

改善金属增材制造材料组织与力学性能的方法与技术*

袁 丁¹, 高华兵², 孙小婧¹, 周长平¹, 孙徕博¹, 陈玉娟¹, 果春焕¹, 牛忠毅¹, 姜风春¹

(1. 哈尔滨工程大学材料科学与化学工程学院, 哈尔滨 150001;

2. 青岛哈船材料成型研究院有限公司, 青岛 266000)

[摘要] 金属增材制造技术在航空航天、船舶工业、汽车制造、生物医疗等行业得到快速发展。然而增材制造过程中存在的几个问题减缓了该技术的广泛应用。其中, 增材制造材料内部的特殊组织使其存在明显的各向异性, 增材制造构件内较大的残余应力导致材料的变形和开裂以及材料内部容易产生裂纹和孔洞。主要介绍几种改善金属增材制造材料内部组织和性能的方法和技术, 包括工艺参数的优化、后处理技术、颗粒引入、超声干扰技术、超声冲击技术、滚压轧制技术和超声微锻造技术。

关键词: 金属增材制造; 滚压; 超声微锻造; 组织; 性能

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.10.040



袁 丁

博士研究生, 研究方向为金属复合材料、金属增材制造。

金属增材制造(Metal Additive Manufacturing)技术, 是基于“离散-堆积”原理, 将电脑软件所设计的三维 CAD 模型, 以金属粉末或丝材为原材料, 运用激光、电子束、电弧等高能束为热源, 进行原位熔化/快速凝固逐层堆积来制造零件和实体的制造方法。与传统制造所采用的车、铣、刨、磨等减材的加工技术不同, 该技术很好地解决了传统技术对复杂结构加工困难甚至无法加工的难题, 具有低成本、短周期、高材料利用率、快速成形制造及自由制造等优势^[1-2]。该技术在制造理念和模式上的创新已成为引领科技创新和产业变革的关键技术之一^[3]。

当前, 金属增材制造技术在航空航天^[4-5]、船舶工业^[6]、汽车制造^[7]、生物医疗^[8-9]和电子产品^[10]等领域得到快速发展。根据所用原材料状态(丝材或粉体)和所用热源(激

光、电子束、电弧)的不同, 常用的金属增材制造技术有选区激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)、电子束选区熔化(Selective Electron Beam Melting, SEBM)、电弧熔丝增材制造(Wire+Arc Additive Manufacturing, WAAM)、电子束熔丝沉积技术(Electron Beam Freeform Fabrication, EBF³)、激光直接沉积技术(Laser Engineered Net Shaping, LENS)5种。其中, SLM 和 EBF³ 技术对于高精度、小尺寸和复杂结构的金属构件具有独特的优势; WAAM、EBF³、LENS 等技术主要应用于工业中结构相对简单的大型结构件的制备。在上述各金属增材制造过程中, 缺陷的产生是不可避免的。内部质量和内部应力的控制以及成形件尺寸精度等问题是金属增材制造技术面临的巨大挑战, 这也制约了金属增材制造技术在各领域的广泛应用, 因此, 如何解

* 基金项目: 国家重点研发计划(KY11000170050)。

决上述问题成为各领域科研工作者的一个非常重要的课题。本文将首先简要阐述金属增材制造过程中所遇到的问题,然后重点介绍目前在金属增材制造过程中使用的改善金属组织和性能的主要方法和关键技术。

金属增材制造技术中存在的缺陷

目前,增材制造技术已经在铸造砂型、生物医疗器械、高分子材料等领域得到了广泛应用,但是该技术本身的特点限制了其在金属零部件快速成形制造领域的应用。金属的增材制造过程经历了复杂物理冶金过程,零件成形时经历的材料熔化、凝固和冷却都是在极短的时间内进行的,不可避免地导致熔池与基体间存在很大的温度梯度,会产生热应力和残余应力,易产生微裂纹降低材料的韧性。同时,材料内部的金属组织为铸态,呈现出树枝状。另外,受增材

制造过程中多种成形工艺因素的影响,在金属沉积层中易形成裂纹、气孔、夹杂、层间结合不良、球化效应等缺陷,如图 1^[11]所示为增材制造过程中常见的缺陷。材料内部微观组织缺陷导致增材制造金属零部件的力学性能(如韧性、强度和疲劳性能等)劣化,这是影响增材制造技术在金属零部件,特别是大型复杂金属构件制造方面应用推广的最主要技术瓶颈。因此,如何改善材料内部微观组织、减少材料内部缺陷、提高金属零部件的力学性能、降低和消除增材制造金属零部件内部残余应力、防止变形和开裂、实现大型金属构件控形控性增材制造是目前金属增材制造领域一个重要的研究方向。

改善金属增材制造材料组织与性能的方法

1 工艺参数优化

不同的金属增材制造技术包含

各自不同的工艺参数,工艺参数的调节对金属增材制造技术来说是第一步,也是至关重要的一步。大量的研究证明了工艺参数的优化对解决增材制造过程中材料内部缺陷、改善材料内部组织和提高材料力学性能的可行性。

以 SLM 技术为例,其工艺参数包括:激光功率、扫描速度、铺粉厚度、扫描间距、基板预热温度、扫描策略、粉末粒径等。Xu 等^[12]通过对层厚、焦偏距以及能量密度的调整,使得所打印的每一层中的 Ti-6Al-4V 合金组织为近 α' 马氏体组织,通过下一层打印所产生的热效应将该层近 α' 马氏体组织原位转变成超细薄片状的 $\alpha + \beta$ 组织,使得最终所打印的 Ti-6Al-4V 合金性能可以与传统的固溶+时效后的 Ti-6Al-4V 合金性能相媲美,比传统的轧制退火态的 Ti-6Al-4V 合金性能更优异。通过工艺参数调整,相同的原位组织转变在 SEBM 技术制备 Ti-6Al-4V 合金时实现^[13],这种转变为后续增材制造钛合金过程提供了一种微观组织的设计方法和策略。Qiu 等^[14]对激光功率和铺粉厚度进行调节,研究发现,热流的不稳定是材料内部孔洞和表面粗糙度增加的主要原因。同样,Zhou 等^[15]运用同步辐射微 CT (Synchrotron Radiation Micro-CT) 技术发现,SLM 材料内部缺陷的产生与熔池动力学、熔池震荡以及“瑞利-泰勒”不稳定性有关,并且提出,通过优化工艺参数,能够有效降低熔池的不稳定性并且改善表面粗糙度,从而可以消除材料内部的缺陷。Wang 等^[16]通过对工艺参数的调节制备出了超越传统 316L 不锈钢的高强度、高韧性 316L 奥氏体不锈钢,所制备材料的致密度高于 99.2%,所制备材料的成分与商用 316L 不锈钢一样。其中,高强度的产生是由于快速凝固过程中所产生的细胞结构和小角度晶界以及制备过程中所产生的

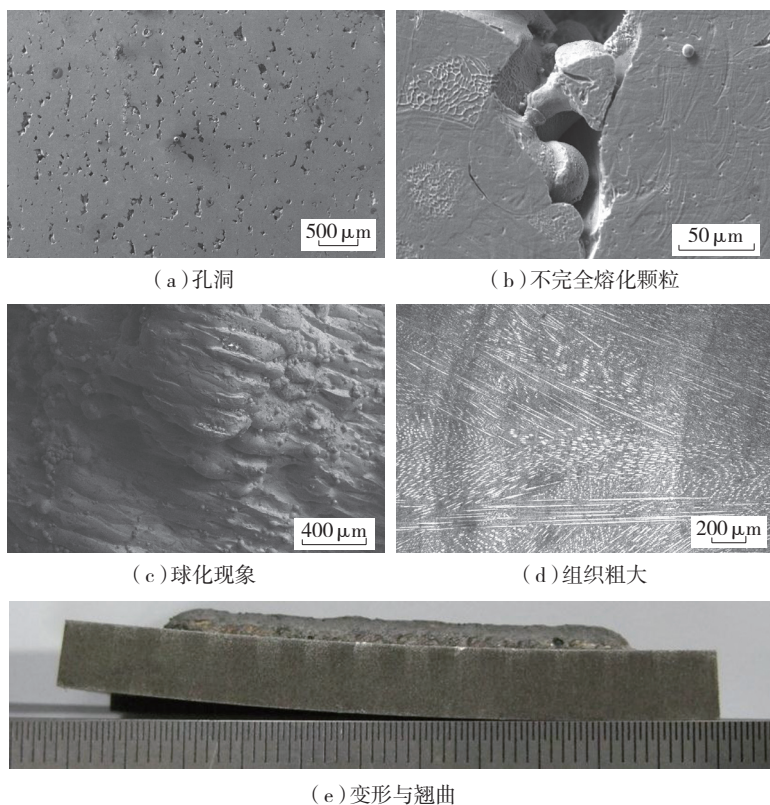


图1 金属增材制造过程中所产生的缺陷

Fig.1 Defects in the manufacturing process of metal additive manufacturing

位错,而高韧性的存在与所产生的多层次多样化的微观结构有关,其层级结构达到6级。Prashanth等^[17]的研究结果表明,通过对过程参数的调整,能够使SLM制备的Al-12Si合金材料获得满足于不同应用需求的性能。

工艺参数的优化在金属增材制造过程中对于消除材料内部缺陷、改善材料内部组织以及提高材料力学性能的重要性,也证明金属增材制造技术具有制造独特微观结构和高性能结构件的潜力。

2 后处理技术

金属增材制造材料在特殊的条件下进行快速制造经常致材料内部存在微孔洞和较大的残余应力,同时,熔化道和熔池的存在,使所制备的材料同样存在明显的中尺度结构,这使得所制备出的材料的性能存在明显的各向异性^[18]。工艺参数的优化过程较为复杂,需要进行大量的试验摸索,也仅有少量材料体系得到了证实,因此,科研工作者通过选择相对较优参数制备所需材料后,会采用传统的后处理技术对所制备材料进行去应力和均匀化处理,以提高材料的性能。其中,后处理技术除了金属热处理领域传统的淬火、回火、退火、正火外,还包括热等静压(HIP)处理、表面热处理以及化学热处理等。传统热处理改性技术在各材料体系中都比较成熟,也为增材制造材料的改性提供了一定的理论依据。因此,在金属增材制造领域,通常采用“工艺参数优化+后处理改性”技术来改善材料组织和性能。

镍基高温合金(IN718、Nimonic 263等)通常应用于飞机引擎中的高温部件,该合金属于典型的固溶(时效)强化合金,其材料内部的主要强化相为 γ' -Ni₃(Al, Ti)和 γ'' -Ni₃Nb相,而在金属增材制造过程中,由于激光与粉末的作用时间较短,材料的冷却速率较快,在一定程

度上阻碍了 γ' 相的沉淀析出^[19-20],使所制备的材料性能与传统“固溶+时效”高温合金相比较差。因此,为了满足工业要求,大量的研究工作者^[21-22]运用热处理技术,成功使增材制造后的镍基高温合金的强度和塑性达到了锻件水平。Vilaro等^[19]通过退火处理,使增材制造后合金内部的残余应力从最高的420MPa降低至50MPa,并且试样不会产生任何的变形,与此同时,材料的屈服强度和抗拉强度得到了大幅度的提高。Pröbstle等^[23]发现,热处理使增材制造技术制备的IN718合金的抗蠕变性能比传统铸造和锻造材料更加优越。Tillmann等^[24]发现通过调节热等静压处理过程中的压力和保温时间,使材料的致密度能够达到99.998%。

对于SLM和SEBM技术所制备的材料或者小型结构件,采用后处理技术较为方便,能较好地控制温度、时间、压力等来改善材料的组织和性能;对大型结构件来说,若采用后处理技术就需要较大的热后处理设备或者热等静压设备,但大型的设备所需要的成本较高,并且对于大型的的结构件,热处理过程中温度场、应力场的控制较为困难。因此,需要找到更加简便、高效的方法来改善增材制造大型结构件过程中的组织和性能。

3 颗粒引入

(1) 复合材料设计思想。

在复合材料设计过程中,可引入增强体和其他合金元素等到金属或合金材料中,结合两者的优点使所制备材料获得更好的性能。同样,这种设计思想在金属增材制造领域也能得到很好的应用,而且由于送粉、送丝增材制造技术的便利性,这种思想更能够得到发挥和应用。Ma等^[25]用纯Ti丝和纯Al丝制备出 γ -TiAl基合金,所制备的合金的显微硬度和拉伸试验结果并没有表现出明显的各向异性。Kang等^[26]用共晶Al-

12Si合金粉与纯Si粉制备出过共晶Al-Si合金,该合金的耐磨性得到明显的提高。Levy等^[27]成功制备出形状复杂得多梯度的TiC颗粒/碳钢基复合材料,并且通过热处理使不同梯度层内材料的显微组织呈现出从铁素体到马氏体组织,显微硬度梯度范围700~1600HV,用来满足不同的使用需求。Erinosho等^[28]运用激光直接沉积技术,用质量分数5%Cu粉与Ti-6Al-4V合金粉所制备出的Ti-6Al-4V-Cu复合材料的纤维硬度明显提高,材料的表面性能得到很大的改善。Almangour等^[29]将316L合金粉末、纯Ti粉与纯C粉进行混合,运用SLM技术制备出了原位生成的TiC颗粒增强316L不锈钢复合材料,该复合材料的耐磨性得到极大提高。

通过将复合材料设计思想运用到金属增材制造领域,运用快速制造的便利性,能够加快推进复合材料的发展,同样运用该思想也能够制备出复杂形状的梯度复合材料,并具有理想的性能梯度,以适用于广泛的实际应用。

(2) 纳米颗粒形核剂。

在金属增材制造领域,目前仅有AlSi10Mg合金、Ti-6Al-4V合金、CoCr合金以及IN718合金^[30-31]等几种合金能可靠地打印。目前工业应用的5500多种合金中,由于增材制造过程中产生的粗大的柱状晶以及周期性的裂纹使绝大部分的合金都不能应用于增材制造。为了解决上述问题, Martin等^[32]基于晶体学理论,选择合适的纳米颗粒形核剂,将其加入7075和6061铝合金粉末中。结果发现,原本用SLM技术成形较困难的高强铝合金,当纳米形核剂产生效用时,成功制备出无裂纹、细小等轴晶组织的铝合金,而且所制备的铝合金强度可与锻造铝合金相媲美。与此同时,该团队也进行了大量的试验,其中能产生等轴晶的粉末体系有: Al7075合金粉末+(TiB₂、

WC) 纳米颗粒、Ti-6Al-4V 合金粉末 + ZrH₂ 纳米颗粒、AlSi10Mg 合金粉末 + WC 纳米颗粒、Fe 粉 + TiC 纳米颗粒。Li 等^[33] 通过将 TiB₂ 纳米颗粒加入到 AlSi10Mg 合金中, 运用 SLM 技术所制备的铝合金, 其屈服强度、塑性以及显微硬度等性能指标都要比传统的锻造铝合金和回火铝合金要高得多。

在金属增材制造领域, 这种方法广泛适用于其他的合金体系, 如焊镍基高温合金和金属间化合物, 并且可以使用不同的增材制造技术来实现, 其中包括: 电子束熔融、定向能沉积技术和选择性激光熔化等。

4 超声干扰技术

超声振动是机械振动的一种, 是传统金属凝固过程中改善组织、提高力学性能的有效方法之一。超声波在液态金属中传播时, 其高频振动和辐射压力对媒介产生机械作用、热作用、空化作用和声流作用等, 对液态金属结晶过程造成的影响有细化晶粒、组织均匀化、组织净化(去气、除渣、提纯)等效果^[34]。金属增材制造过程本身也是金属丝材或粉体的冶金凝固过程, 因此, 在金属增材制造过程中引入超声振动, 在原有工艺参

数的基础上, 能够达到细化晶粒、均匀组织成分、减少试件残余应力的目的。

上海交通大学陈畅源等^[35-36] 的研究结果表明, 超声振动的引入可以减少熔覆层裂纹、均化熔覆层化学成分、细化熔覆层组织晶粒, 从而改善熔覆层性能。沈阳航空航天大学王维^[37] 及湖北工业大学张小伟等^[38] 的研究结果表明: 超声空化或机械效应可以打碎由初生枝晶交错连接形成的固态结晶网, 从而细化晶粒。西安交通大学王潭等^[39] 的研究结果显示: 施加超声振动后, 成形件的表面粗糙度和残余应力得到显著改善, 微观组织得以细化, 抗拉强度和屈服强度均有提高。

超声振动的引入, 在一定程度上可以起到细化晶粒、降低残余应力、减少裂纹和改善材料性能的作用, 但熔覆过程中超声振动的引入, 不能直接将超声振动杆置于熔池内, 能通过间接传递的方式引入(见图 2^[39]), 而超声波在传播途中的反射和衰减, 会使超声振动的作用随着熔覆层厚度的增加而减弱, 最终不能达到预期的目的。因此, 如何改进超声振动装置或超声振动的引入方式是一个值得

思考的问题。

5 超声冲击强化(高频微锻造)技术

超声冲击强化技术属于表面强化技术, 通过表面强化提高零件疲劳寿命的技术中喷丸强化技术应用最为广泛。该技术采用超声波发生器, 能够发出 15~40kHz 范围内高频电振荡信号, 然后由换能器转换为高频机械振动, 与换能器相连的变幅杆将机械振动幅值放大传输到振动工具头^[11]。其工具头为如图 3^[11] 所示的冲击针。

超声冲击强化技术在许多领域得到研究和应用, 其中包括: 焊接结构件残余应力消除、金属表面纳米晶制备和零件修复强化。Cheng 等^[40] 对超声冲击后焊缝的残余应力测试结果表明, 超声冲击区域形成残余压应力, 深度范围为 1.5~1.7mm, 宽度为 15mm, 最大压应力值超过母材屈服强度。饶德林等^[41] 的研究结果显示, 超声冲击对焊缝 2~4mm 深度范围内应力消除效果达 34%~55%。Mordyuk 等^[42] 的研究结果显示, 超声冲击处理 4min 后 Zr-1%Nb 合金表层深度 10 μm 范围内形成超细晶组织, 晶粒尺寸约 100nm。

南华大学邱长军教授课题组^[43] 研究了高频微锻造对激光熔覆层的表面特性影响, 设备如图 4 所示。研究表明: 高频微锻造在试样表面产生大约 150 μm 的塑性变形量, 在特定的激光熔覆层内树枝晶被打碎, 由原来的铸态组织转变为锻造组织, 晶粒尺寸得到细化; 高频微锻造能够将熔覆层的应力状态从拉应力转变成压应力; 与此同时, 试样内部

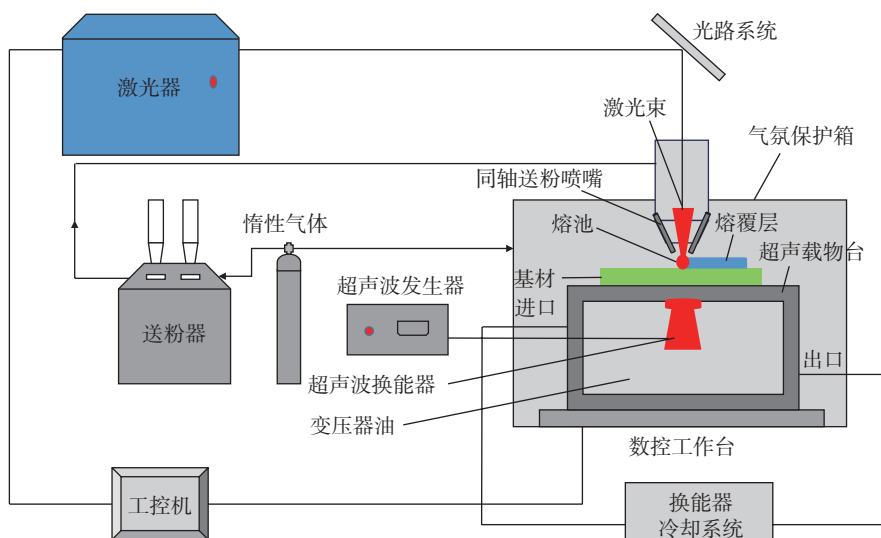


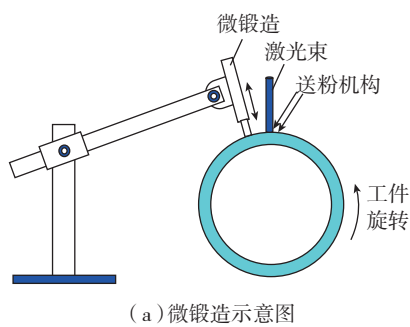
图2 超声振动辅助金属增材制造原理图

Fig.2 Schematic diagram of ultrasonic vibration assisted LMF system

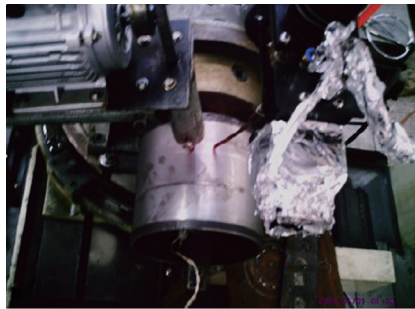


图3 常用冲击针

Fig.3 Common impact pin



(a) 微锻造示意图



(b) 高频微锻造的布局

图4 高频微锻造辅助激光熔覆
Fig.4 Laser cladding under high-frequency microforging

的裂纹的数量和宽度都显著减少,部分裂纹在微锻造后完全愈合。对激光快速成形 304 不锈钢试件^[44]和 45# 钢激光淬火层^[45]的表面进行高频微锻造处理的结果显示:成形件内部的气孔减少,缺陷得到一定程度的愈合;锻造后,激光快速成形件特有的规则的枝状结晶组织转变成锻态组织,晶粒细化,并且高频微锻造后材料表面的显微硬度明显增加。另外,燕山大学运用连续点式锻压激光成形 TA15 钛合金成形件^[46]。南京航空航天大学在激光快速成形镍基高温合金过程中引入了超声冲击技术^[11]。

超声冲击(高频微锻造)技术利用高频次运动的冲击头冲击金属材料表面,超声冲击装置的高频次机械冲击能量及超声应力波均传递到金属表面,使金属表面发生一系列变化。一方面冲击头的机械作用导致金属材料表面的塑性变形,会产生一定的加工硬化,改善材料表面综合机械性能;另一方面剧烈的变形导致

材料表面晶粒变形、破碎^[45]。超声冲击强化技术,对于改善熔覆层表面组织和性能取得较好的效果。但由于该装置的作用深度有限(大约 $150\mu\text{m}$),随着离表面越来越远,微锻造的影响越来越小,因此,对于改善金属增材制造大型结构件的组织和性能并不能取得好的效果。

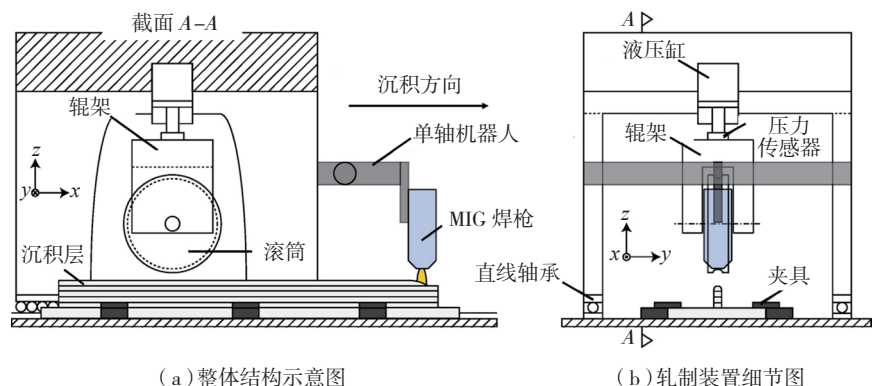
6 滚压轧制技术

在焊接领域,由于超声冲击技术只能使有限的深度范围内的残余拉应力转变成压应力,在一定程度上限制了该技术的发展。因此,Altenkirch 等^[47]提出在焊接接头处施加连续的高压滚动来使其产生塑性变形,该技术的应用使残余应力发生很大的改变,焊缝处产生了很大的压应力。与超声冲击技术不同,滚压轧制技术能够使整个横截面产生塑性变形,而不仅仅是表层。因此,在金属增材制造过程中对沉积层进行滚压处理,对于改善材料内部组织和消除残余应力是一种有效的方法。

英国曼彻斯特大学和克兰菲尔德大学在这方面进行了一系列的探索。Colegrove 等^[48]通过高压滚动的方式采用两种滚筒对电弧熔丝增材制造的材料进行滚压处理(见图 5^[48])。其研究表明:两种滚筒都减少了材料的变形以及表面的粗糙度,其中开凹槽的滚筒消除变形的能力更强;滚压过后试样内部的

残余应力比未经过处理时的残余应力要小,并且越靠近基板效果越明显。同时,在随后的沉积过程中,对被滚压过后的材料再次加热从而诱发了材料内部的晶粒细化。Martina 等^[49]的研究结果显示:轧制能显著地诱发 Ti6Al4V 合金内部先驱 β 相的细化,也能使片层状的 α 晶的厚度变小,并且使材料内部的组织从粗大的柱状晶转变成等轴晶。Gu 等^[50]研究了层间轧制和后沉积热处理对铝合金孔隙率的变化,研究结果显示:不同轧制载荷下,材料内部的孔隙数量都大幅度的减少,甚至在金相显微镜下观察不到。与此同时,Gu 等^[51]发现:经过不同载荷的层间滚压处理后,Al-6.3Cu 合金的硬度和强度发生了显著的提升。Donoghue 等^[52]研究了滚压变形对电弧熔丝增材制造 Ti6Al4V 合金内部影响。研究结果显示:当对每一层都进行轧制滚压时,仅需要少量的变形就能大幅度的缩小 β 相的尺寸;其中,粗大的厘米级别的 β 相晶粒尺寸细化成 $< 100\mu\text{m}$,并且在轧制过程中, β 相和 α 相的组织充分地减弱并趋近于随机分布,其结果如图 6^[52]所示。

华中科技大学张海鸥教授首次提出“微铸轧”技术,并将该技术成功运用于金属增材制造过程中。该团队将热轧直接作用于成形过程,研究结果发现热轧能够促进材料内部



(a) 整体结构示意图

(b) 轧制装置细节图

图5 焊接和轧制设备示意图

Fig.5 Schematic diagram of rolling and welding equipment

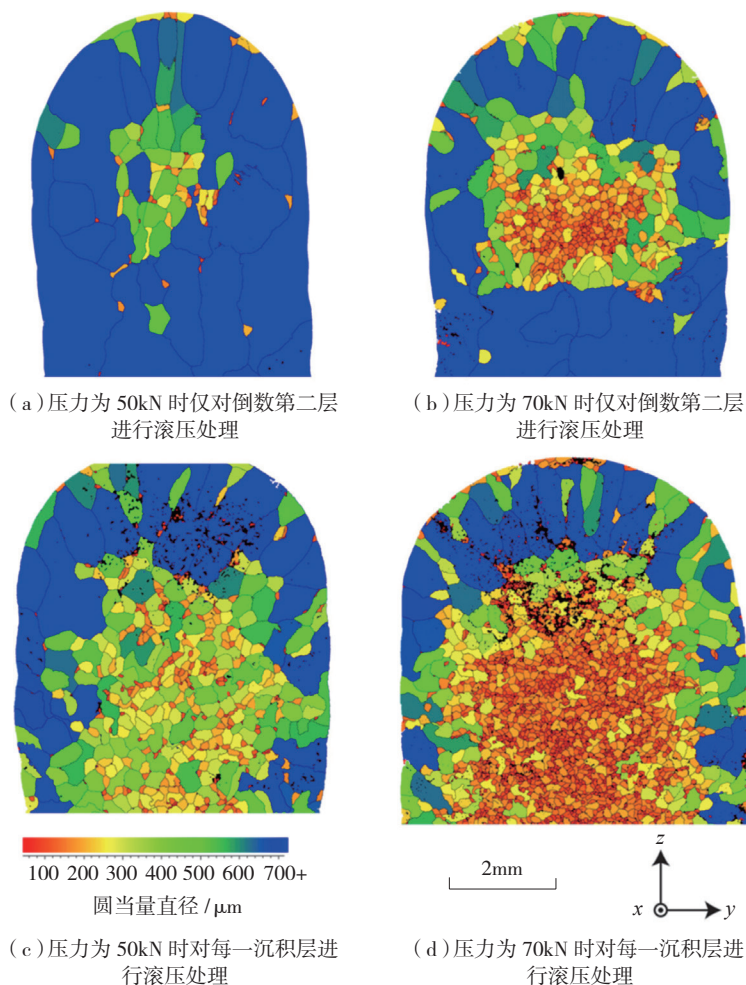


图6 WAAM过程中材料内部 β 相再结晶EBSD图

Fig.6 EBSD reconstructed β grain size maps from transverse, y - z , cross-sections near the top of rolled WAAM walls

树枝晶向等轴晶转变,减少材料内部的缺陷,进而提高了材料的硬度和拉伸性能^[53]。王桂兰等^[54-56]的研究结果显示,与电弧熔积成形相比,微铸轧工艺能细化晶粒,并使材料的强度大幅提高。通过增材制造与“微铸轧”的混合制造所制备的不锈钢结构件具有更好的精度和微观组织,材料的拉伸提高约33%,延伸率提高了2倍以上^[57]。另外,该团队在增材制造与“微铸轧”混合制造中做了很多工作。Zhou^[58]和Fu^[59]等对“微铸轧”技术,在增材制造过程中细化组织,改善材料性能的机理等进行了研究。

滚压轧制技术,由于其较大的作用深度和变形量,引入后使增材制造过程中细化晶粒的效果较为明显,但

滚压轧制技术对材料内部残余应力只能达到减少的目的,不能将材料内部的拉应力有效转化为较为有利的压应力,也不能完全地消除结构件的变形^[60]。滚压轧制技术的细化晶粒、降低材料内部残余应力和减少成形件变形的优势,也证明该技术为改善金属增材制造大型结构件的组织和性能提供了一种有效的工具。

7 超声微锻造技术

通过对目前现有的几种改善增材制造微观组织和提高金属零部件力学性能的方法进行分析可以发现,这些方法和技术能够在一定程度上改善金属增材制造材料内部微观组织和提高金属零部件的力学性能,但每种增材制造辅助方法都存在一

定的局限性,须在一定的条件下使用。近期,本团队提出一种能够改善金属增材制造所制备材料内部残余应力引起的开裂、材料内部缺陷以及材料内部微观组织粗大和不均匀导致的零部件力学性能差等问题的增材制造金属组织与性能的超声微锻造复合装置,已申报国家发明专利(CN107470628A)和国际专利(PCT/CN2017/115700)。该装置综合了超声冲击频率高和机械滚压产生塑性变形大的优点,实现了超声冲击与连续滚压微锻造复合作用,大大提高了微锻造的作用效率和有效深度,可消除增材制造成形件特有的规则的枝状结晶组织,使其每一层的微观组织由铸态转变成锻态组织,大幅细化了晶粒和提高了力学性能,从而通过逐层叠加制造出组织和性能优化的金属零部件。日前,北京隆源自动成型系统公司已成功将该技术应用于激光熔丝设备中,基本实现了激光熔丝增材与超声微锻造的耦合与联动。

该技术和装置将广泛应用于各类增材制造设备和工艺,大幅改善金属微观组织和提高零部件的力学性能,获得可与锻件性能相媲美的高性能金属零部件,特别适用于航空航天、船舶与海洋工程、化工、核电、交通运输等装备制造业的大型金属构件的成形与制造,改善这些领域中大型复杂金属构件变形、开裂等问题,对推广增材制造技术在金属零部件制造中的应用具有重要的意义。

结论

金属增材制造技术,以其崭新的制造理念和创新的模式,在全球范围内快速得到熟知和认可,激起了新一轮科技创新和产业变革的浪潮。在国内,该技术还处于起步阶段,在金属增材制造过程中遇到的问题和挑战也较多,其中所制备材料内部的孔洞裂纹、组织缺陷以及残余应力等都限制了该技术的广泛应用和快速发

展。文中所提到的几种改善金属增材制造材料组织和性能的方法和技术,都有各自的优势,能够在特定的条件下达到预期的目的。但其适用性也在一定程度上受到限制,在使用过程中需要结合各自的优劣势来进行选择。目前,适用于金属增材制造的材料体系相对较少,需要发展和研究更多的方法和技术,用以拓展该技术在各金属材料体系的应用。对于增材制造材料内部质量和综合力学性能的均匀性、稳定性和可靠性的把控方面还需要得到更多的关注和投入。

参考文献

- [1] 杨平华, 高祥熙, 梁菁, 等. 金属增材制造技术发展动向及无损检测研究进展[J]. 材料工程, 2017, 45(9): 13-21.
YANG Pinghua, GAO Xiangxi, LIANG Jing, et al. Development trend of additive manufacturing and processing of the nondestructive testing[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(9): 13-21.
- [2] FRAZIER W E. Metal additive manufacturing: A review[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(6): 1917-1928.
- [3] 薛莲, 肖承翔, 李海斌, 等. 增材制造标准体系研究[J]. 标准科学, 2017(11): 52-55.
XUE Lian, XIAO Chengxiang, LI Haibin, et al. Research on the standard system of additive manufacturing[J]. Standard Science, 2017(11): 52-55.
- [4] 巩水利, 锁红波, 李怀学. 金属增材制造技术在航空领域的发展与应用[J]. 航空制造技术, 2013, 56(13): 66-71.
GONG Shuli, SUO Hongbo, LI Huaixue. The development and application of metal additive manufacturing technology in aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(13): 66-71.
- [5] 李海涛, 谢书凯, 张亮, 等. 增材制造技术在航天制造领域的应用及发展[J]. 中国航天, 2017(1): 28-32.
LI Haitao, XIE Shukai, ZHANG Liang, et al. Application and development of additive manufacturing technology in aerospace manufacturing field[J]. Aerospace China, 2017(1): 28-32.
- [6] 周长平, 林枫, 杨浩, 等. 增材制造技术在船舶制造领域的应用进展[J]. 船舶工程, 2017, 39(2): 80-87.
ZHOU Changping, LIN Feng, YANG Hao, et al. Application of additive manufacturing technology in ship building industry[J]. Ship Engineering, 2017, 39(2): 80-87.
- [7] 李永钧. 3D 打印技术颠覆汽车制造业[J]. 汽车与配件, 2014(10): 73-75.
LI Yongjun. 3D printing has upended the auto industry[J]. Automobile & Parts, 2014(10): 73-75.
- [8] 陈坚伟, 张迪. 3D 打印技术医学应用综述与展望[J]. 电脑知识与技术, 2013, 15(3): 3632-3633.
CHEN Jianwei, ZHANG Di. Summary and prospect of 3D printing technology medical application[J]. Computer Knowledge and Technology, 2013, 15(3): 3632-3633.
- [9] 赵靖, 王笛, 刘继全, 等. 3D 打印技术在医学领域应用的现状及问题[J]. 中国现代医学杂志, 2017, 27(12): 71-74.
ZHAO Jing, WANG Di, LIU Jiquan, et al. Current situation and problems of 3D printing technology in medical field[J]. China Journal of Modern Medicine, 2017, 27(12): 71-74.
- [10] 朱安超. 3D 打印技术在电子设备行业的应用[J]. 无线互联科技, 2015(12): 147-148.
ZHU Anchao. Application of 3D printing technology in electronic equipment industry[J]. Wireless Internet Technology, 2015(12): 147-148.
- [11] 戚永爱. 基于超声冲击的激光快速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, 2014.
QI Yongai. Study on the strengthening technique of laser rapid prototyping nickel-based superalloy based on ultrasonic impact treatment[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [12] XU W, BRANDT M, SUN S, et al. Additive manufacturing of strong and ductile Ti-6Al-4V by selective laser melting via in situ martensite decomposition[J]. Acta Materialia, 2015, 85: 74-84.
- [13] LU S L, QIAN M, TANG H P, et al. Massive transformation in Ti-6Al-4V additively manufactured by selective electron beam melting[J]. Acta Materialia, 2016, 104: 303-311.
- [14] QIU C, PANWISAWAS C, WARD M, et al. On the role of melt flow into the surface structure and porosity development during selective laser melting[J]. Acta Materialia, 2015, 96: 72-79.
- [15] ZHOU X, WANG D, LIU X, et al. 3D-imaging of selective laser melting defects in a Co-Cr-Mo alloy by synchrotron radiation micro-CT[J]. Acta Materialia, 2015, 98: 1-16.
- [16] WANG Y M, VOISIN T, MCKEOWN J T, et al. Additively manufactured hierarchical stainless steels with high strength and ductility[J]. Nature Materials, 2018, 17(1): 63-71.
- [17] PRASHANTH K G, SCUDINO S, ECKERT J. Defining the tensile properties of Al-12Si parts produced by selective laser melting[J]. Acta Materialia, 2017, 126: 25-35.
- [18] CARROLL B E, PALMER T A, BEESE A M. Anisotropic tensile behavior of Ti-6Al-4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing[J]. Acta Materialia, 2015, 87: 309-320.
- [19] VILARO T, COLIN C, BARTOUT J D, et al. Microstructural and mechanical approaches of the selective laser melting process applied to a nickel-base superalloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 534: 446-451.
- [20] DOMASHENKOV A, PLOTNIKOVA A, MOVCHAN I, et al. Microstructure and physical properties of a Ni/Fe-based superalloy processed by selective laser melting[J]. Additive Manufacturing, 2017, 15: 66-77.
- [21] AMATO K N, GAYTAN S M, MURR L E, et al. Microstructures and mechanical behavior of Inconel 718 fabricated by selective laser melting[J]. Acta Materialia, 2012, 60(5): 2229-2239.
- [22] WANG Z, GUAN K, GAO M, et al. The microstructure and mechanical properties of deposited-IN718 by selective laser melting[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 513: 518-523.
- [23] PRÖBSTLE M, NEUMEIER S, HOPFENMÜLLER J, et al. Superior creep strength of a nickel-based superalloy produced by selective laser melting[J]. Materials Science

and Engineering: A, 2016, 674: 299–307.

[24] TILLMANN W, SCHAAK C, NELLESEN J, et al. Hot isostatic pressing of IN718 components manufactured by selective laser melting[J]. Additive Manufacturing, 2017, 13: 93–102.

[25] MA Y, CUIURI D, HOYE N, et al. The effect of location on the microstructure and mechanical properties of titanium aluminides produced by additive layer manufacturing using in-situ alloying and gas tungsten arc welding[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 631: 230–240.

[26] KANG N, CODDET P, LIAO H, et al. Wear behavior and microstructure of hypereutectic Al–Si alloys prepared by selective laser melting[J]. Applied Surface Science, 2016, 378: 142–149.

[27] LEVY A, MIRIYEV A, ELLIOTT A, et al. Additive manufacturing of complex-shaped graded TiC/steel composites[J]. Materials & Design, 2017, 118: 198–203.

[28] ERINOSH M F, AKINLABI E T. Influence of laser power on the surfacing microstructures and microhardness properties of Ti–6Al–4V–Cu alloys using the ytterbium fiber laser[J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4(2): 596–602.

[29] ALMANGOUR B, GRZESIAK D, YANG J M. In-situ formation of novel TiC-particle-reinforced 316L stainless steel bulk-form composites by selective laser melting[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 706: 409–418.

[30] FRAZIER W E. Metal additive manufacturing: a review[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(6): 1917–1928.

[31] LEWANDOWSKI J J, SEIFI M. Metal additive manufacturing: a review of mechanical properties[J]. Annual Review of Materials Research, 2016, 46: 151–186.

[32] MARTIN J H, YAHATA B D, HUNDLEY J M, et al. 3D printing of high-strength aluminium alloys[J]. Nature, 2017, 549(7672): 365–369.

[33] LI X P, JI G, CHEN Z, et al. Selective laser melting of nano-TiB₂ decorated AlSi10Mg alloy with high fracture strength and ductility[J]. Acta Materialia, 2017, 129: 183–193.

[34] 钦兰云, 王维, 杨光. 超声辅助钛合金激光沉积成形试验研究[J]. 中国激光, 2013(1): 76–81.

QIN Lanyun, WANG Wei, YANG Guang. Study on ultrasonic assisted laser deposition of titanium alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013(1): 76–81.

[35] 陈畅源, 邓琦林, 宋建丽. 超声振动对激光熔覆过程的影响[J]. 电加工与模具, 2005(3): 37–40.

CHEN Changyuan, DENG Qilin, SONG Jianli. Effects of ultrasonic vibration on laser cladding process[J]. Electromachining & Mould, 2005(3): 37–40.

[36] 陈畅源, 邓琦林, 宋建丽. Ni 含量及超声振动对激光熔覆中裂纹的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(S1): 44–48.

CHEN Changyuan, DENG Qilin, SONG Jianli. Influence of Ni content and ultrasonic vibration on the crack in laser cladding[J]. Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37(S1): 44–48.

[37] 王维, 郭鹏飞, 杨光, 等. 超声波对 BT20 钛合金激光沉积修复作用机制探究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2453–2459.

WANG Wei, GUO Pengfei, YANG Guang, et al. Mechanism of laser deposition and repair of BT20 titanium alloy by ultrasonic [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(8): 2453–2459.

[38] 张小伟. 超声辅助等离子沉积成形铁基高温合金零件的基础研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2011.

ZHANG Xiaowei. Foundation study of iron-based high temperature alloy parts formed by plasma deposition assisted by ultrasonic[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2011.

[39] 王潭, 张安峰, 梁少端, 等. 超声振动辅助激光金属成形 IN718 沉积态组织及性能的研究[J]. 中国激光, 2016(11):104–109.

WANG Tan, ZHANG Anfeng, LIANG Shaoduan, et al. Research on as-deposited of microstructure and properties of IN718 parts by ultrasonic vibration-assisted laser metal forming[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016(11): 104–109.

[40] CHENG X, FISHER J W, PRASK H J, et al. Residual stress modification by post-weld treatment and its beneficial effect on fatigue

strength of welded structures[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(9): 1259–1269.

[41] 饶德林, 陈立功, 倪纯珍, 等. 超声冲击对焊接结构残余应力的影响[J]. 焊接学报, 2005, 26(4): 48–50.

RAO Delin, CHEN Ligong, NI Chunzhen, et al. Effect of ultrasonic impact treatment on residual stress of welding structure[J]. Welding Institution, 2005, 26(4): 48–50.

[42] MORDYUK B N, KARASEVSKAYA O P, PROKOPENKO G I, et al. Ultrafine-grained textured surface layer on Zr–1% Nb alloy produced by ultrasonic impact peening for enhanced corrosion resistance[J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 210: 54–61.

[43] FAN X F, ZHOU J, QIU C J, et al. Experimental study on surface characteristics of laser cladding layer regulated by high-frequency microforging[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20(3): 456–464.

[44] 余金水. 高频微锻造对激光成形 304 不锈钢试件力学性能的影响[D]. 衡阳: 南华大学, 2012.

YU Jinshui. Influence of high-frequency micro-forging on mechanical properties of 304 stainless steel specimens by laser rapid forming[D]. Hengyang: University of South China, 2012.

[45] 滕崇其. 高频微锻造调控 45 钢激光淬火层表面性能的研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2012.

TENG Chongqi. Experimental study of high frequency micro-forging on laser hardening layer of 45 steel[D]. Hengyang: University of South China, 2012.

[46] 赵毅. 连续点式锻压激光成形 TA15 钛合金组织与性能的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.

ZHAO Yi. Research on microstructures and properties of TA15 titanium alloy formed by the technology of laser rapid forming combined with continue point forging[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016.

[47] ALTENKIRCH J, STEUWER A, WITHERS P J, et al. Residual stress engineering in friction stir welds by roller tensioning[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 14(2): 185–192.

[48] COLEGROVE P A, COULES H E, FAIRMAN J, et al. Microstructure and residual

stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(10): 1782-1791.

[49] MARTINA F, COLEGROVE P A, WILLIAMS S W, et al. Microstructure of interpass rolled wire+ arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46(12): 6103-6118.

[50] GU J, DING J, WILLIAMS S W, et al. The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 230: 26-34.

[51] GU J, DING J, WILLIAMS S W, et al. The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al-6.3 Cu alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 651: 18-26.

[52] DONOGHUE J, ANTONYSAMY A A, MARTINA F, et al. The effectiveness of combining rolling deformation with wire-arc additive manufacture on β -grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V[J]. Materials Characterization, 2016, 114: 103-114.

[53] 雷磊, 王桂兰, 柏兴旺, 等. 电弧

熔积-热轧复合成形件微观组织和性能研究[J]. 焊接技术, 2012, 41(11): 5-7.

LEI Lei, WANG Guilian, BAI Xingwang, et al. Study on microstructures and properties of parts during arc deposition and hot rolling[J]. Welding Technology, 2012, 41(11): 5-7.

[54] 王桂兰, 何奇, 梁养民, 等. 45 钢微铸轧增材成形件的组织性能研究[J]. 新技术新工艺, 2014(8): 102-104.

WANG Guilian, HE Qi, LIANG Yangmin, et al. Study on the microstructure and properties of 45 steel using micro casting-rolling[J]. New Technology & New Process, 2014(8): 102-104.

[55] 王桂兰, 符友恒, 梁立业, 等. 电弧微铸轧复合增材新方法制造高强度钢零件[J]. 热加工工艺, 2015, 44(13): 24-26.

WANG Guilian, FU Youheng, LIANG Liye, et al. Preparation of high strength steel parts by the new method of arc micro casting-rolling[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(13): 24-26.

[56] 王桂兰, 付欣怡, 李小波, 等. 电弧熔积-微轧复合成型枝晶形态演变模拟[J]. 新技术新工艺, 2017(8): 7-10.

WANG Guilian, FU Xinyi, LI Xiaobo, et al. The dendrite morphological evolution simulation hybrid deposition of arc deposition and hot

rolling[J]. New Technology & New Process, 2017(8): 7-10.

[57] ZHANG H, WANG X, WANG G, et al. Hybrid direct manufacturing method of metallic parts using deposition and micro continuous rolling[J]. Rapid Prototyping Journal, 2013, 19(6): 387-394.

[58] ZHOU X, ZHANG H, WANG G, et al. Simulation of microstructure evolution during hybrid deposition and micro-rolling process[J]. Journal of Materials Science, 2016, 51(14): 6735-6749.

[59] FU Y, ZHANG H, WANG G, et al. Investigation of mechanical properties for hybrid deposition and micro-rolling of bainite steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 250: 220-227.

[60] MARTINA F, ROY M J, SZOST B A, et al. Residual stress of as-deposited and rolled wire+ arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components[J]. Materials Science and Technology, 2016, 32(14): 1439-1448.

通讯作者: 姜凤春, 博士、教授、博士生导师、国家重点研发计划“增材制造与激光制造”专项负责人(首席专家), 研究方向为金属复合材料优化设计与先进制造、增材制造技术与装备, E-mail: fengchunjiang@hrbeu.edu.cn.

Methods and Techniques for Improving Microstructure and Performance of Metal Additively Manufactured Materials

YUAN Ding¹, GAO Huabing², SUN Xiaojing¹, ZHOU Changping¹, SUN Laibo¹,
CHEN Yujuan¹, GUO Chunhuan¹, NIU Zhongyi¹, JIANG Fengchun¹

(1. College of Material Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Qingdao Hachuan Material Forming Research Institute Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

[ABSTRACT] Metal additive manufacturing (MAM) technology has been developed rapidly in aerospace, ship building, automobile manufacturing and bio-medical industries. However, MAM technology is characterised by a number of issues that are slowing its wider implementation. The peculiar microstructure of MAM components leads to anisotropy, the components are affected by residual stresses and distortion during MAM, and also it is easy to produce cracks and holes. Therefore, this paper mainly introduces several methods and techniques for improving the microstructure and performance of metal additively manufactured materials, such as optimization of process parameters, post-treatment, particles introduction, ultrasonic interference technique, ultrasonic impact treatment, rolling and ultrasonic micro-forging technique.

Keywords: Metal additive manufacturing; Rolling; Ultrasonic micro-forging; Microstructure; Performance

(责编 铃兰)