

激光熔化沉积技术在制备 梯度功能材料中的应用*

刘 帅,王 阳,刘常升

(东北大学材料科学与工程学院,沈阳 110004)

[摘要] 激光熔化沉积(LMD)是一种典型的增材制造技术,与传统的成形工艺相比,具有加工周期短、设计灵活、成形件尺寸精度高、绿色环保等一系列特点。梯度功能材料(FGM)是一种先进的功能性材料,其内部没有明显的界面,材料的成分、组织性能呈梯度变化。在梯度功能材料的制造方法中,激光熔化沉积既可以缓和不同材料间的应力,保证材料优良的成形性,又可以通过灵活的设计来控制成形件组织和性能的变化和分布规律,为梯度功能材料的制造提供了一种新途径。介绍了激光熔化沉积的技术特点、梯度功能材料的特点与应用、国内外激光熔化沉积技术制造梯度功能材料方面的研究进展,以及团队目前在此领域的研究状况,同时分析了利用激光熔化沉积技术制造梯度功能材料的发展前景。

关键词: 激光熔化沉积;增材制造;快速成形;梯度功能材料;制造方法

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.17.047



刘 帅

博士研究生,主要研究方向为激光快速成形镍基高温合金。

激光熔化沉积(Laser Melting Deposition, LMD)是在快速成形技

*基金项目: NSFC-辽宁联合基金项目(U1508213)。

术和激光熔覆技术的基础上发展起来的一项先进激光增材制造技术。该技术于20世纪90年代中期出现,并在十几年内取得了快速的发展,拥有多种命名:例如美国University of Michigan研发的直接金属沉积技术(Direct Metal Deposition, DMD)^[1-2]、加拿大国家研究委员会设计的集成制造技术(Laser Consolidation, LC)^[3]、美国Sandia国家实验室提出的激光近净成形技术(Laser Engineered Net Shaping, LENS)^[4]、美国AeroMet公司研发的激光增材制造技术(Laser Additive Manufacturing, LAM)^[5]、英国伯明翰大学的受控激光制造技术(Direct Laser Fabrication, DLF)^[6]等。该技术不同于传统的减材制造工艺,是一种逐层堆积成形的增材制造,不需要模具来辅助制造,而是通过设

计CAD模型来指导构件的成形,因此大幅度减少了制造成本,缩短了制造周期,并且制造过程灵活性高,更加适合复杂外形的小批量零件制造^[7-8]。金属粉末在激光作用下快速熔化和凝固,所沉积的零件组织致密、晶粒细化,制备的构件通常具有优异的组织性能。而对于梯度功能材料的制造,该技术可以通过控制所输送不同粉末的比例和激光成形时的工艺来实现构件成分、组织和性能的梯度变化,成为集材料设计、制备于一体的短流程、数字化、高柔性制造系统,成为材料成形领域的一种重要的制造方法^[9]。张魁武^[10]、张永忠等^[11-12]都对其进行了深入研究。

激光熔化沉积技术基本原理

激光熔化沉积技术是使用激光束作为高温热源将基材表面少量熔

化产生熔池,并将金属粉末通过送粉设备同步送入激光熔池使其熔化,形成与基体金属呈冶金结合且稀释率很低的新金属层。其基本步骤为:第一步,由计算机设计所要制备构件的三维 CAD 模型;第二步,将 CAD 模型按实际需要进行切片,使构件复杂立体的三维结构分解成为二维的平面结构;第三步,设计对每个截面的扫描路径和方式,并将其转化为相应的数控程序来控制激光器和机床的运作;第四步,在计算机程序控制下,激光束与送粉设备相对金属基体进行逐线、逐面扫描,逐层堆积材料而形成三维实体构件或需进行少量加工的毛坯构件^[13-14]。LMD 工艺的送粉系统有两种,按照送粉设备与激光束之间的相对位置关系,可分为同轴送粉系统和侧向送粉系统^[15-16],其示意图如图 1 所示。图 1(a)为同

轴送粉系统,该系统中激光束与送粉设备喷出的粉末束的中轴线相同,平面内各个方向的出粉量差别不大,因此成形件同层各方向形状尺寸差异小,加工精度更高,适用于激光快速成形以及构件的修复和再制造。图 1(b)为侧向送粉系统,该系统是将粉末从激光束的一侧送入熔池之中,成形时每层平面上不同方向的工艺条件不同,成形量和形状尺寸的各向异性较强,难以成形复杂形状零件,但其操作和控制难度相对较低,特别体现在对粉末束的控制,其普遍应用在激光熔覆上。

1979 年美国联合技术研究中心(UTS)率先提出可以采用激光束为热源将粉末或丝材熔化来进行金属零件的成形^[17]。20 世纪 80 年代末,美国 Sandia 国家实验室、Los Alamos 国家实验室、密歇根大学同时分别对激光快速制造技术展开研究^[18]。20 世纪 90 年代中期,UTS 与 Sandia 国家实验室合作开发了使用 Nd:YAG 激光器和同步送粉系统的激光成形技术,不仅成形了多种合金,还制备了具有梯度功能材料特点的成形件^[19]。Los Alamos 国家实验室开发了激光快速制造高精度、复杂零件的方法^[20]。密歇根大学开发了对成形过程实时监测的技术^[21]。21 世纪初,美国国防部将激光成形的钛合金零件广泛应用在航空领域。美国 Aeromet 公司利用激光快速成形钛合金并将其产业化。加拿大、英国、德国等也有诸多高校和科研机构进行激光快速成形的研究,例如加拿大国家科学院集成制造技术研究所、德国斯图加特大学、德国弗朗霍夫研究所等。发展至今,国外激光快速成形技术已经相当成熟,广泛应用于航空航天、国防安全、能源等领域,并涌现出越来越多的产业化公司进行激光器设备或原材料的生产和销售。

我国在此领域的研究起步较晚,

但仍然有许多学者和科研机构在此领域做出大量的研究工作,比较突出的有西北工业大学、北京航空航天大学、清华大学、华中科技大学、南京航空航天大学、上海交通大学、中国航空制造技术研究院、北京有色金属研究院等。西北工业大学的黄卫东教授团队在 20 世纪 90 年代中期率先提出激光立体成形技术(LSF),并开展了探索性研究^[22]。北京航空航天大学的王华明院士团队在 20 世纪 90 年代末期便开始致力于激光快速成形航空材料的设备和工艺研究^[23],在“十五”期间自主研发了激光快速成形钛合金设备,在“十一五”期间制备出大型钛合金飞机主承力机构件,标志着我国激光熔化技术制备大尺寸构件已有出色的研究成果和应用。目前国内已有越来越多的学者和科研机构致力于激光快速成形技术的研究,进展良好、成果丰硕,但是与国外相比仍然较为落后,很多技术尚不成熟,很多设备和原料依赖进口,因此需要开展更多更深入的关于激光器设备、制备工艺、激光熔化沉积材料的研究和开发。

梯度功能材料的特点与应用

梯度功能材料(Functionally Gradient Material, FGM)是指材料的组成和结构从材料的某一方位(一维、二维或三维)向另一方位连续或准连续变化,使材料的成分、组织和性能也呈现出梯度变化的一种新型功能性复合材料。FGM 这一概念最早是在 1987 年由日本学者新野正之等^[24]提出的,当时是为了解决航天飞机热保护系统燃烧室金属/陶瓷复合材料在使用过程中由于热应力集中而开裂失效的问题而研制开发出来的。

梯度功能材料设计和制造的理念^[25]是:根据所需要的性能指标和应用条件,选择两种不同的材料,通

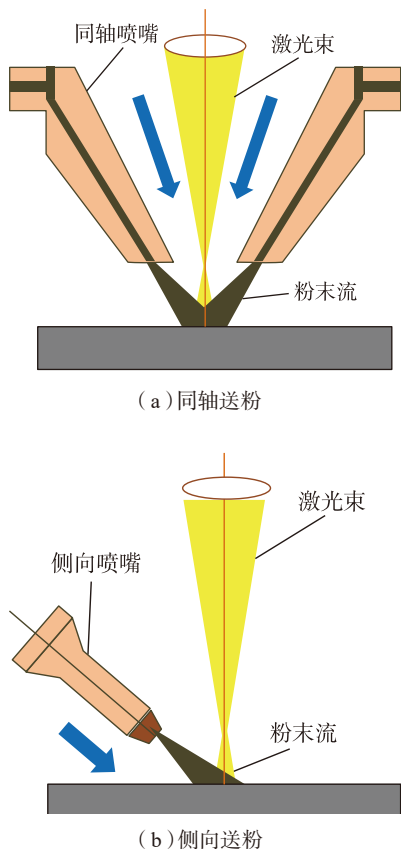


图1 同轴送粉及侧向送粉示意图
Fig.1 Schematic of coaxial and lateral powder feeding

过连续或者准连续地改变两种材料的含量比例和结构特点,使两种材料相结合处的界面模糊或消失,从而得到性能随组成和结构变化而呈梯度变化的新材料。FGM最大的特点在于材料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,从而防止构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,使其能满足在超高温、大温度落差、高速热流冲击等苛刻环境下的工作条件。

与常规复合材料相比,梯度功能材料具有以下优点:(1)以连续变化的组分梯度来代替突变界面,减小了物性突变,可缓和因温差、材料热膨胀系数差异等产生的热应力,防止材料的热应力破坏;(2)梯度材料具有很好的可设计性,异种材料优势互补且成分可设计可控制,通过灵活地改变各组分材料的含量与分布,可改变结构内部应力分布、合理控制裂纹的产生与扩展、满足不同部位对材料使用性能的要求;(3)作为界面层来连接不相容的两种材料(例如金属与陶瓷)时,可提高不同材料之间的界面结合强度;(4)在室温或高温条件下,当受到一定的机械载荷作用时,塑性变形和开裂倾向减小,形变和开裂的起始时间相对推迟,裂纹生长的驱动力大大降低^[26-27]。

目前FGM的应用不再局限于航空航天领域,其在能源工程、机械工程、生物医学工程、光学工程、化学工程、电磁等领域上都有重要的应用^[28-32]。表1列出了FGM在上述领域的一些典型的应用范畴。

梯度功能材料的制造技术

可以应用于梯度功能材料制造的技术种类很多,利用这些技术可以得到从块体材料到薄膜、从金属到陶瓷等多种梯度材料。目前主要的制备方法有粉末冶金法(PM)^[33-34]、离子喷涂法(PS)^[35]、气相沉积法^[36]、

自蔓延高温合成法(SHS)^[37-38]、电沉积法^[39]、离心铸造法^[40-41]和激光沉积法等。表2列出了一些典型的制备技术及其优缺点^[42-45]。

激光熔化沉积制备梯度材料适应面较广,既可以制备FGM涂层也可以制备FGM体材,而且其生产周期短、加工速度快、设计灵活、材料利用率高,其成形件尺寸精度高、组织致密、晶粒细化、具有优良的使用性能。而上文提到的两种送粉系统在制备梯度功能材料上有各自的特点:同轴送粉系统更适合制备成分比例连续变化的梯度功能材料,可以通过调整粉末的输送量和输送比例使两种材料含量实现层与层之间连续变化,成分设计更加灵活,过渡更加

均匀;侧向送粉系统更适合制备成分设计完成且粉末已经充分混合后的梯度功能材料样品,难以实现成分连续均匀变化,成形过程与成形单一合金相同,只能通过更换粉末来形成梯度,但操作简便,成形效率更高。

激光熔化沉积制备梯度功能材料国内外研究进展

美国Sandia国家实验室Griffith等^[46]采用近净成形技术制备了SS316/In690梯度材料,所得成形件致密度高、物理性能良好,且成分、相含量与硬度等主要性能呈梯度分布。美国俄亥俄州立大学的Collins等^[47-48]采用近净成形技术制备了

表1 FGM的典型应用领域

应用领域	应用范畴
航空航天工程	火箭发动机燃烧室、航空发动机涡轮、飞机中小型零件
能源工程	太阳能电池、热电转换装置、地热系统、核反应周边材料、电器绝缘材料
机械工程	陶瓷发动机、耐磨件、耐热件、硬质合金刀具、自润滑轴承
生物医学工程	人造骨骼、人造牙齿、人造关节、人造功能器官、人造内脏器官
光学工程	高性能激光器、光学纤维、光学镜片、光盘
化学工程	功能高分子膜催化剂、固体燃料电池
电子工程	电磁体、永久磁铁、陶瓷振荡器、半导体、混合集成电路

表2 FGM的典型制造方法

工艺	优点	缺点
粉末冶金	设备简单、易于操作、成本低,适合制备大体块体材料	工艺参数需严格控制;制造的块体形状和尺寸受模具限制
等离子喷涂	材料组成具有可控性,无须烧结,成形效率高,所得构件面积大	梯度涂层存在气孔和疏松、不致密
气相沉积	所得材料成分过渡连续均匀	沉积速率低,受沉积室体积限制只适于小尺寸薄膜的沉积,材料致密性较差
自蔓延高温合成	产品纯度高、效率高、能耗少、工艺相对简单	仅适用于高放热反应材料体系;制备出的材料致密性较差、需加压处理
离心铸造	生产效率很高、成本低、适于批量生产,可制备高致密度、大尺寸FGM	仅适于圆筒类铸件,两组分间必须有密度差,不能制备高熔点陶瓷系梯度材料
电沉积	对镀层材料的物理力学性能破坏小、可镀复杂形状工件、设备简单	材料孔隙率较高、强度低;只适合于制造薄型FGM
激光沉积	效率高、适应面较广,能制备高致密度、形状复杂FGM	设备昂贵、技术机理尚不成熟

Ti/V、Ti/Mo、Ti/Al/V 梯度材料,系统地分析了材料内主要的成分分布和 V、Mo 元素的含量与成形件显微组织结构的关系。美国密歇根大学的 Majumdar 等^[49]采用直接金属沉积法制备了 TC4/Co 梯度材料,分析了 TiC 和 Co 元素对成形件显微组织、硬度及耐磨性的影响。美国华盛顿州立大学的 Balla 等^[50]采用激光近净成形技术制备了 Ti/TiO₂ 生物梯度材料,并对其显微组织的变化规律以及生物相容性进行分析。韩国学者 Shin 和美国密歇根大学的 Natu 等^[51]采用直接金属沉积法制备出了 Ni/Cu 的梯度材料,其成分变化由中心的 100% Cu 逐步变化到边缘的 100% Ni,并通过制备这个 Ni/Cu 梯度材料,系统地阐述了采用激光熔化沉积成形技术制备梯度功能材料从设计到成形的具体过程,为激光熔化沉积法在制备梯度功能材料上的应用提供了宝贵的指导和借鉴。美国理海大学的 Liu 等^[52]采用近净成形技术制备了 Ti/ITC 梯度功能材料,其成分变化从一侧的 100% Ti 变化到另一侧的 95% TiC,并且内部的两种材料呈均匀过渡,并未产生明显界面。美国佛罗里达中央大学的 Kahlen 等^[53]采用激光熔覆法制备了 SS304 不锈钢与超级镍基合金的梯度功能材料,总共沉积了 70 层,在垂直方向上的下面 25 层为 100% SS304 不锈钢粉,从第 26 层开始逐层增加超级镍基合金粉末的比例,直到第 46 层停止加入 SS304 不锈钢粉,使 46~70 层为 100% 的超级镍基合金,形成了成分梯度变化,镍含量由下至上从 SS304 不锈钢的 12% 逐渐增加至 50%。英国伯明翰大学的 Wang 等^[54-55]采用激光快速成形技术制备了 TC4/TiC、TC4/TiB 两种梯度材料,并对其碳化物和硼化物含量与分布以及对材料硬度和耐磨性的影响进行了分析。美国宾夕法尼亚大学的 Carroll 等^[56]采用激

光定向沉积的方法制备了 SS304L/Inconel 625 梯度功能材料,由最底层的 100% SS304L 到最顶层的 100% Inconel 625,中部的过渡区成分变化连续均匀,两种材料的体积比每层大约变化 1%,在 82% SS304L 区域发现裂纹,采用试验分析和热力学的计算建模的方法确定了裂纹中的次生相颗粒为 (Mo、Nb)C。

北京有色金属研究院的席明哲等^[57]利用激光快速成形法制备了 316L 不锈钢(SS)/Ni 基合金/Ti6Al4V 梯度薄壁件,分析了具体的组织变化。西北工业大学的杨模聪等^[58]利用激光快速成形技术制备了 Ti60/Ti₂AlNb 的梯度材料单臂墙,研究了随着 Al 和 Nb 元素含量的变化、相与显微组织的变化规律。西安交通大学的解航等^[59]利用激光快速成形法制备了 Ti6Al4V/CoCrMo 梯度材料,并分析了其开裂机制,发现随着 CoCrMo 含量增加,开裂倾向严重。北京航空材料研究院的李胜男等^[60]利用激光快速成形法制备了 Nb/SiC 梯度材料,其成分从 100% 的 Nb 逐步变化到 40% 的 Nb 和 60% 的 SiC,并分析了 Nb 与 SiC 之间的反应以及 SiC 的含量对显微组织的影响和变化趋势。李能等^[61]采用激光原位反应制备了 Ti₂AlNb/TiC+Ti₃SiC₂ 体系梯度材料并对其硬度进行检测,研究发现梯度材料从基体、Ti 连接层、Ti+SiC 混合过渡层再到陶瓷复合层,显微硬度逐渐升高,最外层由于产生了三元陶瓷相 Ti₃SiC₂,硬度降低。北京航空航天大学孙成等^[62]使用激光增材制造技术制备了 TC4/TC11 梯度材料,建立了温度场计算有限元模型并验证了其有效性。大连理工大学的梁晓康^[63]利用激光快速成形法制备了 316L 不锈钢/Inconel718 的梯度材料,通过对工艺的优化得到组织致密,枝晶定向生长,硬度、耐磨性、耐蚀性成梯度变化的成形

件。郝云波等^[64]采用激光快速成形了不同成分比的 SS316/Ni20 梯度材料单臂墙,发现 SS316 质量比在 90%~30% 时成形件出现开裂现象并分析其开裂机理,研究表明由于凝固过程中杂质元素在晶界偏析形成连续液膜,在残余应力的作用下而形成了热裂纹。沈阳工业大学的徐国建等^[65]利用激光熔覆在 SS304 不锈钢的表面上制备了 Co 基合金/VC 的梯度熔覆层。东北大学的董江等^[66]利用激光熔覆在铜板表面制备了 Co-Ni-Cu 梯度熔覆层。

综上所述,国内外针对激光快速制造梯度功能材料的研究发展过程较为相似,早期多是选用两种相似合金按照简单的配比形成梯度材料,更多关注是否具有良好的成形性。进而发展为以多种相似合金、不同金属基元素的合金、合金与陶瓷材料等形成梯度材料,更多关注成分设计及其组织和性能。稍有不同的是,国外的研究人员更倾向满足梯度的连续性,由于设备先进,不难制出大尺寸、多层数的梯度材料样品,而国内的研究人员更侧重研究过渡区的微结构变化和成形件整体的使用性能。另外,通过热力学计算建模的方法辅助梯度材料的成分设计和成形工艺变得更加普遍。

本研究团队目前主要进行 LMD 制造航空发动机高温合金 FGM 整体叶盘的研究。轮盘材料的服役温度为 600~750℃,而叶片材料的服役温度为 900~1050℃,传统制造工艺通常选择两种材料分别制备轮盘与叶片,然后再用机械连接将轮盘和叶片形成整体。而 FGM 整体叶盘相对于传统制造工艺,既更有利于简化结构、减重、提高推重比,又可以防止材料内部组织与性能的突变,提高可靠性。团队主要针对如下 4 个关键的科学问题进行研究:(1)FGM 成分设计。由于梯度合金成分有别于

轮盘的成分,也有别于叶片的成分,需要了解其热力学和相变机制,指导激光熔化沉积FGM的成分路径规划。(2)合金粉体的成形与可沉积性。原始粉体材料的特征诸如成分、球形度、粒度、流动性和纯度决定激光熔化沉积FGM成形体的成分、组织和性能是否满足所设计的数值。(3)激光与合金交互作用规律。激光熔化沉积过程中合金被熔化和重熔多次,经历复杂的热循环和梯度过渡区的成分与微结构变化,沉积过程中的固液界面、相界面及结构界面等影响显著。(4)FGM的强韧性与损伤机理。FGM复杂的微结构与力学行为密切相关,室温和高温下的疲劳损伤微观机制与单一材料明显不同,需要探讨梯度材料损伤行为与机理。

目前为止,团队有如下的研究成果:(1)选取轮盘材料GH4169与叶片材料K417G,试验测定合金的相平衡和相转变,研究合金元素扩散规律;应用CALPHAD方法,建立了本研究多元镍基合金热力学数据库;应用描述合金快速凝固的Scheil模型,模拟确定了快速凝固后合金的相组成,图2为50%GH4169+50%K417G梯度材料的Scheil模型非平衡凝固曲线,推测出该合金快速凝固组织中含有摩尔百分数达97.8%的 γ 相,另外含有0.7%的MC碳化物、0.4%的 β 相、0.4%的 η 相、0.3%的 γ' 相。(2)应用VIGA和EIGA真空气雾化技术和设备制备高温合金粉末,分析了合金成分、熔炼温度、介质压力等对合金粉末颗粒组织形貌成分尺寸空心球率等的影响规律,总结了高温合金粉末的雾化成球机理,制备出了GH4169与K417G原始粉末,其形貌如图3所示。(3)分析了激光熔化沉积成形扫描方式对成形性组织及应力状态的影响。确定了整形激光熔化沉积制备整体叶盘中典型盘用及叶片用镍基高温合

金属材料过程中的工艺参数窗口。(4)采用激光熔化沉积技术制备了多种GH4169/K417G成分比例的样品,如图4为典型的GH4169/K417G梯度材料的显微形貌,并分析了其梯度过渡区的成分及显微组织。分析了有害相的产生与梯度成分的关系,得出的规律是当梯度中GH4169含量较高时,Laves相所占比例较高,为影响强度等性能的主要因素;而当梯度中K417G含量较高时,低熔点的 $\gamma+\gamma'$ 共晶组织大量存在于枝晶间,很容易导致开裂现象的产生。测试了几种梯度成形构件典型的力学性能,如图5所示。

目前尚未解决的问题与后续研究方向有:(1)还需通过热力学分析

和计算,探索铸造和变形高温合金降低微裂纹敏感性的合金化趋势,继续优化激光熔化沉积合金成分,设计梯度过渡区合金成分轨迹。(2)还需优化高性能高温合金粉末的制备技术,研究获得成分、组织结构、粒径尺寸、球形度、流动性、空心球缺陷率等粉体指标,使之能够满足激光熔化沉积航空发动机叶盘梯度结构增材制造专用合金粉末的成套制备技术。(3)目前尚未制备出成分从100%GH4169到100%K417G连续变化的样品,并且在制备纯K417G过程中出现开裂问题,如图6所示。初步认为开裂原因是成形过程中热影响区二次加热使低熔点的 $\gamma+\gamma'$ 共晶组织形成液膜,在热应力的作用下产生

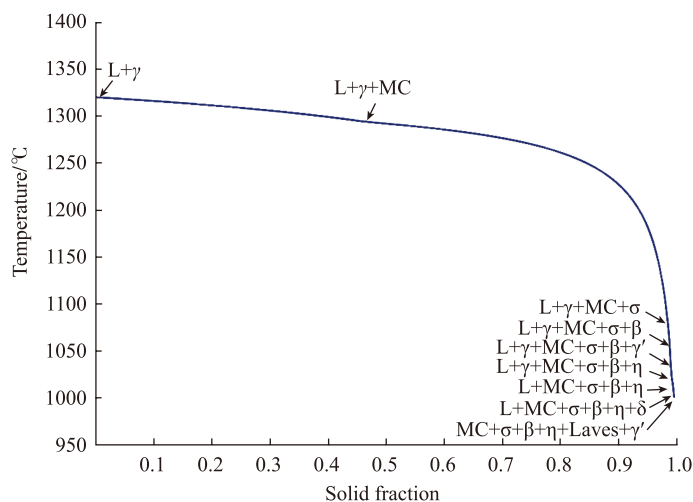
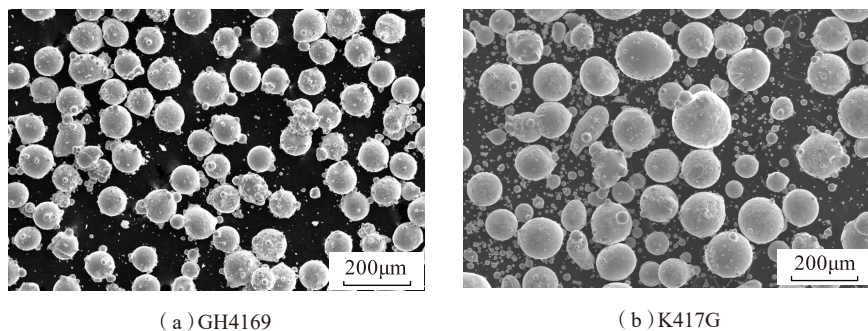


图2 50% GH4169+50% K417G的梯度材料的Scheil模型非平衡凝固曲线
Fig.2 Scheil model of 50% GH4169+50% K417G gradient material with non-equilibrium solidification curve



(a) GH4169

(b) K417G

图3 GH4169和K417G合金粉末的SEM形貌
Fig.3 SEM micrographs of powder of GH4169 and K417G

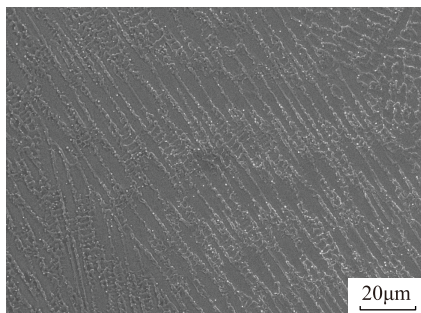
裂纹。因此准备使用同步预热或调整参数控制热输入的方法解决开裂问题。(4) 尚未对所成形出的梯度

材料和结构件的其他相关性能,包括蠕变持久以及高、低周疲劳性能等做出系统的评价。

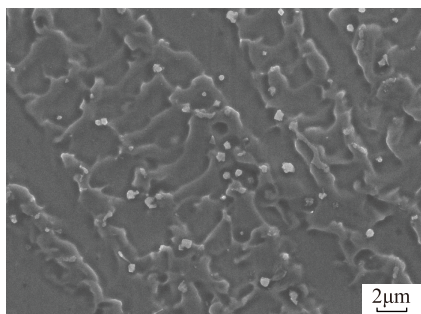
结论

采用激光熔化沉积技术制备梯度功能材料,结合了激光熔化沉积的优点又满足了梯度功能材料的特点,既可绿色、高效地获得成分呈梯度变化的材料,又可以根据材料实际的工作环境和所需要满足的使用性能,来设计三维空间内材料的成分的变化和分布,并在成形过程中通过合理控制工艺参数来获取所需的组织和性能。但是与制备一种合金材料相比,利用激光熔化沉积技术制备梯度功能材料的难度更高,经常产生熔化不均匀现象或者气孔和裂纹等缺陷,这是不同材料的物理性质例如密度、热膨胀系数、熔点以及激光的吸收率等各不相同导致的,因此要求在实际操作中成分设计更加合理,工艺参数的选择更加精确。另外,由于粉末材料的熔点、密度、球形度、尺寸等因素,在送粉时,粉末的行动轨迹与熔化情况不一定满足理想状况,有些粉末会出现熔化不完全或者不在熔池之内等现象,相比制备单一材料,这些现象产生的问题更加严重,会造成实际成分与设计成分有所差别,未必能满足所应达到的性能标准。因此需要物理性质更优异的原始粉末、更合理的成分设计、更先进的送粉系统、更优化的激光熔化沉积工艺以及对于成形构件更科学的性能评价体系。

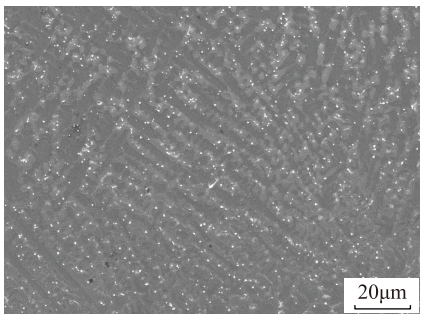
随着从合金到复合材料再到梯度材料的发展,FGM在航空航天、大型工程、功能性材料领域都有广泛的应用前景,而先进的制造方法起着重要的作用。激光熔化沉积技术有效地结合了激光应用技术、机床数控技术、计算机设计技术以及增材制造理念等特点,金属粉末在激光作用下快速熔化和凝固,所沉积的零件组织致密、晶粒细化,制备的部件通常具有优异的组织性能。通过对两种及两种以上材料的成分设计、粉末输送工艺、激光熔化成形工艺的



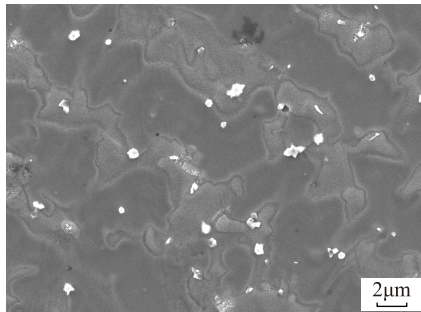
(a) 50% GH4169+50% K417G 低倍形貌



(b) 50% GH4169+50% K417G 高倍形貌



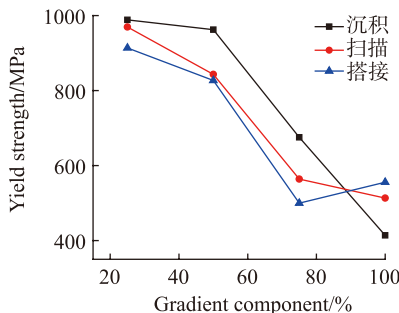
(c) 25% GH4169+75% K417G 低倍形貌



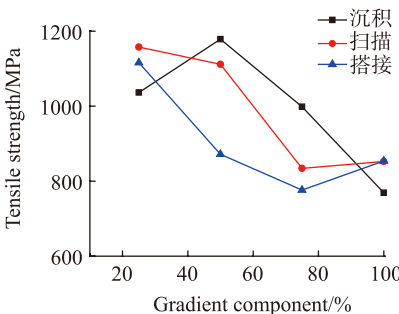
(d) 25% GH4169+75% K417G 高倍形貌

图4 GH4169/K417G梯度材料SEM
微观形貌

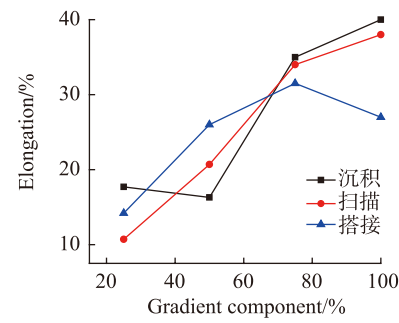
Fig.4 SEM micrographs of
GH4169/K417G FGM



(a) 屈服强度



(b) 抗拉强度



(c) 伸长率

图5 不同梯度成分下的试样拉伸性能
Fig.5 Tensile property of different gradient materials

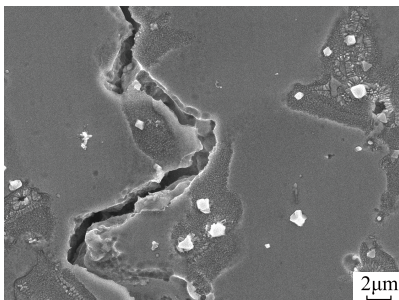


图6 K417G材料微观组织裂纹形貌
Fig.6 Micro cracks morphology of
K417G alloy

精确设计和控制,可以实现材料成分、组织和性能的梯度分布,在制备梯度功能材料零件上有着特有的优势。虽然目前国内激光熔化沉积可制备出一些梯度功能材料样品,但由于存在上面提到的一些问题,还难以推广到大型工业生产,因此还需要科研人员的继续深入研究和努力探索。

参 考 文 献

- [1] KOCH J, MAZUMDER J. Rapid prototyping by laser cladding[J]. Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 1994, 2306: 556.
- [2] MURPHY M, STEEN W M, LEE C. A novel rapid prototyping technique for the manufacture of metallic components[J]. Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 1994, 2500: 31.
- [3] XUE L, ISLAM M U. Free-form laser consolidation for producing metallurgically sound and functional components[J]. Journal of Laser Applications, 2000, 12(4): 160–165.
- [4] GRIFFITH M L, KEICHER D M, ATWOOD C L. Free form fabrication of metallic components using laser engineered net shaping (LENS)[C]//Proceedings of Solid Free Form Fabrication Symposium. Texas, 1996.
- [5] ABBOTT D H, ARCELLA F G. Laser forming titanium components[J]. Advanced Materials & Processes, 1998, 153(5): 29–30.
- [6] WU X, SHARMAN R, MEI J, et al. Direct laser fabrication and microstructure of a burn-resistant Ti alloy[J]. Materials & Design, 2002, 23(3): 239–247.
- [7] LEWIS G K, MILEWSKI O, NEMEC R B, et al. Free-form fabrication of metallic components using the directed light[C]//Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference. Nice, 1998.
- [8] THOMA D J, LEWIS G K, MILEWSKI O, et al. Free-form processing of near-net shapes using directed light fabrication[C]//Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference. Nice, 1998.
- [9] MAZUMDER J, SCHIFFERER A, CHOI J. Direct materials deposition: designed macro and microstructure[C]//Proceeding of Materials Research Society Symposium, Solid Freeform an Additive Fabrication. Boston, 1998.
- [10] 张魁武. 国外激光熔覆应用和直接熔覆金属零件及功能梯度材料制造[J]. 金属热处理, 2002, 27(9): 1–4.
- ZHANG Kuiwu. Industrial applications of laser clad and laser deposited metal parts and graded materials[J]. Heat Treatment of Metals, 2002, 27(9): 1–4.
- [11] 张永忠, 石力开. 梯度复合材料激光熔化沉积成形的研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(11): 21–25.
- ZHANG Yongzhong, SHI Likai. Research progress on laser direct deposition of gradient composites[J]. Materials China, 2010, 29(11): 21–25.
- [12] 张永忠, 刘彦涛, 曹晔. 激光快速成形梯度复合结构的研究进展[J]. 航空制造技术, 2015, 58(10): 44–48.
- ZHANG Yongzhong, LIU Yantao, CAO Ye. Research progress on gradient composite structures fabricated by laser melting deposition process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(10): 44–48.
- [13] 赵晓明. 激光快速成形 Rene'88DT 高温合金力学性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- ZHAO Xiaoming. Study on the mechanical properties of laser rapid forming of Rene'88DT superalloy[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006.
- [14] SYED W U H, PINKERTON A J, LI L. Combining wire and coaxial powder feeding in laser direct metal deposition for rapid prototyping[J]. Applied Surface Science, 2006, 252(13): 4803–4808.
- [15] LIN J, STEEN W M. Design characteristics and development of a nozzle for coaxial laser cladding[J]. Journal of Laser Applications, 1998, 10(2): 55–63.
- [16] 仲崇亮. 基于 Inconel718 的高沉积率激光金属沉积增材制造技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.
- ZHONG Chongliang. Investigations on high deposition-rate laser metal deposition for additive manufacturing application based on Inconel 718[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [17] 孙兵兵, 张学军, 郭绍庆, 等. 金属材料激光快速成形的研究进展[J]. 电焊机, 2013, 43(5): 79–84.
- SUN Bingbing, ZHANG Xuejun, GUO Shaoqing, et al. Research development on the laser rapid prototyping of metal material[J]. Electric Welding Machine, 2013, 43(5): 79–84.
- [18] 钟敏霖, 宁国庆, 刘文今. 激光熔覆快速制造金属零件研究与发展[J]. 激光技术, 2002, 26(5): 388–391.
- ZHONG Minlin, NING Guoqing, LIU Wenjin. Research and development on laser direct manufacturing metallic components[J]. Laser Technology, 2002, 26(5): 388–391.
- [19] GRITTLTH M L, KEICHER D M, ATWOOD C L, et al. Free form fabrication of metallic components using laser engineered net shaping (LENS)[C]//Proceeding of the Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, 1997.
- [20] LEWIS G K, MILEWSKI J O, THOMA D J, et al. Properties of near-net shape metallic components made by the directed light fabrication process[C]//Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, 1997.
- [21] MAZUMDER J, SCHILERER A, CHOI J. Direct materials deposition: designed macro and microstructure[J]. Material Research Innovations, 1999, 3(3): 118–131.
- [22] 黄卫东, 李延民, 冯莉萍, 等. 金属材料激光立体成形技术[J]. 材料工程, 2002(3): 40–43.
- HUANG Weidong, LI Yanmin, FENG Liping, et al. Laser solid forming of metal powder materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2002(3): 40–43.
- [23] 王华明, 张述泉, 汤海波, 等. 大型钛合金结构激光快速成形技术研究进展[J]. 航空精密制造技术, 2008, 44(6): 28–30.
- WANG Huaming, ZHANG Shuquan, TANG Haibo, et al. Research progress on laser rapid prototyping of large titanium alloy structures[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2008, 44(6): 28–30.
- [24] NIINO M, HIRAI T, WATANABE R. Functionally gradient materials in pursuit of super heat resisting materials for spacecraft[J]. Journal of the Japan Society for Composite Materials, 1987, 13(6): 257–264.
- [25] 牛犇. 激光快速成形法制备 Ni/TiC 功能梯度材料的结构设计及优化[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- NIU Ben. Structure optimized design of

Ni/TiC functional gradient materials by laser rapid forming method[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.

[26] 贺晓龙. 激光直接制造 Ni/TiC 功能梯度材料的结构设计优化及仿真 [D]. 长春: 吉林大学, 2007.

HE Xiaolong. Structure optimized design and simulation of Ni/TiC functional gradient materials by direct laser fabrication[D]. Changchun: Jilin University, 2007.

[27] ERDOGAN F. Fracture mechanics of functionally graded materials[J]. Composites Engineering, 1995, 5(7): 753-770.

[28] 吴利英. 梯度功能材料的发展和应 用 [J]. 航空制造技术, 2003, 46(12): 57-61.

WU Liying. Development and application of functional gradient materials[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2003, 46(12): 57-61.

[29] 韩杰才, 徐丽, 王保林, 等. 梯度功能材料的研究进展及展望 [J]. 固体火箭技术, 2004, 27(3): 207-214

HAN Jiecai, XU Li, WANG Baolin, et al. Progress and prospects of functional gradient materials[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2004, 27(3): 207-214.

[30] 朱季平, 张福豹. 梯度功能材料的应用研究及发展趋势 [J]. 装备制造技术, 2001(9): 135-138.

ZHU Jiping, ZHANG Fubao. Application research of functionally gradient materials and their development trend[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2001(9): 135-138.

[31] 郑慧雯, 茹克也木·沙吾提, 章娴君. 功能梯度材料的研究进展 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2002, 27(5): 788-793.

ZHENG Huiwen, SHAWUTI Rukeyemu, ZHANG Xianjun. The advance of functionally gradient materials[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science), 2002, 27(5): 788-793.

[32] 夏永红, 金卓仁, 程继贵, 等. 梯度功能材料及其在机械工程中的应用 [J]. 机械工程材料, 2001, 25(5): 9-11.

XIA Yonghong, JIN Zhuoren, CHENG Jigui, et al. Functionally gradient materials and their application to mechanical engineering[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2001, 25(5): 9-11.

[33] 吴德海, 任家烈, 陈森灿. 近代材料加工原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.

WU Dehai, REN Jialie, CHEN Sencan. Modern principles of material processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.

[34] 郭卫红, 汪济奎. 现代功能材料及其应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.

GUO Weihong, WANG Jikui. Modern functional materials and their applications[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.

[35] 张小诚. 新型材料与表面改型技术 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1990.

ZHANG Xiao Cheng. New materials and surface modification technology[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1990.

[36] SASAKI M, WANG Y C, HIRANO T, et al. Design of SiC/C functionally gradient material and its preparation by chemical vapor deposition[J]. Journal of the Ceramic Society of Japan, 1989, 97(1125): 539-543.

[37] 王皓, 傅正义. 自蔓延高温合成法制备金属—陶瓷复合材料 [J]. 现代技术陶瓷, 1995(1): 18-22.

WANG Hao, FU Zhengyi. Fabrication of metal—ceramic composites through self-propagating high-temperature synthesis[J]. Advanced Ceramics, 1995(1): 18-22.

[38] 张幸红, 韩杰才, 董世运, 等. 梯度功能材料制备技术及发展趋势 [J]. 宇航材料工艺, 1999(2): 1-5.

ZHANG Xinghong, HAN Jiecai, DONG Shiyun, et al. Preparing techniques and developing tendency of functionally gradient materials[J]. Aerospace Materials & Technology, 1999(2): 1-5.

[39] SURESH S, MORTENSEN A. Fundamentals of functionally gradient materials: processing and thermomechanical behaviour of graded metals and metal-ceramic composites[M]. London: IOM Communications Ltd., 1998.

[40] CHOE C R, PARK M, LEE N J. Fabrication of functionally gradient polymer composites using a centrifugal method[M]. Lancaster: Technomic Publishing Co., 1995.

[41] 李健, 陈体军, 郝远, 等. 离心铸造法制备 Al₃Ti/Al 原位自生功能梯度复合材料 [J]. 热加工工艺, 2007, 36(5): 31-34.

LI Jian, CHEN Tijun, HAO Yuan, et al. In-situ functionally graded Al₃Ti/Al composites prepared by centrifugal casting[J]. Hot Working Technology, 2007, 36(5): 31-34.

[42] 魏增敏, 张永忠, 高士友, 等. 激光快速成形技术的发展及其在功能梯度材料制备上的应用 [J]. 材料导报, 2005, 19(5): 77-80.

WEI Zengmin, ZHANG Yongzhong, GAO Shiyu, et al. The development of laser direct metal deposition and its application in fabricating functional gradient material[J]. Materials Review, 2005, 19(5): 77-80.

[43] MAHAMOOD R M, AKINLABI E T, SHUKLA M, et al. Functionally graded material: an overview[J]. Proceedings of the World Congress on Engineering, 2012, 3: 1593-1597.

[44] PEI Y T, DE HOSSON J T M. Functionally graded materials produced by laser cladding[J]. Acta Materialia, 2000, 48(10): 2617-2624.

[45] 刘华炜, 刘学武, 张广文. 功能梯度材料制备工艺及研究进展 [J]. 机械设计与制造, 2012(4): 265-267.

LIU Huawei, LIU Xuewu, ZHANG Guangwen. Research progress and preparing technology of functionally graded material[J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(4): 265-267.

[46] GRIFFITH M L, HARWELL L D, ROMERO J T, et al. Multi-material processing by LENS[C]//Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, 1997.

[47] COLLINS P C, BANERJEE R, BANERJEE S, et al. Laser deposition of compositionally graded titanium-vanadium and titanium-molybdenum alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 352(1/2): 118-128.

[48] BANERJEE R, COLLINS P C, BHATTACHARYYA D, et al. Microstructural evolution in laser deposited compositionally graded α/β titanium-vanadium alloys[J]. Acta Materialia, 2003, 51(11): 3277-3292.

[49] MAJUMDAR J D, MANNA I, KUMAR A, et al. Direct laser cladding of Co on Ti6Al4V with a compositionally graded interface[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(5): 2237-2243.

[50] BALLA V K, DEVASCONCELLOS P D, XUE W C, et al. Fabrication of compositionally and structurally graded Ti/TiO₂ structures using laser engineered net shaping (LENS)[J]. Acta Biomaterialia, 2009, 5(5):

1831–1837.

[51] SHIN K H, NATU H, DUTTA D, et al. A method for the design and fabrication of heterogeneous objects[J]. *Materials & Design*, 2003, 24(5): 339–353.

[52] LIU W P, DUPONT J N, Fabrication of functionally graded TiC/Ti composites by laser engineered net shaping[J]. *Scripta Materialia*, 2003, 48(9): 1337–1342.

[53] KAHLEN F J, KLITZING A, KAR A. Hardness, chemical and microstructural studies for laser-fabricated metal parts of graded materials[J]. *Journal of Laser Applications*, 2000, 205(12): 205–209.

[54] WANG F, MEI J, WU X H. Compositionally graded Ti6Al4V+TiC made by direct laser fabrication using powder and wire[J]. *Materials & Design*, 2007, 28(7): 2040–2046.

[55] WANG F, MEI J, WU X H. Direct laser fabrication of Ti6Al4V/TiB[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 195(1-3): 321–326.

[56] CARROLL B E, RICHARD A O, BORGONIA J P, et al. Functionally graded material of 304L stainless steel and inconel 625 fabricated by directed energy deposition: characterization and thermodynamic modeling[J]. *Acta Materialia*, 2016, 108: 46–54.

[57] 席明哲, 张永忠, 涂义, 等. 激光快速成形 316L 不锈钢 / 镍基合金 / Ti6Al4V 梯度材料 [J]. *金属学报*, 2008, 44(7): 826–830.

XI Mingzhe, ZHANG Yongzhong, TU Yi, et al. 316L stainless steel/Ni-based alloy/Ti6Al4V gradient materials prepared by laser rapid forming process[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2008, 44(7): 826–830.

[58] 杨模聪, 林鑫, 许小静, 等. 激光立体成形 Ti60–Ti₂AlNb 梯度材料的组织与相演变 [J]. *金属学报*, 2009, 45(6): 729–736.

YANG Mocong, LIN Xin, XU Xiaojing, et al. Microstructure and phase evolution in Ti60–Ti₂AlNb gradient material prepared by laser solid forming[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2009, 45(6): 729–736.

[59] 解航, 张安峰, 李涤尘, 等. 激光金属直接成形 Ti6Al4V–CoCrMo 梯度材料开裂研究 [J]. *中国激光*, 2013, 40(11): 89–95.

XIE Hang, ZHANG Anfeng, LI Dichen, et al. Research on the cracking of Ti6Al4V–CoCrMo gradient material fabricated by laser metal direct forming[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(11): 89–95.

[60] 李胜男, 熊华平, 陈冰清, 等. 激光 3D 打印方法制备 Nb/SiC 体系梯度材料的微观组织及反应机理 [J]. *焊接学报*, 2016, 7(2): 1–5.

LI Shengnan, XIONG Huaping, CHEN Bingqing, et al. Microstructure of Nb/SiC system gradient material fabricated by laser 3D printing method and reaction mechanism[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2016, 7(2): 1–5.

[61] 李能, 熊华平, 秦仁耀, 等. 原位反应制备 Ti₂AlNb/TiC+Ti₃SiC₂ 梯度材料的激光熔覆组织及成形机理 [J]. *机械工程学报*, 2018, 54(8): 145–150.

LI Neng, XIONG Huaping, QIN Renyao, et al. Microstructure and mechanism of Ti₂AlNb/TiC+Ti₃SiC₂ gradient materials by in-situ reaction laser cladding[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(8): 145–150.

[62] 孙成, 孙亦璋, 刘金, 等. 激光增材制造 TC4/TC11 钛合金梯度结构温度场预测与显微组织分析 [J]. *航空制造技术*, 2018, 61(4): 96–101.

SUN Cheng, SUN Yizhang, LIU Jin, et al. Temperature field prediction and microstructure analysis of gradient TC4/TC11 titanium alloy

deposited by laser additive manufacturing[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(4): 96–101.

[63] 梁晓康. 激光快速成形 316L/Inconel718 功能梯度材料的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2010.

LIANG Xiaokang. The study of laser rapid forming 316L/Inconel718 functionally gradient materials[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.

[64] 郝云波, 张国会, 马广义, 等. 激光近净成形 SS316/Ni20 复合材料的开裂机理 [J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27(12): 2501–2510.

HAO Yunbo, ZHANG Guohui, MA Guangyi, et al. Cracking mechanism of SS316/Ni20 composite fabricated by laser engineered net shaping[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(12): 2501–2510.

[65] 徐国建, 殷德洋, 杭争翔, 等. 激光熔覆钴基合金与碳化钒的功能梯度层 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 20(6): 136–142.

XU Guojian, YIN Deyang, HANG Zhengxiang, et al. Functionally gradient material coating of Co-based alloy and VC using laser cladding[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 20(6): 136–142.

[66] 董江, 刘常升, 刘芳, 等. 铜板上激光熔覆制备 Co–Ni–Cu 梯度涂层 [J]. *东北大学学报 (自然科学版)*, 2008, 29(11): 1581–1584.

DONG Jiang, LIU Changsheng, LIU Fang, et al. Preparation of Co–Ni–Cu gradient coatings by CO₂ laser cladding on copperplate[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2008, 29(11): 1581–1584.

通讯作者: 刘常升, 教授, 博士生导师, 研究方向为材料表面科学与技术、激光表面改性等, E-mail: cslu@mail.neu.edu.cn.

Application of Laser Melting Deposition Technique in Preparation of Functionally Gradient Materials

LIU Shuai, WANG Yang, LIU Changsheng

(School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

[ABSTRACT] Laser melting deposition (LMD) is a typical additive manufacturing technology. Compared to the traditional forming processes, it has a series of features, such as shorter processing cycle, flexible design, higher dimensional accuracy, and environmental protection. Gradient functional material (FGM) is an advanced functional material without ob-

vious interface inside, and the composition and performance graded distribution along thickness. Among the manufacturing method of FGM, LMD not only relieves the stress between different materials, but also ensures the excellent formability of the material, and controls the change and distribution of the microstructure and properties of the formed parts through flexible design. This paper introduces the technical characteristics of LMD, the characteristic and application of FGM, the research progress in manufacturing FGM by LMD at home and abroad, the current research status of team in this field, and the development prospects of the LMD technology for the manufacture of FGM.

Keywords: Laser melting deposition; Additive Manufacturing; Rapid prototyping; Functionally gradient material; Manufacturing method

(责编 逸飞)

(上接第46页)

electron beam forming system for high power electron gun[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.

[5] 桑兴华, 许海鹰, 左从进, 等. 电子枪束源部件结构尺寸对束流品质影响的 CST 仿真 [J]. 航空制造技术, 2017, 60(9): 60-64.

SANG Xinghua, XU Haiying, ZUO Congjin, et al. CST simulation on effect of beam source component structure size on beam quality in electron guns[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(9): 60-64.

[6] 王之康, 高永华. 真空电子束焊接设备及工艺 [M]. 北京: 原子能出版社, 1990.

WANG Zhikang, GAO Yonghua. Vacuum electron beam welding equipment and technology[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1990.

[7] 刘兵. 电磁仿真软件 CST 和 HFSS 模型接口软件的设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.

LIU Bing. Design of model interface software for CST and HFSS[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.

[8] 刘海涛. 强流皮尔斯电子枪电子束聚焦系统模拟设计研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2011.

LIU Haitao. Simulation design of electron beam focusing system for strong current Pearce electron gun[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.

[9] CST China. CST 粒子工作室基础入门: 三维带电粒子动力学仿真 [M]. 上海: 上海软波工程软件有限公司, 2006.

CST China. CST particle studio basic

introduction: three dimensional charged particle dynamics simulation[M]. Shanghai: CST China Ltd., 2006.

[10] 杜秉初, 汪健如. 电子光学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

DU Bingchu, WANG Jianru. Electron optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

[11] 李骥. 高性能电子枪的设计与研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.

LI Ji. Design and research of high performance electronic gun[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.

通讯作者: 刘方军, 教授, 研究方向为电子束焊接、电子束钎焊等, E-mail: liufangjun@buaa.edu.cn。

Simulation and Optimization of Electrostatic Lens Components of Electron Gun

YANG Zhen, LIU Fangjun, ZHANG Wei

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] According to the principle of electromagnetic lens, the size of the beam spot on the workpiece is related to the position and size of the electron beam waist. The change of the diameter of the grid hole and the position of the anode will cause the change of the electric field distribution, which will change the position and size of the electron beam waist, and eventually influence the size of the working beam spot. The electric field distribution and beam trajectory of the electron gun electrostatic lens are obtained by using the EMF simulation software CST. A single variable method was used to simulate the influence of the diameter of the grid hole and the position of anode on the position and size of the electron beam waist, while the intensity of beam was set to 100mA. The simulation results show that when the diameter of the grid hole is 2mm and the distance between the upper surface of anode and the lower end face is 15mm, the position of electron beam waist is highest and the radius is the smallest in the situation of that other parameters are the same. The welding test was carried out by the optimization parameter $D=2\text{mm}$ and $H=15\text{mm}$. The welding seam with greater depth to width ratio was obtained. It is proved that the purpose of reducing the size of the working beam spot and optimizing the beam quality is reached.

Keywords: Electron beam welding; Electron beam gun; CST simulation; Electric field distribution; Electron beam waist

(责编 逸飞)