

激光增材制造产品缺陷及其处理技术研究现状

姚燕生^{1*}, 汪俊^{1,2}, 陈庆波¹, 丁晨¹, 唐建平¹, 葛张森¹

¹安徽建筑大学机械与电气工程学院, 安徽 合肥 230601;

²安徽春谷 3D 打印智能装备产业技术研究院, 安徽 芜湖 241000

摘要 激光增材制造技术主要分为选区激光熔化和激光直接沉积,其能够满足个性化需求,制造复杂构件时具有无可比拟的优势。简要介绍了激光增材制造技术的原理与方法,通过对国内外有关文献进行调研与分析,阐述了目前激光增材制造构件的残余应力、裂纹、球化和孔隙等内在缺陷所对应的处理方法和工艺,并提出了解决激光增材制造产品缺陷的方法。

关键词 激光加工; 激光增材制造; 复杂构件; 内在缺陷; 处理技术

中图分类号 TG142.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.100004

Research Status of Defects and Defect Treatment Technology for Laser Additive Manufactured Products

Yao Yansheng^{1*}, Wang Jun^{1,2}, Chen Qingbo¹, Ding Chen¹, Tang Jianping¹, Ge Zhangsen¹

¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China;

²Anhui Chungu 3D Printing Institute of Intelligent Equipment and Industrial Technology, Wuhu, Anhui 241000, China

Abstract Laser additive manufacturing is mainly divided into selective laser melting and laser direct deposition, which can meet the individual needs and has unparalleled advantages in the manufacturing of complex components. The principle and methods of the laser additive manufacturing technology are briefly introduced. Through the investigation and analysis of relevant literatures at home and abroad, the treatment methods and processes corresponding to the internal defects such as residual stresses, cracks, spheroidization and pores of laser additive manufactured components are described. A method for solving defects in laser additive manufactured products is proposed.

Key words laser processing; laser additive manufacturing; complex component; internal defect; treatment technology

OCIS codes 140.3380 140.3390 160.3900

1 引言

增材制造技术也称“快速原型制造”、“分层制造”、“三维(3D)打印”等^[1],是一种将材料累加堆积起来形成实体结构的新型制造方法,与传统制造技术相比,具有无需模具与刀具、材料利用率高、生产周期短等优势^[2-5],尤其适用于制造航空航天^[6-9]、汽车^[10]、医疗^[11-14]、军工^[15-16]等领域的复杂金属结构

件,具有良好的应用前景。金属增材制造技术根据热源不同可分为激光、电子束、电弧增材制造等类型^[17]。随着激光技术的发展,激光增材制造技术正不断地深入到诸多重要领域,尤其适用于多种金属材料,但是,在制造过程中,构件会产生如残余应力、裂纹、球化、孔隙等内在缺陷。由于材料累加成形工艺过程的特点,金属激光增材制造也很难避免上述内在缺陷,因此会影响构件的性能和应用。

收稿日期: 2018-10-29; 修回日期: 2018-11-05; 录用日期: 2018-12-17

基金项目: 安徽省自然科学基金项目面上项目(1908085ME130)

* E-mail: y.ys@163.com

本文在调研相关文献后,针对金属激光增材制造产生的残余应力、裂纹、球化以及孔隙4种内在缺陷,分析研究了减少和消除这些缺陷的技术与方法。

2 激光增材制造技术

激光增材制造,又称激光3D打印,是一种采用激光对材料进行加热熔化,再利用逐层堆积的方法进行堆积,直至形成完整构件的技术。激光增材制造按铺粉的方式主要分为两种:选区激光熔化(SLM)^[18]和激光直接沉积(LDS)^[19]。选区激光熔化是在激光烧结技术^[20]的基础上发展而来,通过计算机软件对构件三维模型进行分层切片,再控制激光束根据构件分层形状有选择地熔化平铺在基板上的金属粉末,通过逐层铺粉,再层层熔化叠加形成完整构件。金属激光直接沉积是激光熔覆技术的延伸,是对同步送入的金属粉末通过激光照射进行加热熔化,在基板上沉积形成熔覆点,再由点形成线,由线形成面,逐层叠加堆积形成完整构件的一种制造工艺。

激光增材制造采用的是叠层累加制造方式,存在一定的位置与尺寸误差,会导致构件几何精度不高和表面粗糙度偏大等问题,因此往往需要后期进行机械加工和表面处理(如喷丸、电化学抛光等)^[21-23]。另外,激光增材制造中激光束与材料的作用时间极短,在材料逐层堆积的过程中,材料不断经历急热和急冷的交替过程,致使熔池及其附近部位的加热熔化、凝固和冷却的速度比周围的区域快,在此过程中极易出现残余应力、气孔、球化以及裂纹等缺陷^[24-28],从而对制备构件的性能产生很大的影响。为推广和扩大激光增材制造技术的应用,研究减少和消除这些缺陷的方法和工艺对激光增材制造的发展至关重要,因此,需要对其内在缺陷进行深入研究,探索有效的解决方法。

3 激光增材制造的内在缺陷及其处理方法

3.1 残余应力及其处理方法

在激光增材制造过程中,金属粉末的温度变化很大,极易形成热应力残留在构件内,这对构件而言是一种不确定因素。若某种原因使得残留在构件内的应力突然释放,会导致构件表面产生裂纹,从而影响构件的使用性能及寿命。由于选区激光熔化是将粉末完全熔化,故其形成的热应力尤为显著,极易导

致构件翘曲变形并产生裂纹等^[29],进而对构件的使用性能产生影响。有关研究发现,对残余应力影响较大的因素有材料特性、构件高度、粉层厚度、扫描策略及相关工艺参数等^[30-31]。

虽然对残余应力的测量较为繁琐,但仍有科研工作者对其进行了深入的研究。为了提高研究效率,部分学者采用数值模拟与实验相结合的方法进行了研究^[32-35],提出了一些研究残余应力的理论模型。Wu等^[34]提出了移动等效热源的概念,并将其应用到数值传热模型中,结合非耦合热弹性机制的固体力学模型对残余应力场进行预测,其数值模拟流程图如图1所示。Dai等^[35]为研究单位长度激光能量输入对温度分布、熔池动力学、表面张力和表面形貌的影响,提出了一种具有局部温度场的选择性激光熔融耦合辐射传输和热扩散物理模型,并验证了模拟结果和实验结果相吻合的这一结论。

对构件内的残余应力的控制与消除是决定激光增材制造产品质量的关键因素。除选取适当的工艺参数制备构件^[36-37]以控制残余应力外,近年来国内外科研工作者还提出了多种减少和消除残余应力的方法和工艺。热等静压(HIP)方法^[38-40]、退火和固溶时效处理方法^[41-43]是通过热处理(HT)降低构件内的残余应力。杨启云等^[43]的研究表明,Inconel625试件在退火前表面的平均残余应力为398 MPa,经过1140℃、2h退火处理后,试件表面的平均残余应力为242 MPa,与退火前相比,降低了39.2%。基板预热是通过降低金属粉末在熔化与凝固的过程中温度梯度来减少残余应力的产生,张洁等^[41]测定Inconel 625试件的残余应力在常温下可达 (396.9 ± 23) MPa,而当预热温度达300℃时,残余应力相比未预热时降低超过50%,达到 (160.7 ± 25) MPa。优化扫描策略^[44-46]方法也可以有效减少和消除构件内的残余应力,使金属构件的强度和塑性达到锻件水平^[47-49]。还有部分学者提出了一些新的方法。采用激光冲击强化技术可以减少增材制造构件内的残余应力^[50],但是对于具有较大厚度的构件残余应力仍不易消除;采用电磁辅助制备构件^[51]和在增材制造过程中引入超声振动等方法也可降低构件的残余应力^[52-53],但该技术尚未成熟。

研究表明,对于大型的复杂结构件,在采用热处理消除残余应力的过程中,对温度场、应力场的控制更为困难^[54],一些消除激光增材制造构件残余应力的工艺方法会影响到对球化、气孔、裂纹等缺陷的

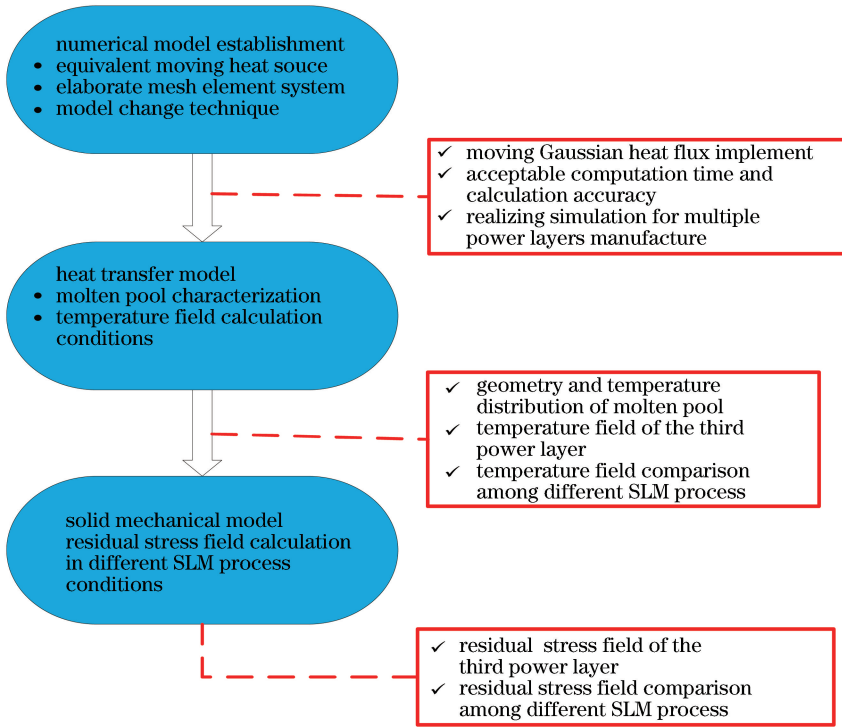


图 1 数值模拟流程图

Fig. 1 Flow chart of numerical simulation

控制。因此,目前对增材制造中残余应力的演化规律及其相关耦合作用的认识还存在不足,需要进一步探索更加简便、高效的处理方法以提高大型结构件的性能。

3.2 裂纹及其处理方法

内部裂纹也是典型的激光增材制造构件缺陷,其主要是由于热应力引起的,对构件的性能影响极大,也是制约激光增材制造产品应用的一个因素。因此,对裂纹的产生进行控制十分重要。

国内外已有很多科研工作者对激光增材制造过程中裂纹的形成机制、裂纹产生的影响因素以及减少与消除裂纹的处理方法进行了研究。研究表明,在热影响区晶界上连续和半连续液膜的形成以及构件内形成的拉应力是导致裂纹产生的主要原因^[55-56]。在激光增材制造中,工艺参数是影响构件中裂纹产生的因素^[57-58],构件内晶粒的方向决定裂纹的生长方向^[59]。Cloots 等^[60]通过模拟的方法对裂纹的形成机制进行了研究,发现构件在冷却过程中,新兴的颗粒沿着垂直方向以某种方式生长,由于冷却速度很快,在临界温度范围内,液态合金不能完全均质化,从而产生了裂纹,裂纹的生长机理如图 2 所示,图中 T 为温度, T_{sol} 为固相线温度, T_{liq} 为液线温度, CTR 为临界温度范围。裂纹是由快速凝固所

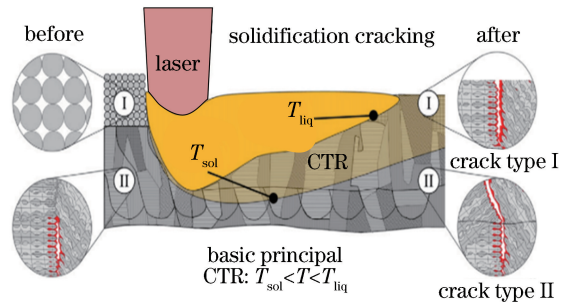


图 2 裂纹的生长机理

Fig. 2 Growth mechanism of cracks

致,固相线温度降低到一定程度会出现明显的 CTR,其边界用液相线和固相线温度来描述。由于冷却速度快,液态合金在临界温度范围内不可能完全均匀化,因此在本构冷却作用下,锆(Zr)浓度高的低熔融膜覆盖了新兴晶粒,如图 2 所示。程灵钰等^[61]证实了 316L-nHA 复合材料增材制造过程中(其中 nHA 表示纳米羟基磷灰石),随着 nHA 含量的增加,试样内部裂纹密度增大,导致试样的拉伸性能显著下降,不同扫描速度下经抛光腐蚀后 316L-nHA 复合材料的显微组织形貌如图 3 所示(316L SS 表示纯 316L 不锈钢粉末; 316L-5 nHA, 316L-10 nHA 表示 316L 不锈钢粉末和 nHA 粉末按体积比 95 : 5, 90 : 10 的比例采用球磨

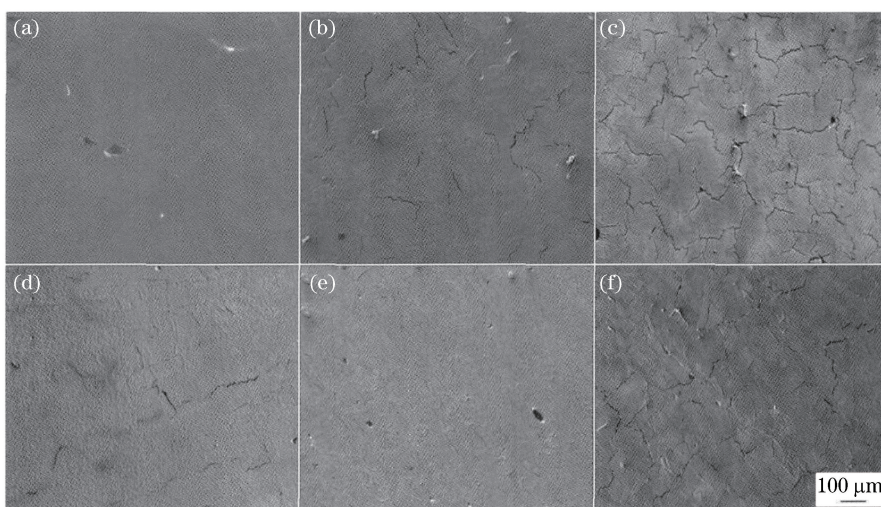


图3 不同扫描速度下经抛光腐蚀后 316L-nHA 复合材料的显微组织形貌。(a) 316L SS, $250 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (b) 316L-5nHA, $250 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (c) 316L-10nHA, $250 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (d) 316L-5nHA, $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (e) 316L-5nHA, $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (f) 316L-10nHA, $350 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 3 Microstructural morphologies of 316L-nHA composites polished and corroded at different scanning velocities. (a) 316L SS, $250 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (b) 316L-5nHA, $250 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (c) 316L-10nHA, $250 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (d) 316L-5nHA, $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (e) 316L-5nHA, $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (f) 316L-10nHA, $350 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

的方式混合)。

在制造的过程中,构件裂纹一旦产生,将沿着熔化层扩散,严重影响构件的各项力学性能,甚至造成构件的报废^[26]。目前最简单的减少裂纹的方法就是调整制造工艺参数^[62],采用 HIP 技术对构件进行后处理,能够显著改善构件的疲劳强度和裂纹^[63]。另外采用喷丸处理,可以提高构件的表面性能,减小和消除构件表面裂纹^[64]。刘凯等^[64]对 K4536 合金进行 HIP 处理,在参数为 $1180 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 160 MPa 、 1 h 的条件下,随炉冷却后,与原试件相比,HIP 处理后的试件微裂纹得到了一定的修复,且材料的综合性能也得到了提高。

在激光增材制造的过程中对基板进行预热,提高成形时周围环境温度,可以降低构件成形时的冷却速度,减小温度梯度,从而减少裂纹的产生^[41]。另外在激光增材制造所采用的粉末材料中加入合金元素,可以改善材料特性,减少成形件的裂纹^[65-66]。刘正武等^[67]发现多激光束选区激光熔化系统中双激光束可消除构件的内应力,降低构件产生裂纹的可能性。黄卫东等^[68-69]研究了大型钛合金构件的缺陷问题,发现采用退火技术可以使构件达到锻件水平,通过 HT 工艺可以获得基本没有冶金缺陷的构件;此外,用激光增材制造技术制造了 C919 大飞机上使用的钛合金翼肋上、下缘条构件,使其达到了锻件水平。在激光增材制造中引入振动,能够减少构

件产生裂纹的数量。陈畅源等^[70]将超声振动引入激光增材制造中,发现超声振动的引入,能够减少金属激光增材制造构件内部残余应力引起的开裂;Fan 等^[71]研究发现高频微锻造能够显著减少构件内部的裂纹数量和宽度,部分裂纹在微锻造后能完全愈合。

在激光增材制造成型过程中,减少和消除内部裂纹的处理技术主要有调整工艺参数、同步预热基材、调整合金成分和引入 HIP 技术。这些处理技术虽能减少和消除内部裂纹,但不易控制且操作复杂。为探索出能有效减少和消除内部裂纹的更加便捷的处理技术,科研工作者还需进一步深入研究。

3.3 球化及其处理方法

球化是激光增材制造构件中存在的一种内在缺陷,对产品质量有较大的影响。球化形貌图如图 4 所示。在激光增材制造过程中,球化的产生过程有: 1) 由于熔池和金属粉末的作用在构件上产生球形的金属颗粒; 2) 受到外界因素的影响而在构件上出现球形的金属颗粒; 3) 在构件成形的过程中金属粉末未完全熔化夹杂在构件之中导致球化。球化形成的金属球之间相互独立,在逐层扫描的过程中容易产生孔隙,造成较高的孔隙率,降低了构件的力学性能。此外,球化也会影响铺粉辊的正常工作,严重时还会阻碍构件成型。球化会增加构件的表面粗糙度,还会降低构件的致密度和力学性能^[62]。因此,

有必要对抑制和消除激光增材制造构件产生的球化问题及其处理方法进行探索和研究。

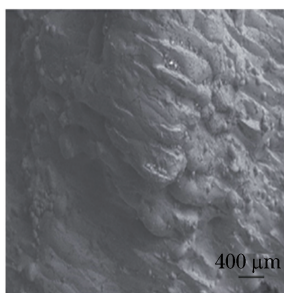


图4 球化形貌图

Fig. 4 Morphology after spheroidization

早期国内外科研工作者研究了激光增材制造中产生球化的机理。Kruth等^[29]用Young方程分析了316L不锈钢SLM成型时的球化形成机理；Tolochko等^[72]对激光作用于金属粉末上时产生球化的具体过程进行了分析；Yadroitsev等^[73-74]在瑞利不稳定性理论的基础上分析了球化现象产生的机理；Gu等^[75-76]采用二氧化碳(CO₂)激光器对不锈钢粉末和铜基合金进行成形，分析了其成形时的球化形成机理；李瑞迪^[77-78]从材料润湿性的角度研究了316不锈钢和纯镍粉末球化的形成机制。吴伟辉等^[79-80]详细分析了激光增材制造技术成形过程中球化缺陷的形成机理。综合国内外对球化形成的机理研究发现，在激光增材制造构件中的球化主要是由于激光束在扫描金属粉末时，粉末吸收能量迅速熔化形成熔池，在熔池的表面形成的张力远大于粉末对熔池的约束力，在重力和熔池周围环境共同作用下，卷缩成球形颗粒物。在对球化形成机理研究的同时，Dai等^[81]对影响球化的因素进行了研究，发现球化是由于杂质氧元素与高温熔体反应形成氧化膜，改变了熔池中心与边缘的表面张力，从而使内部产生内对流。金属熔液与固体基体的润湿性问题也是影响球化现象的一个因素，而含氧量是影响金属熔液与基体的润湿性的关键因素之一，因此，含氧量也是影响球化现象的一个因素^[82-83]。金属铺粉的粉层应在一定的厚度之内，厚度越高越容易发生球化，因为粉层厚度可以影响激光对粉层的加热熔化程度，进而影响熔池的流动性和湿润性^[27,82]。除以上这些因素外，液滴飞溅也会产生球化现象^[84]。

球化的产生不仅对构件的几何精度有较大的影响，还会增加构件的孔隙度，进而降低成形构件的综合力学性能，因此国内外学者对减弱和消除球化缺陷的处理方法进行了研究。除优化工艺参数的处理

方法之外，研究发现，在液态界面之下的熔池很难发生球化的现象，因此可以增加熔池的流动性来降低球化。此外，采用与粉末润湿性较好的基板，采取惰性气体保护措施降低粉末加工过程中熔入氧的含量，采用较高的粉末球形度和尺寸较小的粉末，以及采用多激光束选区激光熔化以增加粉末的流动性，都能抑制球化的产生^[69,84]。扫描方式会影响成形构件过程，优化扫描策略可以减弱球化^[85-86]。目前对球化形成机理的研究较多，但对于消除球化现象的处理方法与工艺研究还有不足，有待进一步的研究。

3.4 孔隙及其处理方法

孔隙是激光增材制造构件中普遍存在的现象，孔隙形貌如图5所示，它能直接影响到构件成形的致密度和力学性能等，决定实体构件的实用性能。通常性能要求较高的构件对孔隙率的要求也较高，但是某些构件也需要具有一定的孔隙度，这种多孔构件制造不属于本文讨论的范围。

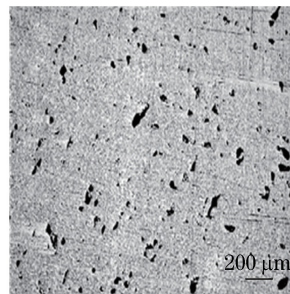


图5 孔隙形貌

Fig. 5 Pore morphology

国内外科研工作者研究了激光增材制造构件的孔隙率，尤为关注对孔隙的控制。在使用要求较高的场合，对于构件的致密度要求也较高，因此有必要采取有效的方法和工艺减少孔隙。为了降低孔隙率，需要了解孔隙的形成机理。孔隙的形成是在材料成形的过程中，材料的熔化和凝固的速度极快，使熔池内的气体没有充足的时间释放，残存在冷却构件内形成气孔，而气孔形状较为规则，一般为球状，尺寸较小^[87]。此外，在激光增材制造构件时，粉体材料本身就存在气孔，尤其对于雾化制备的粉体材料，制备过程均处在氩气保护范围内，在凝固过程中，内部不可避免地包含有微量的氩气^[88]。在激光增材制造构件中，金属粉末在熔化的同时会融入少量的气体或者金属粉末中含有少量的气体，若这些气体不能及时得到释放，则会在构件内形成气孔，进而产生孔隙。孔隙在不同材料中出现的密度也会随

着工艺参数的变化而变化^[89]。另外,在构件内产生的气孔、球化、裂纹与热应力以及扫描间距都是影响孔隙形成的因素^[83,90-91]。

国内外科研工作者提出了一些减少和控制孔隙的方法。研究发现,合理控制材料体能量密度有利于提高构件致密度,减少和避免孔隙等缺陷产生^[88]。除选用适当工艺参数降低构件的孔隙度^[89-90]外,还可采用 HIP 对构件进行处理,通过对构件加压使内部的气体溢出,达到降低构件的孔隙度的目的^[92-93]。Tillmann 等^[37]采用 HIP 方法对 IN718 构件进行处理,得到经 HIP 处理后 IN718 (SLM)在不同温度和压力下的孔隙率,如图 6 所示,HIP 可以在一定范围内使构件的致密度提高到 99.985%~99.989%,并且可以提高构件的拉伸伸长率。多次重熔的方法能够将熔入构件中的杂质气体排出并熔合一些残缺的孔洞,从而显著改善金属激光增材制造中产生的孔隙缺陷,大幅度提高构件成形的质量^[94]。对基板的底部或周围进行预热处理,可以降低熔池的冷却速度,使熔池中的气体排出,从而有效减小构件的孔隙度^[95]。目前对激光增材制造构件孔隙率的控制还需要进行深入研究,有针对性地探索不同材料孔隙率的处理方法。

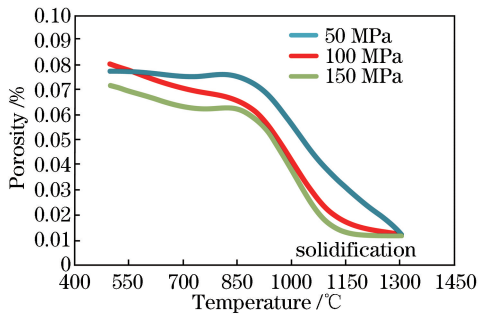


图 6 经 HIP 处理后 IN718(SLM)在不同温度和压力下的孔隙率^[96]

Fig. 6 Porosity of IN718 (SLM) after HIP processing at different temperatures and pressures^[96]

3.5 激光增材制造缺陷综合处理方法

在金属激光增材制造构件的过程中产生的内在缺陷对构件的力学性能具有较大的影响,3.4 节中对单个缺陷及其对应的处理方法进行了介绍,但其中对于有一些方法也会对其他缺陷产生影响。综合当前技术,减少构件内部缺陷的方法有优化扫描策略、基板预热处理、后热处理、HIP、引入振动等。优化扫描策略能够使金属熔池溶解得更充分,降低构件内的残余应力、球化现象及孔隙率,也可以减少裂纹的产生,这种方法操作简便,成本低,但是不能显

著减少构件内产生的缺陷^[44-46]。在激光增材制造构件时采用与金属熔液具有良好湿润性的基板并对基板进行预热,可以较大地减少成形构件内的缺陷,此方法操作简单方便,对构件内的缺陷具有明显的改善,但是,对于不同金属材料所选用的基板有所差异,因此没有统一标准的基板^[41,95]。HT 工艺能够降低构件内的残余应力、减少内裂纹等,这种方法是对激光增材制造构件进行后处理所采用的技术,能够减少构件的内在缺陷,使构件的力学性能达到甚至超过锻件水平,但是其耗时长^[41-43]。HIP 技术是一种在热处理的同时施加压力的方法,对激光增材制造构件处理后,可以显著降低残余应力、裂纹和孔隙等缺陷,并且在降低残余应力的同时显著降低裂纹和孔隙的产生率^[38-40]。在对构件进行后处理时引入振动也可以降低构件内的残余应力,减少内裂纹、孔隙等缺陷,但是对振动频率的把控较难,且振动的引入也较为困难,这使其应用受到了很大的限制^[70-71]。

为更加有效地减少构件的内部缺陷,可以交替或结合采用多种方法进行处理研究,如:先对激光增材制造的构件进行热处理,再对其进行 HIP 处理以降低构件内的缺陷,提高构件的力学性能。对于一些较薄的构件可以采用激光冲击表面强化技术和热处理工艺相结合的方式来解决缺陷问题。

上述方法虽然相对有效但还需要进一步的深入研究。本课题组联合天津镭明激光科技有限公司,对 TC4 的内部缺陷采用 HT+HIP 的后处理方法进行了一些实验。在 800 °C 下对材料进行 4 h 的热处理,之后在 920 °C ± 10 °C 和 120 MPa ± 10 MPa 条件下进行 135 min 的 HIP 处理,结果显示经过 HT 和 HIP 处理后的试件抗拉强度(σ_b)、屈服强度($\sigma_{0.2}$)、延伸率(A)都超过了锻件的水平,尤其是延伸率达到了 16%,这是锻件水平的两倍。钛合金 TC4 的力学性能如表 1 所示。

表 1 钛合金 TC4 的力学性能

| Material | Condition | σ_b /MPa | $\sigma_{0.2}$ /MPa | A/% |
|----------|----------------|-----------------|---------------------|-----|
| TC4 | Forging | 895 | 825 | 8 |
| | SLM+ HT+HIP | 940 | 872 | 16 |

4 结 论

阐述了金属激光增材制造构件中残余应力、裂纹、球化和气孔 4 种内在缺陷的形成机理、影响因素以及对应的解决方法。综合当前研究,降低这些内

在缺陷的方法主要从两方面进行优化,一方面优化制造工艺方法与参数,另一方面优化制造后热处理。为实现高质量构件增材成形制造,首先需对构件形成机理加强探索与研究,了解缺陷产生的原因与变化规律;接着,在增材制造时需优化制造工艺与参数来减少或消除缺陷,同时需要在增材制造后针对不同的缺陷采用相应的后处理技术。由于激光增材制造材料和工艺方法具有多样性与复杂性,对本领域人员来说,研究多种缺陷同步减少和消除的先进工艺将是一个很具有挑战性的工作。同时,还需要将后处理工艺与激光增材制造工艺进行一体化综合设计。

参 考 文 献

- [1] Lu B H, Li D C. Development of the additive manufacturing (3D printing) technology[J]. *Machine Building & Automation*, 2013, 42(4): 1-4.
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.
- [2] Yang Y Q, Chen J, Song Z H, *et al.* Current status and progress on technology of selective laser melting of metal parts [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 011401.
杨永强, 陈杰, 宋长辉, 等. 金属零件激光选区熔化技术的现状及进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 011401.
- [3] Wang H M. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(10): 2690-3698.
王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造: 若干材料基础问题[J]. *航空学报*, 2014, 35(10): 2690-2698.
- [4] Chen J L, Dong P, Zhang K, *et al.* Potential applications of additive manufacture in metal material for aerospace applications [J]. *Electromachining & Mould*, 2014(1): 66-69.
陈济轮, 董鹏, 张昆, 等. 金属材料增材制造技术在航天领域的应用前景分析[J]. *电加工与模具*, 2014(1): 66-69.
- [5] Zhang L C, Attar H, Calin M, *et al.* Review on manufacture by selective laser melting and properties of titanium based materials for biomedical applications [J]. *Materials & Processing Report*, 2016, 31(2): 66-76.
- [6] Zhao Y H, Wang Z G, Long Y, *et al.* Research on influential factor of temperature of molten pool of Inconel 625 superalloy by laser additive manufacturing [J]. *Applied Laser*, 2015, 35(2): 137-144.
赵宇辉, 王志国, 龙雨, 等. Inconel 625 镍基高温合金激光增材制造熔池温度影响因素研究[J]. *应用激光*, 2015, 35(2): 137-144.
- [7] Zhang X W. Application of metal additive manufacturing in aero-engine [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(1): 10-16.
张小伟. 金属增材制造技术在航空发动机领域的应用[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(1): 10-16.
- [8] Liu R, Wang Z, Sparks T, *et al.* Aerospace applications of laser additive manufacturing [M]. Holland: Elsevier, 2017: 351-371.
- [9] Wu K, Zhang J L, Wu B, *et al.* Research and development of Ni-based superalloy fabricated by laser additive manufacturing technology [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2017, 29(12): 953-959.
吴楷, 张敬霖, 吴滨, 等. 激光增材制造镍基高温合金研究进展[J]. *钢铁研究学报*, 2017, 29(12): 953-959.
- [10] Su Y D, Wang X M, Wu B, *et al.* Application potential of 4D printing technology in development of aircraft [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2018, 38(2): 59-69.
苏亚东, 王向明, 吴斌, 等. 4D打印技术在航空飞行器研制中的应用潜力[J]. *航空材料学报*, 2018, 38(2): 59-69.
- [11] Yu Y, Shi T C, Sun F F, *et al.* Study and application status of additive manufacturing of typical inorganic non-metallic materials [J]. *Materials Review*, 2016, 30(21): 119-129.
于云, 史廷春, 孙芳芳, 等. 典型无机非金属材料增材制造研究与应用现状[J]. *材料导报*, 2016, 30(21): 119-129.
- [12] Duan M S, Wu F, Liu R X, *et al.* Application of laser additive manufacturing technology in ophthalmology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 011406.
段沐森, 吴凡, 刘瑞雪. 激光增材制造技术在眼科中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 011406.
- [13] Lusquiños F, Val J D, Arias-González F, *et al.* Bioceramic 3D implants produced by laser assisted additive manufacturing [J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 309-316.
- [14] Khorasani A M. Machining of spherical component fabricated by selected laser melting, part II: Application of Ti in biomedical [D]. Victoria: Deakin

- University, 2017.
- [15] Ma Z S, Chen G S, Ma D X, *et al.* Metal additive manufacturing technologies used in equipment emergency support [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2016, 39(6): 119-124.
马振书, 陈广森, 马东玺, 等. 面向装备应急保障的金属增材制造技术[J]. *兵器材料科学与工程*, 2016, 39(6): 119-124.
- [16] Wang M, Lin X, Huang W. Laser additive manufacture of titanium alloys [J]. *Materials & Processing Report*, 2015, 31(2): 90-97
- [17] Huang C P, Huang S W, Liu F C. Metal material additive manufacturing technology [J]. *Metal Working (Thermal processing)*, 2016(2): 34-38.
黄春平, 黄硕文, 刘奋成. 金属材料增材制造技术[J]. *金属加工(热加工)*, 2016(2): 34-38.
- [18] Wang Y Q, Shen J X, Wu H Q. Application and research status of alternative materials for 3D-printing technology [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2016, 36(4): 89-98.
王延庆, 沈竞兴, 吴海全. 3D打印材料应用和研究现状[J]. *航空材料学报*, 2016, 36(4): 89-98.
- [19] Rosa B, Mognol P, Hascoët J. Laser polishing of additive laser manufacturing surfaces [J]. *Journal of Laser Applications*, 2015, 27(S2): S29102.
- [20] Özel T, Altay A, Donmez A, *et al.* Surface topography investigations on nickel alloy 625 fabricated via laser powder bed fusion [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94: 4451-4458.
- [21] Rosa B, Brient A, Samper S, *et al.* Influence of additive laser manufacturing parameters on surface using density of partially melted particles [J]. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2016, 4(4): 045002.
- [22] Wu A S, Brown D W, Kumar M, *et al.* An experimental investigation into additive manufacturing-induced residual stresses in 316L stainless steel [J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2014, 45(13): 6260-6270.
- [23] Zhou X, Zhou Y, Wei Q S, *et al.* Study on cracking mechanism and inhibiting process of near α Titanium alloy formed by SLM [J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(20): 2816-2820.
周旭, 周燕, 魏青松, 等. 激光选区熔化近 α 钛合金开裂机理及抑制研究[J]. *中国机械工程*, 2015, 26(20): 2816-2820.
- [24] Shao Y C, Chen C J, Zhang M, *et al.* Research on crack issue of Deloro 40Ni alloys prototype fabricated by laser additive manufacturing [J]. *Applied Laser*, 2016, 36(4): 397-402.
邵玉呈, 陈长军, 张敏, 等. 关于 Deloro 40 镍基合金粉末激光增材制造成型件裂纹问题研究[J]. *应用激光*, 2016, 36(4): 397-402.
- [25] Shishkovsky I, Saphronov V. Peculiarities of selective laser melting process for permalloy powder [J]. *Materials Letters*, 2016, 171: 208-211.
- [26] Demir A G, Previtali B. Investigation of remelting and preheating in SLM of 18Ni300 maraging steel as corrective and preventive measures for porosity reduction [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 93: 2697-2709.
- [27] Sears J W. Direct laser powder deposition-State of the Art [C] // *Proceedings of the 1999 TMS Fall Extraction and Processing Meeting*, November 1, 1999, San Diego, California. [S. l. : s. n.], 1999: 213-226.
- [28] Beaman J J, Deckard C R. Selective laser sintering with assisted powder handling: US5053090A [P]. 1990-07-02.
- [29] Kruth J P, Froyen L, van Vaerenbergh J, *et al.* Selective laser melting of iron-based powder [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 149(1-3): 616-622.
- [30] Vrancken B, Cain V, Knutsen R, *et al.* Residual stress via the contour method in compact tension specimens produced via selective laser melting [J]. *Scripta Materialia*, 2014, 87: 29-32.
- [31] Mercelis P, Kruth J P. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2006, 12(5): 254-265.
- [32] Alimardani M, Toyserkani E, Huissoon J P, *et al.* On the delamination and crack formation in a thin wall fabricated using laser solid freeform fabrication process: an experimental-numerical investigation [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2009, 47(11): 1160-1168.
- [33] Wei L, Lin X, Wang M, *et al.* Numerical simulation on laser additive manufacturing process for metal components [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017(13): 16-25.
魏雷, 林鑫, 王猛, 等. 金属激光增材制造过程数值模拟[J]. *航空制造技术*, 2017(13): 16-25.
- [34] Wu J J, Wang L Z, An X G. Numerical analysis of residual stress evolution of AlSi₁₀ Mg manufactured by selective laser melting [J]. *Optik*, 2017, 137: 65-

- 78.
- [35] Dai D H, Gu D D. Tailoring surface quality through mass and momentum transfer modeling using a volume of fluid method in selective laser melting of TiC/AlSi₁₀Mg powder [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 88: 95-107.
- [36] Bartkowiak K, Ullrich S, Frick T, *et al.* New developments of laser processing aluminium alloys via additive manufacturing technique [J]. *Physics Procedia*, 2011, 12(1): 393-401.
- [37] 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.
- [38] Zhang S Y, Lin X, Chen J, *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.
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.
- [39] 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 & Engineering A*, 2012, 534(1): 446-451.
- [40] Zhang S, Gui R Z, Wei Q S, *et al.* Cracking behavior and formation mechanism of TC₄ alloy formed by selective laser melting [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(23): 21-27.
- [41] Zhang J, Li S, Wei Q S, *et al.* Cracking behavior and inhibiting process of Inconel 625 alloy formed by selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2015, 39(11): 961-966.
张洁, 李帅, 魏青松, 等. 激光选区熔化 Inconel 625 合金开裂行为及抑制研究 [J]. *稀有金属*, 2015, 39(11): 961-966.
- [42] Lai Y B, Liu W J, Zhao J B, *et al.* Experimental study on residual stress in titanium alloy laser additive manufacturing [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2013, 431: 20-26.
- [43] Yang Q Y, Wu Y D, Sha F. Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 alloy manufactured by selective laser melting [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2016, 40(6): 83-87.
杨启云, 吴玉道, 沙菲. 选区激光熔化成形 Inconel 625 合金的显微组织及力学性能 [J]. *机械工程材料*, 2016, 40(6): 83-87.
- [44] 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.
- [45] Wang Z M, Guan K, Gao M, *et al.* The microstructure and mechanical properties of deposited-IN718 by selective laser melting [J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2012, 513(2): 518-523.
- [46] 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.
- [47] Yan S X, Dong S Y, Xu B S, *et al.* Mechanics of removing residual stress of Fe314 cladding layers with laser shock processing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(10): 1003004.
闫世兴, 董世运, 徐滨士, 等. Fe314 合金熔覆层残余应力激光冲击消除机理 [J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1003004.
- [48] Sun J, Zhao J F, Xie N, *et al.* Residual stress of laser melt cladding assisted by electromagnetic field [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2017(6): 805-811.
孙杰, 赵剑峰, 谢娜, 等. 电磁辅助激光熔化沉积的残余应力 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2017(6): 805-811.
- [49] Ding J, Colegrove P, Mehnen J, *et al.* Thermo-mechanical analysis of wire and arc additive layer manufacturing process on large multi-layer parts [J]. *Computational Materials Science*, 2011, 50(12): 3315-3322.
- [50] Ding J, Colegrove P, Mehnen J, *et al.* A computationally efficient finite element model of wire and arc additive manufacture [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 70(1-4): 227-236.
- [51] 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.
- [52] Qin L Y, Wang W, Yang G, *et al.* Experimental study on ultrasonic-assisted laser metal deposition of Titanium alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(1): 0103001.
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, 40(1): 0103001.

- [53] Wang T, Zhang A F, Liang S D, *et al.* Research on as-deposited microstructures and properties of IN718 parts by ultrasonic vibration-assisted laser metal forming[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1102005.
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, 43(11): 1102005.
- [54] Yuan D, Gao H B, Sun X J, *et al.* Methods and techniques for improving microstructure and performance of metal additively manufactured materials [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(10): 40-48.
袁丁, 高华兵, 孙小婧, 等. 改善金属增材制造材料组织与力学性能的方法与技术[J]. 航空制造技术, 2018, 61(10): 40-48.
- [55] Montazeri M, Ghaini F M. The liquation cracking behavior of IN738LC superalloy during low power Nd : YAG pulsed laser welding [J]. Materials Characterization, 2012, 67: 65-73.
- [56] Ojo O A. Intergranular liquation cracking in heat affected zone of a welded nickel based superalloy in as cast condition[J]. Materials Science and Technology, 2007, 23(10): 1149-1155.
- [57] Song B, Dong S J, Zhang B C, *et al.* Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V[J]. Materials & Design, 2012, 35: 120-125.
- [58] Gu D D, Hagedorn Y C, Meiners W, *et al.* Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium [J]. Acta Materialia, 2012, 60(9): 3849-3860.
- [59] Konečná R, Kunz L, Nicoletto G, *et al.* Long fatigue crack growth in Inconel 718 produced by selective laser melting [J]. International Journal of Fatigue, 2016, 92: 499-506.
- [60] Cloots M, Uggowitzer P J, Wegener K. Investigations on the microstructure and crack formation of IN738LC samples processed by selective laser melting using Gaussian and doughnut profiles [J]. Materials & Design, 2016, 89: 770-784.
- [61] Cheng L Y, Zhang S, Wei Q S, *et al.* Microstructure and mechanical properties of stainless steel and nano hydroxyapatite composites fabricated by selective laser melting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(6): 1510-1517.
程灵钰, 张升, 魏青松, 等. 激光选区熔化成形不锈钢与纳米羟基磷灰石复合材料的组织及力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(6): 1510-1517.
- [62] Gu D D, Dai D H, Xia M J, *et al.* Cross-scale physical mechanisms for structure and performance control of metal components processed by selective laser melting additive manufacturing [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(5): 645-652.
顾冬冬, 戴冬华, 夏木建, 等. 金属构件选区激光熔化增材制造控形与控性的跨尺度物理学机制[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(5): 645-652.
- [63] Hou H P, Liang Y C, He Y L, *et al.* Microstructural evolution and tensile property of Hastelloy-X alloys produced by selective laser melting [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0202007.
侯慧鹏, 梁永朝, 何艳丽, 等. 选区激光熔化 Hastelloy-X 合金组织演变及拉伸性能[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0202007.
- [64] Liu K, Wang R, Qi H, *et al.* Effects of HIP on microstructure and mechanical properties of K4536 alloy manufactured by SLM [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2018, 38(3): 46-51.
刘凯, 王荣, 祁海, 等. 热等静压工艺对 SLM 成形 K4536 合金组织与性能的影响[J]. 航空材料学报, 2018, 38(3): 46-51.
- [65] Benedetti M, Fontanari V, Bandini M, *et al.* Low- and high-cycle fatigue resistance of Ti-6Al-4V ELI additively manufactured via selective laser melting: Mean stress and defect sensitivity[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 107: 96-109.
- [66] Shi F, Zhao J B, Wang Z G, *et al.* Research on processing technology of superalloy K₄₆₅ via laser additive manufacturing [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(8): 1298-1302.
施凡, 赵吉宾, 王志国, 等. K₄₆₅ 合金激光增材制造加工工艺研究[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(8): 1298-1302.
- [67] Liu Z W, Hou C J, Wang L F, *et al.* Study on selective multi-laser beam melting technology [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2018(1): 56-59.
刘正武, 侯春杰, 王联凤, 等. 多激光束选区熔化成形技术研究[J]. 制造技术与机床, 2018(1): 56-59.
- [68] Huang W D, Lin X. Research progress in laser solid forming of high performance metallic component[J].

- Materials China, 2010, 29(6): 12-27, 49.
- 黄卫东, 林鑫. 激光立体成形高性能金属零件研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(6): 12-27, 49.
- [69] Liu Y S, Han P L, Hu S F, *et al.* Development of laser additive manufacturing with metallic materials and its application in aviation engines [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(10): 62-67.
- 刘业胜, 韩品连, 胡寿丰, 等. 金属材料激光增材制造技术及在航空发动机上的应用[J]. 航空制造技术, 2014(10): 62-67.
- [70] Chen C Y, Deng Q L, Song J L. The influence of ultrasonic vibration on the process of laser cladding [J]. Electromachining & Mould, 2005(3): 37-40.
- 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.
- [71] 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.
- [72] Tolochko N K, Mozzharov S E, Yadroitsev I A, *et al.* Balling processes during selective laser treatment of powders[J]. Rapid Prototyping Journal, 2004, 10(2): 78-87.
- [73] Yadroitsev I, Bertrand P, Smurov I. Parametric analysis of the selective laser melting process [J]. Applied Surface Science, 2007, 253(19): 8064-8069.
- [74] Yadroitsev I, Gusarov A, Yadroitsava I, *et al.* Single track formation in selective laser melting of metal powders [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(12): 1624-1631.
- [75] Gu D D, Shen Y F. Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: metallurgical mechanisms and control methods [J]. Materials & Design, 2009, 30(8): 2903-2910.
- [76] Gu D D, Wang H Q, Zhang G Q. Selective laser melting additive manufacturing of Ti-based nanocomposites: the role of nanopowder [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2014, 45(1): 464-476.
- [77] Li R D. Research on key basic problems of selective laser melting of metal powder [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010: 51-74.
- 李瑞迪. 金属粉末选择性激光熔化成形的关键基础问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010: 51-74.
- [78] Li R D, Liu J H, Shi Y S, *et al.* Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 59: 1025-1035.
- [79] Wu W H, Yang Y Q, Wang D. Balling phenomenon in selective laser melting process[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2010, 38(5): 110-115.
- 吴伟辉, 杨永强, 王迪. 选区激光熔化成型过程的球化现象[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2010, 38(5): 110-115.
- [80] Wang D, Yang Y Q, Su X B, *et al.* Study on energy input and its influences on single-track, multi-track, and multi-layer in SLM[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58: 1189-1199.
- [81] Dai D H, Gu D D. Effect of metal vaporization behavior on keyhole-mode surface morphology of selective laser melted composites using different protective atmospheres[J]. Applied Surface Science, 2015, 355: 310-319.
- [82] Chen H Y, Gu D D, Gu R H, *et al.* Microstructure evolution and mechanical properties of 5CrNi₄Mo Die steel parts by selective laser melting additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(2): 0203003.
- 陈洪宇, 顾冬冬, 顾荣海, 等. 5CrNi₄Mo 模具钢选区激光熔化增材制造组织演变及力学性能研究[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0203003.
- [83] Qiu C L, 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.
- [84] Zhang G, Wang J H, Zhang H. Research progress of balling phenomena in selective laser melting [J]. Foundry Technology, 2017, 38(2): 262-265.
- 张格, 王建宏, 张浩. 金属粉末选区激光熔化球化现象研究[J]. 铸造技术, 2017, 38(2): 262-265.
- [85] Zhu H H, Lu L, Fuh J Y H. Development and characterisation of direct laser sintering Cu-based metal powder [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140(1/2/3): 314-317.
- [86] Deng S S, Yang Y Q, Li Y, *et al.* Planning of area-partition scanning path and its effect on residual stress of SLM molding parts[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1202003.
- 邓诗诗, 杨永强, 李阳, 等. 分区扫描路径规划及其对 SLM 成型件残余应力分布的影响[J]. 中国激光,

- 2016, 43(12): 1202003.
- [87] Ahsan M N, Pinkerton A J, Moat R J, *et al.* A comparative study of laser direct metal deposition characteristics using gas and plasma-atomized Ti-6Al-4V powders[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(25/26): 7648-7657.
- [88] Shi Q M, Gu D D, Xia M J, *et al.* Effects of laser processing parameters on thermal behavior and melting/solidification mechanism during selective laser melting of TiC/Inconel 718 composites [J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 84: 9-22.
- [89] Xu J G, Chen Y, Chen H, *et al.* Influence of process parameters on forming defects of H13 steel processed by selective laser melting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(4): 041405.
徐锦岗, 陈勇, 陈辉, 等. 工艺参数对 H13 钢激光选区熔化成形缺陷的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(4): 041405.
- [90] Zhong C L. 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.
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: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2015.
- [91] Zhong C L, Fu J B, Ding Y L, *et al.* Porosity control of Inconel 718 in high deposition-rate laser metal deposition [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(11): 3005-3011.
- 仲崇亮, 付金宝, 丁亚林, 等. 高沉积率激光金属沉积 Inconel 718 的孔隙率控制[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(11): 3005-3011.
- [92] Leuders S, Thöne M, Riemer A, *et al.* On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: fatigue resistance and crack growth performance [J]. *International Journal of Fatigue*, 2013, 48(3): 300-307.
- [93] Li L J. Repair of directionally solidified superalloy GTD-111 by laser-engineered net shaping[J]. *Journal of Materials Science*, 2006, 41(23): 7886-7893.
- [94] Li S, Li C G, Zhang Q S, *et al.* Research status and prospect of additive manufacturing in laser by aluminum alloy[J]. *Light Industry Machinery*, 2017, 35(3): 98-101.
李帅, 李崇桂, 张群森, 等. 铝合金激光增材制造技术研究现状与展望[J]. *轻工机械*, 2017, 35(3): 98-101.
- [95] Yuan X B, Wei Q S, Wen S F, *et al.* Research on selective laser melting AlSi10Mg alloy powder [J]. *Hot Working Technology*, 2014, 43(4): 91-94.
袁学兵, 魏青松, 文世峰, 等. 选择性激光熔化 AlSi10Mg 合金粉末研究[J]. *热加工工艺*, 2014, 43(4): 91-94.
- [96] Gerling R, Leitgeb R, Schimansky F P. Porosity and argon concentration in gas atomized γ -TiAl powder and hot isostatically pressed compacts[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1998, 252(2): 239-247.