

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.09.04

激光3D打印模具钢工艺和力学性能研究进展

刘爽^{1,2}, 王苏东¹, 郭文强¹, 许荣玉^{1*}

- 江苏威拉里新材料科技有限公司, 江苏 徐州 221001
- 徐矿集团博士后科研工作站, 江苏 徐州 221111

摘要: 激光3D打印技术可实现金属复杂结构一体化成形, 显著降低制造时间及成本。本文综述了模具钢激光3D打印工艺和力学性能的最新研究进展, 系统总结了模具钢激光3D打印工艺、打印设备、打印材料及力学性能的研究成果。重点分析了激光选区熔化(SLM)工艺成形模具钢的关键技术, 并与传统工艺制备的模具钢进行对比。研究表明: 激光3D打印技术(SLM/DED)在模具制造中展现出高致密度(>99.5%)、高精度优势, 可实现随形冷却流道等复杂结构; 等离子旋转电极雾化(PREP)与气雾化(GA)是模具钢粉末主要制备方法; SLM成形的H13钢力学性能与传统锻钢相近, 而18Ni300钢经优化热处理后强度显著提升。当前增材制造模具钢的屈服强度、抗冲击及疲劳性能仍存在提升空间, 未来需优化热处理工艺并深入研究强韧化机制。

关键词: 激光3D打印; 模具钢; 制备工艺; 打印材料; 力学性能

中图分类号: TG76 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)09-0047-12

Recent Advances in Laser 3D Printing of Die Steels: Processing Techniques and Mechanical Properties

LIU Shuang^{1,2}, WANG Sudong¹, GUO Wenqiang¹, XU Rongyu^{1*}

- Jiangsu Vilory Advanced Material Science and Technology Co., Ltd., Xuzhou 221000, China
- Postdoctoral Research Workstation of Xuzhou Mining Group, Xuzhou 221111, China

Abstract: Laser 3D printing technology enables the integrated forming of complex metal structures, significantly reducing manufacturing time and cost. This paper reviews recent research advances in 3D printing processes and mechanical properties of die steels, systematically summarizing research outcomes on die steel printing processes, systems, materials, and mechanical performance. Key analysis focuses on selective laser melting (SLM) technology for forming 18Ni300 die steel, with comparative studies against die steel produced by conventional processes. Research indicates that laser 3D printing technologies (SLM/DED) demonstrate advantages of high density (>99.5%) and precision in die manufacturing, enabling complex structures such as conformal cooling channels. Plasma rotating electrode atomization (PREP) and gas atomization (GA) are identified as primary powder preparation methods for die steel. SLM-formed H13 steel exhibits mechanical properties comparable to traditional forged steel, while optimized heat treatment significantly enhances the strength of 18Ni300 steel. Current limitations in yield strength, impact resistance, and fatigue performance of additively manufactured die steels require further improvement. Future work should prioritize optimizing heat treatment processes and in-depth research on strengthening and toughening mechanisms.

Keywords: laser 3d printing; die steel; processing technique; printing material; mechanical performance

引用格式: 刘爽, 王苏东, 郭文强, 等. 激光3D打印模具钢工艺和力学性能研究进展[J]. 电焊机, 2025, 55(9): 47-58.

Citation: LIU Shuang, WANG Sudong, GUO Wenqiang, et al. Recent Advances in Laser 3D Printing of Die Steels: Processing Techniques and Mechanical Properties[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(9): 47-58.

收稿日期: 2024-03-01 修回日期: 2025-04-07

作者简介: 刘爽(1988—), 男, 博士, 主要从事增材制造用金属粉末材料研究。

通讯作者: 许荣玉(1984—), 男, 高级工程师, 主要从事化学工程与工艺研究。E-mail: xurongyu@wlxcl.com。

0 引言

模具作为现代制造业的基石,广泛应用于航空航天、汽车制造、工业装备、电子、型材加工等制造相关领域中^[1-9],其制造技术的优劣直接体现了一个国家制造业的综合实力。在我国,尽管模具制造产量保持年均15%的高增长率^[10],但仍面临诸多挑战,如模具钢材质不达标、设计理念滞后及加工精度不足等,这限制了高端模具的自主生产能力,导致大量依赖进口^[8,9,11-16]。

模具钢3D打印研究的意义在于,它有望解决传统模具制造中的材料、设计和加工难题,推动模具制造业向更高效、更精准的方向发展。然而,目前该领域的研究仍面临诸多挑战,如打印工艺的优化、打印材料的性能提升以及模具综合力学性能的评估等。

本文综述了模具钢3D打印工艺和力学性能的最新研究进展,重点分析SLM工艺成形18Ni300模具钢的研究成果,并与传统工艺进行对比。同时展望了该技术未来发展方向,旨在为领域内进一步研究和应用提供参考和启示,为模具制造业的转型升级提供有益借鉴。

1 3D打印成形工艺

1.1 概述

3D打印技术^[17-18](又称增材制造,Additive Manufacturing,AM),作为一种革命性的制造方式,通过计算机辅助逐层构建物体,实现了从“减法”到“增材”的转变,不仅节省原材料,还极大拓宽了制造的可能性。该技术起源于20世纪80年代后期,融合信息技术、数控加工、自动化与材料科学等多学科优势,被公认为“21世纪十大颠覆性技术”之一^[19],核心流程为“构建三维模型→切片分层处理→打印参数设置→逐层堆积成形”^[20-21],如图1所示。

自诞生以来,3D打印已发展出熔融沉积制造(FDM,Fused Deposition Modeling)、立体光固化成形(SLA,Stereo Lithography Appearance)、激光粉末烧结(SLS,Selective Laser Sintering)等20余种技术,随着打印分辨率与材料性能的持续提升,复杂

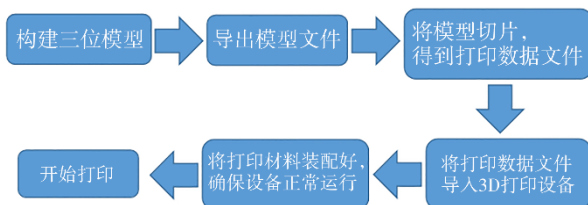


图1 3D打印流程

Fig. 1 Workflow of 3D printing technology

结构金属部件制造成为可能。其中,以激光为能量源的选区激光熔化(SLM, Selective Laser Melting)和定向能量沉积(DED, Directed Energy Deposition)技术,在金属模具钢成形中展现出独特优势:其一,激光束的高能量密度(可达 $10^6 \sim 10^7 \text{ W/cm}^2$)可实现金属粉末的完全熔化,成形件致密度超过99.5%,显著高于SLS技术(通常为90%~95%)^[22-24];其二,SLM工艺的成形精度可达 $\pm 50 \mu\text{m}$,能够直接制造具有随形冷却流道、点阵结构等复杂特征的模具型腔,这是基于熔融挤压的FDM和光固化成形的SLA技术难以实现的^[25-27];其三,激光快速冷却特性(冷却速率达 $10^3 \sim 10^6 \text{ K/s}$)可细化晶粒尺寸,提升模具钢的硬度(较传统铸造提高15%~20%)和抗疲劳性能^[28-30]。这些技术优势使激光3D打印成为高精度、高性能模具制造的优选方案。

当前,3D打印技术在全球范围内备受关注,特别是在航空航天、汽车工业等领域展现出巨大潜力^[31-42],并被《中国制造2025》规划列为推动智能制造的关键手段,对加速高性能材料和高端设备研发重大。相较于传统模具制造,3D打印凭借缩短工期、降低成本、实现高复杂性结构的能力,成为国内外学者研究的热点^[43-45]。

1.2 激光3D打印技术分类

根据美国材料与试验协会标准,激光增材制造技术可分为粉末床熔化法(Powder Bed Fusion, PBF)与直接能量沉积法(Direct Energy Deposit, DED)两类,分别以选区激光熔化(SLM)和激光近净成形(LENS)技术为代表。

(1)SLM技术于20世纪90年代首次提出,其原理是利用高能激光将金属粉末完全熔化后快速冷却凝固,形成高致密度和良好精度的金属零件。SLM设备由铺粉系统、激光系统和电脑控制系统组成,如图2所示^[46]。加工过程中,金属粉末在基板上

均匀铺设,激光束根据层轮廓选择性熔化粉末,逐层加工,直至零件成形。整个过程需在真空或惰性气体保护下进行,以防氧化和缺陷。SLM技术具有较强的操作性、高致密度、优良的尺寸精度和力学性能,但成形效率较低,且成形材料单一无法加工大尺寸零件^[47]。

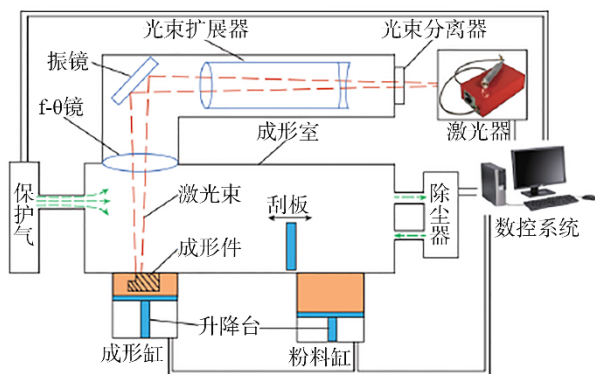


图2 SLM技术成形原理^[46]

Fig. 2 Schematic diagram of SLM

(2) LENS^[48-50]技术最早由美国Sandia国立实验室于1995年提出,基于激光熔覆技术发展而来。其成形原理如图3所示^[51],打印开始前,先将基板置于惰性气体保护箱中,激光束熔化基板形成熔池,同时通过喷嘴将金属粉末送入熔池,粉末被熔化后快速凝固;随后按照设定好的程序,一层打印完成后,激光头抬高进行下一层扫描,直至加工出整个三维实体零件。LENS技术的优势在于:成形效率高、零件尺寸不受限制、能够实现多种材料的复合加工和梯度材料制造,适合个性化生产,并可修复零件表面损伤。

与SLM相比,LENS更适合打印形状简单、尺寸

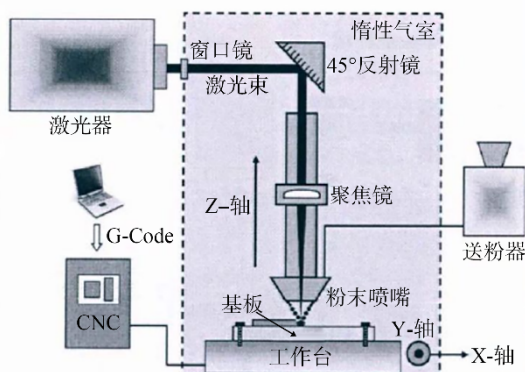


图3 LENS技术成形原理^[51]

Fig. 3 Schematic diagram of LENS

较大的零件。两者的共同点在于均使用单组元金属粉末,并在加工过程中实现100%致密度的金属模型或零件。主要区别在于SLM基于粉末床,而LENS基于局域送粉的激光涂覆技术。

2 模具钢粉末制备工艺

无论是SLM还是LENS成形技术,采用的打印材料均为球形金属粉末。当前主流的金属粉末制备方法有气雾化、水雾化、等离子、等离子旋转电极雾化、离心和氢化工艺等,不同的制备工艺或者不同的生产条件,所制备的粉末颗粒尺寸分布、形貌、成分等都存在差异。如相较于水雾化工艺,气雾化制粉更加圆整,氧含量更低,更适用于SLM成形工艺;而对于纯钛或钛合金等活性较高的金属,等离子旋转电极雾化技术可以获得更好的球形度及粒度分布。针对模具钢材料,常用的球形粉末制备方法主要有等离子旋转电极雾化(PREP)法和气雾化(GA)法^[52]。

2.1 等离子旋转电极雾化(PREP)法

PREP法最早在1974年由美国核金属公司开发成功。其原理是将金属或合金棒料作为自耗电极,在惰性保护气氛中高速旋转,同时通过同轴等离子体电弧加热熔化,熔融金属在离心力作用下形成液膜并飞离电极端面,随后在惰性气体摩擦产生的切应力作用下进一步破碎,最终在表面张力作用下快速冷却凝固,形成球形的金属粉末^[53]。PREP制粉示意如图4所示^[54]。

电极转速、电弧功率、保护气体种类和材料物性都会直接影响通过PREP法制备粉末的纯净度和

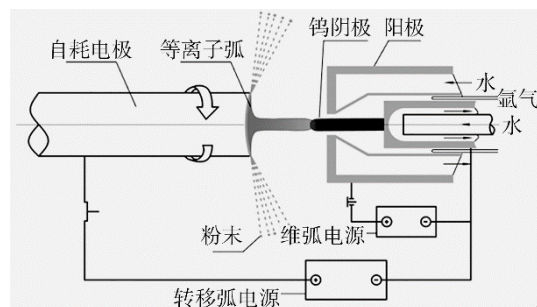


图4 等离子旋转电极雾化制粉示意^[54]

Fig. 4 Schematic diagram of powder preparation by plasma rotating electrode atomization process

球形度,其中电极转速的影响最大^[53]。刘军^[55]等利用PREP设备制备了不同粒度分布的TC4粉末,结果表明粉末粒径随电极转速增加而减小,同时氧含量随粒径减小而升高。杨鑫^[56]等人采用PREP技术制备了Ti基球形粉末,发现当棒料直径为70 mm、转速为18 000 r/min时,粉末球形度最高,达到99.6%,粉末氧含量同样随粒径增大而减小。乔振兴^[57]通过PREP法制备了H13合金粉末,获得了表面光滑、球形度高、物理性能优异的粉末,其松装密度达4.6 g/cm³,但细粉收得率较低,需进一步优化工艺。

PREP法^[54]制备的金属粉末具有优良的球形度、较窄的粒度分布、低氧含量、高表面洁净度及易于控制颗粒大小等优点,是金属增材制造领域的理想粉末制备方法。然而,该方法的加工效率较低、设备运行成本较高,导致生产成本居高不下,限制了其在工业化应用中的推广。尽管如此,PREP法对多种材料的适用性较好,特别适用于小批量生产有色金属、难熔金属等粉末,因此在科研机构及特种材料制备领域仍具有重要应用价值。

2.2 气雾化(GA)法

GA法是利用高速气流将金属和合金熔体破碎成细小液滴,并快速冷却凝固形成粉末的技术。其核心机制是通过雾化喷嘴喷射高速、高压的气体介质流,使熔融金属流破碎成微小液滴,随后在表面张力和冷却速率的共同作用下凝固成球形或类球形粉末^[59]。粉末颗粒的形状主要由熔融金属表面张力、冷却能力、密度、流量和雾化介质的活性决定。一般来说,气体雾化的冷却速度较慢,所制备的粉末通常是球形或类球形,而与之对应的水雾化由于具有相对较高的冷却速度,粉末往往呈多角形或不规则形。气雾化制粉技术早期的研究大多采用“自由下落式喷嘴”,但这种雾化效率低,仅可用于制备50~300 μm的粉末。李鑫^[60]等人研究表明,随着雾化温度的升高,粉末平均粒径降低,但当温度超过一定阈值时,这种影响趋于减弱,如图5所示。王琪^[61]等通过试验发现,随着雾化压力的增大,钛合金粉末的平均粒径会逐渐降低,在氮气、氩气和氦气三种雾化介质中,氦气的雾化效果最佳。孔水龙^[62]等采用真空气雾化法制备了18Ni300马氏

体时效钢粉末,观察到随着粒径增大,粉体表面形貌变差,出现卫星球颗粒等不规则形状,且可能在粉末内部出现中心孔洞。李嘉^[63]等人通过数值模拟方法,结合试验研究给出了最优气雾化参数参考,雾化气体压强5 MPa,气体温度423 K,实际细粉收得率达到了66.59%

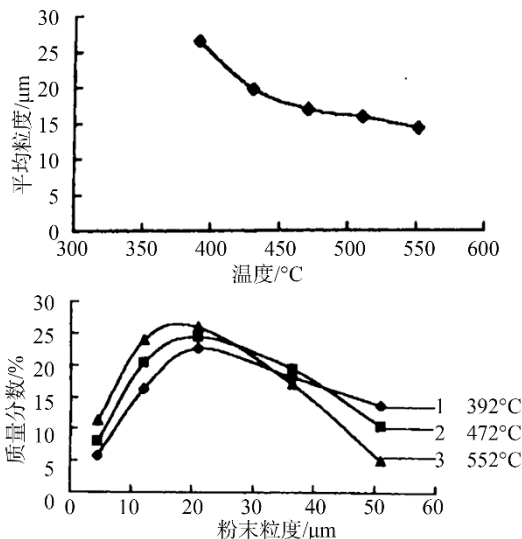


图5 雾化温度对粉末粒径的影响^[60]

Fig. 5 Influence of atomization temperature on powder size

综合对比PREP和GA两种方法,影响PREP制粉质量的因素数量要少于GA,说明PREP对于不同材料的适用性更强,粉末质量的可控性更高,但其生产效率低、生产成本高,所以GA方法更适合于工业化大批量生产,而PREP更适合于满足稀有金属、有色金属和部分难熔金属的个性化生产需要。

3 激光3D打印典型模具钢及其力学性能

模具钢的种类很多,不同类型模具所对应的模具钢性能要求也相差较大。常见的模具钢种类有马氏体不锈钢、高合金低碳钢、优质碳素钢等^[10,64]。H13和18Ni300是目前增材制造领域研究和使用的最多的两种典型钢种,本节对这两种典型模具钢的研究现状以及工艺、微观组织及力学性能进行简要论述。

3.1 激光3D打印H13模具钢及其性能

H13钢是一种热作模具钢^[65],在国标GB/T1299—2014中的牌号为4Cr5MoSiV1。H13钢母材在中

温(约600℃)下的综合性能好,淬透性高,热处理变形率较低,使用寿命高,其具体成分见表1^[53]。

表1 H13钢的化学成分^[53](质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of H13 steel showing (wt. %)				
C	Si	Mn	P	S
0.32~0.45	0.8~1.2	0.20~0.65	≤0.025	≤0.01
Cr	Mo	V	Fe	
4.75~5.50	1.10~1.75	0.8~1.2	余量	

BoRen等^[66]通过优化SLM的打印参数(激光功率和扫描速度),成功制备了致密度高达99.2%的H13模具钢试样,如图6所示。他们发现,随着激光能量密度的增加,相对密度先增大后减小,最佳工艺参数为激光功率170 W和扫描速度400 mm/s。这一结论与严凯等^[67]的研究结果相吻合,即SLM制备的H13钢试样具有高致密度。

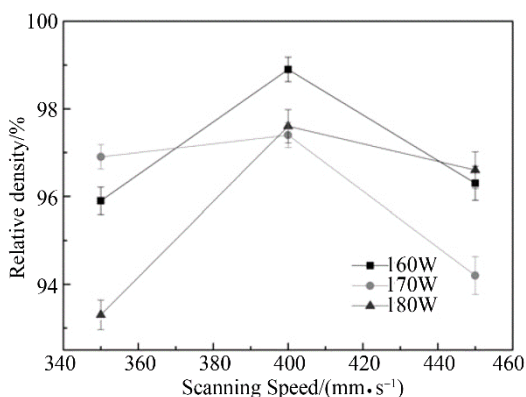


图6 扫描速度与激光速率对H13钢相对密度的影响^[66]

Fig. 6 Effects of process parameters on the density of H13

SLM制备的H13模具钢试样的微观组织主要为马氏体,且包含不同比例的残余奥氏体和细小碳化物。BoRen等^[66]发现其试样中不含碳化物或第二相颗粒,而严凯等^[67]则观察到少量细小碳化物的存在。此外,Faraz Deirmina等^[68]的研究表明,沉积态试样中存在部分回火马氏体和大量残余奥氏体。这些微观组织的差异可能与打印参数、热处理工艺以及材料成分等因素有关。

SLM制备的H13模具钢试样在力学性能上表现出色。Ren等人^[66]的研究表明,其试样的显微硬度和抗拉强度分别与锻造加工热处理的H13锻钢相近,且伸长率更高,如图7所示。严凯等人^[67]通过回火处理进一步提升了试样的力学性能,硬度和强度达到最大,同时保持了较高的延伸率。这些结果

表明,SLM制备的H13模具钢试样在力学性能上可以满足甚至超越传统锻造钢的要求。

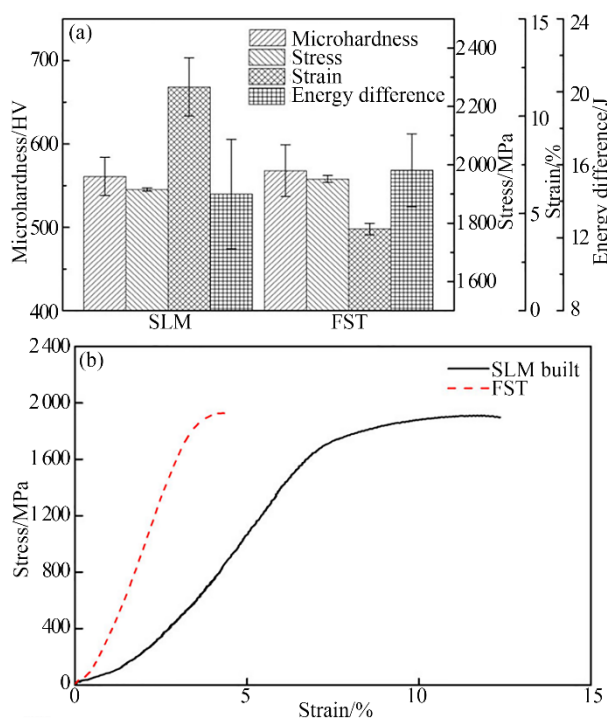


图7 SLM和FST的机械性能对比^[66]

Fig. 7 Mechanical properties of SLM and FST

热处理是改善SLM制备H13模具钢试样力学性能的重要手段。严凯等人^[67]发现,550℃回火处理可以显著提高试样的硬度和强度,同时保持良好的延伸率。Deirmina等^[68]则研究了回火和淬火-回火状态下的试样性能,发现热处理可以显著改变试样的微观组织和力学性能。这些研究为SLM制备H13模具钢试样的热处理工艺提供了有益的指导。Sberg等^[69]的研究表明,经过HIP处理的SLM制备H13模具钢试样具有最高的强度和延展性。HIP处理通过降低孔隙率和减少熔合缺陷,有效提升了试样的力学性能。这一发现为SLM制备高性能模具钢提供了新的思路和方法。Park等^[69]采用LNES法制备了H13模具钢试样,并与锻造H13钢进行了比较。他们发现,沉积态H13钢的硬度较锻造H13钢要高,这可能与SLM制备过程中形成的细晶粒和无第二相析出有关。这一结论与SLM制备试样的微观组织和力学性能特点相一致。

综上所述,激光3D打印技术在制备H13模具钢试样方面表现出显著的优势。通过优化打印参数

和热处理工艺,可以获得高致密度的试样,并具有优异的力学性能。HIP 处理等后续处理工艺可以进一步提升试样的强度和延展性。未来,随着该技术的不断发展和完善,其在模具钢制备领域的应用前景将更加广阔。同时,深入研究激光 3D 打印技术制备过程中微观组织的演变规律以及热处理对性能的影响机制,将为该技术提供更加坚实的理论基础和技术支撑。

3.2 激光 3D 打印 18Ni300 模具钢及其性能

18Ni300 是一种低碳马氏体时效钢,具有强度高、韧性好及耐磨性高的优点^[70],常被用于制作塑料模具,其中以质量分数为 18%Ni 应用最为广泛。由于其优异的焊接性,18Ni300 常被用来进行增材制造。其具体成分见表 2^[52]。

表 2 18Ni300 钢的化学成分(质量分数,%)^[52]

Table 2 Chemical composition of 18Ni300 steel (wt. %)

Al	C	Cr	Co	Fe
0.05~0.15	≤0.03	≤0.50	8.5~9.50	64.6~69.3
Mn	Mo	Ni	Ti	
≤0.10	4.5~5.2	17.0~19.0	0.6~0.8	

陈波^[71]等人采用同轴送粉 LDED 法制备了 18Ni300 钢试样,通过正交试验分析了激光功率、扫描速度和送粉速率等工艺参数对稀释率和外观成形具有显著影响,如图 8 所示,极差分别为 0.246, 0.416, 0.077, 优化后的工艺参数能够获得高质量的成形试样。

陈波等人^[71]还对不同功率下单道多层不同部位的组织进行了比较和分析,发现从底部到顶部晶粒大小依次增大并呈现出明显的方向性,在顶部存在柱状晶向等轴晶的转变。此外,层间晶粒方向各异,存在转向区,顶部存在柱状晶/等轴晶转变区。Yao^[72]等采用激光定向能量沉积法制备了 18Ni300 钢试样,并进行了固溶和时效处理。研究发现,随着时效时间的增加,定向树枝状柱状晶转变为马氏体,气孔数量显著减少。热处理显著提高了试样的显微硬度和拉伸性能。Bai 等人^[73]采用 SLM 方式制备了 18Ni300 钢试件,并进行了不同工艺的热处理。结果表明,ST(固溶处理)和 SAT(固溶+时效)可以消除胞状结构和板状结构,而 DAT(直接时效)对其影响不大。不同热处理状态下试样的显微组织和

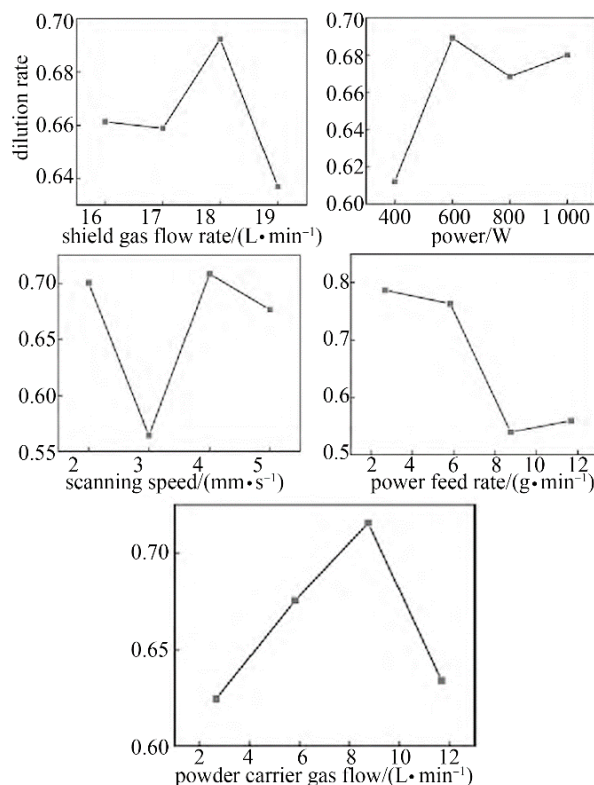


图 8 不同工艺参数对于稀释率影响^[71]

Fig. 8 The influence of processing parameters on dilute on rate

力学性能存在差异,但 SAT 和 DAT 在某些方面的性能相似。

Suryawanshi^[74]等人研究了 SLM 技术制备的 18Ni300 马氏体时效钢在时效前后的组织和室温力学性能。发现时效产生的金属间化合物的纳米级沉淀导致了拉伸强度和屈服强度的提升以及韧性的降低。Mooney 等采用 SLM 制备了 18Ni300 钢试样,并研究了时效处理温度和时间对试样力学性能的影响。结果表明,时效温度在 460~525 °C 范围内时,强度硬度提高,韧性下降;时效温度超过 525 °C 时,延伸率提高,但强度下降。在 525 °C 时效 8 h 时,可获得优异的强韧性配合。Yin^[75]等采用 SLM 制备了 18Ni300 马氏体时效钢试样,并研究了时效温度和时效时间对其摩擦性能的影响。结果表明,时效条件对 SLM 马氏体时效钢的强度和耐磨性有显著影响,在 490 °C/3 h 的时效条件下可以得到最大强度与最优的耐磨性。

3.3 激光 3D 打印典型模具钢工业应用实例

(1) 随形冷却注塑模具的制造。

H13 模具钢通过激光粉末床熔融(LPBF)技术

制造带有复杂随形冷却水道的注塑模具。与传统直线水道相比,3D打印的螺旋形水道使模具冷却效率提升40%,注塑周期缩短18%,且产品翘曲变形率降低23%。该技术已应用于汽车内饰件量产模具(如仪表盘外壳)^[76]。

(2)大型压铸模具的梯度材料修复。

采用激光定向能量沉积(L-DED)技术,在Cr12MoV模具表面熔覆高耐磨马氏体时效钢粉末,形成梯度复合结构。修复后的模具寿命提升至原件的2.1倍,成功应用于铝合金轮毂压铸生产线,单次维修成本降低65%^[77]。

(3)轻量化复合材料成形模具。

基于18Ni300模具钢的拓扑优化设计,通过LPBF技术制备蜂窝结构轻量化热压成形模具。相比传统模具减重52%,热传导均匀性提高30%,已用于航空航天领域碳纤维复合材料部件的生产^[78]。

(4)轻量化复合材料成形模具。

采用选区激光熔化(SLM)技术成形ASP-23粉末高速钢微模具,最小特征尺寸达50 μm ,用于生产医疗导管连接件。模具寿命超过20万次注塑,表面粗糙度 $R_a < 1.6 \mu\text{m}$ ^[79]。

4 总结与展望

3D打印技术由于其独特的逐层累积的打印方式,相比于模具的传统制造方法,具有降低成本、高复杂性制造等优点,在模具钢领域具有广泛的应用前景。

(1)目前模具钢增材制造比较常用的方法有激光选区熔化(SLM)、直接能量沉积(LENS)等。SLM适用于高精度复杂结构(如随形冷却模具),L-DED在大型模具修复与梯度材料制备中优势显著。

(2)金属粉末的制取方法有很多,包括气雾化、水雾化、等离子、等离子旋转电极雾化、离心和氢化工艺等。对于模具钢而言,最常用的球形粉末制备方法等离子旋转电极雾化(PREP)和气雾化(GA)法。两种方法相比,GA方法更适合于工业化大批量生产,而PREP更适合于满足稀有金属、有色金属和部分难熔金属的个性化生产需要。

(3)增材制造已逐步成为模具制造方法的有力

补充,为复杂模具的制造奠定了技术基础。但增材体的最大抗拉强度和屈服强度相对于轧制或者固溶时效后母材的还是偏低,尤其是屈服强度;同时其抗冲击和疲劳性能与传统方法所制造的模具相比还存在较大的差距。

(4)后续的研究应多关注如何提高模具钢的抗冲击和疲劳性能方面,同时还应优化热处理制度,现有方法更多地倾向于固溶时效,而对于近净成形的增材制造来说,如何选择合适的热处理制度、在提高强韧性的同时降低对增材件尺寸精度的影响显得非常重要。

参考文献:

- [1] 姚健,朱喜达,刘宇,等.高碳高合金工模具钢连铸工艺发展现状[J].特殊钢,2022,43(06):66-72.
YAO J, ZHU X D, LIU Y, et al. The Development Status of High Carbon and High Alloy Mold Steel Continuous Casting Process[J]. Special Steel, 2022, 43(06): 66-72.
- [2] 韩永强,吴晓春.国内外塑料模具钢研究现状与发展趋势[J].模具工业,2018,44(09):1-7.
HAN Y Q, WU X C. Research Status and Development Trends of Plastic Mold Steel at Home and Abroad[J]. Mold Industry, 2018, 44(09): 1-7.
- [3] 胡中潮,唐永东,高忠玉,等.H13模具钢铝合金工件生产应用现状综述[J].模具制造,2022,22(02):81-85.
HU Z C, TANG Y D, GAO Z Y, et al. Overview of the Production and Application Status of H13 Mold Steel and Aluminum Alloy Workpieces[J]. Mold Manufacturing, 2022, 22(02): 81-85.
- [4] 邱凌,吴晓春.国内外冷作模具钢发展概述[J].模具制造,2017,17(11):89-96.
QIU L, WU X C. Overview of the Development of Cold Work Mold Steel at Home and Abroad[J]. Mold Manufacturing, 2017, 17(11): 89-96.
- [5] 王春涛,白植雄,贾永闯,等.热冲压模具钢发展现状与趋势[J].模具制造,2017,17(09):93-97.
WANG C T, BAI Z X, JIA Y C, et al. The current development status and trend of hot stamping die steel[J]. Mold Manufacturing, 2017, 17(09): 93-97.
- [6] 吴茜,刘斌.模具材料研究与应用现状及发展趋势[J].模具工业,2017,43(03):1-7+20.
WU Q, LIU B. Current Status and Development Trends

- of Research and Application of Mold Materials [J]. Mold Industry, 2017, 43(03): 1-7+20.
- [7] 夏书文, 左鹏鹏, 吴晓春. 国内外压铸模具钢发展概述[J]. 模具制造, 2017, 17(07): 93-99.
- XIA S W, ZUO P P, WU X C. Overview of the Development of Die Casting Mold Steel at Home and Abroad [J]. Mold Manufacturing, 2017, 17(07): 93-99.
- [8] 张旭, 何文超, 李东辉, 等. 热作模具钢热疲劳机理及性能改善的研究现状[J]. 金属热处理, 2020, 45(09): 10-20.
- ZHANG X, HE W C, LI D H, et al. Current research status on thermal fatigue mechanism and performance improvement of hot work mold steel [J]. Metal Heat Treatment, 2020, 45(09): 10-20.
- [9] 钟强, 李秀兰, 何伟, 等. 冷作模具钢的深冷处理研究现状[J]. 四川冶金, 2019, 41(03): 8-10.
- ZHONG Q, LI X L, HE W, et al. Research status of deep cooling treatment of cold work mold steel [J]. Sichuan Metallurgy, 2019, 41(03): 8-10.
- [10] 吴晓春, 左鹏鹏. 国内外热作模具钢发展现状与趋势[J]. 模具工业, 2013, 39(10): 1-9.
- WU X C, ZUO P P. The Development Status and Trends of Hot Work Mold Steel at Home and Abroad [J]. Mold Industry, 2013, 39(10): 1-9.
- [11] 陈东, 褚作明, 金康, 等. 国内模具选材现状与发展[J]. 金属热处理, 2009, 34(11): 115-119.
- CHEN D, CHU Z M, JIN K, et al. The current situation and development of domestic mold material selection and utilization [J]. Metal Heat Treatment, 2009, 34(11): 115-119.
- [12] 李晓成, 吴晓春. 易切削塑料模具钢发展及展望[J]. 模具制造, 2017, 17(01): 97-102.
- LI X C, WU X C. Development and Outlook of Easy Cutting Plastic Mold Steel [J]. Mold Manufacturing, 2017, 17(01): 97-102.
- [13] 刘宝石, 刘明, 牟风, 等. 热作模具钢 4Cr5Mo2V 的缺陷分析[J]. 模具制造, 2018, 18(09): 79-82.
- LIU B S, LIU M, MOU F, et al. Defect analysis of hot work mold steel 4Cr5Mo2V [J]. Mold Manufacturing, 2018, 18(09): 79-82.
- [14] 吴柏良, 陈旋, 钟雨轩, 等. 锻造过程中大截面塑料模具钢中空洞缺陷的闭合行为[J]. 上海金属, 2021, 43(02): 105-113.
- WU B L, CHEN X, ZHONG Y X, et al. The Closing Behavior of Void Defects in Large Section Plastic Mold Steel during Forging Process [J]. Shanghai Metal, 2021, 43(02): 105-113.
- [15] 杨娥, 张军. H13 模具钢心部缺陷原因分析[J]. 物理测试, 2014, 32(05): 40-43.
- YANG E, ZHANG J. Analysis of the causes of defects in the H13 mold steel core [J]. Physical testing, 2014, 32(05): 40-43.
- [16] 朱俊. 探索模具钢的市场需求及发展趋势[J]. 中国钢铁业, 2014(03): 32-34.
- ZHU J. Exploring the market demand and development trends of mold steel [J]. China Steel Industry, 2014, (03): 32-34.
- [17] 赵延国, 柳传鑫, 许淙博, 等. 3d 打印技术及设备发展现状[J]. 机械研究与应用, 2021, 34(03): 224-227.
- ZHAO Y G, LIU C X, XU C B, et al. The current development status of 3D printing technology and equipment [J]. Mechanical Research and Application, 2021, 34(03): 224-227.
- [18] 杨德安. 3d 打印材料产业发展现状及建议[J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(02): 29-31.
- YANG D A. The current development status and suggestions of the 3D printing material industry [J]. Modern Industrial Economy and Information Technology, 2023, 13(02): 29-31.
- [19] 刘梦梦, 朱晓冬. 3d 打印成形工艺及材料应用研究进展[J]. 机械研究与应用, 2021, 34(04): 197-202.
- LIU M M, ZHU X D. Research progress on 3D printing molding technology and material applications [J]. Mechanical Research and Application, 2021, 34(04): 197-202.
- [20] 郭丽波. 3d 打印技术原理及优势分析[J]. 产业与科技论坛, 2018, 17(22): 59-60.
- GUO L B. Analysis of the Principles and Advantages of 3D Printing Technology [J]. Industry and Technology Forum, 2018, 17(22): 59-60.
- [21] 张家寓. 3d 打印技术原理及发展应用[J]. 软件, 2019, 40(09): 172-175.
- ZHANG J Y. Principles and Development Applications of 3D Printing Technology [J]. Software, 2019, 40(09): 172-175.
- [22] 朱逸韬, 黄卫东, 张伟杰, 等. 基于 SLM 的 18Ni-300 模具钢工艺参数优化[J]. 福建工程学院学报, 2020, 18(06): 570-575.
- ZHU Y T, HUANG W D, ZHANG W J, et al. Process parameter optimization of SLM-formed 18Ni-300 maraging steel [J]. Journal of Fujian University of Technology, 2020, 18(06): 570-575.

- [23] 张国会,郭绍庆,黄帅,等.选区激光熔化技术制备GH4169合金的致密度研究[J].激光与光电子学进展,2020,57(03):163-169.
ZHANG G H, GUO S Q, HUANG S, et al. Research on density of GH4169 alloy fabricated by selective laser melting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(03): 163-169.
- [24] 程博,张璧,白倩,等.选区激光熔化马氏体时效钢(18Ni300)工艺参数研究[J].大连理工大学学报,2018,58(05):471-478.
CHENG B, ZHANG B, BAI Q, et al. Process parameters of selective laser melted 18Ni300 maraging steel [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2018, 58(05): 471-478.
- [25] 陈超越,赵旺,蒋丹青,等.激光粉末床熔融制备高强钢的研究进展与展望[J].钢铁,2024,59(06):22-37.
CHEN C Y, ZHAO W, JIANG D Q, et al. Progress and prospects of laser powder bed fusion for high-strength steels[J]. Iron & Steel, 2024, 59(06): 22-37.
- [26] 陈侠宇,黄卫东,张伟杰,等.基于灰色关联分析的选区激光熔化成形18Ni300模具钢多目标工艺优化[J].中国激光,2020,47(05):341-351.
CHEN X Y, HUANG W D, ZHANG W J, et al. Multi-objective process optimization of SLM-formed 18Ni300 mold steel based on grey relational analysis [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(05): 341-351.
- [27] Maximenko A L, Olevsky E A. Pore filling during selective laser melting - assisted additive manufacturing of composites[J]. Scripta Materialia, 2018, 149: 75-78.
- [28] 张璐,巩建强,杜文强,等.经SLM打印成形的18Ni300热处理研究[J].应用激光,2019,39(04):660-665.
ZHANG L, GONG J Q, DU W Q, et al. Heat treatment of SLM-printed 18Ni300 steel [J]. Applied Laser, 2019, 39(04): 660-665.
- [29] 魏富涛,许冠,毛卫东,等.18Ni300模具钢激光选区熔化工艺优化及力学性能研究[J].粉末冶金技术,2019,37(03):214-219.
WEI F T, XU G, MAO W D, et al. Process optimization and mechanical properties of SLM-formed 18Ni300 mold steel [J]. Powder Metallurgy Technology, 2019, 37(03): 214-219.
- [30] 张海青,游良涛,程忠辉,等.氧化铝对SLM成形18Ni300模具钢力学性能的影响[J].激光与光电子学进展,2021,58(23):256-263.
ZHANG H Q, YOU L T, CHENG Z H, et al. Effect of alumina on mechanical properties of SLM-formed 18Ni300 mold steel [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(23): 256-263.
- [31] 段宣政,赵菲,王淑丹,等.国内外金属3d打印材料现状与发展[J].焊接,2020(02):49-55+68.
DUAN X Z, ZHAO F, WANG S A, et al. The current situation and development of metal 3D printing materials at home and abroad [J]. Welding & Joining, 2020 (02): 49-55+68.
- [32] 程熹乔,瞿申红.3d打印技术在鼻科学的应用及进展[J].山东大学耳鼻喉眼学报,2024,38(2):128-136.
CHENG X Q, QU S H. The application and progress of 3D printing technology in rhinology [J]. Journal of Otolaryngology and Ophthalmology of Shandong University, 2024, 38(2): 128-136.
- [33] 贾平,李辉,孙棕檀.国外3d打印技术在航天领域的应用分析[J].国际太空,2015(04):31-34.
JIA P, LI H, SUN Z T. Analysis of the application of foreign 3D printing technology in the aerospace field [J]. International Space, 2015(04): 31-34.
- [34] 武瑞刚,韩利萍,楚蓓蓓,等.3d打印技术在航天企业的应用[J].机械工程与自动化,2020(06):225-226.
WU R G, HAN L P, CHU B B, et al. The application of 3D printing technology in aerospace enterprises [J]. Mechanical Engineering and Automation, 2020 (06): 225-226.
- [35] 肖升利.3d打印技术在航天制造中的应用[J].科技创新导报,2018,15(04):13-14.
XIAO S L. The application of 3D printing technology in aerospace manufacturing [J]. Technology Innovation Report, 2018, 15(04): 13-14.
- [36] 刘亦文.3d打印技术在机械制造中的应用[J].现代工业经济和信息化,2022,12(05):135-136.
LIU Y W. The application of 3D printing technology in mechanical manufacturing [J]. Modern Industrial Economy and Information Technology, 2022, 12 (05): 135-136.
- [37] 姚清.3d打印技术对机械制造业的影响分析[J].中国新技术新产品,2018(18):13-14.
YAO Q. Analysis of the Impact of 3D Printing Technology on the Mechanical Manufacturing Industry [J]. China's New Technologies and Products, 2018 (18): 13-14.
- [38] 余秀艳.3d打印技术对我国传统制造业的影响[J].时代农机,2015,42(02):65+67.
YU X Y. The Impact of 3D Printing Technology on

- China's Traditional Manufacturing Industry[J]. Era Agricultural Machinery, 2015, 42(02): 65+67.
- [39] 李勇, 巴发海, 许鹤君. 3d打印技术的发展和挑战[J]. 理化检验(物理分册), 2018, 54(11): 799-804+825.
- LI Y, BA F H, XU H J. The development and challenges of 3D printing technology [J]. Physical and Chemical Testing (Physical Division), 2018, 54(11): 799-804+825.
- [40] 孙铁锋, 高志惠, 王平, 等. 3d打印技术在医疗领域的研究进展[J]. 精准医学杂志, 2018, 33(02): 177-180.
- SUN T F, GAO Z H, WANG P, et al. Research progress of 3D printing technology in the medical field[J]. Journal of Precision Medicine, 2018, 33(02): 177-180.
- [41] 纵荣荣, 李海鹏, 葛广跃, 等. 3d打印技术在汽车行业的应用[J]. 汽车实用技术, 2022, 47(11): 195-199.
- ZONG R R, LI H P, GE G Y, et al. The application of 3D printing technology in the automotive industry[J]. Automotive Practical Technology, 2022, 47(11): 195-199.
- [42] 邹瞿超, 金锦江, 黄天海, 等. 3d打印技术在医疗领域的研究进展[J]. 中国医疗器械杂志, 2019, 43(04): 279-281+293.
- ZOU Q C, JIN J J, HUANG T H, et al. Research progress of 3D printing technology in the medical field[J]. Chinese Journal of Medical Devices, 2019, 43(04): 279-281+293.
- [43] 郑幼菊. 3d打印技术在模具制造中的应用研究[J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(04): 112-114.
- ZHENG Y J. Research on the Application of 3D Printing Technology in Mold Manufacturing [J]. Paper Equipment and Materials, 2023, 52(04): 112-114.
- [44] 夏端武, 薛小凤. 3d打印技术对机械制造业产生的影响[J]. 机械设计与制造, 2016(12): 184-186.
- XIA D W, XUE X F. The impact of 3D printing technology on the mechanical manufacturing industry [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2016(12): 184-186.
- [45] 张昊. 工业设计下3d打印与传统模具的互补生存研究[J]. 艺术科技, 2016, 29(12): 283.
- ZHANG H. Research on the complementary survival of 3D printing and traditional molds in industrial design [J]. Art and Technology, 2016, 29(12): 283.
- [46] Tang Y, Loh H T, Wong Y S, et al. Direct laser sintering of a copper-based alloy for creating three-dimensional metal parts [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140(1-3): 368-372.
- [47] Qian B, Saeidi K, Kvetková L, et al. Defects-tolerant Co-Cr-Mo dental alloys prepared by selective laser melting[J]. Dent Mater, 2015, 31(12): 1435-1444.
- [48] 李春梅, 罗煌, 胡俊. 激光近净成形工艺参数对成形组织及力学性能的影响分析[J]. 应用激光, 2015, 35(05): 552-557.
- LI C M, LUO H, HU J. Effect of LENS process parameters on microstructure and mechanical properties [J]. Applied Laser, 2015, 35(05): 552-557.
- [49] 苗佩, 牛方勇, 马广义, 等. 沉积效率对激光近净成形316L不锈钢组织及性能的影响[J]. 光电工程, 2017, 44(04): 410-417+466.
- MIAO P, NIU F Y, MA G Y, et al. Effect of deposition efficiency on microstructure and properties of LENS-formed 316L stainless steel [J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(04): 410-417+466.
- [50] 许旭鹏, 李明亮, 刘莹莹, 等. 激光近净成形GH99合金的裂纹分析[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(02): 97-103.
- XU X P, LI M L, LIU Y Y, et al. Crack analysis of LENS-formed GH99 alloy [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2019, 40(02): 97-103.
- [51] 葛江波, 张安峰, 李涤尘, 等. 激光金属直接成形DZ125L高温合金零件工艺的研究[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 7-13.
- GE J B, ZHANG A F, LI D C, et al. Laser direct forming of DZ125L superalloy components [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(7): 7-13.
- [52] 熊江英, 杨金龙, 张建庭, 等. 金属增材制造的研究进展[J]. 中国建材科技, 2021, 30(02): 1-5.
- XIONG J Y, YANG J L, ZHANG J T, et al. Research progress in metal additive manufacturing [J]. China Building Materials Science & Technology, 2021, 30(02): 1-5.
- [53] 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(03): 1-8.
- ZHANG L L, ZHOU Y, LIU S F, et al. Progress in additive manufacturing and properties of mold steels [J]. China Metallurgy, 2022, 32(03): 1-8.
- [54] 孙念光, 陈斌科, 向长淑, 等. 等离子旋转电极雾化制粉技术现状和创新[J]. 粉末冶金工业, 2020, 30(05): 84-87.
- SUN N G, CHEN B K, XIANG C S, et al. Current status and innovation of plasma rotating electrode atomization [J]. Powder Metallurgy Industry, 2020, 30(05): 84-87.

- [55] 刘军,许宁辉,于建宁.用等离子旋转电极雾化法制备TC4合金粉末的研究[J].宁夏工程技术,2016,15(04):340-342.
LIU J, XU N H, YU J N. Preparation of TC4 alloy powder by plasma rotating electrode atomization[J]. Ningxia Engineering Technology, 2016, 15(04): 340-342.
- [56] 杨鑫,奚正平,刘咏,等.等离子旋转电极法制备钛铝粉末性能表征[J].稀有金属材料与工程,2010,39(12):2251-2254.
YANG X, XI Z P, LIU Y, et al. Characterization of Ti-Al powder prepared by plasma rotating electrode process[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(12): 2251-2254.
- [57] 乔振兴,刘增林,张德金,等.等离子旋转电极雾化制备H13合金特种粉的特性表征[J].粉末冶金工业,2024,34(3):101-105.
QIAO Z X, LIU Z L, ZHANG D J, et al. Characterization of H13 alloy special powder prepared by plasma rotating electrode atomization[J]. Powder Metallurgy Industry, 2024, 34(3): 101-105.
- [58] 王博亚,卢林,吴文恒,等.气雾化制粉技术研究进展[J].粉末冶金工业,2019,29(05):74-80.
WANG B Y, LU L, WU W H, et al. Research progress in gas atomization powder preparation technology[J]. Powder Metallurgy Industry, 2019, 29(05): 74-80.
- [59] 李鑫,王永祥.气雾化工艺参数对金属粉末粒度影响的研究[J].江西有色金属,2002,16(3):15-18.
LI X, WANG Y X. Effect of gas atomization parameters on metal powder particle size[J]. Jiangxi Nonferrous Metals, 2002, 16(3): 15-18.
- [60] 王琪,李圣刚,吕宏军,等.雾化法制备高品质钛合金粉末技术研究[J].钛工业进展,2010,27(5):16-18.
WANG Q L, LV H J, SHI G, et al. Preparation of high-quality titanium alloy powder by atomization[J]. Titanium Industry Progress, 2010, 27(5): 16-18.
- [61] 孔水龙,石磊,厉峰,等.真空雾化制备18Ni300马氏体时效钢粉末及其组织变化[J].粉末冶金工业,2021(5):11-15.
KONG S L, SHI L, LI F, et al. Vacuum gas atomization of 18Ni300 maraging steel powder and its microstructural evolution[J]. Powder Metallurgy Industry, 2021(5): 11-15.
- [62] 李嘉,刘雨,王长军,等.气雾化制备18Ni250钢粉体的数值模拟与试验验证[J].钢铁,2024,59(6):1-9.
LI J, LIU Y, WANG C J, et al. Numerical simulation and experimental verification of 18Ni250 steel powder prepared by gas atomization[J]. Iron & Steel, 2024, 59(6): 1-9.
- [63] 文世峰,季宪泰,周燕,等.激光选区熔化成形模具钢的发展现状及前景[J].激光与光电子学进展,2018,55(01):47-57.
WEN S F, JI X T, ZHOU Y, et al. Current status and prospects of laser selective melting for mold steels[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(01): 47-57.
- [64] 麻梦梅,雷大俊.H13钢热处理工艺及研究现状[J].热处理技术与装备,2023,44(01):13-16.
MA M M, LEI D J. Heat treatment process and research status of H13 steel[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2023, 44(01): 13-16.
- [65] Ren B, Lu D, Zhou R, et al. Preparation and mechanical properties of selective laser melted h13 steel[J]. Journal of Materials Research, 2019, 34(8): 1415-1425.
- [66] 严凯,陈长军,张敏,等.激光增材制造H13钢及回火处理的组织和性能[J].中国表面工程,2017,30(2):9-15.
YAN K, CHEN C J, ZHANG M, et al. Microstructure and properties of laser additive manufactured H13 steel after tempering[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(2): 9-15.
- [67] Deirmina F, Peghini N, Almangour B, et al. Heat treatment and properties of a hot work tool steel fabricated by additive manufacturing[J]. Materials Science and Engineering A, 2019, 753(4): 109-121.
- [68] Åsberg M, Fredriksson G, Hatami S, et al. Influence of post treatment on microstructure, porosity and mechanical properties of additive manufactured H13 tool steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 742: 584-589.
- [69] Park J S, Lee M G, Cho Y J, et al. Effect of heat treatment on the characteristics of tool steel deposited by the directed energy deposition process[J]. Metals and Materials International, 2016, 22(1): 143-147.
- [70] 管航,王小新,董志家,等.18Ni300模具钢粉末3D打印工艺研究[J].模具技术,2020(02):1-6.
GUAN H, WANG X X, DONG Z J, et al. 3D printing process of 18Ni300 mold steel powder[J]. Die & Mould Technology, 2020(02): 1-6.
- [71] 陈波,黄煜华,檀财旺,等.马氏体时效钢激光增材制造工艺及组织研究[J].应用激光,2017,37(4):489-494.
CHEN B, HUANG Y H, TAN C W, et al. Process and

- microstructure of laser additive manufactured maraging steel[J]. Applied Laser, 2017, 37(4): 489-494.
- [72] Yao Y, Huang Y, Chen B, et al. Influence of processing parameters and heat treatment on the mechanical properties of 18Ni300 manufactured by laser based directed energy deposition [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 105: 171-179.
- [73] Bai Y, Wang D, Yang Y, et al. Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of maraging steel by selective laser melting[J]. Materials Science and Engineering A, 2019, 760(7): 105-117.
- [74] Suryawanshi J, Prashanth K G, 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.
- [75] Yin S, Chen C, Yan X, et al. The influence of aging temperature and aging time on the mechanical and tribological properties of selective laser melted maraging 18Ni-300 steel[J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 592-600.
- [76] Bai Y, Zhao C, Wang D, et al. Evolution mechanism of surface morphology and internal hole defect of 18Ni 300 maraging steel fabricated by selective laser melting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 299: 117328.
- [77] Ha K, Kim T, Baek G Y, et al. Numerical study of the effect of progressive solidification on residual stress in single-bead-on-plate additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2020, 34: 101245.
- [78] Wang J, Zhang L, Wei R, et al. Lightweight design and laser additive manufacturing of maraging steel molds for composite forming[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119 (3-4): 1897-1910.
- [79] Hayasaka T, Minoura K, Ishizaki K, et al. A lightweight interpolation algorithm for short-segmented machining tool paths to realize vibration avoidance, high accuracy, and short machining time [J]. Precision Engineering, 2019, 59: 1-17.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第 18 页

- [70] 夏攀, 马飞, 王中任. 基于改进 U-Net 模型的焊缝特征提取[J]. 激光与红外, 2022, 52(8): 1259-1264.
XIA P, MA F, WANG Z R. Weld feature extraction based on modified U-Net model[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(8): 1259-1264.
- [71] 苏志威, 黄子涵, 邱发生, 等. 基于改进 YOLOv8 的航空铝合金焊缝缺陷检测方法[J]. 航空动力学报, 2024: 1-10.
SU Z W, HUANG Z H, QIU F S, et al. Weld defect detection of Aviation Aluminum alloy based on improved YOLOv8[J]. Journal of Aerospace Power, 2024: 1-10.
- [72] 郭波, 石永华. 基于视觉传感的 CO₂ 焊焊接偏差识别[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(7): 1-8.
GUO B, SHI Y H. Vision-Based welding deviation detection for CO₂ arc welding[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(7): 1-8.
- [73] Wang J Y, Mu C Y, Mu S, et al. Welding seam detection and location: Deep learning network-based approach [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2023, 202(04): 104893.
- [74] Li Hao, Wang X C, Liu Y, et al. A novel Robotic-Vision-Based defect inspection system for bracket weldments in a Cloud-Edge coordination environment [J]. Sustainability, 2023, 15(14): 10783.
- [75] Zhu C X, Yuan H T, Ma G H. An active visual monitoring method for GMAW weld surface defects based on random forest model [J]. Materials Research Express, 2022, 9(3): 036503.
- [76] 胡丹, 吕波, 王静静, 等. 焊缝表面缺陷激光视觉传感 HOG-SVM 的检测方法[J]. 焊接学报, 2023, 44(1): 57-62+70.
HU D, LV B, WANG J J, et al. Study on HOG-SVM detection method of weld surface defects using laser visual sensing [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(1): 57-62+70.
- [77] 王杰, 张志芬, 秦锐, 等. 基于机器学习的不锈钢薄板 MIG 焊焊穿缺陷识别[J]. 电焊机, 2023, 53(9): 70-77.
WANG J, ZHANG Z F, QIN R, et al. Identification of MIG welding burn-through defects in stainless steel sheet based on machine learning [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(9): 70-77.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>