DOI: 10.3901/JME.2021.01.186

金属异质材料增材制造研究进展*

王 迪¹ 邓国威¹ 杨永强¹ 陈 杰¹ 吴伟辉² 张明康¹

(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院 广州 510640;

2. 韶关学院智能工程学院 韶关 512005)

摘要: 极端复杂工况条件对材料的功能性提出了新的发展需求, 金属异质材料增材制造技术相比传统制造技术在异质材料零件的制造上具备更大的优势, 在航空航天、生物医学、汽车工业等领域中均具有广阔的应用前景, 可以满足这些领域对部件的高性能、多功能化需求。根据近年来金属异质材料增材制造技术的研究进展, 评述了电弧、电子束和激光增材制造技术在异质材料上的研究现状和技术特点, 并基于团队在异质材料金属增材制造装备、材料工艺与界面缺陷上的研究, 总结了金属异质材料增材制造技术所面临的关键问题以及应用情况, 对其发展趋势和技术难点进行展望。

关键词: 异质材料; 增材制造; 多功能需求; 界面性能

中图分类号: TH16

Research Progress on Additive Manufacturing of Metallic Heterogeneous Materials

WANG Di¹ DENG Guowei¹ YANG Yongqiang¹ CHEN Jie¹
WU Weihui² ZHANG Mingkang¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology,
Guangzhou 510640;

2. School of Intelligent Engineering, Shaoguan University, Shaoguan 512005)

Abstract: New requirements for the functionality of materials are raised on the conditions of extremely complex working conditions. Compared with traditional manufacturing technology, additive manufacturing technology of metal heterogeneous materials has greater advantages in the manufacture of heterogeneous material parts. It has broad application prospects in many areas, such as aerospace, biomedical and automotive industries, and can meet these areas' demand for high performance and multifunctionality of components. Based on the research progress of metal heterogeneous material additive manufacturing technology in recent years, the research status and technical characteristics of arc, electron beam and laser additive manufacturing technology on heterogeneous materials are reviewed. In addition, based on the team's research on heterogeneous material metal additive manufacturing equipment, material technology and interface defects, the key problems and applications of metal heterogeneous material additive manufacturing technology are summarized, and its development trend are prospected.

Key words: heterogeneous material; additive manufacturing; multifunctional requirements; interface performance

0 前言

国家自然科学基金委工程与材料科学部于

2016 年 12 月份遴选出 18 个优先发展领域及其主要研究方向, 这些领域将成为未来五年重点项目和重点项目群立项的主要来源, 其中明确提出重点发展增材制造技术基础(第 10 点), 具体内容包括高精度

* 国家自然科学基金资助项目(52073105, 51875215)。20200403 收到初稿, 20200719 收到修改稿

增材制造、先进材料增材制造技术及材料结构与器件一体化制造原理与方法等;而我国的《“十三五”先进制造技术领域科技创新专项规划》将增材制造列为先进制造领域发展的重点任务之一,要求探索增材制造自由成形过程中材料组织结构与性能的形成规律与关键影响因素和控制方法。

当代社会对产品的功能及性能的要求越来越高,尤其是在航空航天、电力行业、汽车工业、生物医学等领域中,苛刻使役条件要求零件具有功能耦合、多环境适应的能力。例如,在航空航天领域中,作为核心部件之一的涡轮叶片在高温侧需要具有热阻和抗氧化性能,并且在低温侧需要保持一定的机械强度和韧性^[1];在汽车工业领域中,要求车身在保持刚性、强度等性能不降低的前提下实现轻量化^[2];在生物医学领域中,骨科植入体不仅具有个性化要求,还要求具有合适的刚度、优异的耐磨性和耐腐蚀性^[3]。显然,采用单种材料成形的传统零件已日益不能满足应用需求,迫切需要具有特殊功能的机械零件,而这些具有特殊功能的机械零件通常包含多种不同性能的材料,意味着这些机械零件是异质材料零件。由于不同材料具有不同的性能和功能,因此将多种材料结合在一起的异质材料零件可以拥有单一材料零件不具备的优秀的力学、电、热、声、光等性能,具有极大的发展前景以及广阔的应用场合。

然而,如压力加工、粉末冶金、铸造、焊接、喷涂、化学气相沉积、自蔓延合成等传统制造手段在异质材料零件制造上存在困难,不仅难以获得复杂的造型和灵活细微的材料布局,而且制造过程繁琐。近年来,金属异质材料增材制造技术的出现为解决这一难题提供了契机。金属异质材料增材制造技术是指使用多种材料(其中至少有一种为金属材料),制备出具有多种材料结构的单个复杂功能部件的增材制造技术。其中,异质材料零件,亦称为多材料零件,属于复合材料。但是,在增材制造领域中,异质材料强调在预设位置精准成型不同种类的材料,而非将多种粉末混合打印而具有均匀分布的复合材料。增材制造技术(Additive manufacturing, AM)是一种集先进制造、智能制造、绿色制造、新材料、精密控制等技术于一体的新技术。增材制造技术以三维数字模型为基础,将材料通过分层制造、逐层叠加的方式制造出三维实体。基于材料叠加成形的制造特性,金属异质材料增材制造技术可以成

形具有特定材料布局和精细结构的异质材料零件,如激光选区熔化技术可以成形尺寸误差不超过 $\pm 0.1\text{ mm}$ 的异质材料零件,而且可以自由随形布置材料,在零件预设位置上成形特定材料以获得优异的局部性能^[4]。此外,金属异质材料增材制造技术在制造过程中具备低热应力的特点,而且在成形异质材料界面时能够实现成分梯度过渡,因此其成形的异质材料零件能够达到甚至超越传统焊接的结合强度^[5]。

鉴于金属异质材料增材制造技术具备广阔的应用潜能,可以满足航空航天、生物医学等重要领域的需求,本文对金属异质材料增材制造技术的研究进展进行综述,探讨其存在的关键问题。

1 研究现状

按照制造热源划分,常见的金属增材制造技术可以分为三类:激光增材制造技术、电子束增材制造技术和电弧增材制造技术。根据具体工艺,这三类增材制造技术可以进一步细分为种类繁多的、更为具体的增材制造技术。基于上述技术,开发出了许多金属增材制造系统,但是由于机器的限制,这些系统大多数都只限于单一金属材料的增材制造。为了突破制造系统的限制,有不少关于金属异质材料增材制造系统的研究得以进行,并获得了较大进展。在此基础之上,有不少的研究人员投入到关于异质金属材料组合的性能研究之中。

1.1 电弧增材制造技术

电弧增材制造技术(Arc additive manufacturing technology, WAAM)主要使用非熔化极气体保护焊(Tungsten inert gas welding, TIG)、熔化极气体保护焊(Melt inert-gas welding, MIG)以及等离子弧焊(Plasma arc welding, PAW)等产生的电弧作为热源,采用逐层堆焊的方式制造致密金属实体构件,因以电弧为载能束,具有热输入高,成形速度快等特点^[6-7]。因此,有研究人员开始尝试将电弧增材制造技术用于异质材料增材制造。

LIU 等^[8]制备了单熔道多层的低碳钢-硅青铜双金属零件(图 1a),通过图 1b 可以发现该双金属零件形成了具有良好冶金结合的无缺陷界面,两种金属之间形成了牢固结合,证明了 WAAM 具备制造异质材料零件的能力。CHEN 等^[9]通过 WAAM 制备了 Fe-FeAl 功能梯度材料,验证了 WAAM 制造功能梯度铝化铁结构的可行性。

图 1 钢-铜双金属零件

随后,有不少研究人员通过 WAAM 制备出具有简单结构的异质材料零件,且制备出的零件具有良好的性能表现。刘志森等^[10]以 ER80S-G 焊丝为基体区、OK Tubrodur 15.50 焊丝为硬质区进行双金属电弧增材试验,堆积成形简单的墙体。墙体层与层之间具有明显的分界线,没有出现溢流和混层的现象,且内部没有出现气孔、裂纹等缺陷。苗玉刚等^[11]制备出铜/钢 T 型材结构,并发现:采用先铜后钢的增材顺序,可有效防止铜/钢增材时的熔池塌陷问题,以获得成形良好的铜/钢增材接头;而且铜/钢界面处的硬度和力学性能因泛铁现象而显著提高。TREUTLER 等^[12]在同一层上相邻 2 条 Mn4Ni1.5CrMo 焊缝之间焊接 3 条 FeNi36 焊缝,以此叠加 10 层制造出样品。研究发现,制得的样品比 FeNi36 样品具有更高的抗拉强度和屈服强度,并在抗拉强度和断裂伸长率上表现出各向异性。此外,有研究人员将异质材料与特殊结构结合,制备出了具有优异力学性能的异质材料零件。郭一飞^[13]设计出基于天然贝壳珍珠层结构的软硬双金属多层交织结构,最终以 ER316L 与高氮钢(HNS)制造出 30°层间交错双金属多层交织构件。在具有高比例 HNS 的情况下,交织构件在抗冲击性能上将优于纯 HNS 构件和纯 ER316L 构件。

上述研究表明 WAAM 具备成形简单异质材料结构的能力,但在异质材料零件的制造上仍处于研究阶段。因 WAAM 具有热输入高、成形效率高的特点,因此在制造大尺寸且结构简单的异质材料零件上具有相当大的优势,有望在此方面得以应用。

1.2 电子束增材制造技术

电子束增材制造技术是以电子束为热源熔化材料,逐层沉积制造三维实体的一种增材制造技术。然而,电子束增材制造技术领域上的现有研究主要聚焦于单种材料的零件成形,对异质材料零件的成形鲜有研究。形成这一局面的原因可能与电子束增材制造系统有关。电子束增材制造系统是针对单一材料的一次成形而设计的,而且系统是在真空下运行的,这不利于在制造期间进行材料切换^[14]。TERRAZAS 等^[14]借助 CNC 加工制造的铜掩板,通过一系列较为繁琐的步骤,利用电子束熔化工艺(Electron beam melting, EBM)制造出了 Ti6Al4V 和铜的双金属部件,如图 2 所示。图 2 中的双金属零件成型效果良好,证实了 EBM 具备制造异质材料零件的能力。

图 2 Ti6Al4V/Cu 双金属零件

郭超等^[15]开发了具备双金属成形能力的电子束选区熔化(EBSM)系统,该系统利用基于振动的粉末供给方法,实现了两种粉末的独立供给与混合。利用该系统成功制备了界面厚度约为 300 μm 且界面无裂纹的 Ti6Al4V/Ti47Al2Cr2Nb 梯度结构。HINOJOS 等^[16]制备了 IN718/316L 双金属结构和 316L/IN718 双金属结构,发现 316L/IN718 界面存在明显的裂纹,而 IN718/316L 界面却不存在明显的裂纹。针对该发现,HINOJOS 等^[16]认为 316L/IN718 界面的开裂可能是由 IN718 基板施加的变形约束引起的。OSIPOVICH 等^[17-18]通过电子束熔丝成形技术制造了 SS321/Ti6Al4V 双金属结构,并研究了 SS321 与 Ti6Al4V 之间的合金化作用。

通过上述研究,可以发现电子束增材制造技术具备成形异质材料零件的能力,但在抑制界面缺陷形成等方面仍需进一步研究。真空的工作环境虽然不利于电子束增材制造系统制造异质材料零件,但是却赋予其高能效以及加工活性金属和合金的能力。因此,将电子束增材制造技术用于异质材料增材制造仍是具备研究价值的,特别是在成形包含活性金属在内的异质材料零件上具备较大优势。

1.3 激光增材制造技术

目前, 制造高性能金属零部件的激光增材制造技术有两种典型方法: 一种是激光定向能量沉积, 另一种是粉末床激光熔融。这两种技术是研究人员较为关注的激光增材制造技术, 并且已经展现出重大产业化应用价值, 由于针对单一材料的零件成形已发展较为成熟, 它们开始被研究用于异质材料零件的加工与制造。

1.3.1 激光定向能量沉积

激光定向能量沉积技术由激光作为能量源在沉积区域产生熔池并高速移动, 材料以粉末或丝状直接送入高温熔区, 熔化后逐层沉积, 最终制成完整的零件。而激光近净成型技术(Laser engineered net shaping, LENS)便属于激光定向能量沉积技术的范畴, 可以较轻易地实现多种材料的切换, 且制造出来的零件在力学性能上甚至可优于锻件水平, 因此可以用于制造异质材料零件。

目前, 已有多种材料组合的梯度结构通过 LENS 被制备出来。QIAN 等^[19]就采用 LENS 制备了没有冶金缺陷的钛合金 TA2-TA15 梯度结构材料(图 3), 而 ZHANG 等^[20]则在 Ti6Al4V 基板上沉积 Ti6Al4V 和 Al_2O_3 粉末以制造 Ti-Al $_2\text{O}_3$ 梯度结构(图 4)。

图 3 TA2-TA15 梯度结构

图 4 Ti-Al $_2\text{O}_3$ 梯度结构

此外, HEER 等^[21]通过 LENS 系统以 SS430 和 SS316 成功构建出磁性-非磁性双金属成分梯度材料

结构(图 5a)。如图 5b 所示, 将该结构放在磁性颗粒中, 只有磁性 SS430 一侧吸附了磁性颗粒, 这表明无需传统的连接步骤, 仅通过 LENS 便可在一个零件中的特定区域创建磁性区。而 ONUIKE 等^[22]希望用 GRCo-84 来强化 Inconel 718 的热性能, 故使用 LENS 制造了 Inconel 718/GRCo-84 双金属结构。与 Inconel 718 相比, 该双金属结构的热扩散率增加了 250%, 而且电导率也提高了约 300%。显然, 使用 LENS 将特定材料与另一种高性能材料结合以提高特定材料的性能, 这是可行的。

图 5 磁性-非磁性双金属成分梯度材料结构

虽然, 已经制备了多种材料组合的双金属结构零件, 但是这些零件容易在界面处出现裂纹, 尤其是当两种金属的性质不相容时。在这种情况下, 即使使用成分过渡方法来结合这两种材料, 在抑制界面裂纹形成上仍存在困难, 两种材料的结合强度也可能不理想。因此, ONUIKE 等^[23]基于对材料冶金性质和热学性质的理解, 使用 CBL(一种由 VC、Inconel 718 和 Ti64 组成的混合物)作为中间粘结层, 通过 LENS 成功制造出无裂纹的 Inconel 718/Ti64 双金属结构。该研究表明, 除了成分过渡方法之外, 选择合适的粘结中间层来结合两种不同的材料, 也是一种获得无裂纹界面和提升界面结合强度的方法, 即选择一种第三材料作为异质材料的粘结连接并最大程度地减少脆性金属间相的形成, 从而提升界面结合强度。

现有研究表明, LENS 在异质材料零件制造上已有了较大的研究进展, 已可以成形具有良好冶金结合的异质材料零件。不过, 成形的异质材料零件都是在 Z 轴方向上分布的, 缺少 X、Y 轴方向上分布的, 需要进一步研究 X、Y 轴方向上分布的异质材料零件成形以完全实现异质材料零件的增材制造。此外, 基于其净成型的特点, LENS 在零件的修复和涂层上可以得到广泛应用。

1.3.2 粉末床激光熔融

粉末床激光熔融的成型原理为: 在基板上用刮刀铺一层金属粉末, 然后用激光束在扫描振镜的控制下按照规划的路径快速照射粉末, 使其发生熔化、凝固, 形成冶金熔覆层, 之后基板下降一定高度,

重复之前的操作直至零件成型。激光选区熔化技术 (Selective laser melting, SLM) 便属于粉末床激光熔融技术的范畴, 该技术制造出的零件不仅成形精度高, 而且性能高于铸造水平且仅次于锻造标准。此外, 在 SLM 过程中, 因其热影响区小, 故而制出的零件残余应力小。而且, 相比于 LENS, SLM 成形的零件在尺寸精度和表面质量上具有较大优势。因此, SLM 技术具有广阔的应用前景, 成为增材制造领域近年来的研究热点之一。

为了 SLM 技术能适用于异质材料零件的制造, 首先需要解决的问题便是成形设备的改造。根据其铺粉原理, 对现有 SLM 系统进行简单的改造, 便可以成形 Z 轴方向上分布的异质材料零件。DEMIR 等^[24]便采用双漏斗供粉的 SLM 系统制造出了 Fe/Al-12Si 双金属结构, 证实了 SLM 技术成型异质材料零件的可行性, 实现了不同层间的按需布置异质材料, 却无法实现同层内的按需布置异质材料。为了能真正按需布置异质材料从而实现异质材料零件的自由制造, 国外的曼彻斯特大学、国内的华南理工大学等高校纷纷通过结合新的供粉方式和回收原理以进一步升级现有 SLM 系统。曼彻斯特大学研制出一种结合粉末床铺展、逐点选择性除粉和逐点干粉输送的 SLM 系统^[25], 实现了异质材料在不同层间或同层内不同区域的自由布置。但是, 逐点干粉输送是通过超声波送粉喷嘴实现的, 因此逐点干粉输送区域由于缺乏外部压力而处于不致密状态, 在激光熔凝过程中易出现裂纹和气孔^[25-26]。在基于喷嘴的异质材料 SLM 系统的基础上, ZHANG 等^[27]设计并融合了一种可以将异质材料粉末以特定比例混合的原位粉末混合系统, 故而该 SLM 系统可以轻松成型功能梯度材料结构。而功能梯度材料结构可以防止不同材料结合处的组织性能产生突变和不匹配等问题, 有利于解决异质材料界面结合强度不佳的问题^[28]。吴伟辉等^[29]提出了基于多漏斗定量供粉与柔性清扫回收余粉原理的多材料粉末供给、铺设及回收方法, 研制出一套新型的异质材料 SLM 系统, 系统构成及外观如图 6 所示。该系统在成型垂直方向分布的异质材料时, 运行过程跟常规 SLM 系统一致, 只是在成型过程中切换了供粉漏斗; 在成型水平方向分布的异质材料时, 先完成某一层内一种材料的成型区域, 再将该层内的粉末清除干净, 铺展其他材料粉末, 成型同层内的其他材料, 逐层重复之前的过程以成型异质材料零件。该系统能在不同层间或同层内不同区域按需自由布置异质材料, 可以有效解决激光选区熔化成型过程中异质材

料布置的难题, 实现异质材料零件成型。从系统运行过程中可以发现, 如何有效清除当前层内已成型区域外的余粉是其技术关键。虽然该系统针对此问题提出了解决方案, 但是制备出的异质材料零件中仍存在轻微的材料交叉污染的情况^[4]。异质材料按需自由且精准的预置、异质材料粉末按特定比例混合、水平方向分布的异质材料成型等都是异质材料 SLM 设备的关键技术问题。虽然已有一些针对这些问题的解决方案提出, 但这些方案却仍存在着不足, 需要对这些解决方法加以改进或者提出更好、新颖的解决方案。

图 6 异质材料 SLM 增材制造系统构成及外观示意图

除了在成形设备上的研究之外, 不少研究人员对 SLM 成形的异质材料界面性能及其影响因素进行了深入的研究。MEI 等^[30]制备了 316SS/IN718/316SS 结构, 该结构展示出了优异的综合力学性能, 结合了 316SS 和 IN718 的优秀力学性能。但是, 在 IN718/316SS 界面和 316SS/IN718 界面附近都发现

了裂纹。与之相似的是, Chen 等^[31]成型了具有良好冶金结合的 316L/CuSn10 双金属结构, 但是在 316L/CuSn10 界面附近发现了大量的枝状裂纹。异质材料界面处的裂纹可能与材料的热学性质有关^[32], 因此 CHEN 等^[33]提出了一种多材料多层有限元模型以研究激光功率和扫描速度对激光选区熔化过程中 Ti6Al4V 层与 TiB2 层界面热行为的影响。研究表明, 最大温度梯度位于 Ti6Al4V 层与 TiB2 层之间的界面处。在 Ti6Al4V 层与 TiB2 层之间的界面处产生的较大温度梯度可能导致形成较大的热应力, 这将进一步导致界面处出现热裂纹或应力释放导致的变形^[34]。显然, 材料的热学性质对异质材料界面性能具有重要影响, 当两种材料的热学性质不匹配时, 容易在异质材料界面处形成裂纹等缺陷, 进而削弱异质材料界面性能。WANG 等^[35]利用 Ti6Al4V 粉末和 TiB2 粉末制备了 TiB2/TiB/Ti6Al4V 梯度结构, 其中 TiB 是通过 Ti 与 TiB2 原位反应形成的。研究表明, 硬度随着化学成分的逐渐变化而梯度变化, 这有利于残余应力的减少以及界面的良好结合。

相比于其他金属异质材料增材制造技术, SLM 在异质材料零件的制造上具有更大的研究进展。基于粉末床熔融的异质材料 SLM 技术为创造新的应用打开了大门, 在热交换器、火箭喷嘴、钻头嵌件、耐磨组件和切削工具制造领域, 均具有重要的应用潜力。然而, 为了完全挖掘出其潜力, 仍需要探索异质材料界面缺陷产生机制, 归纳界面顺利成型方法以及工艺优化流程, 以有效解决材料不相容引起的诸多问题, 改善界面性能。

2 关键问题

金属异质材料增材制造技术在制造异质材料零件上具备极大的潜力, 能够充分发挥异质材料零件的性能优势, 满足当代社会对高性能零件的迫切需求。但是, 在挖掘金属异质材料增材制造技术潜力的过程中, 仍存在着许多的挑战。在异质材料智能制造方面, 针对材料的精准预置、数据处理与控制软件都是待解决的关键问题。在界面成型与界面性能方面, 异质材料界面缺陷产生机制尚不清楚, 如何有效解决材料不相容引起的性能问题也是一个重要的研究方向。

2.1 数据处理

增材制造技术是基于实体三维模型进行逐层制造的, 所以在进行零件制造之前需要建立零件的三维模型。然而, 目前主流的三维模型只能表达零件

的几何信息, 无法表达零件的材料信息, 无法满足异质材料零件模型需同时表达几何信息与材料信息的要求。显然, 实现金属异质材料增材制造技术设计与制造一体化的关键问题便是缺少一种可以同时表达异质材料零件几何信息与材料信息, 且能够与制造过程衔接的数据接口文件^[36-37]。

目前, 公认的数据格式有 STL 格式文件、AMF 格式文件、PLY 格式文件和 OBJ 格式文件等。其中, STL 格式文件是应用最为广泛的, 已成为商业化三维打印成型机标准化输入文件, 但是 STL 格式文件只能表示实体零件的几何信息, 无法表示零件的材料信息。AMF 文件格式是美国材料与试验协会 (ASTM) 出于标准化考虑而提出的一种异质材料增材制造文件格式, 可以表示实体零件的几何信息与材料信息, 但文件占用存储空间大。而且该文件格式尚处于开放共享研究阶段, 还没有成熟地运用于异质材料零件表达的文件^[38]。PLY 文件格式使用多边形网格表示零件表面信息, 可以包含纹理和颜色等信息, 但当部件包含多个具有不同材料属性的区域时, 则不能用 PLY 文件格式表示^[39]。而 OBJ 文件虽然可以表示色彩信息, 但对材料信息表达仍然乏力。此外, 微软、惠普、Shapeways 等 7 家公司组成的联盟集团联合开发了一种名为 3MF 的文件格式, 该文件可定义制造过程中的工艺数据并描述模型的内在和外在信息、颜色以及其他特性^[38]。上述文件格式各有其优缺点, 仍需进一步研究开发以适应异质材料增材制造。

就目前而言, 虽然对于上述文件格式的研究有很多, 但是并未提出一种公认可行、且能很好适用于异质材料零件表达的文件格式。

2.2 异质材料的精准预置

实现异质材料的精准预置对金属异质材料增材制造技术具有重要意义, 是成形具有细微材料布局的异质材料零件的重要基础, 有利于实现对异质材料零件性能的精准调控。在增材制造领域中, 常用的金属材料主要有丝材和粉末两种形状。显然, 金属粉末材料能实现更加细微的材料布局, 因此其前景更加广阔。但是, 以金属粉末为原材料进行加工的工艺, 如基于粉末床熔融的 SLM 技术, 也面临着更严峻的挑战, 在实现异质材料的精准预置上存在着更大困难。由于 SLM 是一种基于粉末床的技术, 一次只能对一种材料进行铺展, 在实现异质材料的精准预置上存在困难, 特别是在同一层内异质材料的精准预置。因此, 有必要开拓思路, 在 SLM 技术中融入新的技术以实现异质材料的精准预置。如曼

彻斯特大学^[25]研制了一种异质材料 SLM 系统,该系统构成如图 7 所示。该系统将粉末床铺展、逐点多喷嘴超声干粉输送和逐点单层粉末真空吸附等技术结合,在某一层内完成了一种材料的成型之后,通过真空吸附去除同层内的材料,再通过喷嘴进行

图 7 异质材料 SLM 系统构成示意图

同层内其它材料的配置,实现了同一层内的异质材料的精准预置。但是,在激光选区熔化过程中逐点干粉输送的区域容易产生气孔等缺陷。

显然,在如何实现异质材料的精准预置这个问题上,仍需进行更宽泛、更深入的研究,以获得更好的解决方案。

2.3 材料相容性问题

异质材料零件存在一个固有的问题——不同材料的相容性问题。由于不同材料具有不同的冶金性质和热学性质等性质,当它们的这些性质不相容时,它们所形成的界面的结合强度较弱,容易发生开裂、分层等缺陷。如图 8 所示的是杨永强课题组制备的激光选区熔化制造的异质材料零件,其材料组成如图 8a 所示。图 8d 展示了 18Ni300 层和 CoCr 层具有良好的结合界面,说明 18Ni300 和 CoCr 的材料相容性良好。而图 8c、8e 和 8f 则展示了异质材料零件在界面处存在的凝固缺陷(裂纹、孔洞等),尤

图 8 激光选区熔化制造的异质材料零件、界面特征与缺陷

其是 316L/CuSn10 界面不仅存在较多孔洞,还存在大量微裂纹,这说明 316L 和 CuSn10 的材料相容性不佳。从图 9 中可以清楚地看出^[31],裂纹是从 316L/CuSn10 界面处向 316L 区蔓延,这是因为 316L 和 CuSn10 的热膨胀系数不相容,当二者形成良好冶金结合时 CuSn10 撕裂了 316L,形成大量微裂纹。

图 9 316L/CuSn10 界面处的 FE-SEM 图像

除了热膨胀系数之外,其他性质不相容时也会导致缺陷的形成,如熔点、润湿特性等。金属和陶瓷的相容性极为有限,金属和陶瓷之间的润湿特性较差,而且陶瓷的熔点普遍高于金属。因此,在成型陶瓷/金属异质材料零件过程中,当二者的成型顺序以及能量输入不恰当时,就会出现分层缺陷,如图 10 所示^[40]。

图 10 陶瓷/钢界面处的微观图像

此外,在异质材料零件成形的过程中,有可能在界面处形成脆性的金属间化合物,这将导致界面的脆性和破裂^[41]。BOBBIO^[42]和 TOMASHCHUK^[43]都在异质材料界面处发现了金属间脆性相的存在,而这些金属间脆性相与界面缺陷存在密切联系。

基于上述这些问题,异质材料零件的界面往往是其力学性能薄弱之处,将会对异质材料零件的整体性能造成不利影响,限制了异质材料零件在诸多领域中的应用。因此,为了尽可能避免因材料相容性不佳而形成界面缺陷,需要对异质材料之间的相

容性进行深入研究, 建立异质材料之间熔合金学参数、热学性质与界面成型质量的关系数据库, 归纳异质材料热物理参数相容匹配原则。

2.4 界面性能与工艺调控

异质材料零件的界面性能控制对于其广泛应用来说是必要的。异质材料零件的界面性能不佳问题, 一方面可以从材料相容性上寻求解决方案, 选取热物理参数尽可能相容的异种材料进行异质材料零件成形, 有利于获得界面性能良好的异质材料零件; 另一方面便是通过适当的工艺调控以获得更加优异的界面性能。然而, 工艺调控涉及的内容有很多, 如工艺参数、界面结合方法等。

2.4.1 工艺参数

对工艺参数进行调整, 其实质上主要是对成形过程中的能量输入进行调整。如在激光选区熔化过程中, 激光能量输入便与激光功率、扫描速度、扫描间距、铺粉厚度等工艺参数有关。过高或过低的能量输入都会造成零件出现缺陷, 这一问题在异质材料零件界面中得到充分体现。在文献[35]中, TiB₂/Ti6Al4V 部件的横截面因激光能量输入不足而出现许多微孔, 但是有了足够的能量输入后, 就获得了具有良好界面结合的样品。在文献[44]中, 由于激光能量密度低, 一些未熔融 316L 球形颗粒镶嵌在完全熔融铜合金区域中。在文献[24]中, 在 Fe/Al-12Si 界面中的主要缺陷是由于未熔合或过度熔化而产生的大裂纹。显然, 能量输入与异质材料界面的成形质量之间存在密切关系, 即工艺参数对异质材料界面性能有着重要影响。为了改善异质材料零件的界面性能, 通过大量的实验以获得最佳的工艺参数是必要的。

2.4.2 界面结合方法

采取合适的界面结合方法也能达到改善界面性能的目的。目前, 不同材料的结合方法有直接结合法^[4]、成分过渡法^[44]和中间粘结层法^[23]。对于具有相似热学性质的两种材料, 将它们通过直接结合法进行结合, 也可以得到界面性能良好的异质材料零件。但是, 当两种材料的热学性质不相似时, 直接结合法就显得十分乏力。而在这种情况下, 很容易联想到的方法就是中间粘结层法, 使用中间粘合剂将两种材料粘合在一起。但是这种方法的关键是需要找寻到合适的中间粘结剂, 以在两种材料之间建立牢固持久的粘结。对于如何找到合适的中间粘结剂, 目前尚未总结出一般性规律, 因此可能会在寻找过程上耗费大量时间。除此之外, 一种同样有效的方法就是成分过渡法。成分过渡法就是将在两种

材料之间形成缓冲区, 在缓冲区内一种材料逐渐过渡为另一种材料。通过成分过渡法形成不具有明显成分突变界面的异质材料零件, 避免材料的急剧转变导致材料界面处出现缺陷。

2.4.3 界面成型策略与界面设计

采取重熔策略来成形异质材料界面能提高界面的结合强度。由于陶瓷和金属的相容性极为有限, 难以成型具有足够结合强度的界面, KOOPMANN 等^[40]通过高功率激光的重熔作用, 在钢和陶瓷涂层之间产生了锯齿状的表面, 显著改善了钢和陶瓷层之间的粘合。在文献[45]中, 因为在处理玻璃粉末的过程中, 316L 表面得以重熔, 故而在两种材料之间形成良好的结合。除了采取重熔策略外, 还可以通过特殊的材料界面设计来增强界面性能。在文献[25]中, 通过如图 11a 所示的“锯齿形”的连接结构设计, 在材料界面处实现了良好的冶金结合。而作者团队通过“波浪状”的连接结构获得了具有良好冶金结合的钢铜垫片, 如图 11b 所示, 下部为 4340 钢, 上部为 CuSn10 青铜, 中间夹着 2 个 1 mm 厚的波浪状梯度层。这是因为特殊的材料界面设计有助于材料元素的扩散, 从而在界面处形成良好的结合。

图 11 特殊的材料界面设计

通过工艺调控实现异质材料界面的性能控制是一种行之有效的办法, 但是工艺调控涉及的内容较多, 需要进行宽泛且深入的研究, 以探明异质材料零件成形过程中界面缺陷产生机制与界面性能强化机理, 归纳出改善界面性能的工艺措施, 同时建立相应的最佳工艺参数数据库。

3 应用研究

金属异质材料增材制造技术的应用便是用于制造各式各样的异质材料。相比于如压力加工、粉末冶金、铸造、自蔓延合成等传统制造手段, 金属异质材料增材制造技术在异质材料零件制造上具有更大的优势。金属异质材料增材制造技术可以制造具有复杂结构以及细微材料布局的异质材料零件, 而

且制造过程远比传统制造手段简单。如图 12、13 所示的异质材料零件便是通过激光选区熔化技术制备出来的^[4, 25]。通过这些异质材料零件, 不难发现金属异质材料增材制造技术具备自由制造异质材料零件的能力, 可以在零件的特定部位配置合适的材料, 以获得优异的局部性能。在一个异质材料零件中, 不同的部位具有不同的性能, 每一个部位都具有其所需性能, 使异质材料零件的综合性能最大化, 满足现代社会对零件的高性能、多功能化的需求。

图 12 CuSn10/4340 钢异质材料零件

图 13 Cu10Sn/316L 异质材料零件

而且, 金属异质材料增材制造技术还可以将异质材料零件与特殊结构结合, 如将异质材料零件与多孔结合。如图 14 所示的通过激光选区熔化技术成形的 CuSn/18Ni300 双金属多孔结构^[46], 其压缩性能如图 15 所示。压缩曲线表明, 在 CuSn 多孔区域的缓冲作用失效后, 18Ni300 多孔区域将作为内部结构的新缓冲区起缓冲作用。在这种双重缓冲机制的保护下, 内部结构可以得到很好的保护。将异质材料零件与多孔结构结合, 一方面可以制备出独特的保护结构, 对内部结构起到良好的保护作用; 另一方面可以实现在航天航空、汽车等领域迫切需要的轻量化。

图 14 CuSn/18Ni300 双金属多孔结构

图 15 CuSn/18Ni300 双金属多孔结构压缩曲线

此外, 当异质材料之间的相容性较差时, 金属异质材料增材制造技术可以通过成分过渡的方法来成形异质材料零件, 即成功能梯度材料。所谓功能梯度材料是根据使用要求, 选择使用两种不同性能的材料, 采用先进的材料复合技术, 使中间的组成和结构连续呈梯度变化, 内部不存在明显的界面, 从而使材料的性质和功能沿厚度方向呈梯度方向变化的一种新型复合材料^[47]。图 16 所示便是激光选区熔化技术成形的成分梯度过渡的异质材料零件^[44]。通过成功能梯度材料的方法, 使得异质材料零件内部没有明显的界面, 结合处的组分、结构及性能均呈渐变形式, 从而防止零件内不同材料结合处的组织性能产生突变和不匹配等问题, 将不同性能的材料结合在一起, 使成形的异质材料零件符合所需要的性能指标和应用条件^[28]。

图 16 材料逐渐过渡的异质材料零件

金属异质材料增材制造技术在异质材料零件制造与应用上具备广阔的前景, 需要进行更宽泛、更深入的研究, 以更好地应用于航空航天、电力行业、汽车工业、生物医学等领域中。

4 发展趋势

虽然金属异质材料制造技术具有传统制造手段无法比拟的优点, 已经展现出了重大的产业化价值, 但是因其该领域目前尚不成熟, 还存在着诸多不足, 因此具备以下的发展趋势。

(1) 用于增材制造的材料种类将日益多样化。

目前, 适用于增材制造技术的材料种类并不多, 远不及适用于传统制造技术的材料种类, 这限制了金属异质材料制造技术在研究领域与应用领域上的发展。

(2) 金属异质材料增材制造技术将与其它制造技术结合。虽然, 金属异质材料增材制造技术具有诸多优点, 但是其也具有缺点, 通过与其它制造技术的结合, 可以互补长短, 从而制造出性能更加优异的异质材料零件。如用超声振动辅助来弥补 LENS 的不足, 以获得组织细化的零件^[48], 将 SLM 与冷喷涂(Cold spraying)结合以防止异质材料界面形成脆性金属间相^[49], 将增材制造与减材制造结合以获得具有复杂结构、良好尺寸精度的零部件^[50]。

(3) 金属异质材料增材制造技术将趋于设计与制造一体化、趋于智能化。借助计算机辅助技术, 从功能需求出发, 进行材料——结构一体化设计, 得到异质材料零件的三维模型。三维模型进行数据处理后, 便可上传至成形设备进行零件制造。设计与制造一体化、智能化的制造过程更符合实际需求, 具有更高的效率与经济效益。

(4) 金属异质材料增材制造技术将更加注重成型过程中的质量控制。金属异质材料增材制造技术的目的是制造出符合社会需求的高性能零部件, 然而在成型过程中出现的孔隙、裂纹等缺陷却会削弱零件的性能。因此, 为了提高金属异质材料增材制造技术在实际生产中的可靠性, 如何在成型过程中实现精确的质量控制将是一个重要的发展方向。

(5) 金属异质材料增材制造技术需要归纳出异质材料物性相容匹配原则, 建立异质材料之间熔合冶金学参数、热学性质与界面成型质量的关系数据库。依据物性相容匹配原则与关系数据库选择恰当的异质材料组合, 选用合适的工艺参数, 从而达到抑制界面缺陷形成、提高界面性能的目的。

(6) 异质材料打印后粉末的分离方法, 目前异质粉末材料成型后混合导致材料成本高昂。团队前期通过磁力筛分法将不锈钢/模具钢材料试验分离, 可以达到 99% 的纯度, 但仍有少量的异质粉末混杂在一起, 不同粉末材料混合后的分离方法是异质材料工业应用的关键核心问题。

5 结论

金属异质材料制造技术在异质材料零件制造上具备传统制造技术无法比拟的巨大优势, 但是因其尚不成熟而存在诸多不足, 需要研究成形过程中异

质材料界面的缺陷问题, 探索隐藏其背后的材料冶金科学问题, 深入理解异质材料零件成形的基础理论, 以获得符合社会需求的高性能异质材料零件。金属异质材料增材制造技术的目标是实现数字化材料组合和智能化控制。对材料相的体积比、密度分布规律、细观结构特征或结合形态进行研究, 建立数字化材料的单质元素以及合金配比数据库, 实现数字化材料的力学性能、物理性能、几何性质(在细观层次上的形状、分布方式等)、体积比、制备工艺条件及环境影响参数等基本参数的选译、组合和协调智能化, 使之满足工程要求。可以说, 金属异质材料增材制造技术为制造业开启了一扇通向全新领域的大门, 为航空航天、生物医药、核能装置等领域提供了突破当前局限、进一步发展的技术手段。

参 考 文 献

- [1] BHAVAR V, KATTIRE P, THAKARE S, et al. A review on functionally gradient materials (FGMs) and their applications[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing Ltd, 2017, 229: 12021.
- [2] 李永兵, 马运五, 楼铭, 等. 轻量化多材料汽车车身连接技术进展[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 1-23.
LI Yongbing, MA Yunwu, LOU Ming, et al. Advances in welding and joining processes of multi-material lightweight car body[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(24): 1-23.
- [3] BARTOLOMEU F, ABREU C S, MOURA C G, et al. Ti6Al4V-PEEK multi-material structures – design, fabrication and tribological characterization focused on orthopedic implants[J]. Tribology International, 2019, 131: 672-678.
- [4] 吴伟辉, 杨永强, 毛桂生, 等. 激光选区熔化自由制造异质材料零件[J]. 光学精密工程, 2019, 27(3): 517-526.
WU Weihui, YANG Yongqiang, MAO Guisheng, et al. Free manufacturing of heterogeneous materials part by selective laser melting[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(3): 517-526.
- [5] WANG P, LAO C S, CHEN Z W, et al. Microstructure and mechanical properties of Al-12Si and Al-3.5Cu-1.5Mg-1Si bimetal fabricated by selective laser melting[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 36: 18-26.
- [6] 王泽力, 张元彬, 史传伟. 丝材增材制造技术研究现状与展望[J]. 热加工工艺, 2019, 48(3): 6-10, 5.

- WANG Zeli, ZHANG Yuanbin, SHI Chuanwei. Research status and prospect of wire additive manufacturing technology[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(3): 6-10, 5.
- [7] 王世杰, 王海东, 罗锋. 基于电弧的金属增材制造技术研究现状[J]. 金属加工(热加工), 2018(1): 19-22.
- WANG Shijie, WANG Haidong, LUO Feng. Research status of arc-based metal additive manufacturing technology[J]. MW Metal Forming, 2018(1): 19-22.
- [8] LIU L, ZHUANG Z, LIU F, et al. Additive manufacturing of steel-bronze bimetal by shaped metal deposition: Interface characteristics and tensile properties[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69(9-12): 2131-2137.
- [9] SHEN C, SHEN C, PAN Z, et al. Fabrication of Fe-FeAl functionally graded material using the wire-arc additive manufacturing process[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47(1): 763-772.
- [10] 刘志森, 薛丁琪, 韩绍华, 等. 基于 CMT 焊接的双金属电弧增材成形件的组织和力学性能[J]. 热加工工艺, 2017, 46(17): 184-186.
- LIU Zhiseng, XUE Dingqi, HAN Shaohua, et al. Microstructure and mechanical properties of double metal arc additive forming part based on CMT welding[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(17): 184-186.
- [11] 苗玉刚, 李春旺, 赵慧慧, 等. 铜/钢复合接头旁路热丝等离子弧增材特性分析[J]. 焊接学报, 2019, 40(5): 95-99.
- MIAO Yugang, LI Chunwang, ZHAO Huihui, et al. Characteristic analysis of copper/steel composite joint bypass-current wire-heating PAW on additive manufacturing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(5): 95-99.
- [12] TREUTLER K, KAMPER S, LEICHER M, et al. Multi-material design in welding arc additive manufacturing[J]. Metals, 2019, 9(7): 809.
- [13] 郭一飞. 机器人 CMT 增材制造高氮钢-316L 多层结构试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- GUO Yifei. Experimental research on multilayer structure of high nitrogen steel-316L made by robot CMT additive manufacturing[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [14] TERRAZAS C A, GAYTAN S M, RODRIGUEZ E, et al. Multi-material metallic structure fabrication using electron beam melting[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(1): 33-45.
- [15] GUO Chao, GE Wenjun, LIN Feng. Dual-material electron beam selective melting: Hardware development and validation studies[J]. Engineering, 2015, 1(1): 249-262.
- [16] HINOJOS A, MIRELES J, REICHARDT A, et al. Joining of inconel 718 and 316 stainless steel using electron beam melting additive manufacturing technology[J]. Materials & Design, 2016, 94: 17-27.
- [17] GURIANOV D A, KALASHNIKOV K N, OSIPOVICH K S, et al. Obtaining the bimetallic composition by the electron beam freeform fabrication[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing Ltd, 2019, 597: 12043.
- [18] OSIPOVICH K S, KALASHNIKOV K N, VORONTSOV A V. Alloying effect of Ti-6Al-4V on composite of 321 stainless steel fabricated by electron beam additive manufacturing[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing Ltd, 2019, 537: 22075.
- [19] QIAN T, LIU D, TIAN X, et al. Microstructure of TA2/TA15 graded structural material by laser additive manufacturing process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(9): 2729-2736.
- [20] ZHANG Y, BANDYOPADHYAY A. Direct fabrication of compositionally graded Ti-Al₂O₃ multi-material structures using laser engineered net shaping[J]. Additive Manufacturing, 2018, 21: 104-111.
- [21] HEER B, BANDYOPADHYAY A. Compositionally graded magnetic-nonmagnetic bimetallic structure using laser engineered net shaping[J]. Materials Letters, 2018, 216: 16-19.
- [22] ONUKE B, HEER B, BANDYOPADHYAY A. Additive manufacturing of Inconel 718—Copper alloy bimetallic structure using laser engineered net shaping (LENS™)[J]. Additive Manufacturing, 2018, 21: 133-140.
- [23] ONUKE B, BANDYOPADHYAY A. Additive manufacturing of Inconel 718 - Ti6Al4V bimetallic structures[J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 844-851.
- [24] DEMIR A G, PREVITALI B. Multi-material selective laser melting of Fe/Al-12Si components[J]. Manufacturing Letters, 2017, 11: 8-11.
- [25] WEI C, LI L, ZHANG X, et al. 3D printing of multiple metallic materials via modified selective laser melting[J].

- CIRP Annals, 2018, 67(1): 245-248.
- [26] WEI C, GU H, SUN Z, et al. Ultrasonic material dispensing-based selective laser melting for 3D printing of metallic components and the effect of powder compression[J]. Additive Manufacturing, 2019, 29: 100818.
- [27] ZHANG X, CHUEH Y, WEI C, et al. Additive manufacturing of three-dimensional metal-glass functionally gradient material components by laser powder bed fusion with in situ powder mixing[J]. Additive Manufacturing, 2020, 33: 101113.
- [28] 刘帅, 王阳, 刘常升. 激光熔化沉积技术在制备梯度功能材料中的应用[J]. 航空制造技术, 2018, 61(17): 47-56.
- LIU Shuai, WANG Yang, LIU Changsheng. Application of laser melt deposition technique in preparation of functionally gradient materials[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(17): 47-56.
- [29] 吴伟辉, 杨永强, 毛桂生, 等. 异质材料零件 SLM 增材制造系统设计与实现[J]. 制造技术与机床, 2019(10): 32-37.
- WU Weihui, YANG Yongqiang, MAO Guisheng, et al. Design and implementation of SLM system for additive manufacturing of heterogeneous material parts[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2019(10): 32-37.
- [30] MEI X, WANG X, PENG Y, et al. Interfacial characterization and mechanical properties of 316L stainless steel/inconel 718 manufactured by selective laser melting[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 758: 185-191.
- [31] CHEN J, YANG Y, SONG C, et al. Interfacial microstructure and mechanical properties of 316L /CuSn10 multi-material bimetallic structure fabricated by selective laser melting[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 752: 75-85.
- [32] LIU Z H, ZHANG D Q, SING S L, et al. Interfacial characterization of SLM parts in multi-material processing: Metallurgical diffusion between 316L stainless steel and C18400 copper alloy[J]. Materials Characterization, 2014, 94: 116-125.
- [33] CHEN C, GU D, DAI D, et al. Laser additive manufacturing of layered TiB₂/Ti6Al4V multi-material parts: Understanding thermal behavior evolution[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 119: 105666.
- [34] DAI D, GU D, POPRAWA R, et al. Influence of additive multilayer feature on thermodynamics, stress and microstructure development during laser 3D printing of aluminum-based material[J]. Science Bulletin, 2017, 62(11): 779-787.
- [35] WANG R, GU D, XI L, et al. Selective laser melted TiB₂/Ti6Al4V graded materials and first-principle calculations[J]. Materials Letters, 2019, 254: 33-36.
- [36] 吴静雯. 基于三维打印工艺的多材料零件数字化处理研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2016.
- WU Jingwen. Research on digital processing of multi-material parts based on 3D printing process[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2016.
- [37] 张争艳. 异质多材料零件快速成型关键技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- ZHANG Zhengyan. Research of key technologies on heterogeneous and multiple materials rapid prototyping[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [38] 施建平, 杨继全, 王兴松. 多材料零件 3D 打印技术现状及趋势[J]. 机械设计与制造工程, 2017, 46(2): 11-17.
- SHI Jianping, YANG Jiquan, WANG Xingsong. Status and trend of 3D printing technology for heterogeneous objects[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2017, 46(2): 11-17.
- [39] 祝小伟, 王从军. 一种新的面向多材料增材制造的文件格式[J]. 现代制造工程, 2017(10): 30-34.
- ZHU Xiaowei, WANG Congjun. A new file format for multiple material additive manufacturing[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2017(10): 30-34.
- [40] KOOPMANN J, VOIGT J, NIENDORF T. Additive manufacturing of a steel-ceramic multi-material by selective laser melting[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2019, 50(2): 1042-1051.
- [41] SING S L, LAM L P, ZHANG D Q, et al. Interfacial characterization of SLM parts in multi-material processing: Intermetallic phase formation between AlSi10Mg and C18400 copper alloy[J]. Materials Characterization, 2015, 107: 220-227.
- [42] BOBBIO L D, OTIS R A, BORGONIA J P, et al. Additive manufacturing of a functionally graded material from Ti-6Al-4V to Invar: Experimental characterization and thermodynamic calculations[J]. Acta Materialia, 2017, 127: 133-142.
- [43] TOMASHCHUK I, SALLAMAND P, CICALA E, et al. Direct keyhole laser welding of aluminum alloy AA5754

- to titanium alloy Ti6Al4V[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 217: 96-104.
- [44] WEI C, SUN Z, CHEN Q, et al. Additive manufacturing of horizontal and 3D functionally graded 316L/Cu10Sn components via multiple material selective laser melting[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, 2019, 141(8).
- [45] WEI C, SUN Z, CHEN Q, et al. An integrated dual ultrasonic selective powder dispensing platform for three-dimensional printing of multiple material metal/glass objects in selective laser melting[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, 2019, 141(8).
- [46] ZHANG M, YANG Y, WANG D, et al. Microstructure and mechanical properties of CuSn/18Ni300 bimetallic porous structures manufactured by selective laser melting[J]. Materials & Design, 2019, 165: 107583.
- [47] 高晓霞, 姜晓红, 田东艳. 功能梯度材料研究的进展综述[J]. 山西建筑, 2006, 5: 143-144.
- GAO Xiaoxia, JIANG Xiaohong, TIAN Dongyan. Summary of research progress of functionally graded material[J]. Shanxi Architecture, 2006, 5: 143-144.
- [48] NING F, HU Y, CONG W. Microstructure and mechanical property of TiB reinforced Ti matrix composites fabricated by ultrasonic vibration-assisted laser engineered net shaping[J]. Rapid Prototyping Journal, 2019, 25(3): 581-591.
- [49] YIN S, YAN X, CHEN C, et al. Hybrid additive manufacturing of Al-Ti6Al4V functionally graded materials with selective laser melting and cold spraying[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 255: 650-655.
- [50] 招润焯, 丁东红, 王凯, 等. 金属增减材混合制造研究进展[J]. 电焊机, 2019, 49(7): 66-77.
- ZHAO Runzhuo, DING Donghong, WANG Kai, et al. Research progress of metal additive and subtractive hybrid manufacturing technology[J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(7): 66-77.
-
- 作者简介: 王迪, 男, 1986 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为金属增材制造、结构-材料-性能一体化设计与制造、激光精密加工。
E-mail: mewdlaser@scut.edu.cn
- 杨永强(通信作者), 男, 1961 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为金属增材制造技术。
E-mail: meiyqyang@scut.edu.cn