

激光与光电子学进展

Inconel 718 合金激光直接沉积工艺研究进展

郑凯元^{1,2}, 罗耀恩^{1,2}, 张屹^{1,2}, 陈聪^{1,2*}¹湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082;²湖南大学机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082

摘要 激光直接沉积技术由于制造尺寸不受限制、材料自由度高,可用于制造大型金属零件,但常规激光直接沉积技术难以同时兼顾打印效率和打印质量,极大地限制了该技术的推广应用。为此,高速激光直接沉积技术成为了研究热点。本文探讨了扫描速度和激光功率对 Inconel 718 激光直接沉积工艺特性的影响,分析了常规和高速激光直接沉积的表面形貌、组织特征、内部缺陷和力学性能的变化规律,最后指出了将高速激光直接沉积技术应用于三维增材制造中所面临的挑战,为今后高速激光直接沉积技术的发展提供了方向。

关键词 激光技术; 高速激光直接沉积; 常规激光直接沉积; Inconel 718; 工艺特性; 增材制造

中图分类号 TG113

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2300001

Progress in Laser Direct Deposition of Inconel 718 Alloy

Zheng Kaiyuan^{1,2}, Luo Yaoen^{1,2}, Zhang Yi^{1,2}, Chen Cong^{1,2*}¹State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China;²College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China

Abstract Laser direct deposition technology can be used for producing large metal parts due to its unlimited capacity for manufacturing size and high material freedom. However, conventional laser direct deposition technology makes it challenging to consider both printing efficiency and printing quality, thereby restricting the popularization and application of this technology. Therefore, high-speed laser direct deposition technology has gained research popularity. In this paper, the effects of scanning speed and laser power on the process characteristics of Inconel 718 laser direct deposition are discussed, and the changes in surface morphology, microstructure characteristics, internal defects, and mechanical properties of conventional and high-speed laser direct deposition are analyzed. Finally, the challenges of applying high-speed laser direct deposition technology in three-dimensional additive manufacturing are discussed, which offers guidance for the development of high-speed laser direct deposition technology in the future.

Key words laser technique; high-speed laser direct deposition; conventional laser direct deposition; Inconel 718; process characteristics; additive manufacturing

1 引言

镍基高温合金因具有良好的高温力学性能、抗氧化能力、抗蠕变性能、耐腐蚀性及高疲劳寿命等特点,广泛应用于航空航天、石油化工、核工业等领域。然而,镍基高温合金复杂结构的高性能制造一直是世界各国迫切需要解决的重大技术难题。随着增材制造技术的发展,采用增材制造的方式已经成为制造镍基高温合金复杂结构最有效的方法,其中沉淀强化型

Inconel 718 合金因其较强的可焊接性^[1],成为镍基高温合金增材制造的主要材料之一。常见的金属增材制造技术按照热源类型的不同可以分为电子束增材制造、电弧增材制造和激光增材制造。其中,激光增材制造因具有加工精度高、质量好、自动化程度高等特点,是最具潜力的增材制造技术,可以分为以送粉为技术特征的激光直接沉积技术和以铺粉为技术特征的选区激光熔化技术。与选区激光熔化相比,激光直接沉积打印效率较高,成形零件的尺寸不受限制,可以实现梯

收稿日期: 2021-09-27; 修回日期: 2021-10-27; 录用日期: 2021-11-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51975205)、湖南省自然科学基金青年项目(2021JJ40068)

通信作者: *chencong@hnu.edu.cn

度材料零件的成形。采用激光增材制造 Inconel 718 零件,可以得到组织均匀致密、结构复杂的成形件,且加工工艺简单,制造周期短。但是 Inconel 718 合金的弹性模量和热膨胀系数高,在沉积过程中容易产生较大的热应力^[2],且 Ni 元素的偏析会促进 Laves 相的产生,导致应力集中^[3],促使 Inconel 718 沉积件内部产生裂纹缺陷。因此,研究基于 Inconel 718 高温合金的激光增材制造技术具有重要意义。

然而,与其他增材制造技术相比,激光增材制造的效率低是其面临的主要难题,极大地制约了该技术的推广应用^[4]。近年来,德国弗劳恩霍夫激光技术研究所提出了一种高速激光增材制造技术^[5],如图 1 和表 1 所示,与常规激光增材相比,高速激光增材的熔凝形式发生变化,粉末在熔池上方被熔化,再送入熔池,从而节省了粉末在熔池中熔化的时间。激光与粉末耦合处的光斑直径更小,大部分能量作用在粉末上,只有小部分能量作用在基底上,要求粉末流的汇聚性更好,粉斑直径更小,因此本文采用解析模拟的方法模拟了四路送粉末不同送粉参数下的粉末流汇聚特征,为之后研究高速激光直接沉积光粉耦合机理提供基础。如图 2、3 所示:随着载运气流量的增大,粉斑直径减小,粉斑喷射距离增大,粉末峰值质量浓度先减小后增大;随着送粉速率的增大,粉斑直径和粉斑喷射距离不变,粉末峰值质量浓度增大。此外,高速激光直接沉积速度提升 40 倍,沉积层厚度最小可达 0.02 mm,这不仅解决了常规激光增材制造效率低的问题,同时可以在冶金结合良好的情况下制备出更薄的沉积层。沉积层

的稀释率是指在激光直接沉积过程中由于基板熔化、基板元素扩散到沉积层中,导致沉积层成分发生变化。当稀释率过低时,基材与沉积层之间的冶金结合力差,容易导致沉积层脱落;当稀释率太高时,则会影响沉积层的特定性能^[6]。采用高速激光直接沉积制备的沉积层稀释率可低于 5%,粗糙度仅为常规激光直接沉积的 1/10,粉末利用率高达 90%,目前主要应用于涂覆层的制备^[5,7-8]。为使高速激光直接沉积技术得到更广泛的应用,德国弗劳恩霍夫激光技术研究所设计了高速激光直接沉积三维(3D)增材制造装备,能够减小机床本身惯性力导致的振动,并设计了高精度的锥形喷嘴^[9],但高速三维增材制造工艺和高速激光直接沉积光粉耦合机理目前鲜有研究。

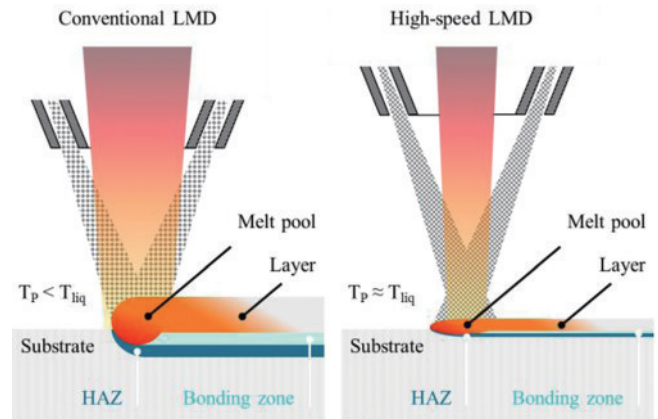


图 1 常规激光直接沉积和高速激光直接沉积原理图^[5]
Fig. 1 Schematic process principle of conventional laser direct deposition and high-speed laser direct deposition^[5]

表 1 常规激光直接沉积与高速激光直接沉积工艺参数及组织性能比较^[4]

Table 1 Comparison of process parameters and microstructure properties between conventional laser direct deposition and high-speed laser direct deposition^[4]

Process type	Scanning speed / (m·min ⁻¹)	Laser spot diameter / mm	Laser energy density / (W·cm ⁻²)	Deposit thickness / mm	Microstructure	Hardness	Abrasion resistance	Corrosion resistance
Conventional laser direct deposition	0.5-2	2-4	70-150	0.5-2	Coarse	Low	Low	Low
High-speed laser direct deposition	20-500	<1	Up to 3000	0.02-2	Fine	High	High	High

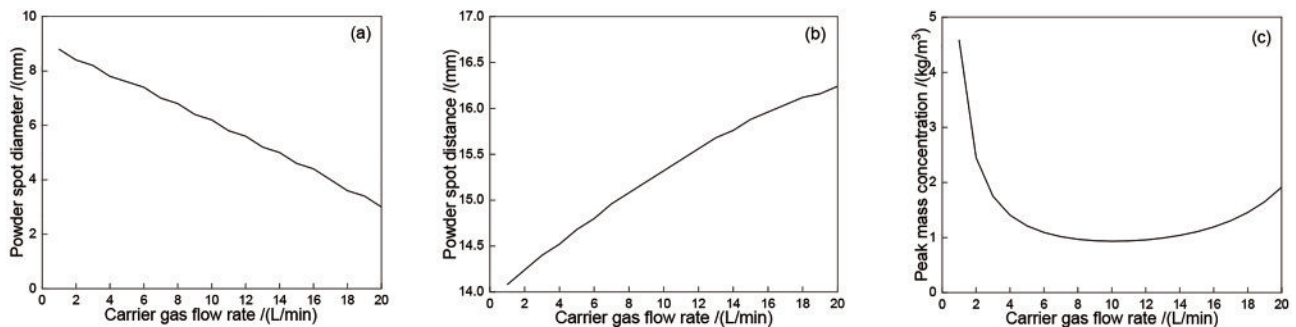


图 2 载运气流量对粉末流汇聚特征的影响。(a)粉斑直径;(b)粉斑喷射距离;(c)粉末峰值质量浓度

Fig. 2 Influence of carrier gas flow rate on powder beam convergence characteristics. (a) Powder spot diameter; (b) powder spot distance; (c) peak mass concentration of powder

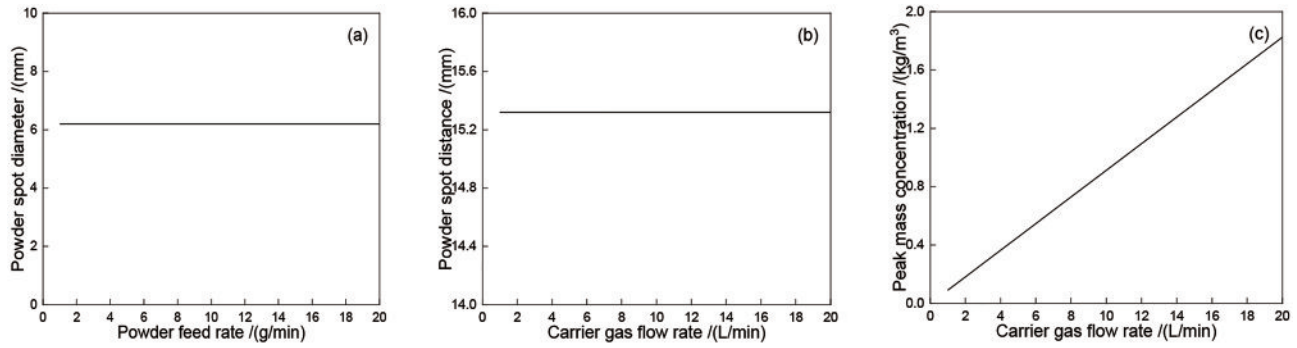


图3 送粉率对粉束流汇聚特征的影响。(a)粉斑直径;(b)粉斑喷射距离;(c)粉末峰值质量浓度

Fig. 3 Influence of powder feed rate on powder beam convergence characteristics. (a) Powder spot diameter; (b) powder spot distance; (c) peak mass concentration of powder

本文总结了近年来常规激光直接沉积 Inconel 718 的文献资料,主要探讨了常规激光直接沉积 Inconel 718 过程中扫描速率和激光功率对沉积试样表面形貌、组织特征、内部缺陷和力学性能的影响,分析了高速激光直接沉积工艺下沉积试样的表面形貌、组织特征、内部缺陷和力学性能,旨在将高速激光直接沉积技术应用于 Inconel 718 合金的三维增材制造中,从而提高打印效率和打印质量,同时对于高速激光直接沉积技术应用于其他金属材料也具有一定的指导意义。

2 Inconel 718 激光直接沉积工艺特性

2.1 沉积件表面形貌

激光增材制造需要沉积层道与道之间具有良好的搭接,层与层之间具有良好的结合,沉积层的几何特征对最终沉积试样的工艺质量有很大的影响,其几何特征主要包括熔池深度、沉积宽度和沉积高度。徐杰等^[10]在 K418 合金基底上进行了 Inconel 718 合金单道熔覆试验,发现随着激光功率的增大,沉积层宽度增

加,稀释率增大。王子等^[11]在 Inconel 718 基底上激光直接沉积 Inconel 718 合金粉末时发现,随着扫描速度的增大,沉积层宽度和高度均减小。Chen 等^[12]通过开展 Inconel 718 激光直接沉积工艺研究,发现沉积层宽度受激光功率影响最大,沉积层高度受扫描速度影响最大。可见沉积宽度和熔池深度主要受激光功率的影响,随激光功率的增大而变大,而沉积高度主要受扫描速度的影响,随扫描速度的增大而减小。为了综合考虑激光功率和扫描速度的影响,不少研究者采用热输入量(激光功率与扫描速度之比)来进行试验研究。Petrat 等^[13]发现,当热输入量和质量能量(激光功率与送粉速率之比)恒定时,随着激光功率和扫描速度增大,在单道单层试验中,沉积层的高度和宽度增加,粉末的利用率提高,如图 4 所示。Zhang 等^[14]研究了激光束比能量(热输入量与光斑直径之比)与沉积层几何特征之间的联系,发现比能量主要影响沉积高度,对沉积宽度几乎没有影响,比能量过高过低都会导致沉积效率下降。

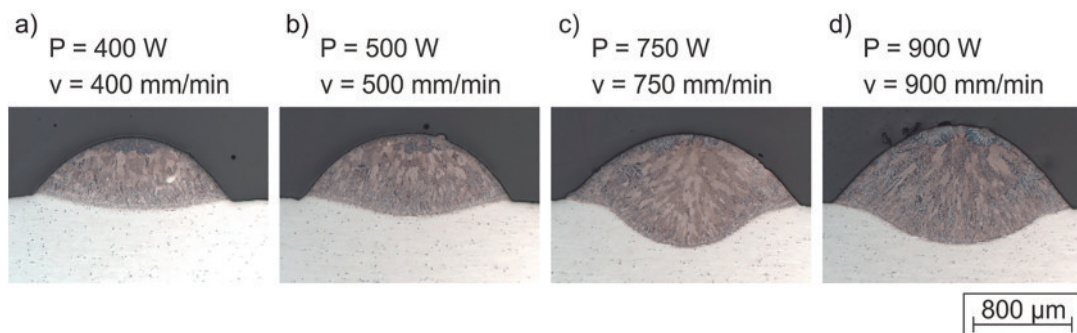


图4 恒定热输入量和质量能量下不同工艺参数单道沉积层比较^[13]。(a) $P = 400 \text{ W}$, $v = 400 \text{ mm/min}$; (b) $P = 500 \text{ W}$, $v = 500 \text{ mm/min}$; (c) $P = 750 \text{ W}$, $v = 750 \text{ mm/min}$; (d) $P = 900 \text{ W}$, $v = 900 \text{ mm/min}$

Fig. 4 Comparison of single-pass deposition layers with different process parameters under constant heat input and mass energy^[13]. (a) $P = 400 \text{ W}$, $v = 400 \text{ mm/min}$; (b) $P = 500 \text{ W}$, $v = 500 \text{ mm/min}$; (c) $P = 750 \text{ W}$, $v = 750 \text{ mm/min}$; (d) $P = 900 \text{ W}$, $v = 900 \text{ mm/min}$

在激光直接沉积过程中,零件表面粗糙主要表现为表面黏粉和层与层、道与道之间的表面纹理,可以分别用表面粗糙度和表面波纹度来表示^[15]。表面黏粉是由于熔池边缘粉末、熔池、激光束之间的相互作用时间

短,温度远低于熔池中心,因此送入熔池边缘的粉末无法完全融化,会粘附在沉积试样表面或向四周飞溅,而粘附在零件表面的粉末可能会在之后的沉积过程中受到激光照射而烧结,严重影响零件的表面质量。Tan

等^[16]研究了单道单层工艺的黏粉机理,发现增大粉末颗粒的粒径和喷射速度,减小粉末汇聚直径,可以抑制表面黏粉现象并改善表面质量。Alimardani等^[17]经试验得出,通过提高扫描速度并同时调整激光功率以保持恒定的熔池平均温度,可以显著降低单道多层沉积

试样的表面粗糙度。Gharbi等^[15]研究了工艺参数对激光直接沉积试样表面质量的影响,发现在高激光功率和高扫描速度下,可以获得最佳的表面质量,如图 5 所示,且增大粉末和激光的作用距离同样能降低沉积试样的表面粗糙度。

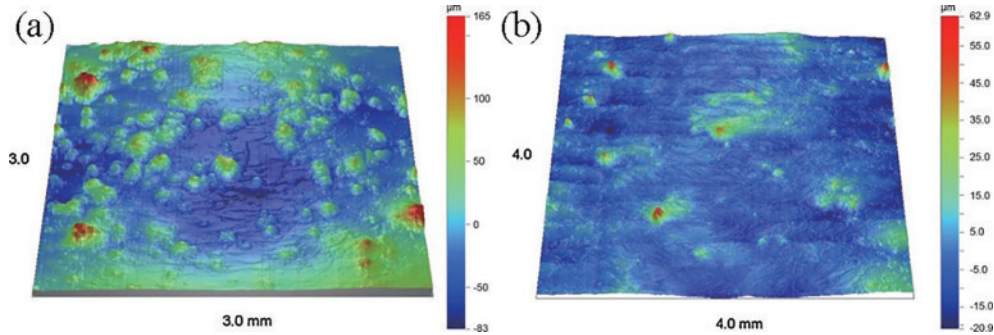


图 5 激光直接沉积表面的三维形貌^[15]。(a) $P = 400 \text{ W}$, $v = 0.2 \text{ m/min}$; (b) $P = 500 \text{ W}$, $v = 0.4 \text{ m/min}$

Fig. 5 3D profiles of laser direct deposition surfaces^[15]. (a) $P = 400 \text{ W}$, $v = 0.2 \text{ m/min}$; (b) $P = 500 \text{ W}$, $v = 0.4 \text{ m/min}$

沉积试样顶面凹凸不平会对零件的成形质量产生影响^[18],且基于增材制造逐层叠加的原理,一旦一层中出现细微的高度差,这种高度差便会在之后的成形过程中变得越发明显。西安交通大学皮刚等^[19]通过建立同轴送粉条件下单道沉积层厚度和粉末离焦量的理论模型,发现当粉末负离焦时,激光直接沉积过程具有形貌自稳定效应,能提高开环系统下零件的成形精度。Zhu等^[18]通过单道多层激光直接沉积试验,也得到了相似的结论,并且还观察到激光处于正离焦状态时的顶面质量要好于激光处于负离焦时的顶面质量。在闭环控制条件下,Bi等^[20]通过建立基于红外温度传感器的监测系统,基于扫描路径对激光功率进行控制,使得熔池的大小恒定,进而提高了薄壁件的尺寸精度。Liu等^[21]采用了实时运动调整策略,通过调整扫描速度,同样提高了零件的尺寸精度。

综上所述,扫描速度和激光功率对 Inconel 718 激光直接沉积的成形特性有重要影响。随着扫描速度的增大,沉积层的沉积高度减小,表面粗糙度降低;随着激光功率的增大,沉积层的沉积宽度和熔池深度增大。在高激光功率和高扫描速度下,沉积层的高度和宽度增加,可以获得较好的表面质量。

2.2 沉积件组织特征

增材制造的合金主要由细长的柱状树枝晶和顶部少量的等轴树枝晶组成,合金底部和顶部的树枝晶细小,而中部的树枝晶较为粗大,在各沉积层之间存在由粗大树枝晶组成的熔合线,在多层沉积的影响下,最后一层沉积层厚度最大^[22]。Chen等^[2]、Ma等^[23]和Zhang等^[3]也发现沉积层主要以柱状树枝晶为主,且枝晶间存在 Laves 相。对于增材组织而言,冷却速率 $(\Delta T/\Delta t)$ 是影响沉积层组织结构的重要参数^[24],决定了沉积层晶粒尺寸的大小,增大冷却速率有利于细化晶粒,而沉积层的冷却速率主要与激光功率和扫描速度有关。

Henry^[24]发现扫描速度在控制温度方面起着非常重要的作用,当激光功率降低或者扫描速度增大时,冷却速率加快。Chen等^[12]也指出热输入量与冷却速率成反比。戴婧等^[25]通过研究柱状晶组织特征,发现柱状晶粒的宽度随激光功率的增大而增大,随扫描速度的增大而减小。兰州理工大学李亚敏等^[26]同样发现:随着激光功率的增大,熔合区和熔覆区的晶粒尺寸增大,熔合区变宽,如图 6 所示;随着扫描速度的增大,熔合区的晶粒由粗大的柱状晶转变为细小的胞状晶,沉积层中部的树枝晶生长受到抑制,晶粒明显细化,如图 7 所示。可见激光功率和扫描速度是影响晶粒尺寸的重要因素,而在热输入量相同的情况下,当同时增加激光功率和扫描速度时,枝晶间距减小^[27-28],说明增材组织不仅与热输入量有关,还受激光功率和扫描速度单个工艺参量的影响。由凝固理论可知,沉积过程中合金的温度梯度 $G(\Delta T/\Delta z)$ 和生长速率 $R(\Delta z/\Delta t)$ 之间的关系也决定了凝固组织的演变, G/R 为局部冷却速率,而 G/R 影响了凝固组织的形态。Amine等^[29]通过研究直接金属沉积工艺参数的影响,发现在 G/R 较低的情况下会出现等轴晶,在 G/R 较高的情况下会出现柱状晶。

在 Inconel 718 合金的凝固过程中,最后会形成奥氏体 γ 相和共晶产物 Laves 相; γ 相为树枝晶的主干,主要富含 Ni、Fe、Cr 元素;Laves 相由 Nb 元素偏析形成并在凝固的最后期析出,主要富含 Nb、Mo 元素。浙江工业大学马春飞^[30]在 Inconel 718 基板上激光增材 Inconel 718 合金时发现,沉积层的 Laves 相的析出量与冷却速率呈负相关关系,沉积层底部的 Laves 相析出量最少,中部最多,上部 Laves 相数量较中部略少。符合底层冷却速率高于顶层冷却速率^[24]这一现象,高冷却速率可以减少元素扩散的时间,进而改善 Nb 元素的偏析,导致 Laves 相减少。方金祥等^[31]通过研究激

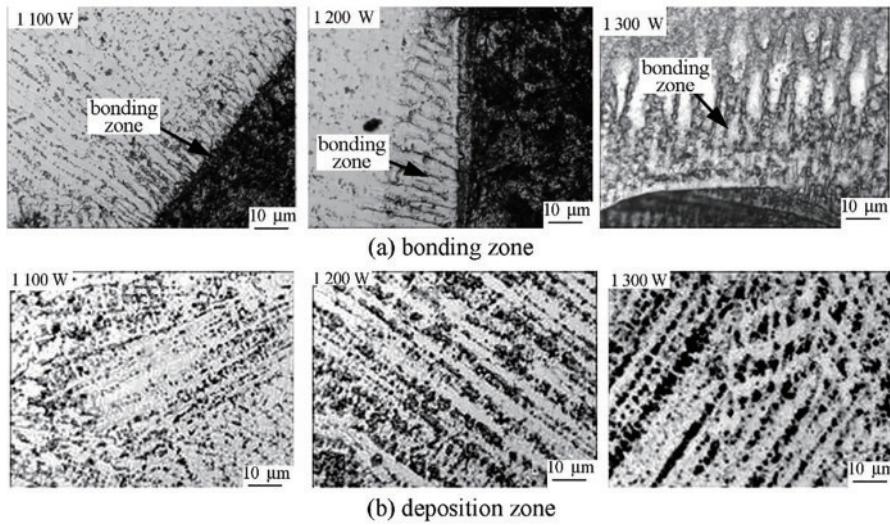


图 6 沉积层微观组织随激光功率的变化^[26]。(a)熔合区;(b)沉积区

Fig. 6 Change of microstructure of sedimentary layer with laser power^[26]. (a) Bonding zone; (b) deposition zone

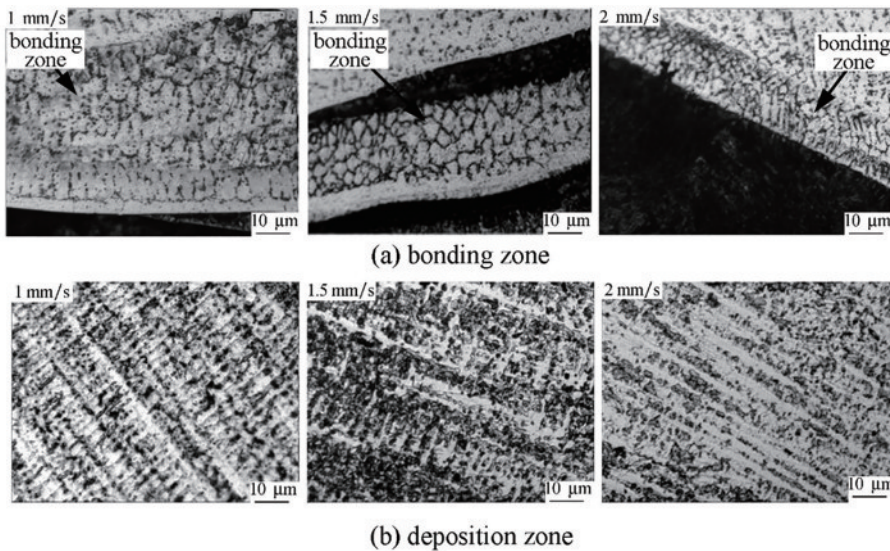


图 7 沉积层微观组织随扫描速度的变化^[26]。(a)熔合区;(b)沉积区

Fig. 7 Change of microstructure of sedimentary layer with scanning speed^[26]. (a) Bonding zone; (b) deposition zone

光熔覆 Inconel 718 合金沉积层与基体表面的组织,发现:在激光功率相同的条件下,当扫描速度增加时,Laves 相越细小;在扫描速度相同的条件下,当功率降低时,Laves 相越细小。Nie 等^[32]建立结合有限元方法和随机分析的多尺度模型,经过试验得出:当激光功率较低时,在高冷却速率和低 G/R 下,较小的等轴树枝晶间距有利于离散 Laves 相的形成,如图 8(a)所示;当激光功率较高时,在低冷却速率和高 G/R 下,较大的柱状树枝晶间距会促使形成连续的 Laves 相,如图 8(b)所示,从而降低零件的力学性能。因此,提高激光直接沉积过程中的冷却速率,可以有效抑制元素偏析,进而抑制低熔点共晶产物的形成,有利于提升零件的力学性能^[22,33]。

2.3 沉积件内部缺陷

沉积试样中存在的孔隙会导致零件强度的降低,

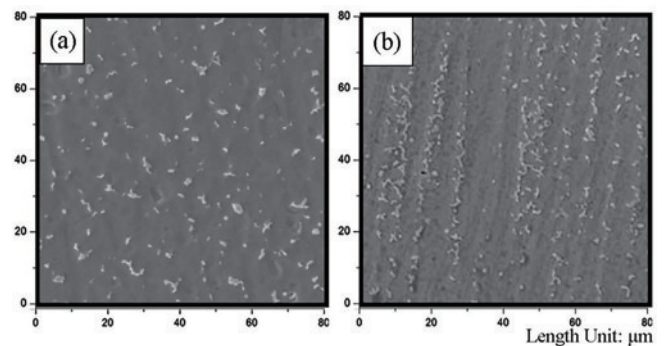


图 8 Laves 相颗粒形貌^[32]。(a) 1 kW; (b) 3.5 kW

Fig. 8 Morphology of Laves phase particles^[32]. (a) 1 kW; (b) 3.5 kW

因此减少和抑制孔隙是获得更高强度金属结构的重要手段。在激光同轴送粉增材中,气孔产生的原因主要

有三种:1) 沉积合金道与道、层与层之间未完全熔合; 2) 制备粉末过程中产生的中空粉末颗粒; 3) 成形过程中捕获的气泡^[34]。Johnson 等^[35]通过激光直接沉积 Inconel 718 时发现, 靠近基底的前几层沉积层中普遍存在层间熔合不充分的现象, 这是未预热基板较高的冷却速率和熔池的不稳定性相互影响的结果。随着增材高度的增加, 远离基板的位置仅存在小球形孔。Kuriya 等^[36]采用高速相机和比色高温计监测激光直接沉积过程, 发现随着激光功率的增大, 熔池尺寸变大, 导致熔池凝固时间变长, 气泡在自身浮力和熔池内部对流的作用下易逸出, 导致孔隙率降低。湖南大学肖

辉^[27]进行了 Inconel 718 合金块体试样沉积试验, 发现在激光功率相同的情况下, 随着扫描速度的增大, 孔隙率增加。Qi 等^[34]通过一系列试验, 对沉积过程进行了优化, 发现孔隙率与热输入量成反比。Mukherjee 等^[33]也提出了通过增加热输入量可以将由于缺乏熔合而产生的孔隙率降至最低的方法。可以发现, 通过预热基板、增大激光功率、降低扫描速度等方式都能有效降低增材件孔隙率。当热输入量和质量能量恒定时, Petrat 等^[13]通过多道多层试验发现, 随着激光功率和扫描速度增大, 气孔的数量和尺寸减小, 如图 9 所示。

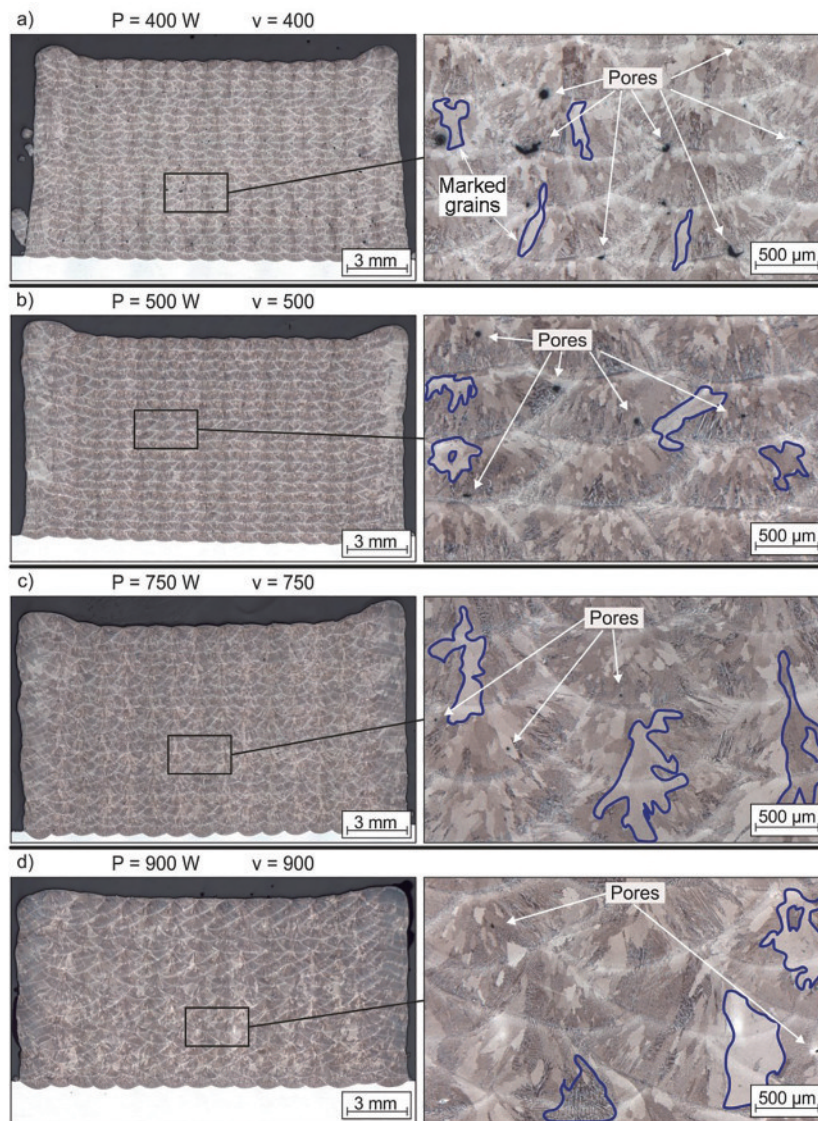


图 9 不同激光功率和扫描速度下块状沉积试样截面形貌^[13]。(a) $P=400\text{ W}$, $v=400\text{ mm/min}$; (b) $P=500\text{ W}$, $v=500\text{ mm/min}$; (c) $P=750\text{ W}$, $v=750\text{ mm/min}$; (d) $P=900\text{ W}$, $v=900\text{ mm/min}$

Fig. 9 Section morphology of massive deposition samples under different laser powers and scanning speeds^[13]. (a) $P=400\text{ W}$, $v=400\text{ mm/min}$; (b) $P=500\text{ W}$, $v=500\text{ mm/min}$; (c) $P=750\text{ W}$, $v=750\text{ mm/min}$; (d) $P=900\text{ W}$, $v=900\text{ mm/min}$

除孔隙率外, 热裂纹也是增材零件中常见缺陷之一。热裂纹可分为在合金顶部产生的结晶裂纹和在合金中下部产生的液化裂纹, 增材件中以液化裂纹为

主。上海交通大学陈源等^[22]在 Inconel 718 基板上增材单道多层 Inconel 718 合金时发现: 当激光热输入量和单层沉积厚度一定时, 随着激光功率和扫描速度增

加,裂纹倾向越明显,如图 10(a)~(e)所示;当扫描速度一定时,随着热输入量越大,裂纹越明显,如图 10(f)~(i)所示,且热裂纹主要沿晶界附近的

Laves 相扩展。Nie 等^[32]也通过试验观察到热裂纹常出现在长链状 Laves 相中,而非离散 Laves 相中,如图 11 所示。

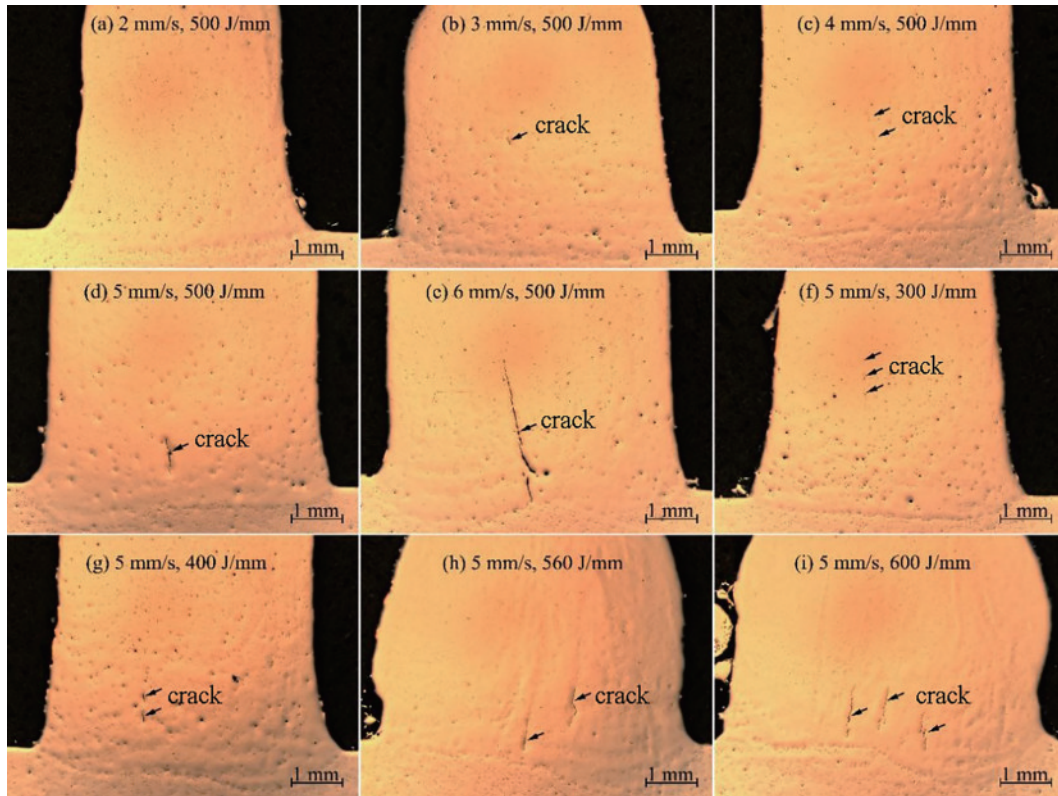


图 10 不同激光扫描速度及热输入量下增材制造合金截面及热裂纹形貌^[22]。(a) 2 mm/s, 500 J/mm; (b) 3 mm/s, 500 J/mm; (c) 4 mm/s, 500 J/mm; (d) 5 mm/s, 500 J/mm; (e) 6 mm/s, 500 J/mm; (f) 5 mm/s, 300 J/mm; (g) 5 mm/s, 400 J/mm; (h) 5 mm/s, 560 J/mm; (i) 5 mm/s, 600 J/mm

Fig. 10 Cross section and hot crack of additive alloy with different laser scanning speed and heat input^[22]. (a) 2 mm/s, 500 J/mm; (b) 3 mm/s, 500 J/mm; (c) 4 mm/s, 500 J/mm; (d) 5 mm/s, 500 J/mm; (e) 6 mm/s, 500 J/mm; (f) 5 mm/s, 300 J/mm; (g) 5 mm/s, 400 J/mm; (h) 5 mm/s, 560 J/mm; (i) 5 mm/s, 600 J/mm

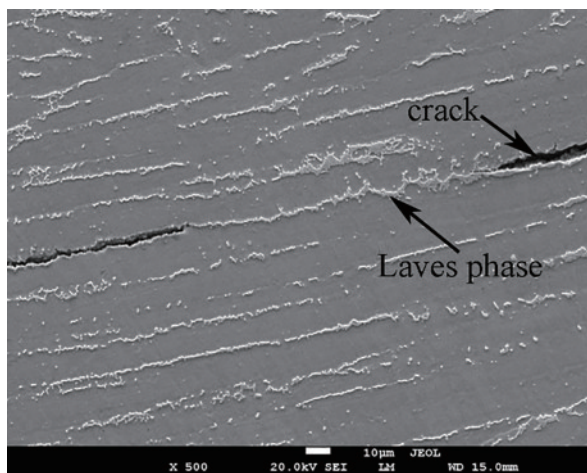


图 11 Inconel 718 沉积试样中长链状 Laves 相中的热裂纹^[32]
Fig. 11 Thermal cracks in long chain Laves phase in Inconel 718 deposited samples^[32]

总的来说,冷却速率是影响 Inconel 718 激光直接沉积组织特性的重要因素,与扫描速度成正比,与激光

功率成反比,因此扫描速度和激光功率对 Inconel 718 激光直接沉积的组织特性有重要影响。当激光功率减小或扫描速度增加时,增材件冷却速率增大,导致零件孔隙率增多、晶粒尺寸减小和 Laves 相析出量减少,促使 Laves 相的形成,导致增材件裂纹倾向增大。因此,在增材制造中,应控制激光功率和扫描速度在合适范围内。

2.4 沉积件力学性能

增材件的力学性能主要与缺陷和组织形态有关。马春飞^[30]发现,Laves 相作为一种脆硬相,当沉积层中析出的 Laves 相含量较高时,沉积层的显微硬度增大。这是因为 Laves 相的形成会消耗基体中的 Nb 元素,从而抑制强化相 γ'' 和 γ' 的析出,导致屈服强度和抗拉强度较低^[34]。连续的 Laves 相容易导致热裂纹的产生,需要通过适当的控制凝固条件,才能有效地避免连续 Laves 相的产生,进而减小对力学性能的危害^[32]。谢晋^[37]和李亚敏等^[26]通过试验得出,当扫描速度增加和激光功率减小时,会出现晶粒细化,枝晶间距减小的现

象,使得合金组织的显微硬度提高,如图 12 所示。Amine 等^[29]也得出了沉积试样的硬度随着激光功率的增加而降低的结论。通过适当提高扫描速度,可以提

升沉积试样的显微硬度、拉伸强度和塑性,而扫描速度过大,则容易导致气孔的产生,进而降低增材件的力学性能^[27]。

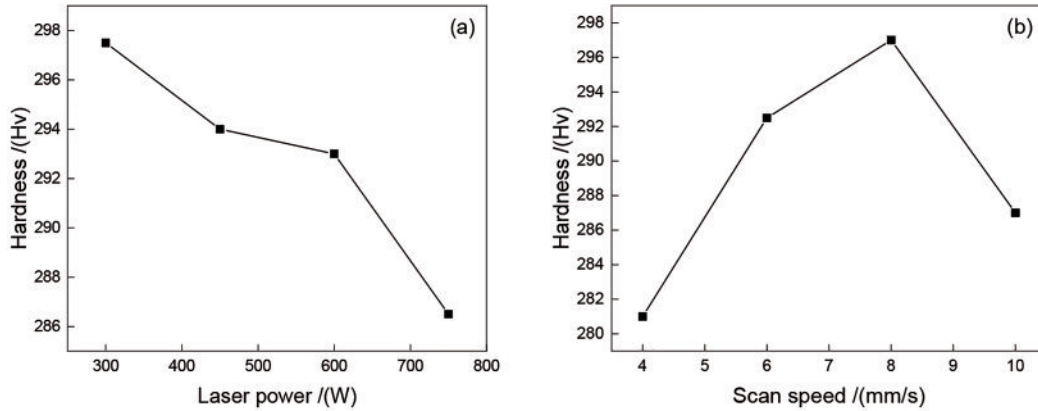


图 12 硬度变化曲线图^[37]。(a)不同激光功率;(b)不同扫描速度

Fig. 12 Curve of hardness change^[37]. (a) Different laser powers; (b) different scanning speeds

激光增材熔池在凝固时会促使晶粒沿增材方向或最大温度梯度方向生长,从而导致沉积试样力学性能的各向异性。席明哲等^[38]研究了激光快速成形 Inconel 718 合金的拉伸力学性能,发现其具有各向异性的特点,拉伸方向沿沉积高度方向时拉伸力学性能最差,沿激光扫描方向时拉伸力学性能最好,但均低于 Inconel 718 合金的锻造标准。Taberero 等^[39]通过对激光熔覆 Inconel 718 零件力学性能的评估,也发现了各向异性的现象,并提出主应力线方向沿熔覆轨迹方向为最佳的激光熔覆策略。Kelly 等^[40]通过对比直接金属沉积 Inconel 718 在不同构造方向下的疲劳寿命,发现疲劳强度同样具有各向异性的特点。

由此可见,扫描速度和激光功率通过影响增材件的组织形态,进而影响其力学性能。当增加扫描速度时,可以提高合金组织的显微硬度、屈服强度和抗拉强度,而随着激光功率的增大,增材件的显微硬度将降低。

3 高速激光直接沉积工艺特性

3.1 高速激光沉积件表面形貌

由于高速激光直接沉积的熔凝形式与常规激光直接沉积不同,所以其沉积层的宏观形貌也不同于常规激光直接沉积。如图 13^[41]所示,高速激光直接沉积的

沉积层呈多层重叠结构,因为沉积过程中扫描速度快,所以热输入量小,形成了较小的熔池,且形成的单道沉积层具有薄且宽的特点。为了形成致密的沉积层,需要较高的搭接率,因此熔池大部分位于上一道沉积层上,仅有一小部分位于基底上,既减少了热输入量,又保证了良好的冶金结合^[42]。高速激光直接沉积与常规激光直接沉积相比,光斑直径更小,所以在相同激光能量输入的情况下,高速激光直接沉积的激光能量密度大, Wu 等^[43]通过高速激光熔覆 Stellite6 钴基合金,提出了激光能量密度是影响沉积层厚度的决定性因素,随着激光能量密度的增大,更多的粉末被熔化后送入熔池,使得沉积层厚度增大,但当激光能量密度过大时,受粉末颗粒蒸发量增加的影响,沉积层厚度反而会减小。Sommer 等^[44]通过对高速激光熔覆 AISI 316L 不锈钢工艺参数的研究,制备出了高至 1413 μm ,低至 144 μm 的沉积层。周远东^[45]和澹台凡亮等^[46]在高速激光熔覆 X-M6V 粉末和 SNJG-160C 型合金粉末时发现:当激光功率一定时,沉积层厚度随扫描速度的增加而减小;当扫描速度一定时,随激光功率的增大,沉积层厚度基本不变,但表面趋于平整。曲劲宇等^[47]在制备 Fe 基非晶合金涂层时也得出相同的观点,同时还发现当扫描速度增加时,沉积层宽度几乎不变,且热输入量减少,使得熔池深度降低,从而使稀释率和热影响

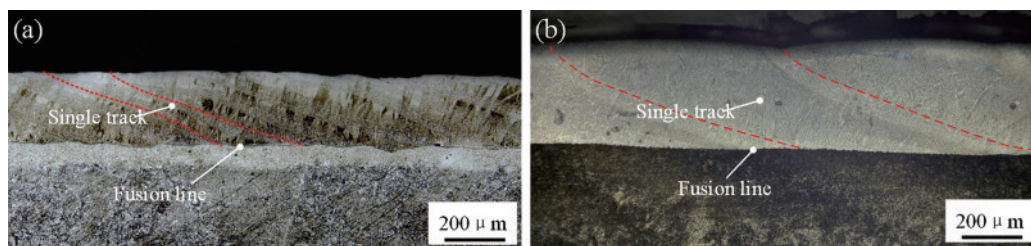


图 13 沉积层的截面的宏观形貌^[41]。(a)高速激光熔覆;(b)常规激光熔覆

Fig. 13 Macroscopic morphology of section of sediment layer^[41]. (a) High-speed laser cladding; (b) conventional laser cladding

区宽度减小;当激光功率增大时,热输入量增多,稀释率和热影响区宽度增大。沉积层的厚度除了取决于扫描速度,与送粉速率也有很大的关系。Lampa 等^[48]通过高速激光熔覆镍基合金,总结出了高速激光熔覆时沉积层厚度 t 、送粉速率 G 、激光功率 P 和搭接率 O 之间的关系为 $t=nG/[P(100-O)]$,其中 n 为大于 0 的自然数。王曙光等^[49]在采用激光内送粉高速熔覆时也观察到,随着送粉速率的增大,沉积层高度随着单位时间进入熔池粉末量的增加而增大,但送粉速率过大则会因粉末未能完全熔化,导致沉积层出现气孔、黏粉的缺陷。而 Wang 等^[50]进行了 K648 高温合金高速激光熔覆试验,发现当激光功率一定时,沉积层的高度随扫描速度和送粉速率的增加而减小,说明与送粉速率相比,扫描速度是影响沉积层高度的主要因素。

高速激光直接沉积的熔凝形式还会对沉积层的表面质量产生影响。Shen 等^[51]在 27SiMn 基底上沉积 AlSi 431 粉末时观察到,高速激光直接沉积的单层沉积层表面粗糙度明显优于常规激光直接沉积的单层沉积层。李朝晖等^[52]在 45 钢上高速激光直接沉积 SD-Ni45 合金时也观察到了相同的现象,如图 14 所示。与常规激光直接沉积相比,其粗糙度等级要高 1 到 2 个等级^[53]。不仅是单层沉积,在进行高速激光多层沉积时也能得到较好的表面质量,李岩等^[54]在 45 钢基底上高速激光熔覆 Fe 基合金,进行了单层、双层和三层熔覆,发现增加沉积层数只会影响增材件厚度,对零件的形

貌结构没有影响。张煜等^[55]在采用高速激光熔覆制备镍基 WC 沉积层时指出,由于在高速激光熔覆中粉末合金以液态的形式注入熔池,因此不易出现表面黏粉现象,沉积层表面更光滑,粗糙度更低。但娄丽艳等^[56-57]在进行高速激光熔覆 FeCr 合金时发现,未熔或半熔的粉末仍会存在,并会保留在沉积层表面形成颗粒状凸起,因此沉积层的表面质量受粉末颗粒尺寸的影响,沉积层表面的粗糙度随粉末粒径的增加而增大,同时还指出沉积层的表面粗糙度会随搭接率的增大而降低,随基底粗糙度的增大而增大。周丹等^[58]研究了扫描速度对高速激光沉积层特性的影响,结果表明随着扫描速度的增加,沉积试样表面粗糙度降低,但当扫描速度过大时,表面会出现“低洼”点,导致表面粗糙度增大。哈尔滨工业大学周远东^[45]发现,当扫描速度恒定时,随着激光功率的增大,沉积层表面越来越光滑,而当激光功率较低时,由于能量输入不够,熔化的粉末和基底之间不能形成良好的冶金结合,会出现翘起的现象。Schaible 等^[59]将高速激光直接沉积应用于三维增材制造上,进行了铁基合金 1.4404 多道多层高速激光直接沉积试验,但沉积件表面质量差,且表面质量随着层数的增加而降低。Xu 等^[60]结合高速激光熔覆与激光重熔,在 45 钢上制备了多道多层铁基不锈钢涂层,优化了沉积件的表面质量,改善了多道多层高速激光直接沉积的常见缺陷,但三维高速激光直接沉积工艺仍需要进一步研究。

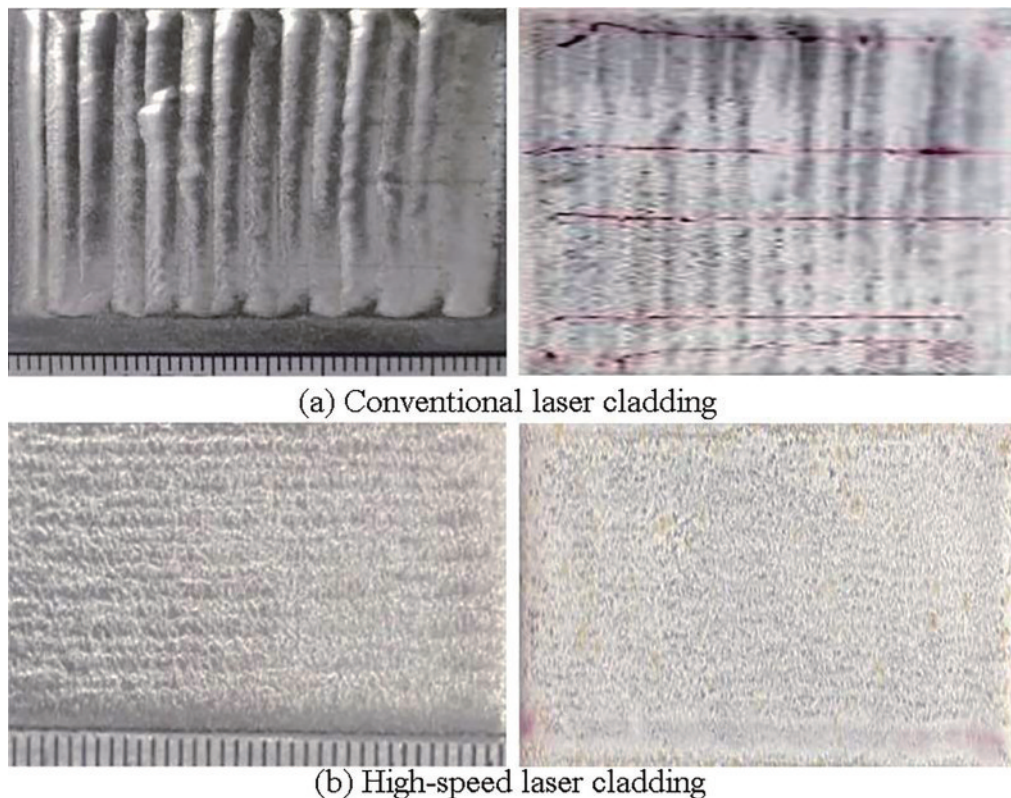


图 14 沉积层宏观形貌及表面探伤^[52]。(a)常规激光熔覆;(b)高速激光熔覆

Fig. 14 Macro morphology and surface detection of sediment layer^[52]. (a) Conventional laser cladding; (b) high-speed laser cladding

由此可见,在高速激光直接沉积过程中,沉积层的厚度主要受送粉速率和扫描速度的影响,随送粉速率的增加而增大,随扫描速度的增加而减小,还可以通过改变激光能量密度来控制沉积层的厚度。与常规激光直接沉积相比,高速激光直接沉积的沉积层表面相对平整,粗糙度低,能有效减小后续加工时的去除量,既提高了效率又降低了成本,通过适当增加扫描速度和激光功率,减小粉末粒径,能有效降低沉积层表面粗糙度。

3.2 高速激光沉积件组织特征

由于高速激光直接沉积的沉积层呈多层重叠结构,熔池尺寸小、搭接率高,所以增材组织十分致密均匀。高速激光直接沉积的成形原理决定了工件表面局部快速熔化且快速凝固的成形特点,导致其沉积层内部的显微组织和晶粒的生长规律有别于常规激光熔覆,晶粒尺寸更加细小,如图 15 所示。采用高速激光直接沉积工艺制备的表面组织主要为细小的树枝晶;中部组织为生长方向明显一致的树枝晶,生长方向沿散热方向垂直于搭接熔合线,搭接熔合区的枝晶尺寸略微粗化;沉积层底部与基底的结合区组织为平面晶,近结合区组织为垂直于基底生长的粗大树枝晶^[52,58,61]。刘德来等^[62]在高速激光熔覆 Ni/316L 沉积层时发现,随着激光功率的增大,沉积层组织转变为以垂直于搭接熔合线生长为主。郑红彬等^[63]在 9Cr2Mo 钢基底上

高速激光熔覆 M2 高速钢时发现,随着扫描速度的减小、激光功率的增大、搭接率的减小,激光热输入量增大,晶粒尺寸增大。Wu 等^[43]发现高速激光熔覆时,在较低的激光能量密度下,可以形成细密的晶粒组织。Lampa 等^[48]和周丹等^[58]发现,随着扫描速度的增加,使得冷却速率增大,进而细化晶粒和减小枝晶间距。Shen 等^[64]也得出了相同的结论,同时还发现随着扫描速度的增加,树枝晶整体尺寸更加均匀。Li 等^[61]在进行 AlSi4340 钢高速激光熔覆时发现,搭接策略对冷却速度有重要影响,结果表明当冷却速率越快时,热影响区宽度越小,显微组织越细密。Yuan 等^[53]通过高速激光熔覆 Ni45 合金发现,无论扫描速度如何变化,单层沉积层从基底到沉积层表面,显微结构均从柱状树枝晶转变为等轴树枝晶,但随着扫描速度的增加,沉积层的冷却速度增加,等轴晶区域增加,且整体组织更加细密。Wang 等^[50]进行了多道多层高速激光熔覆试验,发现沉积层层与层结合区域主要由等轴晶组成,沉积层内部区域主要由柱状晶组成,归因于前一层顶部区域的等轴晶无法在后一层的沉积中完全融化,新沉积层的晶粒将基于前一层未融化等轴晶粒生长,导致等轴晶位于每层柱状晶之间,如图 16 所示。Cui 等^[65]在多层高速激光熔覆 FeCoNiCrMn 高熵合金时也观察到了相似的现象,同时还发现,与单层熔覆相比,多层熔覆的元素分布更均匀,且层与层之间结合质量好。

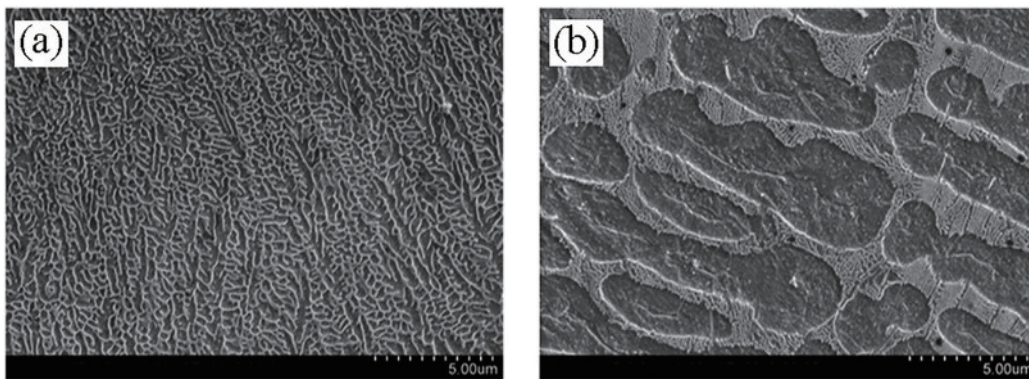


图 15 高速激光熔覆沉积层与传统激光熔覆沉积层组织^[48]。(a)高速激光熔覆;(b)常规激光熔覆

Fig. 15 Microstructure of high-speed laser cladding deposition layer and traditional laser cladding deposition layer^[48]. (a) High-speed laser cladding; (b) conventional laser cladding

澹台凡亮等^[46]和 Shen 等^[51]通过对沉积层进行能谱检测,观察到高速激光沉积层元素分布均匀,元素偏析的趋势较低。李岩等^[54]开展了高速激光熔覆 Fe 基沉积层工艺试验,采用 EDS 分析图谱观察 Cr 元素的分布,发现 Cr 元素含量在沉积层与基底的结合区域内发生变化,说明了沉积层与基底之间冶金结合良好。Lou 等^[66]通过观察 Ti-Cu-NiCoCrAlTaY 沉积层内 Ti 元素的分布,也得出了相同的结论。李俐群等^[42]观察到与常规激光熔覆相比,高速激光熔覆基底和沉积层

直接形成了极窄的元素过渡区,说明高速激光熔覆在良好冶金结合的前提下具有较低的稀释率。镍基 WC 粉末具有良好的耐磨性能,且价格适中,被广泛应用于沉积层的制备上^[61,67],张煜等^[55]研究了高速激光熔覆制备镍基 WC 沉积层,发现沉积层均匀致密,元素过渡区小,且由于基底热输入量低,一方面减少了熔池对流与搅拌时间,使得 WC 颗粒分布均匀,另一方面 WC 颗粒热分解轻微,既保证了 WC 颗粒的完整性,又保证了 Ni-Cu 合金与 WC 颗粒的良好结合。

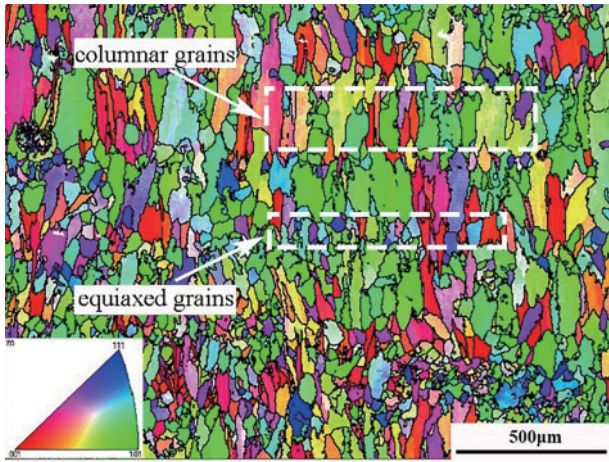


图 16 高速激光熔覆 K648 高温合金沉积层的 EBSD 结果^[49]

Fig. 16 EBSD results of high-speed laser cladding K648 superalloy deposition layer^[49]

3.3 沉积件内部缺陷

在高速激光直接沉积过程中,沉积试样同样会存在气孔裂纹等缺陷。董会等^[68]在高速激光熔覆 Ni/不锈钢时发现,由于粉末在接触熔池前熔化,以液态的形式进入熔池,因此与常规激光熔覆相比,高速激光熔覆的粉末熔化程度高,从而降低了沉积层中未熔化导致的孔隙率。但由于高速激光熔覆熔池存在时间很短,在沉积层层与层的结合区域还是会因不完全熔合而产生孔隙^[49],如果熔池的冷却速度比孔隙的逃逸速度快,也会在沉积层的内部区域产生一些小孔^[69]。Li 等^[61]指出,激光功率密度低和粉末颗粒的缺陷是造成沉积层内部孔隙出现的原因,未预热基底冷却速率高是基底与第一层沉积层之间孔隙产生的原因,且孔隙率随热输入量的增加而降低。但是当采用高速激光熔覆制备镍基 WC 沉积层时,热输入量较低会使 WC 颗粒热分解轻微,沉积层中 C 含量低,从而抑制 CO₂、CO 等气泡的产生,降低孔隙率^[55]。

实现沉积过程中沉积物热输入量的最小化,可以实现最小的热变形,同时获得最佳的冶金性能并减少缺陷,低热量输入可以防止沉积试样出现液化裂纹,从而提高其使用寿命^[70]。王彦芳等^[71]在 35CrMo 合金钢基底上高速激光熔覆马氏体不锈钢合金粉末,并对沉积层表面进行探伤处理,发现沉积层表面无裂纹等缺陷。李朝晖等^[52]发现由于高速激光熔覆的热输入量小,所以在熔覆过程中能快速达到满足激光熔覆的最小比能,进而降低沉积层裂纹敏感性,减少裂纹的产生。Wu 等^[43]研究发现,当激光能量密度过大时,沉积层会产生明显的裂纹,归因于沉积层和基底材料之间的过度混合或沉积层中存在较高的残余热应力。Xiao 等^[72]在高速激光熔覆铁基非晶合金涂层时发现,随着扫描速度的增大,涂层厚度减小,有利于减少应力集中,消除涂层中的裂纹。对于某些特定的复合层,其沉积层材料受熔池温度影响较大,因此对激光功率和扫

描速度的要求也越高,Wang 等^[6]在 42CrMo 钢基底上制备 FeCoCrNi-Mo HEA/金刚石复合沉积层时发现,当激光功率过大或扫描速度过低时,熔池温度增大,导致金刚石颗粒石墨化,在沉积层中形成大量碳化物,促使了裂纹和气孔的产生。

总的来说,在高速激光直接沉积过程中,扫描速度和激光功率对沉积试样组织特性的影响规律与其在常规激光直接沉积过程中相似,但由于高速激光直接沉积的成形原理不同于常规激光直接沉积,其沉积试样整体上组织较为细密,元素分布较为均匀,孔隙率较低,且由于较低的热输入量,能实现较小的热变形,同时防止液化裂纹的产生。

3.4 高速激光沉积件力学性能

高速激光直接沉积由于热输入量小,热影响区小,故基底软化影响小,且由于沉积层整体上组织细密,故整体硬度高于常规激光直接沉积^[42,52],如图 17 所示。周丹等^[58]发现沉积层的显微硬度随着扫描速度的提高而显著提高。Li 等^[61]也发现当冷却速率越快时,显微硬度越高,且沉积层搭接重合区域显微硬度低于非重合区域。沉积层的表面形貌也会在一定程度上影响其力学性能,中国矿业大学于海航^[73]在 27SiMn 钢上高速激光熔覆 Fe-Cr-B 系合金粉末时发现,未完全熔化粉末附着在沉积层表面,会形成高低不等的凸峰,凸峰与沉积层表面的夹角处容易因应力集中而产生疲劳裂纹,使其疲劳强度降低。

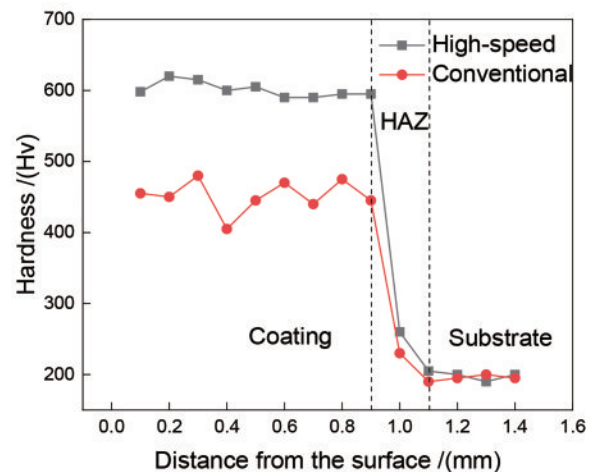


图 17 高速激光熔覆和常规激光熔覆沉积层硬度分布图^[52]

Fig. 17 Hardness distribution of high-speed laser cladding and conventional laser cladding layer^[52]

沉积层组织的耐磨性和耐腐蚀性与微观组织之间有密切的关系。Asghar 等^[74]在 LA43M 镁锂合金上高速激光熔覆 Ni60 合金时发现,由于 Ni60 沉积层较高的显微硬度和沉积层中均匀分布的硬质碳化铬和硼化物,其表面耐磨性得到了增强。李朝晖等^[52]在高压柱塞上高速激光熔覆镍基合金时发现,由于高速激光熔覆的沉积层硬度较高,且沉积层中的硬质相颗粒分布

较均匀,其耐磨性显著提高。徐一飞等^[75]采用高速激光熔覆铁基合金沉积层,指出高速激光熔覆形成的致密均匀的组织结构,有利于提高沉积层的耐蚀性。Ouyang 等^[76]在 27SiMn 钢表面高速激光熔覆 Fe 基合金涂层,并对涂层和基底进行盐雾腐蚀,发现基底表面腐蚀严重,而涂层表面仍然光滑,且在腐蚀过程中的质量损失小于基底。李俐群等^[42]和 Shen 等^[51]采用电化学腐蚀方法测试 431 不锈钢沉积层的耐腐蚀性,结果表明采用高速激光熔覆制造出来的沉积层具有更好的抗腐蚀能力,但沉积层道与道之间的重叠区域抗腐蚀能力进一步减弱^[64]。Yang 等^[77]在 45 钢上高速激光熔覆 FeCrMoMn 涂层,提出涂层的高耐蚀性是由于扫描速度的增加降低了沉积层的稀释率,进而抑制了涂层中元素的扩散程度。与常规激光熔覆相比,高速激光熔覆较低的稀释率使沉积层更好地继承了其设计成分,从而保证了其力学性能特性^[68]。

可见,与常规激光直接沉积技术相比,采用高速激光直接沉积技术制备的沉积层具有较高的显微硬度,且随扫描速度的增加,沉积层硬度增大,同时沉积层的耐磨性和耐腐蚀性也得到了增强。

4 结束语

本文通过探讨常规激光直接沉积 Inconel 718 过程中扫描速率和激光功率对沉积试样表面形貌、组织特征、内部缺陷和力学性能的影响,发现当扫描速度增加时,可以获得表面粗糙度更低、显微组织更细密、显微硬度更高的沉积试样,但会增大零件孔隙率。通过提高激光功率,可以降低试样孔隙率,但晶粒组织更粗大,导致显微硬度降低。而在高激光功率和高扫描速度下,沉积层的高度和宽度增加,可以获得表面质量较好、孔隙率较低的沉积试样,但容易产生热裂纹。因此在常规激光直接沉积过程中,采用提高扫描速度和激光功率的方法提高打印效率,无法兼顾打印质量。

高速激光直接沉积技术对粉末的熔凝形式进行了优化,从而大幅提高了扫描速度,解决了打印效率低的问题。同时通过分析高速激光直接沉积工艺下沉积试样的表面形貌、组织特征、内部缺陷和力学性能,发现其表面粗糙度较低,组织细小,孔隙率更低,增材件力学性能较好,且不易产生裂纹,可见其打印质量也得到了提升。

目前高速激光直接沉积技术主要应用于二维增材中,在三维增材中鲜有应用。本文综述了高速激光直接沉积在镍基合金和其他材料中的应用,为 Inconel 718 合金高速激光直接沉积提供了指导,之后有望将高速激光直接沉积技术应用于 Inconel 718 合金的三维增材制造中,极大提高打印效率和打印质量,并应用于复杂大型零件的单件生产。但高速激光直接沉积技术在 Inconel 718 合金三维增材中的应用面临着诸多

挑战:

1) 在工艺方面,高速激光直接沉积三维增材工艺不成熟,需要开展系统的工艺研究,根据 Inconel 718 合金弹性模量高、热膨胀系数高、存在 Laves 相等特性,重点探究工艺参数对沉积件裂纹缺陷和组织特征的影响规律,得出满足三维增材成形性好、沉积件无裂纹缺陷的优化的增材制造工艺参数;

2) 在理论方面,需要针对新型粉末熔凝模式,建立新型光粉耦合模型,探究高速激光直接沉积过程中的激光能量衰减和粉末热运输特性,探明其作用机理;

3) 在设备方面,目前的二维增材均采用基材高速旋转的方式实现高速激光直接沉积,为实现高速激光直接沉积三维增材,需要机床具备高加速度和高速度移动能力,同时保证所需精度。此外,还需对高速打印头的结构和送粉参数进行优化,使粉末流汇聚特征满足高速激光直接沉积的要求,并确保高速运动中的粉末流保持正常的汇聚特征。

参 考 文 献

- [1] 顾冬冬,张红梅,陈洪宇,等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500002.
Gu D D, Zhang H M, Chen H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500002.
- [2] Chen Y, Lu F G, Zhang K, et al. Dendritic microstructure and hot cracking of laser additive manufactured Inconel 718 under improved base cooling [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 670: 312-321.
- [3] Zhang Y C, Yang L, Lu W Z, et al. Microstructure and elevated temperature mechanical properties of IN718 alloy fabricated by laser metal deposition[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 771: 138580.
- [4] 吴影,刘艳,陈文静,等. 超高速激光熔覆技术研究现状及其发展方向[J]. 电焊机, 2020, 50(3): 1-10, 140.
Wu Y, Liu Y, Chen W J, et al. Research status and development direction of extreme high-speed laser material deposition[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(3): 1-10, 140.
- [5] Schopphoven T, Gasser A, Wissenbach K, et al. Investigations on ultra-high-speed laser material deposition as alternative for hard chrome plating and thermal spraying [J]. Journal of Laser Applications, 2016, 28(2): 022501.
- [6] Wang H J, Zhang W, Peng Y B, et al. Microstructures and wear resistance of FeCoCrNi-Mo high entropy alloy/diamond composite coatings by high speed laser cladding [J]. Coatings, 2020, 10(3): 300-314.
- [7] Schopphoven T, Gasser A, Backes G. EHLA: extreme high-speed laser material deposition[J]. Laser Technik Journal, 2017, 14(4): 26-29.
- [8] Schopphoven T, Pirch N, Mann S, et al. Statistical/numerical model of the powder-gas jet for extreme high-

- speed laser material deposition[J]. *Coatings*, 2020, 10(4): 416-432.
- [9] Schopphoven T, Schleifenbaum J H, Tharmakulasingam S, et al. Setting sights on a 3D process[J]. *Photonics Views*, 2019, 16(5): 64-68.
- [10] 徐杰, 周金宇, 任维彬, 等. Inconel 718 覆层工艺用于 K418 叶片激光再制造立体成形[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(3): 031401.
Xu J, Zhou J Y, Ren W B, et al. Inconel 718 coating process for laser remanufacturing three-dimensional forming of K418 blades[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(3): 031401.
- [11] 王予, 黄延禄, 杨永强. 同轴送粉激光定向能量沉积 IN718 的数值模拟[J]. *中国激光*, 2021, 48(6): 0602115.
Wang Y, Huang Y L, Yang Y Q. Numerical simulation on coaxial powder feeding laser directional energy deposition of IN718[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(6): 0602115.
- [12] Chen B, Mazumder J. Role of process parameters during additive manufacturing by direct metal deposition of Inconel 718[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2017, 23(5): 919-929.
- [13] Petrat T, Brunner-Schwer C, Graf B, et al. Microstructure of Inconel 718 parts with constant mass energy input manufactured with direct energy deposition [J]. *Procedia Manufacturing*, 2019, 36: 256-266.
- [14] Zhang Q L, Yao J H, Mazumder J. Laser direct metal deposition technology and microstructure and composition segregation of Inconel 718 superalloy[J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2011, 18(4): 73-78.
- [15] Gharbi M, Peyre P, Gorny C, et al. Influence of various process conditions on surface finishes induced by the direct metal deposition laser technique on a Ti-6Al-4V alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213(5): 791-800.
- [16] Tan H, Hu G, Zhang F Y, et al. Formation mechanism of adhering powder and improvement of the surface quality during laser solid forming[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(5/6/7/8): 1329-1338.
- [17] Alimardani M, Fallah V, Irvani-Tabrizipour M, et al. Surface finish in laser solid freeform fabrication of an AISI 303L stainless steel thin wall[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(1): 113-119.
- [18] Zhu G X, Li D C, Zhang A F, et al. The influence of laser and powder defocusing characteristics on the surface quality in laser direct metal deposition[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(2): 349-356.
- [19] 皮刚, 张安峰, 朱刚贤, 等. 激光金属直接成形中形貌自稳定效应的研究[J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(11): 77-81.
Pi G, Zhang A F, Zhu G X, et al. Self-regulation-effect in laser direct metal manufacturing[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(11): 77-81.
- [20] Bi G J, Gasser A, Wissenbach K, et al. Characterization of the process control for the direct laser metallic powder deposition[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 201(6): 2676-2683.
- [21] Liu J C, Li L J. In-time motion adjustment in laser cladding manufacturing process for improving dimensional accuracy and surface finish of the formed part[J]. *Optics & Laser Technology*, 2004, 36(6): 477-483.
- [22] 陈源. 激光增材制造 Inconel 718 合金裂纹形成机制及其控制[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
Chen Y. Studies on formation mechanism and control methods of cracking in laser additive manufactured Inconel 718 alloy[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
- [23] Ma M M, Wang Z M, Zeng X Y. Effect of energy input on microstructural evolution of direct laser fabricated IN718 alloy[J]. *Materials Characterization*, 2015, 106: 420-427.
- [24] Henry M M. Experimental study of process parameters setting in laser additive manufacturing for the repair of Inconel 718 Turbopan [D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [25] 戴婧, 王恩庭, 张群森, 等. 激光增材制造镍基合金的柱状晶组织特性[J]. *应用激光*, 2017, 37(6): 813-818.
Dai J, Wang E T, Zhang Q S, et al. Columnar crystal structure of Ni based alloy fabricated by laser additive manufacturing[J]. *Applied Laser*, 2017, 37(6): 813-818.
- [26] 李亚敏, 范福杰, 韩锦玮. 工艺参数对激光熔覆 718 合金涂层的影响[J]. *兰州理工大学学报*, 2018, 44(5): 7-14.
Li Y M, Fan F J, Han J W. Effect of process parameters on laser-cladded 718 alloy coating[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2018, 44(5): 7-14.
- [27] 肖辉. 激光增材制造 Inconel 718 合金凝固组织调控及机理研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
Xiao H. Microstructure control and its mechanisms during laser additive manufacturing of Inconel 718[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [28] 周璨. 激光增材制造 Inconel 718 合金熔池形貌及凝固参数分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
Zhou C. Study on the molten-pool geometry and solidification parameters of laser additive manufactured Inconel 718[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [29] Amine T, Newkirk J W, Liou F. Investigation of effect of process parameters on multilayer builds by direct metal deposition[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 73(1): 500-511.
- [30] 马春飞. 激光增材制造 Inconel 718 高温合金元素偏析控制研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
Ma C F. Study on the element segregation control of Inconel 718 superalloys by laser additive manufacturing [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019.
- [31] 方金祥, 王玉江, 董世运, 等. 激光熔覆 Inconel 718 合金涂层与基体界面的组织及力学性能[J]. *中国机械工程*, 2019, 30(17): 2108-2113.
Fang J X, Wang Y J, Dong S Y, et al. Microstructure and mechanics properties of interfaces between laser cladded Inconel718 coating and substrate[J]. *China Mechanical Engineering*, 2019, 30(17): 2108-2113.

- [32] Nie P L, Ojo O A, Li Z G. Numerical modeling of microstructure evolution during laser additive manufacturing of a nickel-based superalloy[J]. *Acta Materialia*, 2014, 77: 85-95.
- [33] Mukherjee T, Manvatkar V, De A, et al. Dimensionless numbers in additive manufacturing[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 121(6): 064904.
- [34] Qi H, Azer M, Ritter A. Studies of standard heat treatment effects on microstructure and mechanical properties of laser net shape manufactured Inconel 718[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2009, 40(10): 2410-2422.
- [35] Johnson A S, Shao S, Shamsaei N, et al. Microstructure, fatigue behavior, and failure mechanisms of direct laser-deposited Inconel 718[J]. *JOM*, 2017, 69(3): 597-603.
- [36] Kuriya T, Koike R, Mori T, et al. Relationship between solidification time and porosity with directed energy deposition of Inconel 718[J]. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2018, 12(5): JAMDSM0104.
- [37] 谢晋. 激光增材制造镍基合金梯度组织的工艺研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
Xie J. Study on the process of gradient microstructure in a nickel-based alloy by laser additive manufacturing[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [38] 席明哲, 高士友. 激光快速成形 Inconel 718 超合金拉伸力学性能研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0303004.
Xi M Z, Gao S Y. Research on tensile properties of Inconel 718 superalloy fabricated by laser rapid forming process[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(3): 0303004.
- [39] Taberero I, Lamikiz A, Martínez S, et al. Evaluation of the mechanical properties of Inconel 718 components built by laser cladding[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, 51(6): 465-470.
- [40] Kelley P F, Saigal A, Carter A. Fatigue behaviour of direct metal laser sintered Inconel 718[J]. *International Journal of Precision Technology*, 2016, 6(3/4): 277-288.
- [41] Li L Q, Shen F M, Zhou Y D, et al. Comparative study of stainless steel AISI 431 coatings prepared by extreme-high-speed and conventional laser cladding[J]. *Journal of Laser Applications*, 2019, 31(4): 042009.
- [42] 李俐群, 申发明, 周远东, 等. 超高速激光熔覆与常规激光熔覆 431 不锈钢涂层微观组织和耐蚀性的对比[J]. *中国激光*, 2019, 46(10): 1002010.
Li L Q, Shen F M, Zhou Y D, et al. Comparison of microstructure and corrosion resistance of 431 stainless steel coatings prepared by extreme high-speed laser cladding and conventional laser cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(10): 1002010.
- [43] Wu Z F, Qian M, Brandt M, et al. Ultra-high-speed laser cladding of stellite® 6 alloy on mild steel[J]. *JOM*, 2020, 72(12): 4632-4638.
- [44] Sommer N, Stredak F, Böhm S. High-speed laser cladding on thin-sheet-substrates: influence of process parameters on clad geometry and dilution[J]. *Coatings*, 2021, 11(8): 952.
- [45] 周远东. 45#钢表面超高速激光熔覆 X-M6V 耐磨涂层组织性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
Zhou Y D. Research on microstructure and properties of X-M6V wear-resistant coating by extreme-high speed laser cladding on the surface of 45# steel[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [46] 澹台凡亮, 田洪芳, 陈峰, 等. 高速激光熔覆在 27SiMn 液压支架立柱上的应用探讨[J]. *新技术新工艺*, 2019(3): 52-54.
Tantai F L, Tian H F, Chen F, et al. Discussion on application of high-speed laser cladding on 27SiMn hydraulic support column[J]. *New Technology & New Process*, 2019(3): 52-54.
- [47] 曲劲宇. 激光熔覆 Fe 基非晶合金涂层制备工艺及温度场模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
Qu J Y. Study on preparation technology and temperature field simulation of laser cladding Fe based amorphous alloy coating[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [48] Lampa C, Smirnov I. High speed laser cladding of an iron based alloy developed for hard chrome replacement[J]. *Journal of Laser Applications*, 2019, 31(2): 022511.
- [49] 王曙光, 石拓, 傅戈雁, 等. 激光内送粉高速熔覆 Cr₅₀Ni 合金稀释率及单道形貌分析[J]. *表面技术*, 2020, 49(7): 311-318.
Wang S G, Shi T, Fu G Y, et al. Analysis of dilution rate and single channel morphology of high-speed cladding Cr₅₀Ni alloy by laser inside-beam powder feeding process[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(7): 311-318.
- [50] Wang K M, Du D, Liu G, et al. A study on the additive manufacturing of a high chromium Nickel-based superalloy by extreme high-speed laser metal deposition[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 133: 106504.
- [51] Shen B W, Du B R, Wang M H, et al. Comparison on microstructure and properties of stainless steel layer formed by extreme high-speed and conventional laser melting deposition[J]. *Frontiers in Materials*, 2019, 6: 248-256.
- [52] 李朝晖, 李美艳, 韩彬, 等. 高压柱塞高速激光熔覆镍基合金涂层组织和耐磨性[J]. *表面技术*, 2020, 49(10): 45-54.
Li Z H, Li M Y, Han B, et al. High-pressure plunger high-speed laser cladding nickel-based alloy coating structure and wear resistance[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(10): 45-54.
- [53] Yuan W Y, Li R F, Chen Z H, et al. A comparative study on microstructure and properties of traditional laser cladding and high-speed laser cladding of Ni45 alloy coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 405: 126582.
- [54] 李岩, 白瑞兴, 姜丽艳, 等. 1.8 kW 高速激光熔覆铁基合金工艺与组织结构[C]//第二十一届全国热喷涂研讨会(ITSS'2018)暨第二十二届全国热喷涂年会(CNTSC'2018)论文集. 天津: 中国表面工程协会热喷涂专业委员会, 2018: 77-82.
Li Y, Bai R X, Lou L Y, et al. Process and

- microstructure of 1.8 kW high speed laser cladding iron base alloy[C]//Proceedings of the 21st International Conference on Thermal Spraying (ITSS'2018) and the 22nd National Conference on Thermal Spraying (CNTSC'2018). Tianjin: Thermal Spraying Professional Committee of China Surface Engineering Association, 2018: 77-82.
- [55] 张煜, 娄丽艳, 徐庆龙, 等. 超高速激光熔覆镍基 WC 涂层的显微结构与耐磨性能[J]. 金属学报, 2020, 56(11): 1530-1540.
Zhang Y, Lou L Y, Xu Q L, et al. Microstructure and wear resistance of Ni-based WC coating by ultra-high speed laser cladding[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(11): 1530-1540.
- [56] 娄丽艳, 张煜, 徐庆龙, 等. 超高速激光熔覆低稀释率金属涂层微观组织及性能[J]. 中国表面工程, 2020, 33(2): 149-159.
Lou L Y, Zhang Y, Xu Q L, et al. Microstructure and properties of metallic coatings with low dilution ratio by high speed laser cladding[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(2): 149-159.
- [57] 娄丽艳, 李成新, 张煜, 等. 低功率超高速激光熔覆 FeCr 合金薄涂层微观结构与表面形貌演化[J]. 燕山大学学报, 2020, 44(2): 116-124.
Lou L Y, Li C X, Zhang Y, et al. Microstructure and surface morphology evolution of FeCr alloy thin coatings deposited by ultra-high speed laser cladding with low laser power[J]. Journal of Yanshan University, 2020, 44(2): 116-124.
- [58] 周丹, 沈义, 熊大辉, 等. 扫描速度和 Ni 含量对高速激光熔覆层特性的影响[J]. 应用激光, 2020, 40(4): 579-586.
Zhou D, Shen Y, Xiong D H, et al. Effects of scanning speed and Ni content on the characteristics of high-speed laser-clad coating[J]. Applied Laser, 2020, 40(4): 579-586.
- [59] Schaible J, Sayk L, Schopphoven T, et al. Development of a high-speed laser material deposition process for additive manufacturing[J]. Journal of Laser Applications, 2021, 33(1): 012021.
- [60] Xu X, Du J L, Luo K Y, et al. Microstructural features and corrosion behavior of Fe-based coatings prepared by an integrated process of extreme high-speed laser additive manufacturing[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 422: 127500.
- [61] Li T C, Zhang L L, Bultel G G P, et al. Extreme high-speed laser material deposition (EHLA) of AISI 4340 steel[J]. Coatings, 2019, 9(12): 778.
- [62] 刘德来, 王博, 周攀虎, 等. 激光功率对高速激光熔覆 Ni/316L 层组织与力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(5): 213-218.
Liu D L, Wang B, Zhou P H, et al. Effect of laser power on microstructure and mechanical properties of high-speed laser clad Ni/316L layer[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(5): 213-218.
- [63] 郑红彬, 王森辉, 葛学元, 等. 超高速激光熔覆工艺参数对熔覆层组织和性能的影响[J]. 新技术新工艺, 2021(5): 63-69.
Zheng H B, Wang M H, Ge X Y, et al. Influence of ultra-high-speed laser cladding process parameters on the structure and properties of the cladding layer[J]. New Technology & New Process, 2021(5): 63-69.
- [64] Shen F M, Tao W, Li L Q, et al. Effect of microstructure on the corrosion resistance of coatings by extreme high speed laser cladding[J]. Applied Surface Science, 2020, 517: 146085.
- [65] Cui Z Q, Qin Z, Dong P, et al. Microstructure and corrosion properties of FeCoNiCrMn high entropy alloy coatings prepared by high speed laser cladding and ultrasonic surface mechanical rolling treatment[J]. Materials Letters, 2020, 259: 126769.
- [66] Lou L Y, Zhang Y, Jia Y J, et al. High speed laser cladded Ti-Cu-NiCoCrAlTaY burn resistant coating and its oxidation behavior[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 392: 125697.
- [67] 李福泉, 冯鑫友, 陈彦宾. WC 含量对 WC/Ni60A 激光熔覆层微观组织的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0403009.
Li F Q, Feng X Y, Chen Y B. Influence of WC content on microstructure of WC/Ni60A laser cladding layer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0403009.
- [68] 董会, 韩燕, 付安庆, 等. 快速激光熔覆 Ni/不锈钢堆焊层组织及耐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2019, 48(5): 21-27.
Dong H, Han Y, Fu A Q, et al. Microstructure and corrosion resistance of Ni/stainless steel surfacing layer deposited via high-speed laser cladding[J]. Surface Technology, 2019, 48(5): 21-27.
- [69] Zhao T, Wang Y H, Xu T S, et al. Some factors affecting porosity in directed energy deposition of AlMgScZr-alloys[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 143: 107337.
- [70] Kong C Y, Scudamore R J, Allen J. High-rate laser metal deposition of Inconel 718 component using low heat-input approach[J]. Physics Procedia, 2010, 5: 379-386.
- [71] 王彦芳, 赵晓宇, 陆文俊, 等. 抽油杆接箍表面高速激光熔覆不锈钢涂层的组织与性能[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602114.
Wang Y F, Zhao X Y, Lu W J, et al. Microstructure and properties of high speed laser cladding stainless steel coating on sucker rod coupling surfaces[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602114.
- [72] Xiao M Y, Gao H B, Sun L B, et al. Microstructure and mechanical properties of Fe-based amorphous alloy coatings prepared by ultra-high speed laser cladding[J]. Materials Letters, 2021, 297: 130002.
- [73] 于海航. 高速激光熔覆及后处理表面完整性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
Yu H H. Research on surface integrity of high-speed laser cladding and post-treatment[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [74] Asghar O, Lou L Y, Yasir M, et al. Enhanced tribological properties of LA43M magnesium alloy by Ni60 coating via ultra-high-speed laser cladding[J]. Coatings,

- 2020, 10(7): 638.
- [75] 徐一飞, 孙耀宁, 王国建, 等. 高速激光熔覆铁基合金涂层的组织及性能研究[J]. 中国激光, 2021, 48(10): 1002122.
- Xu Y F, Sun Y N, Wang G J, et al. Microstructure and properties of iron-based alloys coatings prepared by high-speed laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(10): 1002122.
- [76] Ouyang C Y, Bai Q F, Yan X G, et al. Microstructure and corrosion properties of laser cladding Fe-based alloy coating on 27SiMn steel surface[J]. Coatings, 2021, 11(5): 552.
- [77] Yang J X, Bai B, Ke H, et al. Effect of metallurgical behavior on microstructure and properties of FeCrMoMn coatings prepared by high-speed laser cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 144: 107431.