

金属增材制造技术

赵剑峰 马智勇 谢德巧 韩雪谦 肖 猛

(南京航空航天大学机电学院, 增材制造(3D 打印)研究所, 南京, 210016)

摘要:金属增材制造技术作为 3D 打印技术的一个重要分支,在 20 余年的发展中取得了显著的进展。文中简要回顾了金属增材制造技术的历史溯源,重点从制件组织结构、制件性能、制件微观缺陷、成形工艺等方面分析了针对钛合金、镍基高温合金等常用材料的增材制造技术研究新进展,探讨了增材制造技术发展所面临的技术问题以及需要重点考虑的发展方向。

关键词:金属材料;增材制造;激光快速成形;性能

中图分类号:V26 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2014)05-0675-09

Metal Additive Manufacturing Technique

Zhao Jianfeng, Ma Zhiyong, Xie Deqiao, Han Xueqian, Xiao Meng

(Research Institute of Additive Manufacturing(3D Printing), College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The metal additive manufacturing technique, as an important branch of 3D printing technique, has made remarkable progress based on the rapid development of materials technique, equipment technique, computer technique, and so on. The evolution history of metal additive manufacturing technique is reviewed briefly. The microstructure, the mechanical performance, the micro-defect, and the technological process of product are introduced to discuss the studies on additive manufacturing technique of titanium alloy, nickel-base superalloy, and so on. Some suggestions of technical problems in the development of additive manufacturing technique are put forward. Finally, the main development direction is pointed out.

Key words: metal; additive manufacturing; laser rapid manufacturing; performance

作为一种全新概念的制造技术,增材制造技术自 20 世纪 90 年代出现以来,经过 20 余年的发展,已经成为当前先进制造技术领域技术创新蓬勃发展的源泉,以“3D 打印技术”为全新概念的增材制造技术已经成为当前包括美国在内的世界主要制造大国实施技术创新、提振本国制造业的重要着力点^[1]。中国政府积极推进 3D 打印技术在制造业的技术创新进程。在工业和信息化部支持下,2012 年成立“中国 3D 打印技术产业联盟”。2013 年,中国 3D 打印技术产业联盟成功举办首届世界

3D 打印技术产业大会,并与亚洲制造业协会、英国增材制造联盟、比利时 Materialise 公司、德国 EOS 公司、美国 3DSystem 公司等组织共同发起成立世界 3D 打印技术产业联盟的号召,高度凸显了中国 3D 打印技术在全球 3D 打印技术创新领域的重要引领作用。作为增材制造技术基础研究的支持机构,国家自然科学基金委员会机械工程学科在“十三五”学科发展战略规划设想中明确将增材制造技术作为跨学科学部交叉优先领域进行布局,以进一步提升中国增材制造技术的自主创新能力。

基金项目:国家自然科学基金(51475238)资助项目。

收稿日期:2014-05-10;**修订日期:**2014-07-10

作者简介:赵剑峰,男,教授,博士生导师,主要研究方向:特种加工、快速成型、纳米材料加工技术。

通信作者:赵剑峰,E-mail:zhaojf@nuaa.edu.cn。

1 金属增材制造技术概况

直接制造金属零件以及金属部件,甚至是组装好的功能性金属制件产品,无疑是制造业对增材制造技术提出的终极目标。早在20世纪90年代增材制造技术发展的初期(当时称之为“快速原型制造技术”或“快速成形技术”),研究人员便已经尝试基于各种快速原型制造方法所制备的非金属原型,通过后续工艺实现了金属制件的制备^[2]。与立体光造型(Stereolithography, SLA)、叠层制造(Laminated object manufacturing, LOM)、熔融沉积成型(Fused deposition modeling, FDM)、三维打印(Three-dimensional printing, 3DP)等快速原型制造技术相比,选择性激光烧结技术(Selected laser sintering, SLS),由于其使用粉末材料的特点,为制备金属制件提供了一种最直接的可能。SLS技术利用激光束扫描照射包覆有机粘接剂的金属粉末,获得具有金属骨架的零件原型,通过高温烧结、金属浸润、热等静压等后续处理,烧蚀有机粘接剂并填充其他液态金属材料,从而获得致密的金属零件^[3]。随着大功率激光器在快速成形技术中的逐步应用,SLS技术随之发展成为选区激光熔化成形技术(Selective laser melting, SLM)。SLM技术利用高能激光束照射预先铺覆好的金属粉末材料,将其直接熔化并固化,成形获得金属制件^[4]。在SLM技术发展的同时,基于激光熔覆技术,逐渐形成了金属增材制造技术研究的另一重要分枝——激光快速成形技术(Laser rapid forming, LRF)或激光立体成形技术(Laser solid forming, LSF)。该技术起源于美国Sandia国家实验室的激光近净成形技术(Laser engineered net shaping, LENS)^[5],利用高能量激光束将与光束同轴喷射或侧向喷射的金属粉末直接熔化为液态,通过运动控制,将熔化后的液态金属按照预定的轨迹堆积凝固成形,获得从尺寸和形状上非常接近于最终零件的“近形”制件,并经过后续的小余量加工后以及必要的后处理获得最终的金属制件^[6-8]。

基于SLS技术的SLM技术和基于LENS技术的LRF技术作为金属增材制造技术的两个主要研究热点,引领着当前金属增材制造技术的发展。由于具有极高的制造效率、材料利用率以及良好的成形性能等优势,金属增材制造技术从一开始便被应用于航空航天等高端制造领域的高性能金属材料 and 稀有金属材料的零部件制造。经过20余年的发展,中国国内金属增材制造技术在材料、工艺、装

备以及成形性能等各个方面均得到长足的发展,并且已经在航空航天等高端制造领域实现了初步应用^[9]。

2 研究进展

金属增材制造技术对高性能金属材料(包括稀有金属材料)而言,是一种极为有利的加工制造技术。相较于材料去除(或变形)的传统加工和常见的特种加工技术,基于材料增加的金属增材制造技术有着极高的材料利用率。当前增材制造技术的金属材料主要集中在航空航天用钛合金、高温合金、高强钢以及铝合金等材料体系。研究人员以上述金属材料为研究对象,从制件组织结构、制件性能、制件缺陷以及成形工艺等方面对金属增材制造技术开展了广泛的研究。

2.1 制件组织结构

钛合金材料是当前金属增材制造技术最主要的研究对象。在对航空用TC4钛合金激光成形的研究中,陈静等发现制件的组织结构为粗大的柱状晶,在粗大的 β 晶粒内是细小的针状马氏体 α' ^[10];薛蕾等在研究中发现制件的组织结构为柱状原始 β 晶界内编织细密的 $\alpha+\beta$ 网篮组织^[11];而张霜银等的进一步研究获得了TC4钛合金制件组织结构中柱状晶向等轴晶(CET)转变的时机及其P/V值^[12]。咎林等发现TC21激光成形制件组织结构为粗大的沿沉积高度方向外延生长的原始 β 柱状晶,仅最后一层熔覆层顶部为较细小的 β 等轴晶,在宏观上存在针状马氏体区和网篮组织区^[13]。王彬等发现Ti60棒状试样的组织结构是以棒材轴心呈微“八”字形对称分布的定向生长柱状晶构成,柱状晶内部为近乎无侧向分枝的胞状晶组织^[14]。贺瑞军等在对Ti-6Al-2Zr-Mo-V合金的成形研究中发现制件具有均匀细小的 α/β 双相片层组织,且片层取向随机多样,分布均匀^[15]。赵张龙等采用SLM+等温锻造复合工艺制备的TC17钛合金制件,其组织结构主要由粗大 β 柱状晶粒组成,经相变点、下等温锻造及热处理后,制件组织结构主要由条状和细小等轴 α 相组成,仅经相变点以下等温锻造及热处理后,制件组织主要由细小等轴 α 相组成,仍存在有少量的原始 β 晶粒边界^[16]。

在镍基高温合金材料的激光成形中,冯莉萍等发现Rene95高温合金制件的组织结构为定向凝固柱状枝晶,组织细密,枝晶一次间距为5~30 μm ,二次臂很小或者完全退化^[17],其在FGH95合金制件中也获得了相似结论,其组织结构由细小柱

状枝晶组织组成,枝晶一次间距约为 $10\ \mu\text{m}$,二次臂退化。由于局部凝固条件的不同,枝晶干区域的 γ' 相为球形、枝晶间区域的 γ' 相为立方体形态,尺度均小于 $0.1\ \mu\text{m}$ ^[18]。

林鑫在 316L 不锈钢制件中发现其组织呈现全 γ 奥氏体结构, γ 奥氏体从基体外延生长成柱状枝晶,并显示较强的晶体取向性,其 $\langle 100 \rangle$ 晶向基本平行沉积方向,仅在顶部出现一薄层转向枝晶^[19]。贾文鹏等通过建立的预测模型,预测了 316L 不锈钢激光快速成形制件的组织结构为细长柱状晶,并且获得了不发生 CET 转变的控制条件^[20]。董翠等制备的 300M 超高强度钢制件其组织结构则具有细小均匀的快速凝固胞状树枝晶,其显微组织为马氏体与贝氏体混合组织^[21]。

王小军等在对 Al-12Si 合金激光成形的研究中发现,在相邻激光相互作用形成德尔热影响区内有粗大的针状初生 Si 形成,其余部分由纳米级球状 Si 颗粒镶嵌在 Al 基体中组成^[22]。

2.2 制件性能

比对基于传统制造方法的制造规范和制造标准,激光增材制造制件性能的达到程度决定着该项技术在工程实际中的应用程度。李怀学等发现 TC4 钛合金制件室温拉伸强度达到 $1\ 100\ \text{MPa}$,达到锻件标准,硬度在 $3\ 300\sim 3\ 500\ \text{MPa}$ 之间,各向硬度差异不显著^[23]。高士友等发现,TC4 钛合金制件尽管其组织结构类似于铸造,但其抗拉强度达到了锻造制件的水平^[24]。陈静等制备的 TC4 钛合金制件的室温及 $300\ ^\circ\text{C}$ 拉伸强度及塑性指标均达到或超过锻造件水平^[10]。

张方等发现 Ti60 合金制件的硬度要高于锻件指标,室温和 $600\ ^\circ\text{C}$ 高温拉伸强度均高于锻件,室温塑性略低于锻件,而高温塑性与锻件相当^[25],其进一步的研究表明 Ti60 合金制件在进行双重退火热处理后,其室温和高温($600\ ^\circ\text{C}$)下的拉伸强度略有下降,但塑性显著增高,综合力学性能得到提高^[26]。陈静等发现 Ti60 制件的组织结构以及粉末材料的制备方法会使钛合金制件的高温持久性能发生大幅度变化。较高的功率密度所形成的魏氏组织相较较低功率密度形成的网篮组织其高温持久性显著降低,采用气雾化法制备的粉末在制件中形成的气孔会导致其高温持久性能降幅达 300% ^[27]。于翔天等制备的 TiB+TiC 增强 TA15 复合材料制件,当 TiB+TiC 增强相体积分数约为 9% 时,制件抗拉强度和屈服强度提高了 12% ,分别达到 $1\ 040\ \text{MPa}$ 及 $935\ \text{MPa}$ ^[28]。

冯莉萍等发现 FGH95 合金的成形制件的拉伸强度指标达到粉末冶金 97.9% ,塑性超过粉末冶金制件^[18]。金具涛等发现激光成形 Rene95 合金的室温抗拉强度为 $1\ 247\ \text{MPa}$,较粉末冶金 C 级水平略低,而沿沉积高度方向的延伸率为 16.2% ,高于粉末冶金 A 级水平^[29]。杨海欧等研究表明,对 Rene95 高温合金激光快速成形制件进行固溶+时效热处理后,其强度指标接近粉末冶金 C 级标准,塑性指标超过粉末冶金 A 级标准。试样平均硬度达到 $\text{HV}496.3$ ^[30]。赵晓明等对 Rene88DT 高温合金制件进行时效热处理后,发现其抗拉强度提高了 $400\ \text{MPa}$,屈服强度接近同种材料的粉末锻造水平^[31]。

袁源等制备的铁基固溶体 α 增韧 Fe9Cr9Si2 三元金属硅化物合金制件,其韧性明显改善,在干滑动摩擦条件下,具有较低的摩擦系数^[32]。董翠等制备的 300 M 超高强度钢制件室温拉伸性能接近同质材料的锻件水平^[21]。

2.3 制件微观缺陷

对金属增材制造制件性能的研究发现,制件性能尽管在个别指标能够达到同质材料的相应标准和规范,但总体上还是存在着一定的差距,其主要原因在于增材制造技术成形机理的固有特性——“瞬态熔凝过程”所导致的制件内部的微观缺陷,如裂纹、空洞等,其产生的原因包括工艺参数配置不当、内应力以及熔合不良等。

张凤英等对钛合金制件围观缺陷的产生进行了深入的研究,发现由于钛合金本身所特有的优良的塑性性能,其制件往往很少出现裂纹,但在制件内部大多存在微气孔以及熔合不良等缺陷。此外,成形件内部的气孔形貌呈球形,在成形件内部的分布具有随机性,气孔是否形成取决于粉末材料的松装密度等特性,氧含量对气孔的形成没有影响。熔合不良缺陷形貌一般呈不规则状,主要分布在各熔覆层的层间和道间,其是否产生取决于成形特征参量是否匹配,其中最显著的影响因素是能量密度、多道间搭接率以及 Z 轴单层行程^[33]。

陈静等的研究表明:316L 不锈钢激光快速成形容易产生开裂,裂纹多发生在树枝晶的晶界,呈现出典型的沿晶开裂特征。熔覆层中的裂纹是凝固裂纹,属于热裂纹范畴。裂纹产生的主要原因是熔覆层组织在凝固温度区间晶界处的残余液相受到熔覆层中的拉应力作用所导致的液膜分离的结果^[34]。卢朋辉在对 K418 高温合金的开裂研究中也发现了制件内裂纹为与液膜有关的结晶裂纹,裂

纹沿枝晶晶界扩展^[35]。赵晓明对 Rene88DT 激光快速成形裂纹的研究中发现裂纹为液化裂纹,与钛合金相似,也具有典型的沿晶开裂特征^[36]。贺瑞军等在对 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 合金在高周疲劳失效中的变形行为的研究中发现钛合金制件的疲劳裂纹萌生和扩展中的变形行为都与其位错运动和滑移行为密切相关。疲劳裂纹扩展中的滑移主要沿两个滑移面进行,裂纹扩展亚表面存在大量二次裂纹^[37]。

2.4 成形工艺

在特定的成形材料的前提下,工艺研究是金属增材制造技术的基础研究内容,也是制件内缺陷消除、制件性能提高的必由之路。研究人员在金属增材制造技术的基础工艺研究中投入了大量的工作,从基础工艺参数、成形气氛、材料预处理、制件热处理等方面开展了广泛的研究,甚至考虑采用其他的能量来源代替激光光源^[12,27,38-39]。

环境中的氧含量对成形工艺包括激光沉积工艺、成形质量、粉末利用率、熔覆层是否开裂等具有显著影响。陈静等认为氧含量严格控制在 0.02% 以下时,可获得表面平整光洁、无裂纹等缺陷的 TC4 薄壁试样^[27]。刘奋成等对比了氩气和空气环境中 Inconel718 镍基高温合金的成形,发现在两种气氛环境下制件组织结构基本相同,均为沿成形方向连续生长的粗大柱状枝晶,组织细密,均匀;空气环境中制件拉伸强度略高于氩气环境中制件的拉伸强度,但是前者的塑性略低,疲劳性能比后者约低 30%,其原因是制件中较多的氧化物夹杂和显微气孔等缺陷^[40]。谭华等则研究了以单元素混合粉末代替预合金粉末为原料制备 Ti-6Al-4V 制件,可在较大程度上控制氧含量,仅约 0.1% (质量分数),且其室温拉伸性能提高较多,超过锻件标准要求^[41]。陈静等在对 Ti60 合金的成形研究中发现,采用气雾化法制备的粉末非常容易在制件中形成气孔,其高温持久性能降幅达 300%^[42]。谢德巧等则在熔池中引入脉冲电流,利用脉冲电流在熔池中产生的磁致压缩力用以挤压熔池中形成的气泡,以期减少制件中孔隙的数量以及尺寸^[43]。

激光增材制造的瞬态熔凝过程所产生的极高的温度梯度,极易在制件内部形成封闭的内应力。杨健等在对 316L 不锈钢激光快速成形制件的残余应力的研究中发现,制件内部的残余应力以拉应力作用为主,垂直于扫描方向的残余应力相较于平行方向要小一些,随着制件高度增加,拉应力逐渐减小,有改变为压应力的趋势^[44]。为了降低或消

除内应力对制件性能所产生的影响,王凯等采取了采用基板预热的方法以控制薄壁制件内应力以及内应力引起的变形^[45]。张霜银等对 TC4 成形制件和经热处理后的残余应力进行了研究,发现靠近基材处的残余应力为较大的压应力,随着制件高度的增加,到顶部转变为较小的拉应力。去应力退火热处理后,制件的残余应力分别降低 59.8% 和 72.3%,固溶时效处理后残余应力分别降低 64.7% 和 67.8%。钛合金制件的残余应力总体属于低应力水平,制件经热处理后残余应力分布趋于平缓,可有效地消除和调整激光成形过程产生的残余应力^[46]。戚永爱则利用喷丸强化的辅助方法对成形过程中所产生的内应力进行实时处理,制件内沿着扫描方向残余应力消除达到 93.64%;垂直于扫描方向的残余应力受超声冲击作用由拉应力变为压应力^[47]。

对制件进行后续热处理是当前金属增材制造技术实现组织结构优化和性能提高的主要工艺手段。陈静等研究发现,对 Ti-6Al-4V 合金制件进行固溶时效热处理后所获得的网篮组织综合性能最好,不论是强度指标还是塑性指标都高于锻件标准^[48]。张霜银等对 TC4 钛合金成形制件进行去应力退火和固溶时效处理,对比发现,经退火处理后性能改善不明显,塑性有所提高,而经固溶时效处理后塑性有明显提高,且强度降低不大,具有良好的综合力学性能^[49]。王俊伟等对 TC17 的同类研究表明,成形制件在组织结构上呈现出与 TC4 相同的变化^[50]。张小红等研究了对 TA15 钛合金制件的退火、固溶时效以及双固溶时效处理。结果表明经退火处理后塑性得到了提高,具有良好的综合拉伸性能,达到了锻件退火态的拉伸性能标准;经固溶时效处理后,制件强度显著提高^[51]。林鑫等对 Ti6Al4V 合金制件进行退火处理后,制件组织结构原有的等轴 α +层状 α + β 双态组织经热影响区连续转变为晶内分布魏氏 α + β 的外延生长的粗大柱状晶组织,修复区中 α 板条有粗化趋势,综合力学性能得到一定改善,塑性有所提高,其静载拉伸性能达到锻件标准,再辅以喷丸处理,制件的低周疲劳性能达到锻件标准要求^[52]。

赵晓明等研究了时效时间对激光快速成形后时效硬化镍基高温合金 Rene88DT 中沉淀相组织演化和力学性能的影响。发现随时效时间的增加制件组织中沉淀相颗粒粗化明显^[31],成形件经 1 160 °C、2 h、200 MPa 热等静压的高压、高温固溶处理后,裂纹得到明显的愈合修复,在原裂纹附近

析出 MC 型碳化物。将热等静压处理后的成形件进行固溶时效热处理后,拉伸强度和塑性均明显提高,综合力学性能接近粉末冶金 Rene88DT 的标准^[53]。赵卫卫等对 Inconel718 制件进行直接时效处理后发现硬度和拉伸强度均明显提高,合金性能得到进一步改善,室温、高温拉伸强度和塑性都达到了高强锻件的技术标准 Q/3B548-1996(高强)^[54]。

从能量源角度出发,锁红波等利用电子束代替激光实现了 Ti6Al4V 钛合金制件的制备,制件经退火处理后拉伸性能可满足 AMS4999 标准的要求,但与锻件标准 HB5432 相比仍有差距^[55]。

2.5 梯度材料

为实现某种或某几种功能或性能,而不仅仅局限在单一材料体系,增材制造技术为设计方法的变革提供了一条崭新的途径,基于增材制造技术的梯度功能材料就是最为典型的应用。杨海欧等制备了从 100% 316L 到 100% Rene88DT 成分连续渐变的梯度材料制件。制件组织致密,在过渡层内,随着 Rene88DT 合金所含比例的逐渐提高,硬度和一次枝晶间距持续增大,硬度值从底部 100% 316L 的 186HV 连续渐变到顶端 100% Rene88DT 的 458HV。平均一次枝晶间距由底部的 12.41 μm 逐渐增大到顶部的 16.99 μm ^[56]。刘建涛等制备了从 Ti 到 Ti₂AlNb 成分连续渐变、外形规则、高度为 17 mm 的梯度材料制件。随着 Al 和 Nb 成分的提高,Ti-Ti₂AlNb 功能梯度材料实现了由 α 型钛合金经过 $\alpha+\beta$ 型及 β 型钛合金向 Ti₂AlNb 基合金的转变^[57]。解航等成功制备了 CoCrMo 体积分数 10% 的无裂纹 Ti6Al4V-CoCrMo 梯度材料制件,用于人工关节的制备^[58]。许小静等进行了 Ti-80%Ni(质量分数)合金的工艺研究,制件组织结构由 η -TiNi₃ 板条和 TiNi(B2)+ η 共晶构成,随着激光扫描速率的增大, η 板条逐渐转变为 η 板条+(TiNi(B2)+ η) 共晶,随着激光功率的增大,块状组织越细,形成 (TiNi(B2)+ η) 离异共晶组织+板条间 (TiNi(B2)+ η) 共晶组织^[59]。

3 发展前景

金属增材制造技术作为一种全新理念的制造技术,自其出现之日起,便被工程材料领域的研究者们视为一种新的方法和手段,实现或者替代既有加工制造方法和材料制备方法。众多的研究表明,当前绝大多数关于增材制造技术的研究,其最终目标依旧是基于某一材料体系的零件、部件或功能组

合制件的制备。无论是材料制备还是加工制造,无论是对制件组织结构、制件性能的研究还是对制件微观缺陷、成形工艺等的研究,其参考的标准依旧是既有加工制造和材料的指标体系,从某种意义上讲,当前增材制造技术的相关研究主要聚焦于对既有加工制造方法和材料制备方法的替代或者提升。

随着对增材制造技术研究的深入和理解认识的进一步拓展,人们逐步意识到增材制造技术的内涵似乎已经不仅仅局限于工程和材料学科,其所蕴含的潜能正在逐步向外辐射,日益影响着其他学科的发展,甚至是社会生产模式、思维模式的变革,以至于终将影响社会形态的发展^[60]。

北京航空航天大学王华明教授提出了金属增材制造技术实际上是一个以高性能材料制备、内部质量控制为核心的“控形/控性”一体化制造技术,其面临的关键问题是突破“内应力”控制及“变形开裂”预防、“内部质量控制”及检测评价等^[60]。西北工业大学黄卫东教授认为金属增材制造技术发展目标应该是形成增材制造技术的设计、工艺、材料、装备和质量等方面完整的学科与技术体系^[60]。华南理工大学杨永强教授提出“制造改变设计”必将成为可能,增材制造技术将必然带来对 CAD 模型的新的设计要求,带来设计方面革命性的变化^[60]。华中科技大学史玉升教授提出了现代增材制造技术超越传统单材均质加工技术的 3 个突破,即材料复杂性、层次复杂性和功能复杂性,对现代设计方法提出了新的挑战,即现代设计方法必须引入新一代的复杂形状建模、复杂材料建模和复杂层次建模技术,在更高层次上将上述复杂性统一起来^[60]。西安交通大学卢秉恒院士不仅在技术层面提出了增材制造科学与技术所面临的具体科学问题,包括在制造技术层面的材料与工艺与制造功能和质量的关系、在设计层面的以材料和工艺为支持的功能驱动的设计方法以及在系统层面的制造能力与设计智慧构建的集散制造模式等,更在战略层面上揭示了增材制造技术将会对社会形态发展带来的影响的内涵,充分展现了增材制造技术在新的社会发展时期所面临的机遇和挑战^[60]。

4 结束语

金属增材制造技术因其逐点堆积的过程,可以通过对“点”的精确控制,从而实现金属件的“控形控性”的要求。在合适的工艺基础上,金属增材制造技术可完成钛合金、高温合金、不锈钢等零件的高品质、快速制造。文中,作者从两个层面提出

了增材制造技术的新构想:一方面,基于既有制造/材料标准体系,以产品性能指标(或称产品质量)为目标,通过对制造过程的工艺配置,控制成形过程中制件的组织结构,建立制件性能指标—制件组织结构—制造工艺参数的“关系数据链”,实现“基于性能驱动的增材制造闭环控制”;另一方面,基于增材制造技术现状,从观念上正确认识增材制造技术的规律性,接受并认可增材制造技术的固有属性,综合考虑产品功能/性能、效率和成本的关系,建立增材制造技术产品独立的评价体系。

参考文献:

- [1] 卢秉恒,李涤尘. 增材制造(3D打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化,2013,42(4):1-4.
Lu Bingheng, Li Dichen. Development of the additive manufacturing(3D printing) technology[J]. Machine Building & Automation, 2013, 42(4): 1-4.
- [2] 赵剑峰,张建华,余承业,等. 激光烧结铸造型壳强度试验分析[J]. 南京航空航天大学学报,2001,33(1): 41-45.
Zhao Jianfeng, Zhang Jianhua, Yu Chengye, et al. Strength analysis of mold shell manufactured with selective laser sintering technology[J]. Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2001, 33(1): 41-45.
- [3] 赵剑峰,李悦,黄因慧,等. 金属原型零件钨铜烧结及其放电加工行为[J]. 粉末冶金技术,2001,9(5):286-289.
Zhao Jianfeng, Li Yue, Huang Yinhuai, et al. Infiltrating copper sintering and electrical discharge machining behaviour of metal P/M parts[J]. P/M Technology, 2001, 9(5): 286-289.
- [4] 张剑峰,沈以赴,赵剑峰,等. Ni基金属粉末激光快速制造的研究[J]. 航空学报,2002,23(3):221-225.
Zhang Jianfeng, Shen Yifu, Zhao Jianfeng, et al. Study on laser sintering of Ni-based alloy powders[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(3): 221-225.
- [5] Griffith M L, Keicher D M, Atwood C L, et al. Free form fabrication of metallic components using laser engineered net shaping (LENS)[C]// Solid Freeform Fabrication Proceedings. Texas, USA: University of Texas at Austin, 1996.
- [6] 张永忠,章萍芝,石力开,等. 金属零件激光快速成型技术研究[J]. 材料导报,2001,15(12):10-13.
Zhang Yongzhong, Zhang Pingzhi, Shi Likai, et al. Research on laser direct forming of metal parts[J]. Materials Review, 2001, 15(12): 10-13.
- [7] 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.
- [8] Huang Weidong, Chen Jing, Li Yanming. Laser rapid forming technology of high performance dense metal compents with complex structure [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5629: 67-75
- [9] 王华明. 航空高性能金属结构件激光快速成形研究进展[J]. 航空制造技术,2005(12):26-28.
- [10] 陈静,杨海欧,黄卫东. 先进飞机结构用钛合金零件的激光快速成形[C]//探索创新交流——中国航空学会青年科技论坛文集. 银川:中国航空学会:2004: 623-626.
- [11] 薛蕾,陈静,张凤英,等. 飞机用钛合金零件的激光快速修复[J]. 稀有金属材料与工程,2006,35(11): 1817-1821.
Xue Lei, Chen Jing, Zhang Fengying, et al. Laser rapid repair of the aircraft components of titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(11): 1817-1821.
- [12] 张霜银,林鑫,陈静,等. 工艺参数对激光快速成形 TC4 钛合金组织及成形质量的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2007,36(10):1839-1843.
Zhang Shuangyin, Lin Xin, Chen Jing, et al. Influence of processing parameter on the microstructure and forming characterizations of Ti-6Al-4V titanium alloy after laser rapid forming processing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(10): 1839-1843.
- [13] 咎林,陈静,林鑫,等. 激光快速成形 TC21 钛合金沉积态组织研究[J]. 稀有金属材料与工程,2007,36(4):612-616.
Zan Lin, Chen Jing, Lin Xin, et al. Research on microstructures of deposited TC21 titanium alloy by laser rapid forming[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(4): 612-616.
- [14] 王彬,张述泉,王华明. 激光熔化沉积高温钛合金 Ti60 快速凝固组织[J]. 材料热处理学报,2008,29(6):86-92.
Wang Bin, Zhang Shuquan, Wang Huaming. Rapid solidified microstructure of Ti60 alloy produced by laser rapid forming process[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2008, 29(6): 86-92.
- [15] 贺瑞军,王华明. 激光熔化沉积 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 钛合金组织特征研究[J]. 航空材料学报,2009,29(6): 18-22.
He Ruijin, Wang Huaming. Microstructure features of laser deposited Ti-6Al-2Zr-Mo-V alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2009, 29(6): 18-22.
- [16] 赵张龙,郭鸿镇,姚泽坤,等. 激光烧结/等温锻造 TC17 粉末钛合金的组织与性能[J]. 稀有金属材料与工程,2009,38(6):1104-1107.

- Zhao Zhanglong, Guo Hongzhen, Yao Zekun, et al. Microstructures and properties of TC17 powder metallurgy titanium alloy prepared by laser sintering/isothermal forging[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(6): 1104-1107.
- [17] 冯莉萍, 黄卫东, 李延民, 等. 激光金属成形定向凝固显微组织及成分偏析研究[J]. 金属学报, 2002, 38(5): 501-506.
- Feng Liping, Huang Weidong, Li Yanmin, et al. Investigation on the microstructure and composition segregation of the laser metal forming directional solidification[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(5): 501-506.
- [18] 冯莉萍, 黄卫东, 林鑫, 等. FGH95 合金激光成形定向凝固显微组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(1): 181-187.
- Feng Liping, Huang Weidong, Lin Xin, et al. FGH95 superalloy laser metal forming directional solidification[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(1): 181-187.
- [19] 林鑫, 杨海欧, 陈静, 等. 激光快速成形过程中 316L 不锈钢显微组织的演变[J]. 金属学报, 2006, 42(4): 361-368.
- Lin Xin, Yang Haiou, Chen Jing, et al. Microstructure evolution of 316L stainless steel during laser rapid forming[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(4): 361-368.
- [20] 贾文鹏, 汤慧萍, 贺卫卫, 等. 316L 不锈钢激光快速成形的微观组织模拟[J]. 金属学报, 2010, 46(2): 135-140.
- Jia Wenpeng, Tang Huiping, He Weiwei, et al. Numerical microstructure simulation of laser rapid forming 316L stainless steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(2): 135-140.
- [21] 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.
- Dong Cui, Wang Huaming. 300M fabricated by laser melting deposition[J]. Heat Treatment of Metals, 2008, 33(9): 1-5.
- [22] 王小军. Al-Si 合金的选择性激光熔化工艺参数与性能研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2014.
- Wang Xiaojun. Process parameters and properties of selective laser melting Al-Si alloys[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014.
- [23] 李怀学, 黄柏颖, 孙帆, 等. 激光选区熔化成形 Ti-6Al-4V 钛合金的组织 and 拉伸性能(英文)[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(S2): 209-212.
- Li Huaixue, Huang Baiying, Sun Fan, et al. Microstructure and tensile properties of Ti-6Al-4V alloys fabricated by selective laser melting[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(S2): 209-212.
- [24] 高士友, 张永忠, 石力开, 等. 激光快速成型 TC4 钛合金的力学性能[J]. 稀有金属, 2004, 28(1): 29-33.
- Gao Shiyu, Zhang Yongzhong, Shi Likai, et al. Mechanical properties of TC4 alloy fabricated by laser direct deposition[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2004, 28(1): 29-33.
- [25] 张方, 陈静, 薛蕾, 等. 激光成形修复 Ti60 合金组织与性能研究[J]. 应用激光, 2009, 29(2): 87-91.
- Zhang Fang, Chen Jing, Xue Lei, et al. Study on microstructure and mechanical properties of laser solid repaired Ti60 alloy[J]. Applied Laser, 2009, 29(2): 87-91.
- [26] 张方, 陈静, 薛蕾, 等. 激光立体成形 Ti60 合金组织性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(3): 452-456.
- Zhang Fang, Chen Jing, Xue Lei, et al. Microstructure and mechanical properties of laser solid formed Ti60 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(3): 452-456.
- [27] 陈静, 杨海欧, 汤慧萍, 等. 成形气氛中氧含量对 TC4 钛合金激光快速成形工艺的影响[J]. 稀有金属快报, 2004, 23(3): 23-26.
- [28] 于翔天, 王华明. 激光熔化沉积(TiB+TiC)/TA15 原位钛基复合材料的显微组织与力学性能[J]. 复合材料学报, 2008, 25(4): 113-118.
- Yu Xiangtian, Wang Huaming. Microstructure and mechanical properties of laser melting deposited(TiB+TiC)/TA15 in situ titanium matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(4): 113-118.
- [29] 金具涛, 张永忠, 黄灿, 等. 激光熔化沉积 Rene95 镍基高温合金的凝固组织及力学性能[J]. 稀有金属, 2009, 33(6): 805-810.
- Jin Jutao, Zhang Yongzhong, Huang Can, et al. Solidification microstructure and mechanical properties of laser direct deposited Rene95 nickel based superalloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2009, 33(6): 805-810.
- [30] 杨海欧, 陈静, 李延民, 等. Rene95 高温合金激光快速成形试样的力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(4): 276-279.
- Yang Haiou, Chen Jing, Li Yanmin, et al. The mechanics properties of the Rene95 samples produced by the laser rapid forming process[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003, 32(4): 276-279.
- [31] 赵晓明, 陈静, 何飞, 等. 激光快速成形 Rene'88DT 高温合金的时效强化研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(12): 2208-2211.
- Zhao Xiaoming, Chen Jing, He Fei, et al. Study on the age-hardening mechanism of Rene'88DT superalloy by laser rapid forming[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(12): 2208-2211.

- [32] 袁源,王华明. 激光熔化沉积 $\alpha/\text{Fe}_9\text{Cr}_9\text{Si}_2$ 三元金属硅化物耐磨合金组织和摩擦学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(9): 1660-1663.
Yuan Yuan, Wang Huaming. Microstructure and tribological property of laser melt deposited $\alpha/\text{Fe}_9\text{Cr}_9\text{Si}_2$ metal silicide alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(9): 1660-1663.
- [33] 张凤英,陈静,谭华,等. 钛合金激光快速成形过程中缺陷形成机理研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(2): 211-215.
Zhang Fengying, Chen Jing, Tan Hua, et al. Research on forming mechanism of defects in laser rapid formed titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(2): 211-215.
- [34] 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.
Chen Jing, Lin Xin, Wang Tao, et al. The hot cracking mechanism of 316L stainless steel cladding in rapid laser forming process[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003, 32(3): 183-186.
- [35] 卢朋辉,刘建睿,薛蕾,等. 激光成形修复 K418 高温合金的显微组织与开裂行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(2): 315-319.
Lu Penghui, Liu Jianrui, Xue Lei, et al. Microstructure and cracking behavior of K418 superalloy by laser forming repairing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(2): 315-319.
- [36] 赵晓明,陈静,何飞,等. 激光快速成形 Rene88DT 高温合金开裂机理研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(2): 216-220.
Zhao Xiaoming, Chen Jing, He Fei, et al. The cracking mechanism of Rene88DT superalloy by laser rapid forming[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(2): 216-220.
- [37] 贺瑞军,王华明. 激光熔化沉积 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 合金高周疲劳变形行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(2): 288-291.
He Ruijun, Wang Huanming. Deforming behavior in high-frequency fatigue failure of laser melting deposited Ti-6Al-2Zr-Mo-V alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(2): 288-291.
- [38] 黄瑜,陈静,张凤英,等. 热处理对激光立体成形 TC11 钛合金组织的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(12): 2146-2150.
Huang Yu, Chen Jing, Zhang Fengying, et al. Influence of heat treatment on microstructure of laser solid forming Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.25Si alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(12): 2146-2150.
- [39] 王堃,孟牧,王华明. 热处理及激光多道搭接对激光熔化沉积 TC18 钛合金组织的影响[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(3): 521-525.
Wang Kun, Meng Mu, Wang Huaming. Effect of heat treatment and laser multi-track overlapping on microstructure of a laser melting deposition TC18 titanium alloy [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(3): 521-525.
- [40] 刘奋成,林鑫,杨海林,等. 不同气氛激光立体成形镍基高温合金 Inconel718 的显微组织和力学性能[J]. 金属学报, 2010, 46(9): 1047-1054.
Liu Fencheng, Lin Xin, Yang Gaolin, et al. Microstructures and mechanical properties of laser solid formed nickelbase superalloy Inconel 718 prepared in different atmospheres[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(9): 1047-1054.
- [41] 谭华,陈静,张凤英,等. 混合元素法激光立体成形 Ti-6Al-4V 的组织及性能研究(英文)[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(4): 574-578.
Tan Hua, Chen Jing, Zhang Fengying, et al. Microstructure and mechanical properties of laser solid formed Ti-6Al-4V from blended elemental powders [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(4): 574-578.
- [42] 陈静,张瑞,张强,等. 激光立体成形 Ti60 合金组织和缺陷对性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(3): 0548-0552.
Chen Jing, Zhang Rui, Zhang Qiang, et al. Relationship among microstructure, defects and performance of Ti60 titanium alloy fabricated by laser solid forming[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(3): 0548-0552.
- [43] 谢德桥,赵 Jianfeng, 齐 Yongai, et al. Decreasing pores in laser cladding layer with pulsed current [J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(11): 58-61.
- [44] 杨健,黄卫东,杨海欧. 激光快速成形 316L 不锈钢残余应力分布[J]. 应用激光, 2005, 25(3): 151-154.
Yang Jian, Huang Weidong, Yang Haiou. Study on the planar residual stress distribution of laser rapid forming 316L sheet [J]. Applied Laser, 2005, 25(3): 151-154.
- [45] 王凯,杨海欧,刘奋成,等. 基板预变形下激光立体成形直薄壁件应力和变形的有限元模拟[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0603002.
Wang Kai, Yang Haiou, Liu Fencheng, et al. Stress and deformation finite element method simulation of thin wall part with pre-deformation substrate during laser solid forming [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(6): 0603002.
- [46] 张霜银,林鑫,陈静,等. 热处理对激光立体成形 TC4 残余应力的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(5): 774-778.

- Zhang Shuangyin, Lin Xin, Chen Jing, et al. Influence of heat treatment on residual stress of Ti-6Al-4V alloy by laser solid forming[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38(5):774-778.
- [47] 戚永爱. 基于超声冲击的激光熔覆成形镍基高温合金强化技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学机电学院, 2014.
- [48] 陈静, 张霜银, 薛蕾, 等. 激光快速成形 Ti-6Al-4V 合金力学性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, 36(3): 475-479.
- Chen Jing, Zhang Shuangyin, Xue Lei, et al. Mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy by laser rapid forming[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, 36(3): 475-479.
- [49] 张霜银, 林鑫, 陈静, 等. 热处理对激光成形 TC4 合金组织及性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, 36(7):1263-1266.
- Zhang Shuangyin, Lin Xin, Chen Jing, et al. Influence of heat treatment on the microstructure and properties of Ti-6Al-4V titanium alloy by laser rapid forming[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, 36(7): 1263-1266.
- [50] 王俊伟, 陈静, 刘彦红, 等. 激光立体成形 TC17 钛合金组织研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(3):847-851.
- Wang Junwei, Chen Jing, Liu Yanhong, et al. Research on microstructure of TC17 titanium alloy fabricated by laser solid forming[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(3):847-851.
- [51] 张小红, 林鑫, 陈静, 等. 热处理对激光立体成形 TA15 合金组织及力学性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2011, 40(1):142-147.
- Zhang Xiaohong, Lin Xin, Chen Jing, et al. Effects of heat treatment on the microstructures and mechanical properties of TA15 titanium alloys by laser solid forming[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, 40(1): 142-147.
- [52] 林鑫, 薛蕾, 陈静, 等. 激光成形修复 Ti-6Al-4V 钛合金零件的组织与性能[J]. *中国表面工程*, 2009, 22(1):19-24.
- Lin Xin, Xue Lei, Chen Jing, et al. Microstructure and mechanical properties of laser forming repaired Ti-6Al-4V alloy component[J]. *China Surface Engineering*, 2009, 22(1): 19-24.
- [53] 赵晓明, 林鑫, 陈静, 等. 激光快速成形 Rene88DT 高温合金的热等静压处理[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(8):1446-1452.
- Zhao Xiaoming, Lin Xin, Chen Jing, et al. HIP treatment of superalloy Rene88DT prepared by laser rapid forming[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(8): 1446-1452.
- [54] 赵卫卫, 林鑫, 刘奋成, 等. 热处理对激光立体成形 Inconel718 高温合金组织和力学性能的影响[J]. *中国激光*, 2009, 36(12):3220-3225.
- Zhao Weiwei, Lin Xin, Liu Fencheng, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser solid forming Inconel718 superalloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(12): 3220-3225.
- [55] 锁红波, 陈哲源, 刘建荣, 等. 电子束快速成形 Ti-6Al-4V 合金的组织与性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2014, 43(4):780-785.
- Suo Hongbo, Chen Zheyuan, Liu Jianrong, et al. Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V by electron beam rapid manufacturing [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, 43(4): 780-785.
- [56] 杨海欧, 林鑫, 陈静, 等. 利用激光快速成形技术制造高温合金不锈钢梯度材料[J]. *中国激光*, 2005, 32(4):567-570.
- Yang Haiou, Lin Xin, Chen Jing, et al. Functionally gradient material prepared with laser rapid forming [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(4): 567-570.
- [57] 刘建涛, 林鑫, 吕晓卫, 等. Ti-Ti₂AlNb 功能梯度材料的激光立体成形研究[J]. *金属学报*, 2008, 44(8): 1006-1012.
- Liu Jiantao, Lin Xin, Lv Xiaowei, et al. Research on laser solid forming of a functionally gradient Ti-Ti₂AlNb alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2008, 44(8): 1006-1012.
- [58] 解航, 张安峰, 李涤尘, 等. 激光直接成形 Ti6Al4V-CoCrMo 梯度材料开裂研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(11):1103003-1-1103003-7.
- 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): 1103003-1-1103003-7.
- [59] 许小静, 林鑫, 黄卫东, 等. 激光立体成形 Ti-80%Ni 合金显微组织及力学性能[J]. *金属学报*, 2010, 46(9):1081-1085.
- Xu Xiaojing, Lin Xin, Huang Weidong, et al. Microstructure and mechanical property of Ti-80%Ni alloy prepared by laser solid forming[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2010, 46(9):1081-1085.
- [60] 宋建丽, 王国彪, 黎明. “增材制造科学与技术中青年学者论坛”在西安召开[EB/OL]. <http://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab110/info45674.htm>, 2014-09-29.

