

激光增材制造钢粉体材料研究现状

董世运¹, 闫世兴¹, 冯祥奕¹, 李永健¹, 陈岁元²

¹陆军装甲兵学院装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072;

²东北大学材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110004

摘要 随着激光增材制造金属件的质量和性能的提高,金属粉体材料已成为金属激光增材制造技术应用的制约因素,激光增材制造专用金属粉体材料成为了近年来的研究热点之一。针对激光增材制造钢粉体材料,从材料设计、粉体制备、表征评价、样件实例等方面综述了激光增材制造钢粉体材料的国内研究现状,提出了激光3D粉体材料研究和应用中存在的主要问题及发展方向。

关键词 激光技术; 激光增材制造; 钢; 粉体材料

中图分类号 TG142.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.011407

Research Status of Steel Powder Material for Laser Additive Manufacturing

Dong Shiyun¹, Yan Shixing¹, Feng Xiangyi¹, Li Yongjian¹, Chen Suiyuan²

¹National Key Laboratory for Remanufacturing, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China;

²School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China

Abstract With the improvement of the quality and performance of laser additive manufacturing metal components, the metal powder material has become a restraining factor for the application of metal laser additive manufacturing technology. Therefore, the special metal powder for laser additive manufacturing has recently become one of the research hotspots in the recent years. The research current status of steel powders used for laser additive manufacturing is reviewed from various aspects such as materials design, powder fabrication, powder evaluation and sample cases. Also, the main problems and research directions are put forward for the research and application of laser additive manufacturing steel powders.

Key words laser technique; laser additive manufacturing; steel; material of powders

OCIS codes 140.3390; 160.3900

1 引言

增材制造技术,也称3D打印技术,是一种集成计算机、数控、新材料等于一体的新兴制造技术。与传统的机械加工减法制造理念不同,该技术使得材料利用率得到显著提高并使制造柔性得到改善。增材制造材料是影响该技术发展的关键之一^[1]。随着增材制造技术的发展,适用于增材制造的材料体系不断拓展,从早期的低熔点非金属材料(如工程塑料、树脂和纸张等)到目前的高熔点金属材料^[2]。2016年增材制造金属粉体市场达到了2.5亿美金,同时增材制造金属粉体市场仍保持高增长的态势,IDTechEx预测到2025年增材制造金属粉体市场将达到50亿美金的规模,年复合增长率为39.5%^[3]。

我国金属增材制造技术起步晚,但发展迅速、市场需求大、应用前景广阔。目前,我国金属增材制造材料主要依赖进口,技术应用尚局限于航空航天、塑料模具等个别领域,实现应用的材料主要是少数几

脂和纸张等)到目前的高熔点金属材料^[2]。2016年增材制造金属粉体市场达到了2.5亿美金,同时增材制造金属粉体市场仍保持高增长的态势,IDTechEx预测到2025年增材制造金属粉体市场将达到50亿美金的规模,年复合增长率为39.5%^[3]。

我国金属增材制造技术起步晚,但发展迅速、市场需求大、应用前景广阔。目前,我国金属增材制造材料主要依赖进口,技术应用尚局限于航空航天、塑料模具等个别领域,实现应用的材料主要是少数几

收稿日期: 2017-10-23; 收到修改稿日期: 2017-11-16

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2016YFB1100200)、北京市科技专项计划(Z161100004916009, Z161100001516007)

作者简介: 董世运(1973—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事激光增材制造与再制造及其质量无损检测评价等方面的研究。E-mail: 445279752@qq.com

种钛(Ti)合金和不锈钢粉体材料。德国 Concept Laser 公司、EOS 公司和 SLM Solutions 公司,美国 Carpenter Technology 公司和 Pyrogenesis 公司,英国 CPM 公司和 LPM Technology 公司等国外金属增材制造企业在设备、材料和工程应用等方面的技术水平全面领先于国内。此类公司已把金属增材制造技术推广应用于航空航天、汽车制造、石化工程、模具、电力工业等行业。国外金属增材制造所采用的金属粉体材料也比较广泛,一般有工具钢、马氏体钢、不锈钢、钛合金、铝合金、镍基合金、铜基合金、钴铬合金等。

以钢为代表的铁基合金材料是工程技术中使用范围最广、最重要的金属材料,来源广泛、价格便宜,是激光材料加工领域研究较早、研究较深的金属材料。目前,利用激光增材制造成形的钢材料主要有 H13 工具钢、316L 不锈钢、304L 不锈钢等。钢材料在激光快速制造领域得到了广泛的研究,其中使用最多的是 316L 不锈钢。然而,随着增材制造和粉体制备技术的快速发展,基于钢粉体的增材制造技术急需突破目前面临的一些关键技术难题,例如:粉体质量和性能难以控制、材料成本相对较高、制造大型钢件的成形效率相对较低、可选用的钢粉体材料种类少以及缺少粉体质量评价标准等。

为突破上述因素的制约,激光增材制造钢粉体研制正朝高性能、高质量方向发展。为实现该目标,一些重点研究工作亟待开展,例如:高性能钢粉体材料的科学设计、高效率 and 高质量制粉装备与在线监测控制系统研制、增材制造钢粉体的静态和动态性能评价以及增材制造钢件力学行为研究等。此外,激光选区熔化型增材制造用钢粉体还需要重复使用,因此对原始粉体的形态、质量以及抗老化特性要求更为苛刻,这就需要在粉体研制阶段对其进行系统的科学设计。

随着钛合金、铝合金激光增材制造金属零件的实际应用,钢件激光增材制造已成为当前的研究热点和难点,钢粉体材料是制约钢件激光增材制造技术发展和应用的关键因素之一。为此,本文从激光增材制造钢粉体材料的设计、制备方法、质量评价和现状等方面进行系统总结,提出其存在的主要问题和今后研究的思路。

2 激光增材制造钢粉体材料设计

2.1 设计原则

目前,钢粉体设计的手段主要采用混合元素法,

即依据元素冶金机理设计合金组元配比,通过大样本工艺试验验证粉体成形质量和性能,并通过添加微量元素(或稀土元素)、第二相金属化合物如氧化钇(Y_2O_3)、二氧化铈(CeO_2)等调控实现粉体的特殊使用性能^[4]。

在材料设计途径上,主要采用理论计算、数值模拟和试验分析相结合的方法。从材料性能要求出发,依据钢相图计算、工艺过程监测控制、组织特征分析和缺陷检测、机械性能评价与统计建模以及合金组元优化设计的技术途径进行材料设计,如图 1 所示。

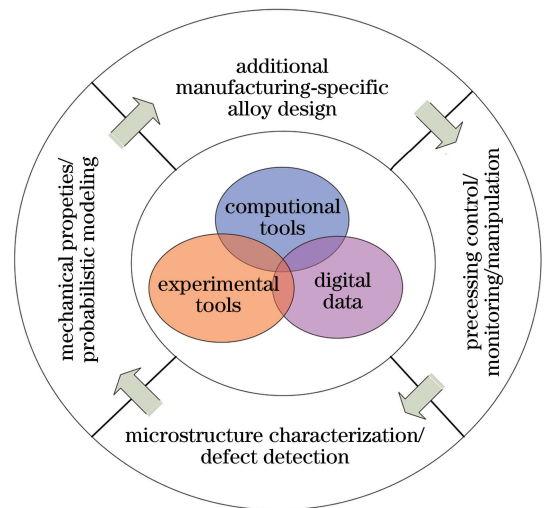


图 1 合金粉末闭环设计流程

Fig. 1 Flow diagram of closed-loop design process for alloy powders

围绕该设计途径,一些关键的科学问题和技术理论需要深入研究,例如:钢粉体多元体系中合金元素的匹配关系、非平衡条件下粉体成分强化设计理论、液态金属雾化过程两相流热量动量传输规律、激光对粉体合金元素作用机制、所设计的合金成分与预期成形钢组织和性能的匹配关系以及钢粉体特性调控等,最终可获得粉体物性、激光参数、成形特性、力学性能的内在映射关系,为钢零件激光增材制造提供材料设计基础。为了获得适用于激光增材制造的高质量钢粉体,可从粉体颗粒形状与粉体性能控制两个方面进行设计。

2.1.1 控形设计原则

激光增材制造钢件的成形形状是决定最终钢件质量的关键因素之一。为此,在形状控制方面,设计研制的激光增材制造用钢粉体需要良好的流动性、较小的线膨胀系数和良好的脱氧造渣、除气、隔气性能,以防止产生裂纹、夹渣、气孔、氧化等缺陷。

粉体的流动性直接影响激光增材制造时铺粉效果、成形过程以及增材制造件质量。粉体的流动性与粉体的粒度、外观形貌、松装密度及霍尔流速等特征有关。粉体的球形度越高、粒度分布越均匀、霍尔流速越小,则粉体的流动性越好。粉体粒度的要求与增材制造技术有关,对于基于铺粉式粉末床的激光增材制造技术,其粉体粒度最好在 $15\sim 53\ \mu\text{m}$ 范围内。

在粉体的工艺特性方面,元素含量的设计对控形也有很大影响。工艺性显著影响成形件的表面质量、气孔率、裂纹和夹杂,与粉体的含氧量、化学成分、粒度有很大关系。粉体溶解的氧及表面氧化物膜影响粉体流动性和熔池冶金成形,会使成形件出现气孔,增大裂纹敏感性,导致粉体成分和成形件力学性能发生改变。因此,高性能的激光增材制造钢粉体中氧(O)元素的质量分数需小于 3×10^{-4} 。硼(B)元素、硅(Si)元素在成形过程中具有脱氧造渣能力,能够有效地减弱液态金属过度氧化,改善润湿能力^[5]。同时,粉体的杂质元素的质量分数要小,磷(P)元素和硫(S)元素的质量分数都要小于0.015%。激光增材制造成形不是简单的激光熔覆,必须具有良好的熔覆层堆积能力,因此要求粉体应具有高强韧性。在钢粉体中加入铬(Cr)元素、钼(Mo)元素等可提高粉体的强度硬度。为了成形高质量大型件,还需要通过合理添加镍(Ni)合金元素来平衡粉体的塑性和韧性。

2.1.2 控性设计原则

控性设计指的是粉体成形后的增材制造件必须具备良好的力学性能,且要达到甚至超过传统的铸造锻造件性能,是粉体设计的重点也是难点。激光增材制造成形的同步送粉方式实现了合金的整体均匀及梯度成形,设计难点在于所设计合金组元综合性能需与成形后覆层性能保持一致,设计的核心是调控粉体元素配比、防止易烧蚀元素在光粉作用过程中损失。国外学者已经开始利用混合元素法进行这方面的研究,Takeda等^[6-8]采用混合元素法研究了激光熔覆铁-铬-镍(Fe-Cr-Ni)和激光表面处理铁-钴-铝(Fe-Co-Al)系合金,建立了合金体系硬度及磨损抗力随所含元素成分变化的关系图。对于激光增材制造钢粉体,建立不同合金组元含量与力学性能的关系,对实现从粉体设计方面获得良好的控性效果至关重要。然而,钢中元素作用及相变过程极其复杂,增加了粉体设计的难度。为此,当前应加强钢粉体元素与激光作用机理研究,系统分析和掌握合

金元素对激光增材制造钢的物相转变和性能演化的规律,以获得钢粉体成分与激光增材制造钢件力学性能的对应关系,实现科学有效的粉体设计。

2.1.3 激光增材制造钢粉体材料设计工具

2011年,奥巴马提出了材料基因组计划,其目标是将材料的发现、设计、制造及实用化的速度提高一倍,其中最重要的一环就是材料设计。当前材料设计主要存在以下几个问题:1)大多数的材料设计主要依赖于试验,没有可靠的计算工具;2)周期长,材料设计速度远小于产品生产速度;3)所设计的材料性能不佳,限制了材料的发展速度。

激光增材制造钢粉体材料设计同样存在以上问题,因此今后的增材制造钢粉体材料的设计发展方向之一是研发有效可靠的计算和试验工具。当前,合金成分设计所用的计算方法主要是借助CALPHAD软件,又称为CALPHAD法,该方法能够计算多元合金在不同温度下的热力学参数及物理特性。成形金属显微组织的预测方法常采用相场法,该方法能够预测复杂显微组织的相变过程。性能预测多采用位错动力学方法和微观力学方法。要建立成分-组织-性能之间关系的数据库,还需要试验的佐证。对于钢的不同元素成分梯度,可以用扩散多元法建立相组织的数据库,但目前尚欠缺一套具有微米级分辨率的性能检测工具^[9]。利用扩散多元法获得的固溶体相成分梯度进行微区性能检测是建立成分-组织-性能关系数据库的必要途径,对激光增材制造钢粉体设计具有重要意义。

目前,常采用的材料设计软件有JMatPro和Materials Studio相图计算与材料性能模拟软件^[10]。在钢粉体成分设计阶段,通过预先计算粉体材料多相平衡与多种性能,从而可以辅助完成合金材料设计。

2.2 元素对钢物相转变的影响

合金元素对成形组织类型和比例具有重要影响。因此,在钢粉体设计中,需要合理分配典型元素的配比,充分发挥元素的冶金特性,如Cr、Ni、钼(Mo)、锰(Mn)、碳(C)等合金元素均能溶入铁素体、珠光体和贝氏体。在铁素体中的固溶强化效果从好到差依次为Mn、Ni、Mo和Cr,在珠光体中的固溶强化效果从好到差依次为Cr、Mo、Mn和Ni,在贝氏体中的固溶强化效果从好到差依次为Mn、Mo、Cr和Ni。除Ni外,多数合金元素会降低铁素体的韧性,特别是Al。合金元素在钢中还能与C发生作用并生成碳化物。Cr、Mo和铌(Nb)元素为强碳化

物形成元素, Mn 为弱碳化物形成元素。合金元素的一部分可溶入铁基固溶体, 另一部分则溶入渗碳体中, 即合金元素代替一部分碳化三铁(Fe_3C)中的铁原子而形成合金渗碳体, 如 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ 。除溶入固溶体和形成合金渗碳体外, 还有剩余的合金元素可形成特殊碳化物, 如 $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$, Ni 和铜(Cu)元素不形成碳化物。

2.3 元素对钢粉体性能的影响

钢是多元铁基合金, 其元素成分复杂, 各元素均影响钢粉体的特性, 进而影响激光增材制造钢件的质量和性能。在合金元素对钢性能影响方面, 人们已积累了丰富的传统钢铁冶金理论和经验知识, 这些理论和经验可为激光 3D 钢粉的设计和研制提供借鉴和参考。C、B、P、Ni、Mo、Cr、Nb、钒(V)、Ti、Al 及稀土元素等在钢中的作用不尽相同, 它们会影响奥氏体区域和生成化合物, 影响晶粒生长和组织形成, 从而影响钢的性能^[11-19]。

C 是钢中最常用的合金化元素, 可溶入铁中形成间隙式固溶体, C 元素在增材制造合金材料中的作用体现为: C 溶入铁中形成的间隙式固溶体起到固溶强化作用, 与铁生成 Fe_3C , Fe_3C 可改善材料的显微组织, 减少金属氧化物的数量, 从而改善材料的力学性能。针对 C 元素在钢粉体设计中的作用机制, 一些学者开展了深入研究。Li 等^[12]研究激光熔覆铁基合金时, 发现 C 的质量分数在 0.3%~0.4% 之间时随着扫描速度的增大而增大。显微硬度增大, Cr 元素的偏析率增大, 而 Ni、Mn、Si 的偏析率先减小后增大; 同时随着扫描速度和 C 的质量分数 ($\geq 0.3\%$) 的增大, 裂纹敏感性增强, 由此可知 C 含量较低时, 凝固温度范围较小, 晶粒细化, 显微硬度较高, 合金涂层的可塑性和韧性较好。Nakamoto 等^[13]研究了 C 含量对选区激光熔化高碳钢组织及力学性能的影响, 对于高碳钢粉体(C 的质量分数为 0.33%~1.05%), 随着激光扫描速度和扫描间距的减小, 采用激光熔化成形(SLM)方法制备的碳钢的孔隙率逐渐降低。

Ni 在钢中的作用体现为: 1) 对基体铁素体产生固溶强化, 且不会明显降低铁素体的延伸率和韧性; 2) 稳定 $\gamma\text{-Fe}$, 使钢的共析含 C 量降低, 增加珠光体量, 使材料在较高的延伸率情况下有较大的强度; 3) Ni 有促进致密化作用, 可减少孔隙和球化; 4) Ni 可降低钢的临界转变温度和钢中各合金元素的扩散速度, 增强钢的淬透性, 促进马氏体的形成, 提升热处理后材料的力学性能。Song 等^[14]研究了 Ni 含

量对激光熔覆 Fe-Cr-Ni-B-Si 合金裂纹敏感性和显微组织形貌的影响, 研究发现随着 Ni 含量的增加, 合金的裂纹敏感性降低, 可塑性得到改善, 显微组织由竹叶结构变为枝晶结构, 热膨胀系数降低。李胜等^[15]研究了 Ni、Cr 和 Mo 合金元素含量对铁基合金激光熔覆层硬度、开裂敏感性和残余奥氏体含量的影响, 研究表明, 随着 Ni 含量的增加, 铁基合金激光熔覆层显微硬度不断降低, 开裂敏感性降低, 不易产生裂纹, 残余奥氏体增多。Yang 等^[16]研究 Ni 含量的增加对激光熔覆铁基合金性能的影响。将 Fe-15.2Cr-5.1Ni 和 Fe-15.7Cr-7.1Ni 两种粉体分别熔覆在 1Cr13 钢表面, 研究发现当 Ni 的质量分数增加 2% 时, 涂层中奥氏体的质量增加约 9%, 枝晶间区域增加 5%, 同时枝晶间富集 Cr, 显微硬度降低, 而 1Cr13 钢的电化学腐蚀、高温抗氧化性能得到提升。

Cr 元素可以提升钢的力学性能, 还可改善钢的抗氧化性能和抗腐蚀性能。Cr 可固溶于 $\alpha\text{-Fe}$ 并缩小 $\gamma\text{-Fe}$ 相区, 还可溶入渗碳体并形成稳定的合金渗碳体 Cr 的碳化物。Cr 不易溶于 $\gamma\text{-Fe}$, 延缓 $\gamma\text{-Fe}$ 的形成, 细化了 $\gamma\text{-Fe}$ 晶粒。姜峰等^[17]研究了 Cr 元素对 Fe-2Ni 合金力学性能的影响。研究表明, Cr 以固溶的形式进入 Fe 基体中, 随 Cr 含量的增大, 固溶强化作用增强, 使钢的硬度和抗拉强度增大。由于 Cr 原子的尺寸较大, 随着 Cr 的加入, 合金密度降低, 气孔等缺陷增多。气孔等缺陷严重影响合金的延伸率和耐冲击性, 故延伸率随着 Cr 含量的增大而降低, 耐冲击性随着 Cr 含量的增大而减弱。

Nb、V、Ti 和 Al 元素在钢中可产生相间沉淀和纤维状碳化物, 沉淀可发生在铁素体、珠光体、贝氏体内, 形成奥氏体、珠光体组织时, 产生较大的强化效果。V 的沉淀强化效果强且容易控制, 是使用最广泛的沉淀强化添加剂^[20]。研究发现, 随着 V、Nb 和 Ti 元素和稀土氧化物二氧化铈(CeO_2) 的依次加入, 熔覆涂层原柱状晶形态逐渐改变为柱状树枝晶, 最后转变为无明显柱状晶方向性的树枝晶; 在激光熔覆涂层中, 同时添加 V 和 Nb 元素, 涂层枝晶间的连续长条状碳化物被截断, 形成块状; 同时添加 V、Nb、Ti 元素和 CeO_2 , 涂层枝晶间的碳化物会被球化。通过改善涂层树枝晶组织形态以及球化枝晶间碳化物, 涂层的抗拉强度和断后伸长率明显得到提高, 涂层的强韧性得到显著增强。其他元素的添加也会对钢的组织及性能产生影响。Gao 等^[21]研究了 Co 元素对激光熔覆铁基合金组织及界面性能的影响。采用 Co 含量不同的铁基合金粉体在中碳钢

表面制备涂层,涂层的枝晶由 $\text{Fe}_{0.64}\text{Ni}_{0.36}$ 相组成,枝晶间区域由 $(\text{Fe},\text{Cr})_7(\text{C},\text{B})_3$ 相组成,Co 均匀地溶解在涂层中。质量分数为 3% 的 Co 涂层枝晶间区域增加了 5%,界面附近的硬度增加了 55 HV,界面强度增大了 30 MPa。界面断裂表现为韧性断裂。

3 激光增材制造钢粉体及其制备方法与评价

3.1 钢粉体研究现状

高性能铁基合金粉体材料的制备是目前科研人员研究的焦点。目前,主流用于激光增材制造成形的铁基合金材料有 H13 工具钢、316L 不锈钢和 304L 不锈钢等。国内中国科学院金属研究所、北京矿冶研究总院、中航迈特粉冶科技有限公司、沈阳稀有金属研究所等单位在不锈钢、模具钢以及高速钢等增材制造用钢粉体方面进行大量的研发和生产工作,为我国军工单位和高校院所提供增材制造粉体产品。清华大学、西北工业大学、北京航空航天大学、华中科技大学、装甲兵工程学院、中国科学院金属研究所和北京有色金属研究总院等研究单位开展了深入的钢粉体增材制造控形控性基础理论研究,推进了高性能激光增材制造钢粉体材料的研制^[22-26]。

目前,国内粉体制备技术相对欧美先进制粉公司存在较大的差距,例如,国产细粒径合金粉体制备相对困难,粉体收得率低、氧及其他杂质含量偏高,金属粉体质量和批次稳定性差,导致了激光增材制造构件中夹杂含量高、致密性差、强度低、结构不均匀等问题。

鉴于国内生产的钢粉体难以满足激光增材制造用粉体的苛刻要求,目前高性能的激光增材制造钢粉体材料主要依赖进口。全球金属粉体市场占有率最高的是英国 Sandvik Osprey 公司,该公司现在供应的钢市场有用于医疗行业的不锈钢和用于快速模具的马氏体时效钢、工具钢等^[26],其采用气雾化技术制备的粉体球形度高、粒度分布均匀、流动性好,在增材制造金属粉体领域有很高的地位。美国的 Carpenter Technology 公司致力于特种合金的开发,在钢粉体方面主要提供不锈钢及工具钢^[27]。该公司目前销售的钢粉体有上百个品种,例如,用于排气阀的具有良好高温强度和耐腐蚀性的 21-12N 铬镍合金,用于恒温器的高膨胀系数 22-3 合金等。此外,瑞典 Hoeganaes、英国 LPW 公司、德国 H.C. Starck 也都是生产高性能增材制造用钢粉体的先进

单位。国内的中航迈特粉冶科技(北京)有限公司利用电极感应熔炼雾化技术制备了高品质的球形钢粉体,提供不锈钢、高强钢等产品,该公司在钢粉体方面解决了球形度、收得率等问题。上海材料研究所引进国外高端雾化制粉设备,能够制备含氧量低、流动性好的不锈钢和模具钢粉体,制备的 316L、17-4PH 不锈钢和 18Ni-300 模具钢都具有很高的球形度,霍尔流速小于 0.5 s/g,松装密度为 $3.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,具备很好的激光增材制造成形工艺性。除此之外,还有飞尔康、西安塞隆、苏州英纳特纳等公司也在研发和制备高品质激光增材制造钢粉体。

3.2 典型激光增材制造钢粉体

目前,应用于激光增材制造的较为成熟的钢粉体材料相对较少,且多沿用热喷涂系列合金或激光表面熔覆系列合金,这些材料表面涂覆层成形性能较为优异,但体成形性相对欠缺。现阶段适用于激光增材制造的钢材料有 316L 和 304L 不锈钢、18Ni-300 马氏体时效钢、17-4 PH 和 15-5 PH 沉淀硬化不锈钢以及 H13 工具钢等,依据激光增材制造钢粉体的使用性能,可将其分为高强韧钢粉体、耐磨损钢粉体、抗疲劳钢粉体等类型。

3.2.1 高强韧钢粉体

高强韧钢兼具高强度、高韧性,且成形性能好,目前已成为激光增材制造钢构件的主要材料。高强韧钢中合金元素的主要强化机制为固溶强化,析出碳化物第二相强化和细晶强化。因此,高强韧钢粉体多采用添加 Ni、Cr、钨(W)和 Mo 等元素实现固溶强化以及采用析出的碳化物来强化合金化层。通过添加少量的 B 和 C 改善晶界,以实现晶界强化。Al、Ti、Nb 和 Mo 等强碳氮化物形成元素可形成颗粒,阻止晶粒长大,弥散分布的硬质碳化物颗粒使整个材料的强度得到了提升;同时激光熔覆过程中的快速升温 and 降温过程使材料发生非稳态固态的相变过程,为个别钢种弥散的纳米级渗碳体的形成等硬化过程提供了条件。

在高强韧钢粉体体系中,不锈钢粉体材料的研究与应用相对较多,其中,316L 钢是使用和研究较多的不锈钢之一,具有较好的强韧综合性能,在高温下具有较大的强度和较好的耐腐蚀性^[28-29]。AISI 316L 是该种不锈钢钢粉体的美国牌号,国内标准牌号为 022Cr17Ni12Mo2。与 316 不锈钢相比,316L 降低了其中的 C 含量;在激光加工过程中,316L 碳很难析出并与铬结合成碳化铬,提升了不锈钢的耐腐蚀性能。许多学者对 316L 不锈钢在激光增材制

造中的应用进行了基础性研究,席明哲等^[30]研究了激光同轴送粉成形中粉体与激光的作用;宋建丽等^[29]对激光熔覆成形 316L 不锈钢的成形工艺进行了研究和优化,得到组织细密无缺陷的、垂直于结合面的外延生长柱状树枝晶和层间部分转向树枝晶的熔覆层,其抗拉强度和延伸率均接近或超出传统加工方法,熔覆层与基体呈冶金结合;陈静等^[18]研究了 316L 不锈钢粉体在激光快速成形过程中熔覆层的开裂行为及其成形机理,研究表明熔覆层的裂纹是凝固裂纹,属于热裂纹范畴。

304L 不锈钢对应国内牌号 022Cr19Ni10,具有优异的强韧综合性能、耐腐蚀性能和加工性能。目前已经有一些关于 304L 在激光增材制造中的应用研究成果,史玉升等^[31]采用 304L 不锈钢粉体进行选择 SLM 工艺试验,发现高激光功率、低扫描速率、窄扫描间隔和低铺粉层有利于成形件的致密化。西北工业大学王波等^[32]对成形过程中瞬时应力场及残余应力场和基板的最终形态进行了瞬态热弹塑有限元分析,发现基板预变形可以有效提高成形后基板的平整度。Bailey 等^[33]发现 304L 基体热影响区的残余应力因受激光多层堆积成形过程中的循环热作用而变小。

17-4PH 钢对应国内牌号 0Cr17Ni4Cu4Nb,具有较大强度、良好的塑韧性和耐腐蚀性能以及优异的焊接性能,广泛应用于各种对材料性能要求较为苛刻的场合,如大型压缩机转子、压气机叶片和核反应堆结构件等^[34]。该类零部件制造工艺复杂、附加值高,具有很大的增材制造潜力。Wu 等^[35-36]使用 17-4PH 不锈钢粉体在 17-4PH 基体上进行激光熔覆成形研究,发现激光沉积件的强度较大,但可塑性很差,通过热处理和激光重扫后处理可显著改善其可塑性。本课题组针对 17-4PH 不锈钢粉体激光沉积成形的过程,建立了考虑固态相变影响的激光熔覆过程的应力数值模型,发现固态相变对沉积成形过程的应力影响很大^[37]。

3.2.2 耐磨损钢粉体

某些激光增材制造钢件需在摩擦磨损条件下使用,例如模具零件,这对钢粉体提出了较高的耐磨损性能要求。从微观结构上看,钢的耐磨性主要得益于碳化物的生成,以及经历固态相变后奥氏体及残余奥氏体向马氏体的转变。一般来说,随着 C 元素的增多,固溶体中的 Fe_3C 等碳化物的增多和弥散分布势必会增强钢件的耐磨性,但也严重降低了材料的可塑性。如果加入其他强碳化物后形成了合金

元素,则可有效解决强韧性低的问题。目前,由于耐磨损钢的成分、成形能力及其应用等综合问题较为复杂,仅有少数学者使用耐磨损钢材料进行激光增材制造试验。

H13 是一种应用广泛的热作模具钢材料,对应的国内牌号为 4Cr5MoSiV1,具有高的强度、耐磨损性、冲击韧性、淬透性和较好的热稳定性。H13 是 Cr 系热作不锈钢,学者对其成分的优化进行了广泛的研究,通过控制 S、C 和 Cr, H13 钢的塑韧性可得到明显改善^[38-39]。西安交通大学刘建永等^[40]开展了 H13 合金粉体的激光熔覆工作, H13 熔覆层与基体呈冶金结合,涂层组织致密无裂纹,成形件界面区域出现硬化,是基体硬度的 2.4~3.0 倍。Telasang 等^[41]开展了 H13 工具钢的激光增材制造研究,研究发现在 550 °C 下经 2 h 的回火处理后,可获得致密均匀的组织,沉积件晶界和枝晶间区域的碳化物偏析消失,同时通过 1000 W 的激光重熔可使组织得到进一步细化,经过激光处理后沉积件表面的残余应力为压应力。

3.2.3 抗疲劳钢粉体

大型复杂的钢承力零部件的服役时间长,服役环境恶劣,其材料必须同时拥有较好的强韧性能、加工性能和抗疲劳性能。一些学者对承力部位的钢激光增材制造件的疲劳特性进行了研究。在激光/金属相互作用过程中,极高的能量密度使基体表面材料在成形过程中发生熔化,熔覆层及基体受到的短周期、多循环、具有极高加热和冷却的热历史不同,因而固态相变过程和最终组织的形貌也不同。钢材的成分决定其升降温过程的稳态和非稳态固态相变过程是复杂而难以精准预测和控制的,同时材料本身还要拥有优异的增材制造成形能力,因此目前和未来一段时间,钢材的增材制造部件的疲劳问题会成为制约增材制造钢件的关键问题之一^[42]。

300M 钢拥有超高的强度(达到 1860 MPa 以上)及优异的综合性能,国内牌号为 43CrNiSiMoV,相比加入 Si(质量分数为 1.6%)和 V(质量分数为 0.1%)的 4340 钢,其屈服强度和抗拉强度,特别是固有疲劳强度得到极大的提高,因此该种合金粉体具有极大的强度和较好的抗疲劳性能。董翠等^[43]对激光熔化沉积快速成形 300M 钢薄板的显微组织和力学性能进行了分析,结果显示,沉积过程不同,沉积高度材料经历的快速非稳态热循环历史也不同,试样中、上部为马氏体和贝氏体混合组织,中、下部为无碳贝氏体和岛状马氏体/奥氏体(M-A)组织,

底部为马氏体及贝氏体回火组织。300M 钢薄板硬度也随沉积高度的变化呈阶梯状变化,对应上述组织结果;刘丰刚等^[44]开展了激光立体成形修复 300M 钢的相关工作,修复后沉积态试样的拉伸性能远低于锻件标准,经过热处理后,各项力学性能均得到了改善。应力-应变曲线结果显示,超过最大拉伸强度后,局部应变在修复区急剧增加;修复件沉积态显微组织从修复区顶部到基材的发生率显著变化,冲击韧性为 $14.3 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$,远低于 300M 钢锻件,经过热处理后修复件组织明显变得均匀,冲击韧性提高到 $28.3 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。沉积态试样的断裂方式为准解理断裂,主裂纹在扩展过程中横穿马氏体区域,并在下个区域发生偏转,而热处理试样的断裂方式为韧性断裂。

3.3 粉体制备方法

用于增材制造的金属粉体材料是金属增材制造的物质基础,同时也是增材制造技术发展的突破点。增材制造金属粉体除需具备良好的可塑性外,还必须满足粉体粒径细小、粒度分布较窄、球形度高、流动性好和松装密度高等要求。目前,粉体制备方法按照制备工艺主要可分为还原法、电解法、羰基分解法、研磨法和雾化法等。不同的制备方法对粉体的要求不同,电解法和还原法只适合单质金属粉体的制备,无法制备钢粉体。雾化法能够控制粉体形状,满足增材制造对金属粉体的特殊要求,成为了目前应用最广泛的钢粉体制备方法^[45]。

目前,激光增材制造钢粉的制备技术主要分为气雾化法、等离子雾化法和等离子体旋转电极法等,其中气雾化法又可细分为层流雾化法、紧耦合雾化法、真空感应熔炼气雾化法(VIGA)和电极感应熔炼气雾化法(EIGA)等。不同制粉方法的技术原理存在差异,使其在制备激光 3D 钢粉方面也各有优缺点。等离子雾化法具有雾化效率高、制备粉体呈近规则球形、粉体质量大等优点,适合用于增材制造,但该方法不适用于难变形合金。等离子旋转电极法制备的粉体具有球形度高、纯度高、流动性好等特点,可有效避免“伞效应”,同样适用于增材制造,但该方法存在粉体收得率低的问题。在几种气雾化方法中,层流雾化法具有雾化效率高、气体消耗量低、制备粉体粒度分布窄等优点,但该方法控制难度大,粉体产量小,仅部分适用于增材制造;紧耦合雾化法可制备 $2 \mu\text{m}$ 以下的超细粉体,但同样存在粉体产量小的问题,也仅部分适用于增材制造;VIGA 法可制备难熔高温合金粉体,粉体具有粒径分布较

宽、纯度高、球形度高等特点,适用于增材制造,缺点是制备过程易污染、腐蚀仪器;EIGA 法的优点是能耗低、可制备活性材料,所制备的粉体行星颗粒较多,粒度细,含氧量低,同样适用于增材制造,但制备过程应存在电极偏析、粉体粘连、孔隙率高等问题^[46-54]。不同粉体制备方法各有千秋,但增材制造技术对钢粉体质量的要求极高,从而对制粉装置和技术的要求也越来越严。目前,最具有发展前景的还是 VIGA 技术、EIGA 技术和等离子旋转电极技术。有些学者也研究了几种技术的相互结合,取得了一些成果,但与实现工业化生产、满足增材制造需求还有一定差距。

3.4 钢粉体质量评价

增材制造件的性能很大程度取决于粉体特性,粉体成为了增材制造技术的重中之重。当前生产粉体的研究单位及公司有很多,制备方法也不尽相同,粉体性能的评价成为产业链中的重要一环。

目前,尚无评价激光增材制造合金粉体的国家标准,多沿用热喷涂和粉体冶金粉体制备与性能测试标准,例如 HB 5441.6-1989《粉末冶金制品和粉体的性能测试金属粉体流动性的测试方法》、JIS H8260-2007《热喷涂用粉末》、GB/T 5158.1-2011《金属粉末还原法测定氧含量第 1 部分总则》、GB/T 1482-2010《金属粉末流动性的测定标准漏斗法(霍尔流速计)》、GB/T 19743-2005《粉末冶金用水雾化纯铁粉、合金钢粉》、JIS Z2504-2000《金属粉末—表观密度测定方法—漏斗法》等。

目前,研究人员对粉体的化学成分、粒度大小及粒度分布、粉体形貌、粉体松装密度和振实密度、粉体流动性等开展了一系列的评价^[55-57]。由于用于增材制造的金属粉体种类繁多,形成统一的粉体评价标准是一项复杂的事情。当前粉体的性能评价形式还处于粉体物理特性的研究,对于元素作用形式及规律还停滞不前,这也与钢的复杂相变过程有关。要建立科学的评价标准,需要从研究元素作用机理方面出发,深入探讨元素在激光成形过程中与激光的相互作用。

4 激光增材制造钢件典型实例

3D Systems 公司在增材制造市场上具有重要的国际影响力,可满足不同规模和形状的增材制造需求。该公司工业级增材制造机 PROX DMP320 允许增材制造马氏体时效钢、316L 和 17-4PH 等常见高强韧钢材料。该公司制造的沉积件致密度接近

100%，力学性能优异，制备的马氏体时效钢件(沉积态)的抗拉强度可达 (1110 ± 50) MPa，延伸率可达11%。Caterpillar公司可利用激光增材制造技术制造复杂的汽车零部件，从而提高了复杂零部件的生产效率，为制造已经停产的燃油滤清器底座(图2)等复杂的结构钢零件提供了便利途径。

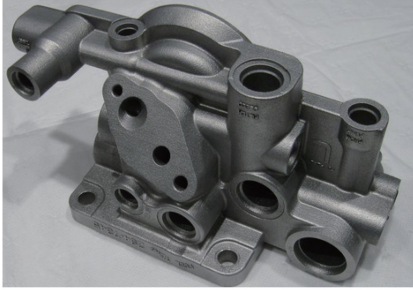


图2 Caterpillar公司制造的燃油滤清器底座

Fig. 2 Fuel filter base produced by Caterpillar company

ExOne公司提供工业级打印机的生产、销售和增材制造服务。该公司使用420不锈钢激光增材制造成形了不同尺寸和形状的零部件。在面对多尺寸、多形状零件的快速制造方面，激光增材制造克服了传统模具铸造的限制，大大提高了零件制造的效率，降低了零件制造的成本。

武汉滨湖机电技术产业有限公司是国内最早从事增材制造技术研究的企业之一。该公司采用增材制造激光选区熔化成型和铸造结合的方法，将六缸发动机蠕铁缸盖的生产周期从5个月缩短到一周。同时，缸体、缸盖、排气管和发动机叶片(图3)等内部结构复杂零件也适合使用该方法进行制造。

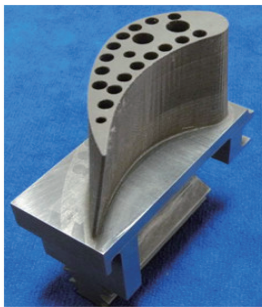


图3 增材制造的航空发动机叶片

Fig. 3 Blade of aviation engine by additive manufacturing

美国NanoSteel公司开发了一种专门用于增材制造的硬化钢材，型号为BLDRmetal L-40，其力学性能如表1所示。该材料的热处理态硬度大于70 HRC，延伸率可达10%，所制备零部件(图4)的综合力学性能远优于一般用于增材制造的硬化钢材

料，如H13和M300。同时，该材料激光增材制造的成形性能比较优异，在激光增材制造成形过程中几乎不产生裂纹等缺陷。C.F.K公司使用该材料成功完成20.32 cm的滚螺纹模具的制造。BLDRmetal L-40使双螺纹结构模具的制造变得简单且成形件几乎没有缺陷^[58]。

表1 NanoSteel公司的L-40钢材料力学性能^[60]

Table 1 Physical properties of L-40 steel from NanoSteel company


Property	Test standard	As-deposited state	As-deposited state after heat treatment
Tensile strength / MPa	ASTM E8	1500	1650
Yield strength / MPa	ASTM E8	1300	1350
Elongation	ASTM E8	14+	10
Hardness / HRC	ASTM E384	51	66-74

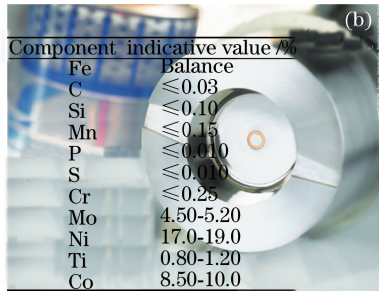


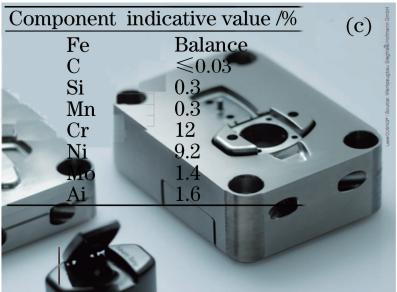
图4 NanoSteel公司的L-40钢零部件

Fig. 4 L-40 steel components from NanoSteel company

德国的Concept Laser公司在增材制造用钢材材料上有自己专门的实验室，可保证粉体的质量，并对材料成分进行优化以满足不同的成形需求^[59]。图5为Concept Laser公司采用几种典型材料增材制造的零部件。图5(a)中的零部件型号为CL20ES，所用钢材为316L，主要用于各种不同功能性零部件和3D熔模的成形；图5(b)中的零部件型号为CL50WS，是一种热作钢材料，主要用于制作注塑成形模具和压铸模具；图5(c)中的零部件型号为CL91RW，是高强度耐腐蚀的热作钢，用于大型注塑成形模具部件和高载荷不锈钢零件的成形；图5(d)中的零部件型号为CL92PH，所用钢材为17-4PH，主要用于各种功能部件和医疗器件。

Component indicative value /%		(a)
Fe	Balance	
Cr	16.5-18.5	
Ni	10.0-13.0	
Mo	2.0-2.5	
Mn	0-2.0	
Si	0-1.0	
P	0-0.045	
C	0-0.030	
S	0-0.030	

Component indicative value /%		(b)
Fe	Balance	
C	≤0.03	
Si	≤0.10	
Mn	≤0.15	
P	≤0.010	
S	≤0.008	
Cr	≤0.25	
Mo	4.50-5.20	
Ni	17.0-19.0	
Ti	0.80-1.20	
Co	8.50-10.0	

Component indicative value /%		(c)
Fe	Balance	
C	≤0.03	
Si	0.3	
Mn	0.3	
Cr	12	
Ni	9.2	
Mo	1.4	
Al	1.6	

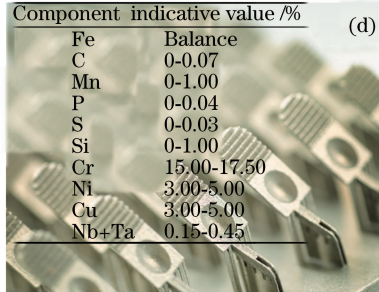
Component indicative value /%		(d)
Fe	Balance	
C	0-0.07	
Mn	0-1.00	
P	0-0.04	
S	0-0.03	
Si	0-1.00	
Cr	15.00-17.50	
Ni	3.00-5.00	
Cu	3.00-5.00	
Nb+Ta	0.15-0.45	

图5 Concept Laser公司的钢铁材料零部件。(a) CL20ES;(b) CL50WS;(c) CL91RW;(d) CL92PH^[61]

Fig. 5 Steel components from Concept Laser company. (a) CL20ES; (b) CL50WS; (c) CL91RW; (d) CL92PH

5 结 论

激光增材制造技术具有高柔性设计、无模具加工、短周期成形等优点,在制造高性能金属构件方面向传统制造技术发起了挑战。钢材作为用途最广泛的金属材料,实现钢件的激光增材制造生产将使激光增材制造技术得到应用和推广,并给传统制造业发展带来革命性的推动。当前,钢的激光增材制造还处于研究状态,距离工业化生产还有很大差距,其中,增材制造钢粉体是重要的制约因素。为此,针对激光增材制造钢粉体的研究和应用发展,应重点关注以下4个方面的内容:

1) 加强钢粉体元素与激光作用机理的研究。在粉体设计时,综合考虑合金元素与工艺设备,采用混合元素法探索不同体系钢的元素与性能的对应关系,建立成分、组织与性能的数据库,实现在粉体设计阶段对零件性能的调控及预测。

2) 注重粉体制备技术的多方法融合与创新,实现工艺与装备一体化。当前,用于制备增材制造钢粉体的方法主要包括真空感应熔炼雾化技术、电极感应熔炼雾化技术和等离子旋转电极技术,粉体收得率及物理特性仍是目前需主要解决的问题。通过改进制备方法和装置,可提高粉体制备效率,是今后粉体制备技术的重要发展方向。

3) 建立科学统一的粉体评价标准体系。激光增材制造钢粉体评价不仅是物理特性的评价,更应该注重性能评价,其评价标准应与粉体设计要求联

系起来,共同建立一个标准体系。

参 考 文 献

- [1] Lu B H. Research progress of advanced manufacturing technology in Xi'an Jiaotong University[J]. Engineering Sciences, 2013, 15(1): 4-8.
卢秉恒. 西安交通大学先进制造技术研究进展[J]. 中国工程科学, 2013, 15(1): 4-8.
- [2] Breuninger J. Additive manufacturing: Challenges and advantages for the medical industry[J]. Puerto Rico Health Sciences Journal, 2000, 19(1): 57-67.
- [3] 赵晓凤. 美国3D打印产业发展迅速将带动全球金属粉末市场[J]. 现代材料动态, 2017, (3): 16-17.
- [4] Zheng X, Xue L, Huang W D. Powder proportion during laser solid forming from blended element powders[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(18): 21-23.
郑星, 薛蕾, 黄卫东. 混合元素法激光立体成形中粉末配比的研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41(18): 21-23.
- [5] Dong S Y, Ma Y Z, Xu B S, *et al.* Current status of material for laser cladding[J]. Materials Review, 2006, 20(6): 5-9.
董世运, 马运哲, 徐滨士, 等. 激光熔覆材料研究现状[J]. 材料导报, 2006, 20(6): 5-9.
- [6] Takeda T, Steen W M, West D R F. Laser cladding with multi elemental powder feed [M]. Berlin: Springer, 1986: 394-398.

- [7] Steen W M, Vilar R M, Watkins K G, *et al.* Alloy system analysis by laser cladding [C]// Proceeding ICALEO, 1992, 92: 278-288.
- [8] Watkins K G. Achieving the potential of direct fabrication with lasers [C]. 3rd International Conference on Laser Assisted Net Shaping (LANE 2001), 2001: 25-38.
- [9] Zhao J C. A perspective on the materials genome initiative [J]. Chinese Journal of Nature, 2014, 36(2): 89-104.
赵继成. 材料基因组计划简介 [J]. 自然杂志, 2014, 36(2): 89-104.
- [10] 中仿科技. 金属材料相图及物理性能计算软件 JMatPro V6.1 简介 [J]. 智能制造, 2012(10): 35-37.
- [11] Li Y M, Li J G, Yang H O, *et al.* Laser direct forming of metal components [J]. Applied Laser, 2002, 22(2): 140-144.
李延民, 李建国, 杨海欧, 等. 金属零件激光直接成形 [J]. 应用激光, 2002, 22(2): 140-144.
- [12] Li S, Hu Q W, Zeng X Y, *et al.* Effect of carbon content on the microstructure and the cracking susceptibility of Fe-based laser-clad layer [J]. Applied Surface Science, 2005, 240(1): 63-70.
- [13] Nakamoto T, Shirakawa N, Miyata Y, *et al.* Selective laser sintering of high carbon steel powders studied as a function of carbon content [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(15): 5653-5660.
- [14] Song W L, Zhu P D, Cui K. Effect of Ni content on cracking susceptibility and microstructure of laser-clad Fe-Cr-Ni-B-Si alloy [J]. Surface and Coatings Technology, 1996, 80: 279-282.
- [15] Li S, Zeng X Y, Hu Q W. Influence of alloy elements and their content on performance of laser cladding layers on Fe-based alloy [J]. Hot Working Technology, 2006, 35(23): 67-69.
李胜, 曾晓雁, 胡乾午. 合金元素及其含量对铁基合金激光熔覆层性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2006, 35(23): 67-69.
- [16] Yang X Y, Peng X, Chen J, *et al.* Effect of a small increase in the Ni content on the properties of a laser surface clad Fe-based alloy [J]. Applied Surface Science, 2007, 253(9): 4420-4426.
- [17] 姜峰. 合金元素对粉末冶金低合金钢性能和组织的影响研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2004.
- [18] Chen J, Lin X, Wang T, *et al.* The hot cracking mechanism of 316L stainless steel cladding in rapid laser forming process [J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2003, 32(3): 183-186.
陈静, 林鑫, 王涛, 等. 316L 不锈钢激光快速成形过程中熔覆层的热裂机理 [J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(3): 183-186.
- [19] Yang H O. The Microstructure and Mechanical Characters of Rene95 Laser Solid Forming [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2002.
杨海欧. Rene95 合金激光立体成形显微组织与力学性能研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2002.
- [20] Shi D K, Meng Q K, Liu J H. Microstructure and mechanical properties of interphase precipitation steel [J]. Iron & Steel, 1994, 29(4): 50-55.
石德珂, 孟庆奎, 刘军海. 相间沉淀钢的组织与性能 [J]. 钢铁, 1994, 29(4): 50-55.
- [21] Gao L L, Bian X F, Tian Y S, *et al.* Effect of Co on microstructure and interfacial properties of Fe-based laser cladding [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2009, 16(4): 84-88.
- [22] Zhang Y Z, Xi M Z, Shi L K, *et al.* Research on laser direct deposition of 316L stainless steel [J]. Journal of Materials Engineering, 2002(5): 22-25.
张永忠, 席明哲, 石力开, 等. 激光快速成形 316L 不锈钢研究 [J]. 材料工程, 2002(5): 22-25.
- [23] Xi M Z, Zhang Y Z, Zhang P Z, *et al.* Influence of processing parameter on the microstructure and properties of the 316L SS fabricated by laser direct deposition [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(11): 1045-1048.
席明哲, 张永忠, 章萍芝, 等. 工艺参数对激光快速成型 316L 不锈钢组织性能的影响 [J]. 中国激光, 2002, 29(11): 1045-1048.
- [24] Liu Z W, Cheng X, Li J, *et al.* Effect of heat treatments on microstructures and mechanical properties of laser additive manufactured 05Cr15Ni5Cu4Nb stainless steel [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0602010.
刘正武, 程序, 李佳, 等. 激光增材制造 05Cr15Ni5Cu4Nb 沉淀硬化不锈钢的热处理工艺 [J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0602010.
- [25] Wang Z H, Wang H M, Liu D. Microstructure and mechanical properties of AF1410 ultra-high strength steel using laser additive manufacture technique [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0403001.
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): 0403001.
- [26] Capus J. Sandvik Osprey: a very bright future [J].

- Metal Powder Report, 2016, 71(2): 81-85.
- [27] 江洪, 杜妍洁, 刘义鹤. 美国科技与金融结合案例: Carpenter 技术公司发展启示[J]. 新材料产业, 2016(8): 21-24.
- [28] Chen J, Lin X, Wang T, *et al.* Metal powder materials for additive manufacturing and their preparation methods[J]. Industrial Technology Innovation, 2017(4): 59-63. 张飞, 高正江, 马腾, 等. 增材制造用金属粉末材料及其制备技术[J]. 工业技术创新, 2017(4): 59-63.
- [29] Song J L, Deng Q L, Hu D J, *et al.* Microstructure characterization and properties of laser cladding forming 316L stainless steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(10): 1441-1444. 宋建丽, 邓琦林, 胡德金, 等. 激光熔覆成形 316L 不锈钢组织的特征与性能[J]. 中国激光, 2005, 32(10): 1441-1444.
- [30] Xi M Z, Yu G, Zhang Y Z, *et al.* Interaction of the laser beam and the metal powder conveyed by coaxial powder feeder[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(4): 562-566. 席明哲, 虞钢, 张永忠, 等. 同轴送粉激光成形中粉末与激光的相互作用[J]. 中国激光, 2005, 32(4): 562-566.
- [31] Shi Y S, Li R D, Zhang W X, *et al.* Study on the technique during selective laser melting of stainless steel powder[J]. Electromachining & Mould, 2010(s1): 67-72. 史玉升, 李瑞迪, 章文献, 等. 不锈钢粉末的选择性激光熔化快速成形工艺研究[J]. 电加工与模具, 2010(s1): 67-72.
- [32] Wang B, Lin X, Ma L, *et al.* A thermo-mechanical finite element method simulation of 304L stainless steel during laser solid forming with pre-deformation substrate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(1): 242-249. 王波, 林鑫, 马良, 等. 基板预变形下 304L 不锈钢激光立体成形过程热弹塑性有限元分析[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 242-249.
- [33] Bailey N S, Katinas C, Shin Y C. Laser direct deposition of AISI H13 tool steel powder with numerical modeling of solid phase transformation, hardness, and residual stresses[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 247: 223-233.
- [34] Wang W F, Zheng Y G. Microstructure and properties of 17-4PH steel by laser solid solution and aging treatment and its cavitation erosion resistance[J]. Transactions of Materials & Heat Treatment, 2013, 34(9): 155-159. 王维夫, 郑玉贵. 17-4PH 钢激光固溶-时效强化及抗空蚀性能[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(9): 155-159.
- [35] Wu Q L, Song F M, Sun Y S, *et al.* Microstructure and properties of TiC strengthened 17-4PH stainless steel[J]. Hot Working Technology, 2007, 36(16): 39-42. 吴钱林, 宋凤明, 孙扬善, 等. TiC 弥散强化 17-4PH 钢的显微组织和性能[J]. 热加工工艺, 2007, 36(16): 39-42.
- [36] Hu Z, Zhu H, Zhang H, *et al.* Experimental investigation on selective laser melting of 17-4PH stainless steel[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 87: 17-25.
- [37] Fang J X, Dong S Y, Wang Y J, *et al.* The effects of solid-state phase transformation upon stress evolution in laser metal powder deposition[J]. Materials & Design, 2015, 87: 807-814.
- [38] Song W W, Min Y A, Wu X C. Study on carbides and their evolution in H13 hot work steel[J]. Transactions of Materials & Heat Treatment, 2009, 30(5): 122-126. 宋雯雯, 闵永安, 吴晓春. H13 钢中的碳化物分析及其演变规律研究[J]. 材料热处理学报, 2009, 30(5): 122-126.
- [39] Bailey N S, Katinas C, Shin Y C. Laserdirect deposition of AISI H13 tool steel powder with numerical modeling of solid phase transformation, hardness, and residual stresses[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 247: 223-233.
- [40] Ye S Y, Liu J Y, Yang W. Quality of H13 alloy coating on H13 steel prepared by laser cladding[J]. Surface Technology, 2015, 44(8): 81-85. 叶四友, 刘建永, 杨伟. H13 钢表面激光熔覆 H13 合金涂层质量研究[J]. 表面技术, 2015, 44(8): 81-85.
- [41] Telasang G, Majumdar J D, Padmanabham G, *et al.* Structure-property correlation in laser surface treated AISI H13 tool steel for improved mechanical properties[J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 599: 255-267.
- [42] 张莹. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室在激光立体成形技术方面取得重要研究进展——金属 3D 打印技术[J]. 中国材料进展, 2013, 32(8): 508.
- [43] Dong C, Wang H M. Microstructures and mechanical properties of ultra-high strength steel 300M fabricated by laser melting deposition[J]. Heat Treatment of Metals, 2008, 33(9): 1-5.

- 董翠, 王华明. 激光熔化沉积 300M 超高强度钢组织与力学性能[J]. 金属热处理, 2008, 33(9): 1-5.
- [44] Liu F G, Lin X, Song K, *et al.* Microstructure and mechanical properties of laser forming repaired 300M steel[J]. *Acta Metallurgical Sinica*, 2017, 53(3): 325-334.
- 刘丰刚, 林鑫, 宋衍, 等. 激光修复 300M 钢的组织及力学性能研究[J]. 金属学报, 2017, 53(3): 325-334.
- [45] 姚妮娜, 彭雄厚. 增材制造金属粉体的制备方法[J]. 四川有色金属, 2013, (4): 48-51.
- [46] Gerking L. Powder from metal and ceramic melts by laminar gas streams at supersonic speeds [J]. *PMI Powder Metallurgy International*, 1993, 25(2): 59-65.
- [47] Liang R, Dang X A, Zhao X J, *et al.* Status of Atomization Nozzle Design for Micron Metal Powders [J]. *Nonferrous Metals*, 2008, 60(1): 36-40.
- 梁荣, 党新安, 赵小娟, 等. 微细金属粉末雾化喷嘴的设计进展[J]. 有色金属工程, 2008, 60(1): 36-40.
- [48] 陈欣. 紧耦合气雾化流场结构和雾化机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [49] He W W, Jia W P, Yang G Y, *et al.* Research progress in preparation of TiAl-alloyed power [J]. *Titanium Industry Progress*, 2012, 29(4): 1-6.
- 贺卫卫, 贾文鹏, 杨广宇, 等. TiAl 预合金粉末制备的研究进展[J]. 钛工业进展, 2012, 29(4): 1-6.
- [50] 刘娜, 李周, 袁华, 等. 一种粉体高温合金的熔炼方法: CN103589912A[P]. 2014-02-19.
- [51] Qin S S, Yu Y, Zeng G Y, *et al.* Research on the preparation of metal powder for 3D printing [J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2016, 26(5): 21-24.
- 覃思思, 余勇, 曾归余, 等. 3D 打印用金属粉末的制备研究[J]. 粉末冶金工业, 2016, 26(5): 21-24.
- [52] Chen S Y, Dong H H, Liu C S, *et al.* TC4 alloy powder prepared by electrode induction melting gas atomization for laser 3D printing [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science Edition)*, 2017, 38(4): 497-501.
- 陈岁元, 董欢欢, 刘常升, 等. EIGA 法制备激光 3D 打印用 TC4 合金粉末[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 497-501.
- [53] Wei M W, Chen S Y, Guo K K, *et al.* Preparation of TA15 Titanium alloy powder by EIGA for laser 3D printing [J]. *Materials Review*, 2017, 31(6): 64-67.
- 魏明炜, 陈岁元, 郭快快, 等. EIGA 法制备激光 3D 打印用 TA15 钛合金粉末 [J]. 材料导报, 2017, 31(6): 64-67.
- [54] 赵风琴, 王长京. 等离子旋转电极制粉设备中的等离子发生器装置的设计与制造 [J]. 稀有金属材料与工程, 1988, (6): 69-73.
- [55] 杨启云, 吴玉道, 仲守亮. 增材制造专用金属粉体的特性研究 [C]. 全国粉体冶金学术会议暨海峡两岸粉体冶金技术研讨会. 2015.
- [56] Chen Y W, Guan H J, Li B, *et al.* Characteristics and applications of metal powders for 3D printing [J]. *Materials Review*, 2017(s1): 98-101.
- 程玉婉, 关航健, 李博, 等. 金属 3D 打印技术及其专用粉末特征与应用 [J]. 材料导报, 2017(s1): 98-101.
- [57] Fan L K. Analysis on key factors of metal powders for additive manufacturing [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing*, 2015, 51(7): 480-482.
- 范立坤. 增材制造用金属粉末材料的关键影响因素分析 [J]. 理化检验-物理分册, 2015, 51(7): 480-482.
- [58] Nanosteel. Bldrmetal for powder bed fusion [EB/OL]. (2017-09-07) [2017-09-20]. <https://nanosteelco.com/products/additive-manufacturing/powder-bed-fusion/>
- [59] Concept Laser GmbH. CL 20ES stainless steel [EB/OL]. (2017-09-01) [2017-09-20]. <https://www.concept-laser.de/en/products/materials.html>