sup>[6]</sup>: (a) powder morphology without Ce element, (b) powder morphology with Ce element, (c) APT characterization of precipitates in the AM parts

元素分布如图4所示,发现稀土元素可以对粉体物性和增氧量进行明显改善,起到夹杂物的改性、稀土沉淀相强化和晶粒细化的作用,从而同时提升了PH13-8Mo钢的强度和塑韧性。

17-4PH和15-5PH高强度不锈钢的增材制造研究起步相对较早,主要原因是其强塑性好、硬度高、耐腐蚀性优异、制备技术成熟。根据高强度不锈钢的成分特点,增材制造工艺为多道次的循环热处理过程,其固态相变过程相对复杂,尤其是不锈钢存在一定的敏化温度区间,致使其显微组织结构和力学性能与传统制备工艺差别较大,超高强度不锈钢的增材制造工艺及后热处理汇总见表3。因此,仍需要对高强度不锈钢增材制造的凝固过程以及循环固态相变进行系统的研究。

### 3 国内外在增材高强度钢领域的技术发展以及典型应用

随着工业金属3D打印装备的逐渐成熟,越来越多的材料领域研究学者投入到金属增材制造工艺以及配套新材料研发,并形成了一些具有代表性的研究与应用成果。美国国家航空航天局(NASA)于2022年3月公布了HR系列高强度、抗氢特种合金,采用激光粉末定向能量沉积(LP-DED)工艺,成功打印出了直径为1.52 m和高度为1.78 m的整体通道喷嘴如图5(a)所示,应用于液体火箭发动机<sup>[51-53]</sup>,在周期设计和成本方面展现出了显著的优势。美国空军理工学院开发了一种牌号为AF-9628的高性能3D打印钢,打印件如图5(b)所示,其比传统低合金高强度钢打印态的抗拉强度高约20%,能够用于包

括弹射装置等近130个零件的制备<sup>[19-21, 23]</sup>。

目前,在高强度钢增材制造的工业化技术应用方面,国内已具备制造大尺寸金属零件的能力。对于国内高强度钢增材制造技术的研发,目前典型应用部件为飞机起落架和低温厚壁大口径三通管道。早在2008年,300M钢的激光成形技术已申请发明专利<sup>[67]</sup>。此后,北京航空航天大学联合中航工业沈阳飞机设计研究所采用激光直接沉积的方法,制备出了A-100钢工业尺寸的高强度钢飞机起落架<sup>[68]</sup>,如图6所示,支撑了中国飞机起落架外筒及活塞杆等大型复杂部件设计与研发。针对增材制造高强度钢在油气输送方面的应用<sup>[69]</sup>,中国石油工程材料研究院<sup>[70]</sup>通过电弧3D增材制造试验研究平台,采用热源熔化X80钢丝材,制备出了适用于-60℃和-45℃低温环境油气管道工程用 $\phi 1\ 219\ \text{mm}$  TE555增材制造厚壁大口径三通管件<sup>[71]</sup>。

### 4 增材制造高强度钢的现状与未来发展趋势

如今,增材制造作为世界各国未来产业发展新的增长点,代表了先进制造业的发展方向,是智能制造、云制造和数字化制造的核心技术,力争抢占未来科技和产业制高点<sup>[72]</sup>。针对增材制造和其在高强度钢方面的进一步发展,提出以下几点建议。

(1) 基于增材制造工艺的合金正向设计。现阶段金属增材制造高强度钢粉末合金成分基本沿用对应牌号的锻件与铸件合金成分。然而,针对不同的合金设计应基于对应的材料制造工艺,完全采用常规工艺合金成分的适用性并不能完全满足激光

表 3 超高强度不锈钢的增材制造工艺及后热处理汇总  
Table 3 Summary of AM process and post-heat treatment of ultrahigh-strength stainless steels

牌号	打印工艺	打印参数	后热处理工艺	力学性能
17-4 PH <sup>[57]</sup>	SLM	激光功率 200 W 扫描速度 1 000 mm/s 光斑直径 100 ~ 500 μm 能量密度 2 J/mm <sup>2</sup>	482 °C 时效 1 h → 空冷	屈服强度 1 190 MPa 抗拉强度 1 370 MPa 断后伸长率 8.3%
17-4 PH <sup>[58]</sup>	SLM	激光功率 190 W 扫描速度 787 mm/s 光斑直径 100 μm 扫描间距 110 μm 层厚 40 μm	1 040 °C 固溶 30 min 480 ~ 620 °C 时效 1 h	屈服强度 (1 121±9)MPa 抗拉强度 (1 172±2)MPa 断后伸长率 7.9% ~ 11.3% 硬度 346 ~ 354HV
17-4 PH <sup>[59]</sup>	SLM	激光功率 150 W 扫描速度 1 550 mm/s 能量密度 64 J/mm <sup>3</sup> 激光功率 195 W, 扫描速度 1 250 mm/s 能量密度 104 J/mm <sup>3</sup>	1 051 °C 固溶 1 h(H <sub>2</sub> 气氛) → 482 °C 时效 1 h(N <sub>2</sub> 气氛) 1 315 °C 固溶 45 min(H <sub>2</sub> 气氛) → 482 °C 时效 1 h(N <sub>2</sub> 气氛)	屈服强度 1 116 MPa 抗拉强度 1 358 MPa 断后伸长率 5.1% 硬度 45HRC
17-4 PH <sup>[60]</sup>	LB-PBF	激光功率 220 W 扫描速度 755.5 mm/s 扫描间距 110 μm, 层厚 40 μm	1 050 °C 固溶 0.5 h → 空冷 → 552 °C 时效 4 h → 空冷	屈服强度 1 178 MPa 抗拉强度 1 192 MPa 断后伸长率 33% 疲劳寿命 > 11 × 10 <sup>6</sup> 次
17-4 PH <sup>[61]</sup>	SLM	激光功率 400 W 扫描速度 1 000 mm/s 层厚 20 μm, 布粉速率 80 mm/s	650 °C 去应力 1 h → 炉冷	屈服强度 (793±7.1)MPa 抗拉强度 (896±7.6)MPa 断后伸长率 39.9% ~ 44.1%
17-4 PH <sup>[62]</sup>	DMD	激光功率 685 W 扫描速率 10 mm/s 送粉速率 7 g/min, 层厚 0.5 mm 扫描间距 1.1 mm	未热处理	屈服强度 (765±23)MPa 抗拉强度 (1 223±10)MPa 断后伸长率 13.6% ~ 14.4%
15-5 PH <sup>[63]</sup>	SLM	激光功率 195 W 扫描速度 800 mm/s 扫描间距 0.1 mm, 层厚 40 μm	482 °C 时效	屈服强度 (1 297±1.01)MPa 抗拉强度 (1 450±2.06)MPa 断后伸长率 11.46% ~ 13.6% 疲劳寿命 ≥ 10 <sup>5</sup> 次 (900 MPa)
PH13-8Mo <sup>[64, 65]</sup>	SLM	激光功率 200 ~ 260 W 扫描速度 800 ~ 1 000 mm/s 光斑直径 100 μm 扫描间距 80 μm 层厚 30 μm	925 °C 固溶 1 h → 水淬 → 0 °C 深冷处理 4 h → 540 °C 时效 4 h → 空冷至室温	屈服强度 1 443 MPa 抗拉强度 (1 450±2.06)MPa 断后伸长率 12.2% 室温冲击吸收功 124.25 J/cm <sup>2</sup>

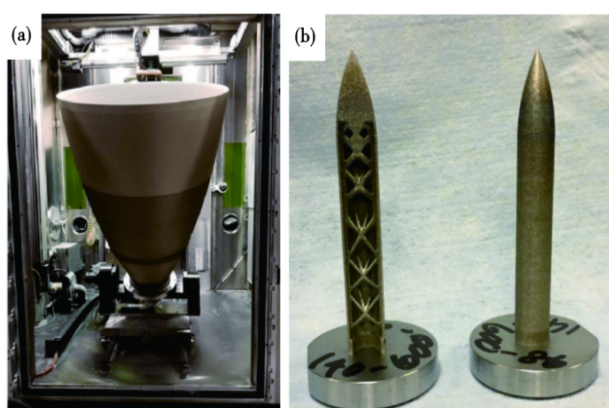


图 5 增材制造高强度钢在航空航天领域的典型应用: (a) NASA HR-1 增材制造抗氢合金在火箭发动机喷嘴上的应用<sup>[51]</sup>, (b) AF-9628 钢增材制造的拓扑设计<sup>[23]</sup>

Fig. 5 Typical applications of AM high-strength steels in aerospace: (a) application of additive manufactured NASA HR-1 hydrogen-resistant alloy on rocket engine's channel nozzle<sup>[51]</sup>, (b) topology design of AF-9628 Steel additive manufactured components<sup>[23]</sup>

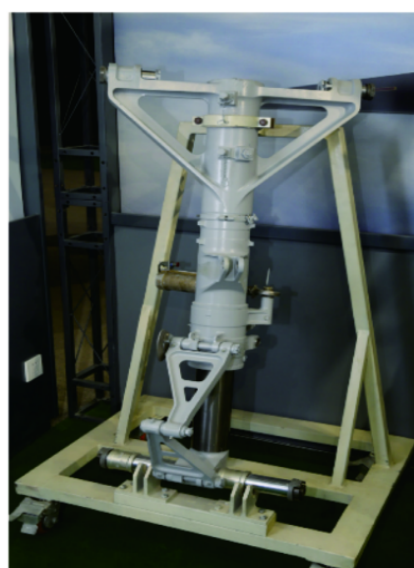


图 6 增材制造 A-100 钢用于飞机起落架<sup>[68]</sup>

Fig. 6 Additive manufactured aircraft landing gears using A-100 steel<sup>[68]</sup>

增材制造。应根据增材制造“微熔瞬凝”的成形特点,进行新型高强度钢的合金成分正向设计以及专用合金研发<sup>[73]</sup>,例如前文提到的 $\text{Fe}_{19}\text{Ni}_5\text{Ti}$ 合金<sup>[6]</sup>。

(2)大尺寸高精度与智能化装备发展。根据高强度钢增材制造技术的总结分析,可以发现高强度钢的增材制造部件主要应用于大型承力或结构功能一体化部件,尤其是对于工业尺寸大型部件的制备。目前的增材制造设备的可操作空间相对较小,定向沉积打印惰性环境不稳定,难以满足大型金属构件的打印需求。另外,为了达到较高的成形精度,现有设备的打印制造效率相对偏低,严重制约了生产效率的提高。未来的增材制造设备将向着大型化、高效化、智能化的方向发展,以提高应用范围以及生产效率<sup>[74]</sup>。对于高端装备的开发,增材制造技术仍需大量基础科研工作的支撑,包括对于增材制造的冶金学与凝固学原理、高精度打印成形控制机理、零部件的后处理组织性能调控以及缺陷的检测与评价技术等,涉及到从科学基础、工程化应用到产业化生产的质量保证各个层次的研究积累。

(3)标准体系建设。建立增材制造粉体制备和打印技术的质量标准体系,实现增材制造技术的过程管控和可复现性,以促进增材制造技术的工业化应用是非常必要的。迄今,ASTM已制定和发布了多个增材制造标准,如增材制造技术的标准术语、增材制造用金属粉末的性能表征规范等。中国在标准体系建设中,已对增材制造钛合金、高温合金等合金体系进行了标准体系分类,但增材制造特殊钢的相关标准体系仍比较薄弱,需要进一步完善相

关特殊钢专用牌号的标准体系建设与分类,为未来增材制造技术的工业化发展奠定基础<sup>[75]</sup>。

## 5 总结

高强度钢增材制造技术开发,是先进制造业的重要发展方向之一。通过对高强度钢增材制造的技术发展和研究现状进行分析总结,得出以下几点结论。

(1)分析低合金超高强度钢、高合金超高强度钢和超高强度不锈钢的研究现状,主要包括制粉和打印工艺、热处理工艺以及组织性能3个方面。目前低合金超高强度钢打印态的力学性能与常规锻态相比塑性偏低,仍需通过合金成分调整和热处理工艺优化进行改善;高合金超高强度钢适用于高应力载荷和复杂结构等特殊应用场景,增材制造技术具有原材料成本优势,可实现整体研发成本的合理控制;高强度不锈钢增材制造的固态相变过程复杂,使其显微组织结构和力学性能与传统制备工艺差别较大,仍需要对高强度不锈钢增材制造的凝固过程以及循环固态相变进行系统的研究。

(2)随着工业金属3D打印装备的逐渐成熟,增材制造技术在大尺寸、高精度的复杂零部件上逐渐进行推广应用。针对航空航天、油气输送等装备服役的特殊要求,金属增材制造工艺以及配套新材料研发,通常具有定制化特色。

(3)针对增材制造和其在高强度钢方面的进一步发展,在基于增材制造工艺的合金正向设计、大尺寸高精度与智能化装备发展以及标准体系建设3个方面提出了相关建议。

## 参考文献

- [1] 卢秉恒,李涤尘.增材制造(3D打印)技术发展[J].机械制造与自动化,2019,42(4):1-4
- [2] 王华明.高性能大型金属构件激光增材制造:若干材料基础问题[J].航空学报,2014,35(10):2690-2698.
- [3] Gu D D, Shi X Y, Poprawe R, et al. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing[J]. Science, 2021,372(6545): eabg1487.
- [4] Sing S L, Huang S, Goh G D, et al. Emerging metallic systems for additive manufacturing: In-situ alloying and multi-metal processing in laser powder bed fusion[J]. Progress in Materials Science, 2021, 119: 100795.
- [5] Zhao C, Parab N D, Li X X, et al. Critical instability at moving keyhole tip generates porosity in laser melting[J]. Science, 2020, 370(6520): 1080-1086.
- [6] Kürnsteiner P, Wilms M B, Weisheit A, et al. High-strength Damascus steel by additive manufacturing[J]. Nature, 2020, 582(7813): 515-519.
- [7] 赵磊,刘宪民,雍岐龙,等.热处理对DT300低合金超高强度钢组织和性能的影响[J].特殊钢,2007,28(2):29-30.
- [8] 赵海民,陈思联,郝立群,等.2000 MPa高强度钢的超高周疲劳破坏行为[J].特殊钢,2008,29(3):13-15.
- [9] 舒宗富,黄春平,林鑫,等.钢的激光增材制造研究进展及前景展望[J].精密成形工程,2019,11(4):81-88.
- [10] 冯凌冰,刘丰刚.增材制造高强钢的研究进展及应用[J].粉末冶金工业,2022,32(3):23-33.
- [11] Brandt M, Sun S J, Leary M, et al. High-Value SLM Aerospace Components: From Design to Manufacture[J]. Advanced Materials Research, 2013, 633: 135-147.
- [12] 谭超林,周克崧,马文有,等.激光增材制造成型马氏体时效钢研究进展[J].金属学报,2020,56(1):36-52.

- [13] 刘丰刚, 张文军, 刘奋成, 等. 激光增材制造低合金超高强度钢的组织与力学性能研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(S1): 77-85.
- [14] 李福泉, 孟祥旭, 董志宏, 等. 激光增材制造钢的后热处理研究现状[J]. 精密成形工程, 2018, 10(1): 97-108.
- [15] 董翠, 张述泉, 李安, 等. 激光熔化沉积300M超高强度钢的显微组织[J]. 金属学报, 2008, 44(5): 598-602.
- [16] Rahman-Rashid R A, Nazari K A, Barr C, et al. Effect of laser reheat post-treatment on the microstructural characteristics of laser-cladded ultra-high strength steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 372: 93-102.
- [17] Jing G Y and Wang Z M. Defects, densification mechanism and mechanical properties of 300M steel deposited by high power selective laser melting[J]. Additive Manufacturing, 2021, 38: 101831.
- [18] Zhan Z X, Ao N, Hu Y N, et al. Defect-induced fatigue scattering and assessment of additively manufactured 300M-AerMet100 steel: An investigation based on experiments and machine learning[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 264: 108352.
- [19] Abrahams R. Low alloy high performance steel : US10450621 [P]. 2019-10-22.
- [20] Seede R, Shoukr D, Zhang B, et al. An ultra-high strength martensitic steel fabricated using selective laser melting additive manufacturing: Densification, microstructure, and mechanical properties[J]. Acta Materialia, 2020, 186: 199-214.
- [21] Hager E M, O'Hara R P, Cobb G R, et al. Development of high density parts in the low-alloy, high-performance steel AF9628 using laser powder bed fusion[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 838: 142656.
- [22] Kudzal A D, McWilliams B A, Taggart-Scarff J, et al. Fabrication of a low alloy ultra-high strength (>1500 MPa yield) steel using powder bed fusion additive manufacturing[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 770: 138512.
- [23] Hager E. Process Parameter Development of Additively Manufactured AF9628 Weapons Steel [M]. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, USA: Air Force Institute of Technology, 2019.
- [24] Jelis E, Clemente M, Kerwien S, et al. Metallurgical and Mechanical Evaluation of 4340 Steel Produced by Direct Metal Laser Sintering[J]. JOM, 2015, 67(3): 582-589.
- [25] Jelis E, Hespos M R, Ravindra N M. Process evaluation of AISI 4340 steel manufactured by laser powder bed fusion[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(1): 63-71.
- [26] Wang L Z, Wei W H. Selective Laser Melting of 30CrMnSiA Steel: Laser Energy Density Dependence of Microstructural and Mechanical Properties[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2018, 31(8): 807-814.
- [27] Jiang C Y, Li X Q, Luo H, et al. DT300 ultra-high strength steel fabricated using selective laser melting: Densification, microstructure, and mechanical properties[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 863: 144541.
- [28] Kempen K, Yasa E, Thijs L, et al. Microstructure and mechanical properties of Selective Laser Melted 18Ni-300 steel[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 255-263.
- [29] Casati R, Lemke J, Tuissi A, et al. Aging Behaviour and Mechanical Performance of 18-Ni 300 Steel Processed by Selective Laser Melting[J]. Metals, 2016, 6(9): 218.
- [30] Jäggle E, Sheng Z D, Kürnsteiner P, et al. Comparison of maraging steel micro- and nanostructure produced conventionally and by laser additive manufacturing[J]. Materials, 2016, 10(1): 8.
- [31] Suryawanshi J, Prashanth K G, and Ramamurthy U. Tensile, fracture, and fatigue crack growth properties of a 3D printed maraging steel through selective laser melting[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 725: 355-364.
- [32] Li J N, Wang X L, Qi W J, et al. Laser nanocomposites-reinforcing manufacturing of SLM 18Ni300 alloy under aging treatment[J]. Materials Characterization, 2019, 153: 69-78.
- [33] 杨东青, 王小伟, 黄勇, 等. 熔化极电弧增材制造18Ni马氏体钢组织和性能[J]. 焊接学报, 2020, 41(8): 6-9.
- [34] Wu W, Wang X, Wang Q, et al. Microstructure and mechanical properties of maraging 18Ni-300 steel obtained by powder bed based selective laser melting process[J]. Rapid Prototyping Journal, 2020, 26(8): 1379-1387.
- [35] Hong Y, Dong D D, Lin S S, et al. Improving surface mechanical properties of the selective laser melted 18Ni300 maraging steel via plasma nitriding[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 406: 126675.
- [36] 刘再西, 卢德宏, 王长军, 等. 气雾化参数对SLM用1720 MPa级马氏体时效钢粉末特性的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(9): 54-59.
- [37] Ferreira D F S, Vieira J S, Rodrigues S P, et al. Dry sliding wear and mechanical behaviour of selective laser melting processed 18Ni300 and H13 steels for moulds[J]. Wear, 2022, 488-489: 204179.
- [38] 刘再西, 卢德宏, 王长军, 等. 基于SLM工艺制备的C250马氏体时效钢的工艺优化及其组织[J]. 金属热处理, 2023, 48(3): 143-150.
- [39] Ran X Z, Liu D, Li A, et al. Microstructure characterization and mechanical behavior of laser additive manufactured ultrahigh-strength AerMet100 steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 663: 69-77.
- [40] 崔灿, 刘栋, 苏亚东, 等. 热处理对激光直接沉积成形A-100钢基体组织及性能的影响[J]. 航空制造技术, 2017, 60(13): 89-92+99.
- [41] 陈汉宾, 李忠盛, 代野, 等. 激光直接沉积A-100钢薄壁环形件的组织与应力[J]. 金属热处理, 2018, 43(8): 220-223.
- [42] Ran X Z, Liu D, Li J, et al. Effects of post homogeneity heat treatment processes on microstructure evolution behavior and tensile mechanical properties of laser additive manufactured ultrahigh-strength AerMet100 steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 723: 8-21.
- [43] 于梦晓, 李佳, 李卓, 等. 热处理对激光增材制造AerMet100超高强度钢动态力学性能的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(11): 62-70.
- [44] 许忠智, 黄顺喆, 戴建科, 等. 淬火温度对电弧微铸锻Aer-

- Met100钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(2): 124-130.
- [45] 王志会, 王华明, 刘 栋. 激光增材制造 AF1410 超高强度钢组织与力学性能研究[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 59-65.
- [46] Li Y F, Cheng X, Liu D, et al. Influence of last stage heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser additive manufactured AF1410 steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 713: 75-80.
- [47] 廉学魁, 厉 勇, 刘宪民, 等. 二次硬化超高强度钢 AF1410 奥氏体晶粒长大行为[J]. 特殊钢, 2010, 31(5): 61-63.
- [48] Telasang G, Dutta Majumdar J, Padmanabham G, et al. Effect of laser parameters on microstructure and hardness of laser clad and tempered AISI H13 tool steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 258: 1108-1118.
- [49] Joshi S S, Sharma S, Mazumder S, et al. Solidification and microstructure evolution in additively manufactured H13 steel via directed energy deposition: Integrated experimental and computational approach[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68: 852-866.
- [50] Oliveira A P, Lima L H Q R, Felipe B C A, et al. Effect of microstructure and defect formation on the bending properties of additive manufactured H13 tool steel [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 3598-3609.
- [51] Blakey-Milner B, Gradl P, Snedden G, et al. Metal additive manufacturing in aerospace: A review[J]. Materials & Design, 2021, 209: 110008.
- [52] Gradl P R, Cervone A, Gill E. Surface texture characterization for thin-wall NASA HR-1 Fe - Ni - Cr alloy using laser powder directed energy deposition (LP-DED)[J]. Advances in Industrial and Manufacturing Engineering, 2022, 4: 100084.
- [53] Soltani-Tehrani A, Chen P S, Katsarelis C, et al. Laser powder directed energy deposition (LP-DED) NASA HR-1 alloy: Laser power and heat treatment effects on microstructure and mechanical properties [J]. Additive Manufacturing Letters, 2022, 3: 100097.
- [54] 黄永建, 刘军会, 杨进航, 等. 增材制造模具的研究进展[J]. 中国冶金, 2019, 29(11): 6-15.
- [55] 周 燕, 文世峰, 魏青松, 等. 增材制造专用模具钢粉末材料设计、制备及其制造技术[J]. 中国材料进展, 2020, 39(5): 356-363.
- [56] 张亮亮, 周 阳, 刘世锋, 等. 模具钢增材制造及其性能的研究进展[J]. 中国冶金, 2022, 32(3): 1-8.
- [57] Murr L E, Martinez E, Hernandez J, et al. Microstructures and Properties of 17-4 PH Stainless Steel Fabricated by Selective Laser Melting [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2012, 1(3): 167-177.
- [58] LeBrun T, Nakamoto T, Horikawa K, et al. Effect of retained austenite on subsequent thermal processing and resultant mechanical properties of selective laser melted 17 - 4 PH stainless steel [J]. Materials & Design, 2015, 81: 44-53.
- [59] Pasebani S, Ghayoor M, Badwe S R, et al. Effects of atomizing media and post processing on mechanical properties of 17-4 PH stainless steel manufactured via selective laser melting[J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 127-137.
- [60] Nezhadfar P D, Anderson-Wedge K, Daniewicz S, et al. Improved high cycle fatigue performance of additively manufactured 17-4 PH stainless steel via in-process refining micro-/defect-structure[J]. Additive Manufacturing, 2020, 36: 101604.
- [61] Wang X F, Liu Y, Shi T Y, et al. Strain rate dependence of mechanical property in a selective laser melted 17 - 4 PH stainless steel with different states[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 792: 139776.
- [62] Yu Z Y, Zheng Y, Chen J M, et al. Effect of laser remelting processing on microstructure and mechanical properties of 17-4 PH stainless steel during laser direct metal deposition [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 284: 116738.
- [63] Rafi H K, Starr T L, Stucker B E. A comparison of the tensile, fatigue, and fracture behavior of Ti - 6Al - 4V and 15-5 PH stainless steel parts made by selective laser melting [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69 (5-8): 1299-1309.
- [64] Wang C J, Liu C, Zhang M X, et al. Effect of Yttrium on the Microstructure and Mechanical Properties of PH13-8Mo Stainless Steels Produced by Selective Laser Melting[J]. Materials, 2022, 15(15): 5441.
- [65] Liu C, Liang J X, Wang C J, et al. Synergistic improvement of strength and ductility via doping cerium into PH13-8Mo stainless steel by laser powder bed fusion [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023 (accepted).
- [66] 王长军, 梁剑雄, 刘振宝, 等. 一种 SLM 用高强度不锈钢粉末、制备方法及其打印工艺 [P]. 北京: CN114393206B [P]. 2022-12-16.
- [67] 王云阁, 王向明, 王华明. 一种 300M 超高强度钢飞机起落架的制造方法: CN101229586 [P]. 2008-07-30.
- [68] 崔 灿, 王向明, 吴 斌, 等. 激光直接沉积成形 A-100 钢起落架制件质量一致性检验方法: CN105458255A [P]. 2016-04-06.
- [69] Ning J, Yu Z S, Sun K, et al. Comparison of microstructures and properties of X80 pipeline steel additively manufactured based on laser welding with filler wire and cold metal transfer [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 10: 752-768.
- [70] 胡美娟, 马秋荣, 吉玲康, 等. 一种油气输送用厚壁大口径三通管件的电弧增材制造方法: CN112935276B [P]. 2022-10-04.
- [71] 掌握先进技术、打造国之重器—中石协组织增材制造低温厚壁大口径三通产品鉴定. <https://www.cpei.org.cn/11/202209/4250.html>, 2022.
- [72] Bandyopadhyay A, Traxel K D, Lang M, et al. Alloy design via additive manufacturing: Advantages, challenges, applications and perspectives [J]. Materials Today. 2022, 52: 207-224.
- [73] 杜宇雷. 3D 打印材料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.
- [74] 汤慧萍. 3D 打印金属材料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.
- [75] 魏青松, 宋 波, 文世峰. 金属粉末激光增材制造技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.