

特约专栏

增材制造专用模具钢粉末材料设计、 制备及其制造技术

周 燕¹, 文世峰², 魏青松², 闫春泽², 史玉升²

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

(2. 华中科技大学材料科学与工程学院, 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 基于材料逐层堆积制造的增材制造技术将传统的三维制造降为二维制造, 突破了传统制造方法的约束和限制, 特别适合制造具有复杂内置随形冷却流道的模具钢。增材制造模具钢专用粉末材料、增材制造工艺及其性能等是影响增材制造模具钢应用的主要因素。重点综述了增材制造模具钢粉末材料的设计与制备研究进展, 探讨了典型的模具钢增材制造工艺及其性能, 在此基础上, 介绍了增材制造技术在模具钢领域的应用实例及现状, 以期对增材制造模具钢的深入研究提供借鉴。

关键词: 模具钢; 增材制造; 粉末制备; 硬度; 耐磨损; 抗腐蚀

中图分类号: TG76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2020)05-0356-07

Design, Preparation and Manufacturing Technology of Special Mold Steel Powder Materials for Additive Manufacturing

ZHOU Yan¹, WEN Shifeng², WEI Qingsong², YAN Chunze², SHI Yusheng²

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

(2. State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The additive manufacturing (AM) technology based on layer-by-layer stacking reduces the traditional 3D manufacturing to 2D manufacturing, and breaks through the constraints and limitations of traditional manufacturing methods, especially is suitable for manufacturing mold steel with complex conformal cooling channels. AM mold steel materials, AM process and properties are the main factors affecting the application of AM mold steel. For this reason, this paper summarizes the research progress of material design and preparation of AM mold steel powder materials, discusses several typical manufacturing processes for mold steel and their performance. Finally, this paper introduces the application example and present situation of AM mold steel. This paper may supply guidance for the further research of AM mold steel.

Key words: mold steel; additive manufacturing (AM); powder preparation; hardness; wear resistance; corrosion resistance

1 前 言

模具是现代制造业的基础工艺装备, 大多数工业产品的零部件都依靠模具技术来生产^[1-3]。其中, 模具冷

却系统对模具的寿命、产品的生产效率和质量都有着至关重要的影响^[4]。现有模具冷却系统一般由直孔水道构成, 其无法均匀贴近型腔表面, 易造成冷却不均, 效率低下。而随型腔形状变化的随形冷却水道可极大提升冷却效率和均匀性, 但利用机加工和电火花加工等传统加工方法无法制造^[5]。为满足复杂模具高效冷却的需求, 常需加工铜质镶块以实现局部冷却, 但由此增加了模具的制造周期和成本^[6]。因此, 高性能模具的制造亟需寻求新的加工方法。

增材制造技术是一种基于材料逐层堆积制造的先进制造技术, 它将复杂的三维制造降为二维制造, 可快速

收稿日期: 2019-12-27 修回日期: 2020-03-27

基金项目: 广东省重大科技专项(2017B090911007)

第一作者: 周 燕, 女, 1987 年生, 副教授, 硕士生导师,
Email: zhouyan@cug.edu.cn

通讯作者: 文世峰, 男, 1979 年生, 副教授, 硕士生导师,
Email: roya_wen@hust.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.201912023

制造出任意复杂的结构和形状^[7,8]。20世纪90年代增材制造技术已开始应用于模具快速制造,但主要用于间接制造模具,如通过硅胶软模翻模制造模具。间接制造的模具在性能、使用寿命等方面存在局限性^[9]。随着增材制造技术的发展,使用高能束能量熔化金属材料可直接制造金属模具,推动了模具制造技术的发展,进一步提升了模具的冷却性能^[10,11]。目前,用于增材制造模具的金属材料有钢、铝合金、铜合金和锌合金等^[1,12],其中,钢是应用最广泛的模具材料之一,本文将主要论述模具钢材料。

增材制造模具钢的成型过程与传统铸锻焊工艺过程差异较大,如基于粉末床的增材制造中粉末材料经历快速升温与冷却,该过程涉及复杂的传热、传质行为,将导致合金元素损失及组织偏析等,同时存在球化、孔隙、裂纹等缺陷,会直接影响到模具钢的精度和性能^[13-18]。因此,设计与制备增材制造专用模具钢粉末材料成为推动增材制造技术在模具制造领域应用的关键。

本文综述了增材制造模具钢粉末材料的设计与制备研究进展,介绍了模具钢增材制造工艺及其性能,列举了增材制造技术在模具钢领域的应用实例及现状,以期增材制造模具钢的深入研究奠定基础。

2 模具钢粉末材料设计及制备

2.1 模具钢粉末材料设计

根据模具钢应用领域的不同,可将其分为冷作模具钢、热作模具钢和注塑模具钢^[19]等。随着对模具钢性能要求的日益提升,越来越多的模具钢材料被设计出来。然而当前模具钢成分设计主要面向传统制造工艺,如为了改善模具钢的淬透性,通常往钢中添加微量Cr, Mn, Si等元素;为了提高模具钢的耐磨性,通常尽可能使模具钢中形成更多的未熔碳化物。然而上述模具钢成分设

计原则可能无法适应增材制造工艺要求,如增材制造过程中通常存在较大热应力,若较多硬质碳化物析出在晶界,将导致制造的模具钢产生较多的微裂纹。为了提升增材制造模具钢的性能,需针对增材制造工艺特点开发出增材制造专用模具钢材料。

目前,已有学者对增材制造模具钢成分设计开展了初步研究。主要通过两种成分设计思路提升模具钢性能:改善模具钢合金元素配比和引入第二相强化颗粒。如为了提高增材制造S136模具钢的硬度和耐腐蚀性,Zhou等^[20]通过微调S136模具钢中Si和Mn元素含量,使得模具钢机械性能明显提升,如图1所示。Wen等^[21]研究了Cr元素含量对增材制造S136模具钢组织和性能的影响规律,结果表明Cr元素在模具钢表面会生成致密的氧化膜,适当的Cr元素添加能显著提升模具钢抗腐蚀性能,延长使用寿命。然而,添加过多的Cr元素将会导致S136模具钢内部孔洞和裂纹等缺陷的形成,从而会显著降低模具钢的致密度和硬度。

除了调节模具钢合金元素含量之外,还可向模具钢中添加第二相强化颗粒形成金属基复合材料,从而获得性能更加优异的改性模具钢。Wen等在S136模具钢中分别添加纳米TiB₂增强相颗粒^[22]和石墨烯^[23],以实现S136模具钢硬度、耐磨性和抗拉强度等机械性能的提升。如图2所示,增材制造0.5%TiB₂/S136(质量分数)模具钢的硬度和抗拉强度分别为761.5(HV)和982.8 MPa,较未添加TiB₂的S136模具钢分别提升了17%和26.9%,这主要得益于基体中均匀分布的尺寸为350 nm左右的环状纳米结构所产生的细晶强化和晶界强化。Almangour等^[24]向H13模具钢中添加体积分数为15%的纳米TiC颗粒,增材制造的TiC/H13模具钢中,纳米颗粒均匀分散在H13基体中,模具钢硬度、弹性模量和摩擦磨损性能均显著优于未添加纳米TiC的H13模具钢。

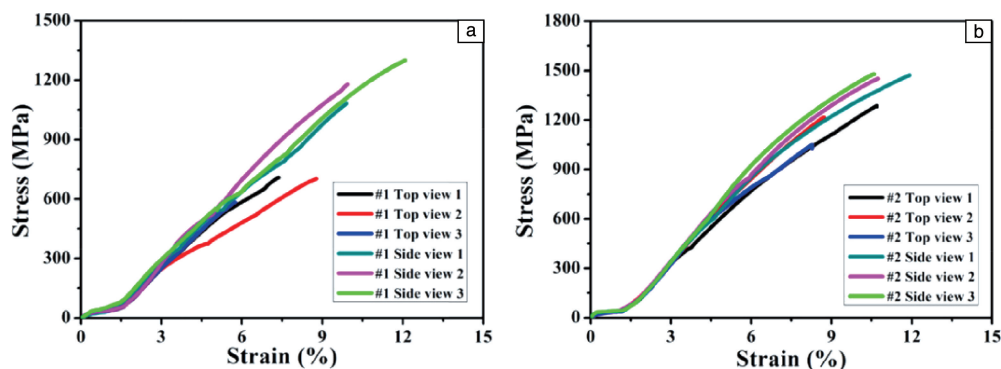


图1 增材制造S136的拉伸性能:(a)Si和Mn含量高,(b)Si和Mn含量低^[20]

Fig. 1 Tensile properties of AM S136: (a) high Si and Mn content, (b) low Si and Mn content^[20]

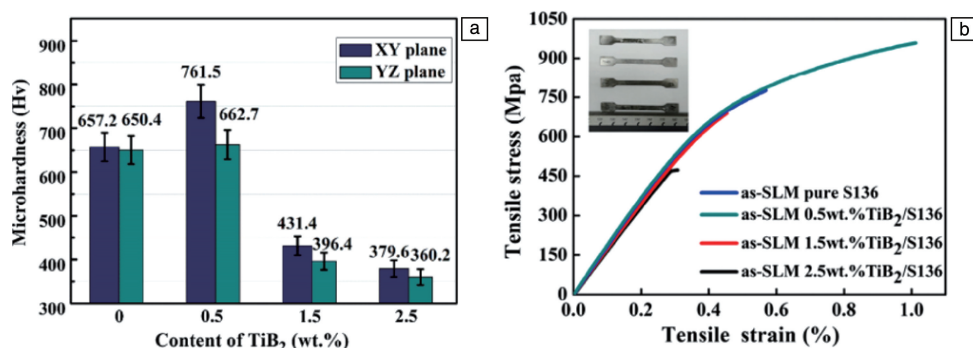


图2 TiB₂ 含量对增材制造 TiB₂/S136 模具钢显微硬度的影响(a), 不同 TiB₂ 含量的模具钢应力-应变曲线(b) [22]

Fig. 2 Effect of TiB₂ content on microhardness of TiB₂/S136 mold steel manufactured by AM (a), stress-strain curves of AM mold steels with different TiB₂ contents (b) [22]

2.2 模具钢粉末材料的制备

增材制造模具钢因其特定的制造装备及性能要求, 需要其粉末具有球形度高、松装密度高、粒径分布范围窄以及 O 和 N 含量低 [25] 等特点。在增材制造模具钢时, 不同增材制造工艺所要求的粉末粒度各异。粉末粒度过大或过小, 都会对模具钢致密度和表面粗糙度产生不利影响 [26]。粉末球形度影响模具钢成形质量, O 和 N 含量影响模具钢气孔等内部缺陷 [27]。

增材制造用模具钢粉末制备方法有气雾化(GA)法、等离子旋转电极(PREP)法、等离子球化(PS)法和等离子雾化(PA)法等。上述方法制备的粉末球形度高、粒径分布范围窄, 满足增材制造工艺需求 [28]。综合考虑不同制粉方法的特点, 不同增材制造工艺选用的粉末略有差异。目前常见的金属增材制造工艺包括激光选区熔化(SLM)、电子束熔融(EBM)和激光近净成形(LENS)等。其中 SLM 和 EBM 工艺采用粉床铺粉的方式, 而 LENS 工艺采用同轴送粉的方式, 因此 SLM 和 EBM 工艺对于粉末的流动性和松装密度要求更高。采用 PREP 方法制备的粉末粒径通常在 75~250 μm 之间, 主要适用于 LENS 工艺, 改进后的超高转速等离子旋转电极(SS-PREP)方法能够生产足够细小的金属粉末, 可以满足 SLM 和 EBM 等工艺需求 [27]。采用 PA 工艺制备的金属粉末在 0~45 μm 粒径范围内的成品率最高, 最适宜用于 SLM 工艺。PS 方法将非球形粉末作为原材料, 制备的粉末球形度高, 特别适合制备 W, Ta 等熔点较高元素的增材制造球形粉末。

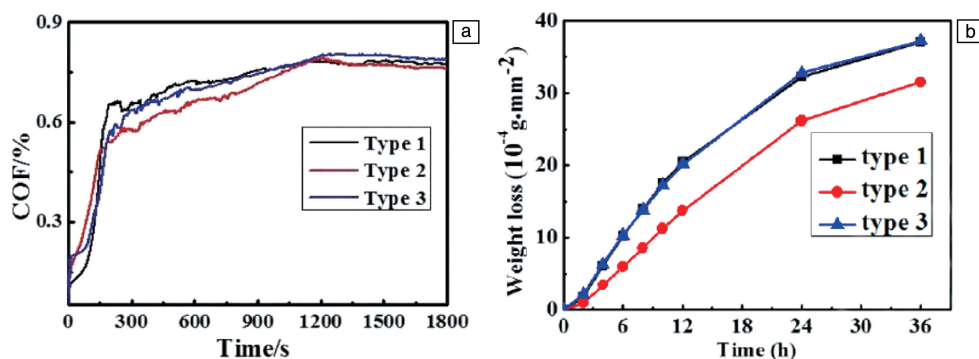
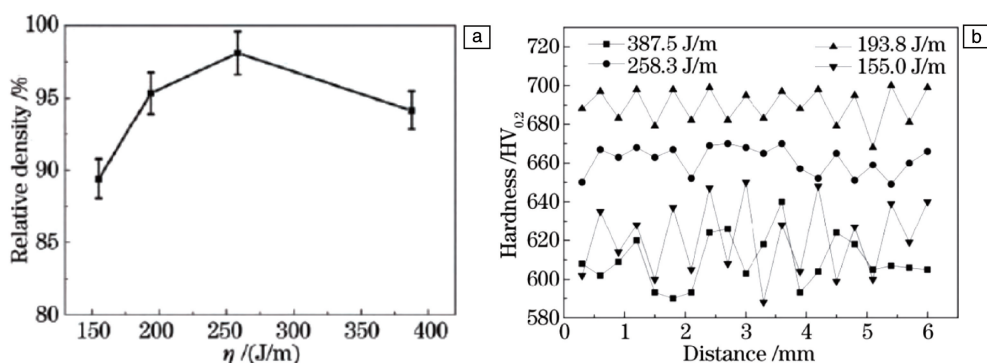
随着对增材制造专用模具钢粉末需求的不断提升, 多家粉末制造厂商开始研发增材制造用模具钢粉末。例如西安赛隆公司 [29, 30] 研发了 PREP 制粉设备, 并开发出不锈钢粉末等先进粉末; 中航迈特 [31] 基于商用化的 GA 法开展了模具钢用等一系列合金粉末的制备工艺研发。

3 模具钢增材制造及性能

3.1 激光选区熔化制造模具钢

SLM 工艺采用了光纤激光器, 其具有激光能量密度高、光斑细小、制造精度高、冷却速度快等特点, 在制造具有复杂冷却流道的精密模具领域潜力巨大, 成为增材制造模具钢研究的热点方向 [32]。原材料的选择对 SLM 制造模具钢的性能影响较大, 如采用相同的 SLM 工艺参数, 不同粉末特性的模具钢性能有显著差异。Zhou 等 [33] 研究了 3 种粉末粒径对 SLM 制造 S136 模具钢性能的影响规律, 如图 3 所示, 当粉末粒径适中(22.8 μm)时, 制造的模具钢试样基本无缺陷, 同时试样的摩擦系数较低, 腐蚀失重最少、耐腐蚀性能最佳, 表明粉末粒径 22.8 μm 左右的 S136 粉末更适用于制造 SLM 模具钢。

目前围绕 SLM 制造模具钢的研究主要集中在通过优化 SLM 工艺参数提高模具钢的力学性能、摩擦磨损性能和耐腐蚀性能等。Gu 等 [34] 系统研究了激光能量密度 η 对 SLM 制造 5CrNi4Mo 模具钢相转变和力学性能影响, 如图 4 所示, 在 $\eta = 258.3 \text{ J/m}^3$ 时, 试样致密度达到 98.12%, 平均显微硬度较高, 摩擦系数和磨损率较低, 表明较高的冷却速率下发生了明显的细晶强化, 产生了更优的综合力学性能。除了优化 SLM 工艺参数外, 通过热处理也可调控 SLM 制造模具钢的微观组织, 从而获得性能更优的模具钢。Wen 等 [35] 系统研究了淬火温度对 S136 模具钢微观组织和耐腐蚀性能的影响, 经 1050 °C 的淬火处理后, S136 模具钢的硬度和耐腐蚀性能最优。诸多研究表明, 通过优化 SLM 工艺参数或采用后续热处理可制造出近全致密的模具钢, 其综合力学性能优异, 且接近同牌号锻件 [36, 37]。

图3 不同粒径粉末的 SLM 试样摩擦因数曲线(a)和腐蚀失重曲线(b)^[33]Fig. 3 Friction factor curves (a) and corrosion weight loss curves (b) of SLM samples of powders with different particle sizes^[33]图4 不同能量密度 η 条件下 SLM 试样的致密度(a)和显微硬度(b)^[34]Fig. 4 Density (a) and microhardness (b) of SLM sample by different energy density η ^[34]

3.2 电子束熔融制造模具钢

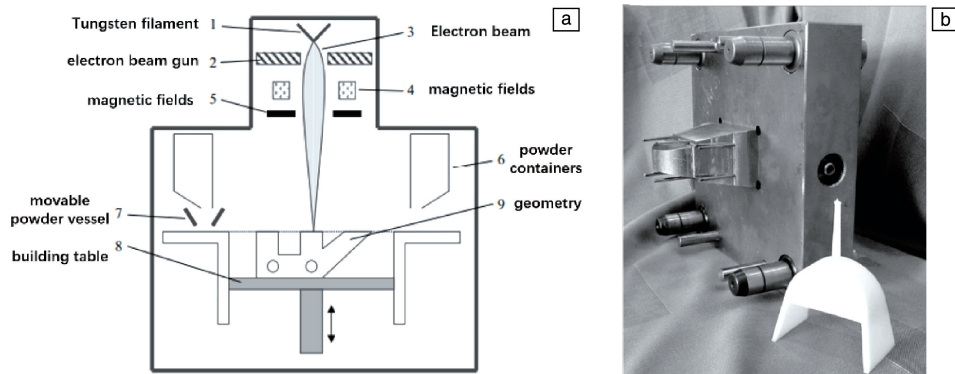
EBM 工艺的真空环境可以避免金属粉末在液相烧结或熔化过程中被氧化, 同时良好的热环境保证了样件的形状稳定性和残余应力低, 因此, EBM 工艺在制造热作模具钢方面具有优势。H13 模具钢机械性能好、使用寿命长, 但是它热导率较低, 增材制造存在困难。Rannar 等^[38]采用 EBM 工艺制造了具有随形冷却流道的 H13 模具钢, 如图 5 所示, 并针对模具行业常见的深部磁芯冷却不足的问题, 研究了增材制造模具钢与传统工艺制造模具钢

在冷却时间和尺寸精度上的差异。结果表明, 使用 EBM 工艺制造 H13 模具钢, 可提高尺寸精度, 缩短冷却时间。

3.3 激光近净成形制造模具钢

LENS 工艺利用高能激光束将与光束同轴或侧向喷射的金属粉末直接熔化, 将熔化后的粉末按一定轨迹对样件截面进行填充, 产生冶金结合^[39]。该工艺与 SLM、EBM 工艺相比, 可制造复杂曲面样件, 在模具钢制造领域优势明显。

Articek 等^[40]使用 LENS 工艺制造了 H13-Cu 功能梯度

图5 EBM 工艺装备结构示意图(a); EBM 制造的嵌件和带顶针的型芯板(b)^[38]Fig. 5 Equipment schematic of EBM technology (a); Insert and core plate with thimble made by EBM (b)^[38]

模具, 该模具结合了铜的良好导热性和钢的高耐磨性, 且其孔隙率低、梯度层过渡平滑, 具有独特的高导热区域, 用该模具可生产性能更优、成本更低的注塑聚合物产品。Yan 等^[41]采用 LENS 工艺制造了 H13 模具钢, 并系统研究了不同回火温度对模具钢微观组织和力学性能的影响规律。沉积态试样在 350, 450, 550, 600, 650 °C 分别回火热处理 2 h 后进行维氏硬度测试、摩擦磨损性能测试和拉伸性能测试, 发现 550 °C 回火后具有最高的显微硬度 600 (HV_{0.3})、最大的抗拉强度 1928.2 MPa 和 6.4% 的延伸率。

4 增材制造模具钢应用

目前, 增材制造的模具钢已逐渐在模具行业开始应用。尤其在注塑模具领域, 增材制造的复杂随形冷却流道可紧附于模具型腔表面, 随型腔形状变化而变化, 从而极大地提升了模具钢的冷却效率和冷却均匀性。华中

科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室快速制造中心从 2014 年开始采用 SLM 工艺制造模具钢。针对高性能复杂随形冷却流道模具钢的制造难题, 该团队系统研究了 SLM 专用模具钢材料、SLM 制造工艺及 SLM 制造模具钢在企业应用示范等, 形成了成套技术。该团队制造的模具钢尺寸精度达到 0.1 mm, 表面粗糙度小于 15 μm。如图 6 和图 7 所示, 采用 SLM 成形了具有随形冷却流道的模具钢镶块, 解决了 R-PET 结晶性注塑用料因注塑区间窄、注塑温度高而易产生的浇口飞边、崩开等问题, 同时使得模具注塑生产效率提高了 20% 以上。Pan 等^[42]针对传统直线形冷却水路的注射模具冷却周期长、冷却效率低、制造产品质量差、易变形等难题, 采用基于 SLM 制造的冷却水路优化设计方法进行水路设计。然后采用传统机加工工艺、SLM 工艺分别制造模具钢镶块, 生产了注塑产品, 结果表明: SLM 制造的模具钢镶块可大幅缩短模具注塑冷却周期, 提高注塑件质量。

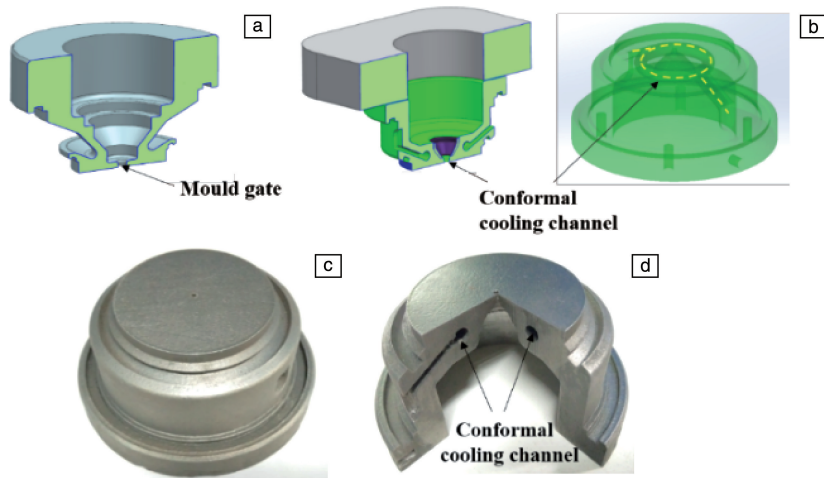


图 6 注塑模具 CAD 模型(a, b), SLM 制造模具钢镶块(c, d)^[8]

Fig. 6 CAD model of injection mold (a, b), mold steel inserts manufactured by SLM (c, d)^[8]

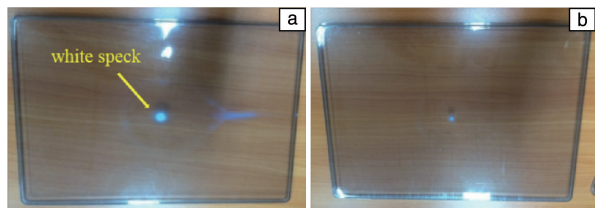


图 7 不同模具钢生产的注塑件: (a) 镶钎铜, (b) SLM 制造的模具^[8]

Fig. 7 Injection parts made by different mold steels: (a) inlaid with beryllium copper, (b) the mold manufactured by SLM^[8]

在挤压模具领域, Oter 等^[43]用增材制造技术制造了马氏体时效钢舷窗模具, 如图 8 所示。使用该模具在工业铝型材挤出设备中挤出了高质量的型材, 证明了增材

制造技术在挤压模具领域应用的可行性。

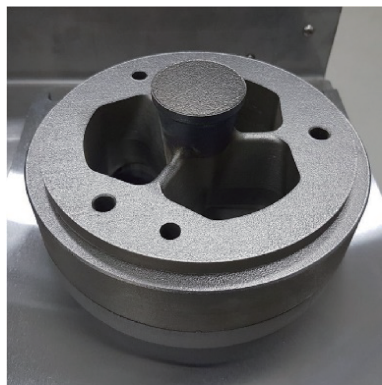


图 8 增材制造的马氏体钢舷窗模具^[43]

Fig. 8 Martensite steel porthole mold by AM technology^[43]

5 结 语

增材制造专用材料的研发是影响增材制造技术发展及应用推广的关键因素之一。增材制造专用模具钢材料的成分优化设计、模具钢粉末材料制备方法、模具钢增材制造工艺等, 直接影响增材制造模具钢的性能。本文综述了模具钢粉末合金成分对增材制造模具钢性能的影响, 介绍了增材制造专用模具钢粉末的性能要求及其制备方法。重点论述了采用 SLM、EBM 及 LENS 3 种增材制造工艺制造模具钢的研究进展, 列举了增材制造注塑模具钢和挤压模具钢的应用现状, 以期促进增材制造技术在模具钢领域应用提供借鉴。

参考文献 References

- [1] 文世峰, 季宪泰, 周燕, 等. 激光与光电子学进展[J], 2018, 55(1): 011404.
WEN S F, JI X T, ZHOU Y, *et al.* Laser & Optoelectronics Progress [J], 2018, 55(1): 011404.
- [2] 吴晓春, 谢尘. 模具工业[J], 2013, 39(12): 1-11.
WU X C, XIE C. Die & Mould Industry[J], 2013, 39(12): 1-11.
- [3] 吴晓春, 左鹏鹏. 模具工业[J], 2013, 39(10): 1-9.
WU X C, ZUO P P. Die & Mould Industry[J], 2013, 39(10): 1-9.
- [4] 文世峰, 吴雪良, 周燕, 等. 热加工工艺[J], 2019, 48(4): 26-30.
WEN S F, WU X L, ZHOU Y, *et al.* Hot Working Technology [J], 2019, 48(4): 26-30.
- [5] 潘金芝, 任瑞铭, 戚正凤. 金属热处理[J], 2008, 33(08): 10-15.
PAN J Z, REN R M, QI Z F. Heat Treatment of Metals[J], 2008, 33(08): 10-15.
- [6] 张佳琪, 王敏杰, 刘建业, 等. 模具制造[J], 2019, 19(02): 72-79.
ZHANG J Q, WANG M J, LIU J Y, *et al.* Die & Mould Manufacture [J], 2019, 19(02): 72-79.
- [7] 文世峰, 吴雪良, 周燕, 等. 华中科技大学学报(自然科学版)[J], 2018, 46(2): 51-55.
WEN S F, WU X L, ZHOU Y, *et al.* Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition) [J], 2018, 46(2): 51-55.
- [8] WEN S F, JI X T, ZHOU Y, *et al.* Chinese Journal of Mechanical Engineering[J], 2018, 31: 108.
- [9] JHAVAR S, PAUL C P, JAIN N K. Engineering Failure Analysis[J], 2013, 34(8): 519-535.
- [10] 刘颖. 激光选区熔化成形 4Cr13 钢工艺优化与性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
Liu Y. Study on Process Optimization and Properties of Selective Laser Melting 4Cr13 Steel[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [11] 黄永建, 刘军会, 杨进航, 等. 中国冶金[J], 2019, 29(11): 6-15.
HUANG Y J, LIU J H, YANG J H, *et al.* China Metallurgy [J], 2019, 29(11): 6-15.
- [12] 阮雪榆, 李志刚, 武兵书, 等. 模具技术[J], 2001(02): 72-74.
RUAN X Y, LI Z G, WU B S, *et al.* Die and Mould Technology [J], 2001(02): 72-74.
- [13] 吴茜, 刘斌. 模具工业[J], 2017, 43(03): 1-7.
WU Q, LIU B. Die & Mould Industry [J], 2017, 43(03): 1-7.
- [14] HU H, WEN S F, DUAN L C, *et al.* Optics & Laser Technology [J], 2019, 119: 105588.
- [15] 陈帅, 陶凤和, 贾长治, 等. 铸造技术[J], 2018, 39(03): 658-661.
CHEN S, TAO F H, JIA C Z, *et al.* Foundry Technology [J], 2018, 39(03): 658-661.
- [16] 胡捷, 廖文俊, 丁柳柳, 等. 材料导报[J], 2014, 28(S2): 459-462.
HU J, LIAO W J, DING L L, *et al.* Materials Review [J], 2014, 28(S2): 459-462.
- [17] 李福泉, 孟祥旭, 董志宏, 等. 精密制造工程[J], 2018, 10(01): 97-108.
LI F Q, MENG X X, DONG Z H, *et al.* Journal of Netshape Forming Engineering [J], 2018, 10(01): 97-108.
- [18] 陈波, 黄煜华, 檀财旺, 等. 应用激光[J], 2017, 37(04): 487-491.
CHEN B, HUANG Y H, TAN C W, *et al.* Applied Laser [J], 2017, 37(04): 487-491.
- [19] 王晶. 科技资讯[J], 2010(23): 59.
WANG J. Science & Technology Information [J], 2010(23): 59.
- [20] ZHOU Y, DUAN L C, JI X T, *et al.* Optics & Laser Technology [J], 2018, 108: 81-89.
- [21] 季宪泰, 陈柯宇, 周燕, 等. 激光与光电子学进展[J], 2018, 55(09): 091402.
JI X T, CHEN K Y, ZHOU Y, *et al.* Laser & Optoelectronics Progress [J], 2018, 55(09): 091402.
- [22] WEN S F, HU H, ZHOU Y, *et al.* Applied Surface Science [J], 2018, 457: 11-20.
- [23] WEN S F, CHEN K Y, LI W, *et al.* Materials & Design [J], 2019, 175: 107811.
- [24] ALMANGOUR B, GRZESIAK D, YANG J M. Materials & Design [J], 2016, 96: 150-161.
- [25] 邹海平, 李上奎, 李博, 等. 中国金属通报[J], 2016(8): 88-89.
ZOU H P, LI S K, LI B, *et al.* China Metal Bulletin [J], 2016(8): 88-89.
- [26] 尹华, 白培康, 刘斌, 等. 热加工工艺[J], 2010, 39(1): 140-144.
YIN H, BAI P K, LIU B, *et al.* Hot Working Technology [J], 2010, 39(1): 140-144.
- [27] 杨全占, 魏彦鹏, 高鹏, 等. 材料导报[J], 2016, 30(S1): 107-111.
YANG Q Z, WEI Y P, GAO P, *et al.* Materials Review [J], 2016, 30(S1): 107-111.
- [28] 乐国敏, 李强, 董鲜峰, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2017, 46(4): 1162-1168.

- LE G M, LI Q, DONG X F, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2017, 46(4): 1162-1168.
- [29] 雷囡芝. 等离子旋转电极雾化法制备球形金属粉末的工艺及性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- LEI N Z. Study on Process and Properties of Spherical Metal Powder Prepared by Plasma Rotating Electrode Atomization Method [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [30] 董鹏, 陈济轮. 航天制造技术[J], 2014, 2(1): 1-5.
- DONG P, CHEN J L. Aerospace Manufacturing Technology[J], 2014, 2(1): 1-5.
- [31] 张飞, 高正江, 马腾, 等. 工业技术创新[J], 2017, 04(04): 59-63.
- ZHANG F, GAO Z J, MA T, *et al.* Industrial Technology Innovation [J], 2017, 04(04): 59-63.
- [32] 胡辉, 周燕, 文世峰, 等. 中国激光[J], 2018, 45(12): 131-140.
- HU H, ZHOU Y, WEN S F, *et al.* Chinese Journal of Lasers[J], 2018, 45(12): 131-140.
- [33] 周燕, 段隆臣, 吴雪良, 等. 激光与光电子学进展[J], 2018, 55(10): 101403.
- ZHOU Y, DUAN L C, WU X L, *et al.* Laser & Optoelectronics Progress[J], 2018, 55(10): 101403.
- [34] 陈洪宇, 顾冬冬, 顾荣海, 等. 中国激光[J], 2016, 43(02): 66-73.
- CHEN H Y, GU D D, GU R H, *et al.* Chinese Journal of Lasers[J], 2016, 43(02): 66-73.
- [35] 季宪泰, 文世峰, 魏青松, 等. 浙江大学学报(工学版)[J], 2019, 53(04): 664-670.
- JI X T, WEN S F, WEI Q S, *et al.* Journal of Zhejiang University(Engineering Science)[J], 2019, 53(04): 664-670.
- [36] ZHAO X, WEI Q S, GAO N, *et al.* Journal of Materials Processing Technology[J], 2019, 270: 8-19.
- [37] 罗喜望. 激光选区熔化制造 4Cr13 模具钢零件的力学性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- LUO X W. The Study on Mechanical Properties of 4Cr13 Die Steel Fabricated by Selective Laser Melting [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [38] RANNAR L E, GLAD A, GUSTAFSON C G. Rapid Prototyping Journal[J], 2007, 13(3): 128-135.
- [39] 马明明. 两种典型金属零部件激光增材制造技术基础比较研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- MA M M. A Comparative Study on Fundamentals of Two Typical Laser Additive Manufacturing Technologies of Metallic Components. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [40] ARTICEK U, MILFELNER M, ANZEL I. Advances in Production Engineering & Management[J], 2013, 8(3): 169-176.
- [41] 严凯, 陈长军, 张敏, 等. 中国表面工程[J], 2017, 30(02): 134-142.
- YAN K, CHEN C J, ZHANG M, *et al.* China Surface Engineering [J], 2017, 30(02): 134-142.
- [42] 潘晓勇, 彭德权, 何云锋, 等. 模具工业[J], 2015, 41(01): 39-42.
- PAN X Y, PENG D Q, HE Y F, *et al.* Die & Mould Industry[J], 2015, 41(01): 39-42.
- [43] QTER Z C, COSKUN M, AKCA Y, *et al.* Optik-International Journal for Light and Electron Optics[J], 2019(176): 175.

(编辑 惠 琼)