

激光增材制造单晶高温合金研究进展

刘龙涛, 陈超越, 李霞, 王江, 任忠鸣

(上海大学 材料科学与工程学院 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室,
上海 200444)

摘要: 镍基单晶高温合金具有良好的高温强度、抗氧化和抗腐蚀性能、抗蠕变性能和组织稳定性, 被广泛应用于制造航空发动机和燃气轮机叶片。由于其工作条件复杂恶劣, 采用有效手段修复单晶叶片可以大大提高其使用寿命。综述了激光增材制造技术制备单晶高温合金的研究现状, 介绍了激光增材制造技术制备单晶合金的理论基础, 以及控制其单晶凝固组织的困难和不足, 着重综述了激光增材制造技术控制单晶高温合金凝固制造的方法, 主要包括通过激光参数调控温度梯度及凝固速率, 以及通过基体晶体取向控制晶粒外延生长。最后, 展望了该领域未来的主要研究方向和发展前景。

关键词: 激光增材制造; 单晶高温合金; 外延生长; CET 转变

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.04.010

中图分类号: TG146 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)04-0073-08

Research Progress in Laser Additive Manufacturing Technology of Single Crystal Superalloy

LIU Long-tao, CHEN Chao-yue, LI Xia, WANG Jiang, REN Zhong-ming

(State Key Laboratory of Advanced Special Steel, School of Materials Science and Engineering, Shanghai University,
Shanghai 200444, China)

ABSTRACT: It is well-known that nickel-based single crystal superalloys have excellent properties, including high temperature strength, oxidation and corrosion resistance, creep resistance, and structural stability. Therefore, they are widely used in blades of aircraft engines and gas turbines. Due to complicated and harsh working conditions, the service life of single crystal blades can be prolonged by efficient repair technology. In this paper, the status of research on laser additive manufacturing technology for single crystal superalloys was reviewed. The theoretical basis of the additive manufacturing for single crystal superalloy and the difficulties and shortages of controlling single crystal solidification structures were introduced. The methods of controlling solidification and manufacturing of single crystal superalloys by laser additive manufacturing technology were reviewed, mainly including controlling temperature gradient and solidification rate by laser parameters and controlling epitaxial growth of crystal grains by controlling the crystal orientation of substrates. Finally, the main research directions and development prospect of this field were prospected.

KEY WORDS: laser additive manufacturing; single crystal superalloys; epitaxial growth; CET transformation

收稿日期: 2019-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(51604171, 51690162); 上海市科委项目(17JC1400602); 上海市扬帆计划(16YF1404300); 国家两机重大专项(2017-VII-0008-0102)

作者简介: 刘龙涛(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光增材制造技术。

通讯作者: 王江(1985—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为激光增材制造、电磁冶金技术。

激光增材制造 (Laser Additive Manufacturing, LAM) 是一种利用激光作为能量源, 基于分层制造原理, 通过对三维 CAD 立体模型进行逐层切分, 然后对金属材料进行逐层累加制造的新型制造技术^[1]。正是由于激光增材制造技术在材料的成分设计、组织结构调控以及零件结构设计等方面具有极大的自由度, 因此在航空航天、核电、石化、船舶等高端重大装备制造中具有巨大的发展潜力和广阔的发展前景, 成为近 20 年来材料加工工程与先进制造技术的研究热点方向之一^[2]。

单晶高温合金具有良好的高温强度、抗氧化和抗腐蚀性能、抗疲劳和抗蠕变性能、断裂性能和组织稳定性, 被广泛应用于航空发动机和工业燃气轮机叶片等领域。单晶发动机叶片的性能虽然较为优异, 但是单晶叶片的材料和制造成本高达 30 000 美元^[3], 并且其使用寿命受热疲劳裂纹、叶尖腐蚀、表面磨损和热腐蚀等缺陷的限制。单晶叶片的更换很大程度上影响了现代航空发动机和燃气轮机的运行成本。通过对损伤叶片进行修复, 使其能够重新满足使用需求, 这样有助于降低成本。在许多传统的修复技术中, 真空钎焊很难保证修复区域与基体组织的一致性, 钨极氩弧焊在修复过程中钨易蒸发, 容易引入杂质, 而激光熔沉沉积技术 (Laser Melting Deposition, LMD) 以近净成形的方式来修复受损的单晶叶片, 又可以保证修复区与基体组织的一致性, 因此被认为是一种有效且高度可控的方法^[4-5]。文中基于激光熔沉沉积技术在单晶高温合金制备中的研究进展、存在问题以及未来方向进行综述。

1 单晶叶片修复技术的理论基础

激光熔沉沉积技术是通过激光对基体加热形成熔池, 并通过送粉系统将金属粉末/丝材送入熔池中, 当激光束离开熔池后, 熔池发生快速凝固形成目标零件。由于高精度的激光束可以有效提高修复精度, 同时配合高自由度的机械手, 可实现结构复杂区域的修复; 激光束的光斑直径小, 能量集中, 对基体的热影响区较小, 因此可以最大限度地减少修复加热过程对被修复零件带来的如变形、热影响区等负面影响。通过适当调整工艺参数, 可以获得与原来基体生长方向一致的外延生长组织, 从而达到单晶叶片的修复目的, 以使修复区与零件在成分、组织结构与性能上最大程度保持一致。

由于单晶高温合金的激光增材制造过程是在单晶基底上进行的, 基体与金属粉末在激光束的照射下熔化形成液相, 随后在基体形成的熔池中凝固形成外延生长的单晶层, 因此沉积层也不存在晶界。单晶基体作为冷端, 激光加工面作为热端, 产生了从激光加工面至基体底部的热流方向, 由于激光的光斑尺

寸小, 热量密度高, 为定向凝固提供了高温梯度。但是由于温度梯度从激光熔池底部到顶部是逐渐减小的, 而凝固速率逐渐增加, 这常常会在熔池顶部出现等轴晶, 即柱状晶向等轴晶转变 (Columnar to Equiaxed Transition, CET)。对于强制枝晶生长, 若固液界面前沿的最大局部过冷度大于形核过冷度, 则可能导致形核出现等轴晶生长, 使得单晶在生长过程中出现杂晶, 影响其性能。Hunt^[6]研究了稳态下柱状晶和等轴晶的生长行为, 并提出柱状晶/等轴晶生长形态转变的解析模型, 并估算当等轴晶的体积分数 $\Phi < 0.66\%$ 时, 凝固组织为全柱状晶; 当等轴晶的体积分数 $\Phi > 49\%$ 时, 凝固组织为全等轴晶, 两者之间则为柱状晶与等轴晶混合组织。

Gäumann 等^[7-9]的研究表明, 形核过冷度、形核位点数以及合金成分对 CET 转变都有重要的影响。在温度梯度低、凝固速度较慢时, 枝晶尖端的过冷度较小, 形核过冷度将会对 CET 转变起主导作用, 形核过冷度越小, 越易形成等轴晶; 在高温梯度的快速凝固过程中, 枝晶尖端的过冷度较大, 形核过冷度更容易达到, 此时形核位点数起主要作用。他们基于 KGT 模型^[10]将 Hunt 提出的 CET 转变模型扩展到快速凝固过程中, 并深入研究了 LMD 过程中激光工艺参数对成形过程稳定性、成形零件的精度控制、材料的微观组织以及性能的影响, 成功制备出了由基体外延生长并与基体生长方向一致的单晶组织, 有效控制了凝固过程中的 CET 转变并将该技术应用于单晶叶片的修复。此外, 由于高温梯度下形核位点数起主要作用, 形核过冷度可以忽略, 为了使 CET 转变与快速凝固条件更加容易关联起来, 又进一步推导出复杂多元合金的简化 CET 判据:

$$\frac{G^n}{v} = K_{\text{CET}} = \alpha \left[\sqrt[3]{\frac{-4\pi N_0}{3\ln(1-\Phi)}} \times \frac{1}{n+1} \right]^n \quad (1)$$

式中: G 为温度梯度; v 为树枝晶生长速度; N_0 为形核位点数; Φ 为等轴晶的体积分数; α, n 为与材料相关的参数。当 G^n/v 比小于 K_{CET} 时, 将发生 CET 转变。该 CET 判据表明, 只要能够确定温度梯度与枝晶生长速度, 就可以建立工艺参数和凝固微观结构之间的直接关系, 并最终得到的工艺-微观结构图可以直接将最终的微观结构 (单晶或多晶) 与几个关键的工艺参数 (激光功率 P , 扫描速度 v_b , 光束直径 D_0 和预热温度 T_0) 联系起来。这可以直接预测获得制备单晶组织所需的工艺窗口, 如图 1 所示。曲线为预测的凝固组织形态与温度梯度 G 以及凝固速率 v 的函数, 虚线为基于 CMSX-4 合金特性所得的 CET 转变临界值 K , 方框为 LMD 加工过程所能达到的温度梯度与凝固速率的范围, A, B, C 为不同实验条件所到达的值。

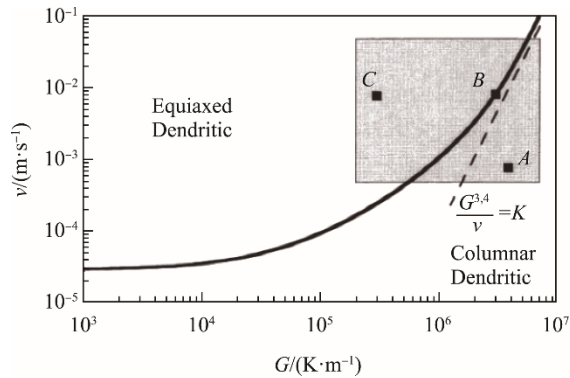


图 1 CMSX-4 单晶高温合金凝固组织预测^[8]
Fig.1 Prediction on solidification structure for single crystal superalloy CMSX-4

Wang 等^[11]通过对激光重熔过程中的熔池进行预测并通过实验进行印证,发现了在激光重熔过程中产生的熔池形状及枝晶类型分布,如图 2 所示。不同颜色的区域代表不同生长方向的枝晶:蓝色为[100]方向,绿色为[010]方向,红色为[001]方向。在熔池底部存在沿[001]生长的柱状树枝晶,而熔池两侧存在[010]和[0 $\bar{1}$ 0]方向生长的树状晶,熔池顶部中间则是[100]方向的转向枝晶区。这主要是由于枝晶生长择优取向的问题,枝晶生长并不完全受热流的控制,而是选择与热流方向最为接近的择优取向进行生长。对于面心立方而言,<100>晶向族是其择优生长方向,通常最终的枝晶生长方向将是与固液界面前沿的速度 v_s 夹角最小的一个<100>晶向族中的一个取向。在熔池边界周围的枝晶生长方向都是由于熔池形状变化导致其散热方向变化。在熔池中心,由于该区域的枝晶生长方向比较接近于扫描速度方向,从而使得由熔池底部外延生长的[001]方向的枝晶发生[100]方向转向。此外,熔池中可能产生等轴晶的区域主要聚集于熔池顶部,因为接近熔池顶部时,温度梯度逐渐变小,并且凝固速度较大,容易发生 CET 转变成等轴树枝晶。

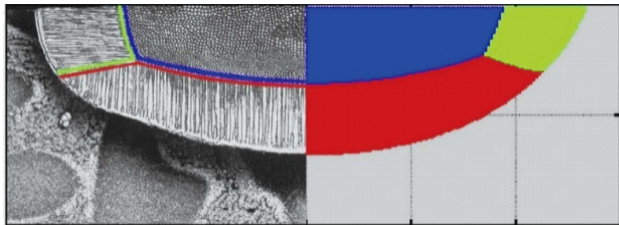


图 2 激光重熔微观纵截面组织^[11]
Fig.2 Micrograph of cross-sectional microstructure by laser remelting

结合三维传热与熔池流体流动模型和单晶生长模型对激光焊接过程中的熔池进行模拟,在研究工艺参数对熔池凝固参数和杂晶形成的影响过程中发现,随着扫描速度的增加,杂晶含量呈现先增加后减少的趋势,而激光功率的增加导致杂晶含量增加^[12-14]。Liang 等^[15]通过对激光重熔实验中杂晶形成的原因进行研究,发现基板中的枝晶间产生的成分偏析使得在

枝晶干和枝晶间处的熔深不一致,由于枝晶间的液相温度比枝晶干更低,在枝晶间处的熔深更大,更容易形成等轴树枝晶而破坏外延生长,因此需要在实验前对基板进行均匀化退火来减小基板的成分偏析,避免杂晶的形成。此外,熔池内部流动会导致枝晶在生长过程中发生偏转,位于熔池两侧的枝晶在熔池顶部受流体运动的影响会向两侧偏转,取向差超过 20°^[16]。

虽然这些激光重熔研究有助于进一步理解在激光加工中熔池内部的组织结构演化,但都是在没有考虑送粉的情况下,基于激光重熔/焊接的模型可能产生与实际 LMD 过程(考虑送粉过程)的偏差。实际过程中,送粉过程中引入的粉末颗粒会影响熔池中的非均匀形核,从而导致形核点位 N_0 不再是一个恒定的值。此外,粉末会对激光能量分布产生影响,改变了激光吸收率,导致熔池的形状发生变化^[17]。之后,Liang 等^[18]引入了具有工艺相关性的 N_0 与激光吸收率 β 对其进行修正,把工艺参数与外延生长比之间建立联系,获得了较为适合单晶外延生长的工艺窗口(如图 3 所示,当单晶外延比大于 0.75 时,为最佳工艺窗口;单晶外延比大于 0.67 时,为可加工工艺窗口),但是仍未建立较为准确的传热传质模型,因此,这也只能作为一个半定量的模型来方便研究人员快速确定一个合理的工艺窗口。近年来,已经有一些有限元模型耦合了传质、传热、对流以及自由表面流动等因素,并考虑了在送粉状态下的激光增材制造快速凝固过程^[19-20]。与先前的简化分析模型相比,上述有限元模型更接近实际的快速凝固过程。

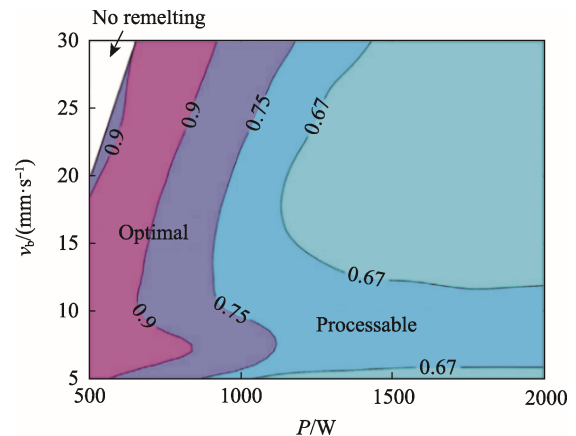


图 3 激光功率与扫描速率对单晶外延比的影响^[18]
Fig.3 Influences of laser power and scanning speed on extension ratio of single crystal

2 激光增材制造单晶高温合金组织研究进展

2.1 工艺参数对增材制造单晶高温合金组织的影响

许多研究人员对不同工艺参数下外延生长的影

响做了大量研究。Santos 等^[21]在 CMSX-4 单晶基板上对 René N4 合金进行 LMD, 通过选择合理的沉积方向以及对工艺参数进行优化, 可以得到由基底外延生长出的单晶组织, 每一沉积层外延生长的单晶区域高度能够达到 30%~40%。整个沉积层的底部组织是朝 [001] 方向生长的柱状树枝晶, 上部发生枝晶转向, 树枝晶由原来的 [001] 方向转变成 [100] 方向生长。接近沉积层顶部则会发生 CET 转变, 产生等轴枝晶, 并通过对工艺参数的控制获得 10 层的连续外延生长沉积层 (如图 4 所示)。由于实验中的沉积层与基板成分不同, 所以提出在 LMD 过程之前需要对基板进行均匀化退火, 减小两者在显微结构上的差异。

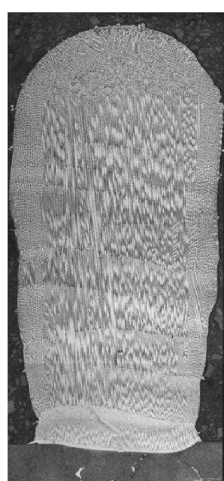


图 4 LMD 沉积 10 层纵向微观组织^[21]

Fig.4 Optical micrograph of the transverse cross section of a 10-layer deposit by LMD

Liu 等^[22-24]通过对激光熔融沉积过程的温度场进行仿真, 建立三维有限元数值模型, 对单晶高温合金的枝晶外延生长进行预测, 并研究激光功率、扫描速度以及送粉速率等工艺参数对 LMD 过程中的柱状树枝晶外延生长的影响, 并加以实验验证。发现随着激光功率的增加, 外延生长的高度增加, 但是熔池深度和宽度也在增加, 因此外延高度比略微减小。而随着扫描速度的增加, 激光的能量输入减小, 熔池逐渐变浅, 外延高度比增加。送粉速率则对枝晶外延高度比的影响不明显, 但是应选择相对较低的送粉速率以保证激光能将粉末完全熔化。Liang 等^[25]利用正交实验进行了 René N5 的 LMD 实验, 也得到了类似的结论。Wang 等^[26]研究了激光扫描速度对激光重熔组织的影响, 发现重熔后右侧 [010] 的生长区域几乎是左侧 [0 $\bar{1}$ 0] 的 2 倍, 随着扫描速度的增加, [001] 方向的外延生长高度基本保持不变, 但是外延比增加。此外随着扫描速度增加, 一次枝晶臂间距减小。对于单晶高温合金的多道熔融沉积, 两道之间的搭接率对熔池形态和凝固界面处的温度梯度分布具有显著影响, 适当的搭接率 (30%~34%) 有利于多道多层 LMD 工艺中

熔池形态的控制并实现单晶高温合金的连续外延生长^[27-29]。Liu 等^[30]还研究了基板温度对单晶高温合金 LMD 过程中晶体生长的影响, 发现基板温度对熔池的形状影响并不明显, 但明显改变了 CET 转变的位置和一次枝晶臂间距。在给定的工艺参数下, 较低的基板预设温度可以有效抑制杂晶的形成, 减小一次枝晶臂间距。这是由于当基板温度较低时, 一方面提高了温度梯度, 另一方面也有助于熔池朝基板方向单向散热, 这样有助于柱状树枝晶的外延生长。

2.2 基体取向对增材制造单晶高温合金组织的影响

除了激光工艺参数, 基体的晶体取向也会对沉积过程的单晶组织外延生长产生影响。Wang 等^[31-32]通过研究不同枝晶取向的基板对激光重熔过程的影响 (如图 5 和图 6 所示), 发现可以通过对基板围绕 x 轴和 z 轴进行旋转来改变基板取向, 从而影响不同优先生长方向的枝晶之间的竞争。绕 x 轴顺时针旋转会使得熔池左侧的沿 [0 $\bar{1}$ 0] 生长的枝晶逐渐沿左上方移出熔池, 当旋转角度达到 45° 时, [0 $\bar{1}$ 0] 方向的枝晶将会全部移出熔池。绕 z 轴顺时针旋转时, 熔池左侧的 [0 $\bar{1}$ 0] 方向的枝晶会向右侧移动, 而 [010] 方向的枝晶则逐渐向右侧移出至熔池外, 当旋转角度为 45° 时, [010] 方向的枝晶全部移出至熔池外。而对于绕 y 轴顺时针旋转会使得熔池上部的 [100] 方向的转向枝晶区逐渐向上移动, 在旋转至 45° 时, 全部移出熔池外最终只剩下 [001] 方向的外延生长区和两侧少量的 [010] 方向枝晶区。逆时针旋转结果则相反。此外, 还发现在不同择优生长方向枝晶的交汇处的温度梯度是整个熔池中最低的, 这样会导致这些区域容易发生 CET 转变形成等轴晶, 破坏外延生长, 绕 y 轴旋转可以有效减少等轴晶的形成。Wang 等^[33]对不同生长取向的单晶高温合金基板的激光重熔过程进行计算预测, 并对熔池中的等轴晶分布进行预测, 也得到了几乎一致的结果。这说明基板晶体取向对于熔池中的外延生长以及等轴晶形成有着显著的影响, 应当在单晶沉积过程中对其进行控制。Zhang 等^[34]通过研究发现, 枝晶凝固速度方向与扫描速度方向的夹角 θ 会对树枝晶生长的方向产生影响, 通过计算发现, 当 θ 为 45° 时, 会发生枝晶转向过程。通过实验对其进行印证发现, 改变基板取向可以减少转向枝晶层厚度, 将基板绕 [010] 旋转一定角度 Ω , 通过计算发现当 Ω 从 0° 增加至 45° 增加时, 转向枝晶层的厚度逐渐减小; 通过实验发现, 当 $\Omega=30^\circ$ 时, 顶部转向枝晶层基本消除。Liu 等^[35]研究了基板取向对外延生长的影响, 通过对熔池建立三维瞬态模型进行预测并加以实验验证, 研究发现在熔池纵向截面中, 基底晶体取向的变化主要影响 CET 转变位置, 而横截面中的基底晶体取向的变化主要影响柱状树枝晶的优先生长方向的竞争

力和相应的微观结构形成。在纵截面中,随着基板取向与 $[001]$ 方向的夹角 α 从 -30° 变化到 $+30^\circ$,外延生长的高度比从 9%增加至 94%,几乎呈线性增加。在横截面中,当基板取向与 $[001]$ 方向的夹角 β 从 0° 变化到 $+45^\circ$ 时,熔池中右侧 $[010]$ 方向外延生长柱状树枝晶区域逐渐变大,向熔池中心扩展。此外还在 LMD 过程中通过改变同轴送粉嘴与基板的夹角来研究其对熔池形状以及外延生长的影响^[36],发现增加同轴送粉嘴的倾斜度会降低沉积层的高度,同时增加了熔化深度。当送粉嘴沿激光扫描方向倾斜时,沉积层中的外

延生长高度增加;而当送粉嘴朝相反方向倾斜时,则会抑制外延生长。当送粉嘴沿激光扫描方向倾斜至 45° 时,对前一层沉积层顶部的熔化深度已经超过杂晶层高度,这意味着沉积层可以完全熔化上一层顶部的杂晶,这将有利于连续沉积层柱状晶的外延生长。

2.3 增材制造单晶高温合金组织研究进展

除了对激光增材制造单晶高温合金快速凝固过程中枝晶外延生长的研究以外,一些研究人员也对激光增材制造单晶高温合金的微观组织结构以及后续

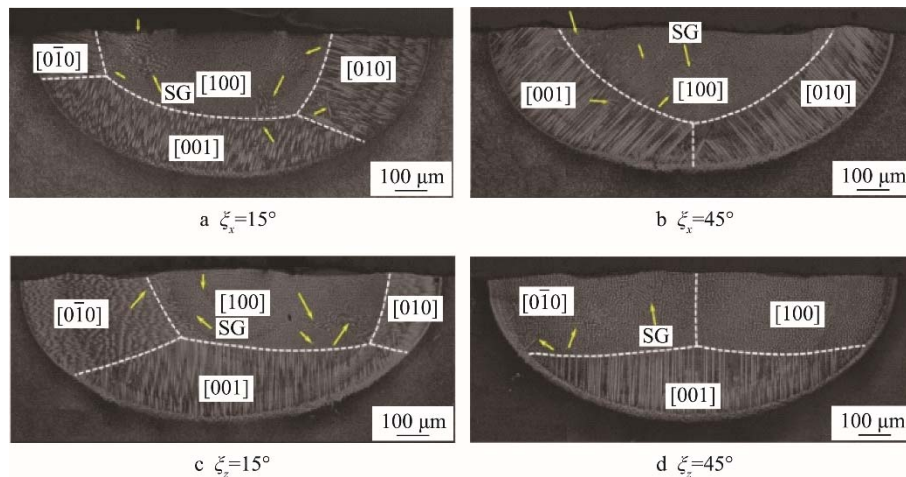


图 5 绕 x 轴与 z 轴旋转至不同角度所获得的熔池微观组织^[32]
Fig.5 Micrographs of molten bath at different orientations via x - and z -axis rotations

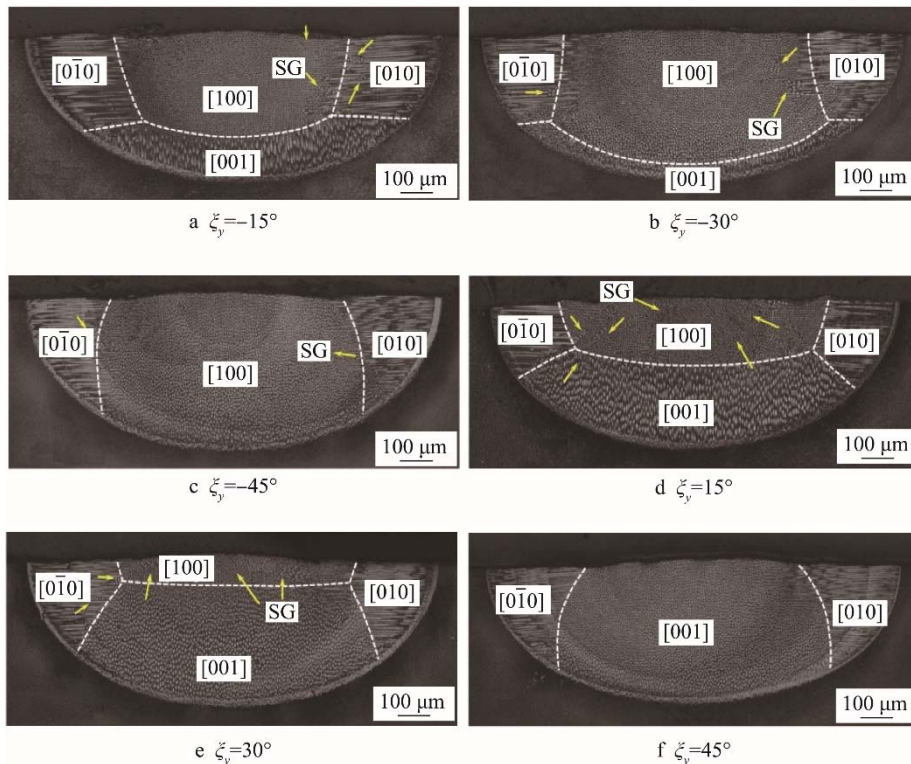


图 6 绕 y 轴旋转至不同角度所获得的熔池微观组织^[32]
Fig.6 Micrographs of molten bath at different orientations via y -axis rotation

热处理态组织结构进行了研究。梁静静等^[37]对单晶高温合金进行 LMD 过程,发现枝晶间均匀弥散分布着类圆形微观疏松和块状 MC 型碳化物。沉积态试样的 γ 基体中分布着大量纳米级 γ' 颗粒。经固溶+两级时效热处理后,试样发生完全再结晶,再结晶晶粒大小极度不均匀,部分再结晶晶粒中还存在孪晶。 γ' 析出相的尺寸分布与传统铸造合金热处理后相似。Basak 等^[38]对 René N5 单晶高温合金进行增材制造,发现外延生长的柱状树枝晶的一次枝晶臂间距比基体小约 10 倍,且由于粉末中含有微量的 B 元素和 C 元素,导致有不同形态的碳化物析出。Liang 等^[39]在考虑非平衡凝固和枝晶尖端过冷的情况下,开发了一种新的快速凝固多组分合金微观偏析模型,用于预测激光快速凝固单晶高温合金的微观偏析,研究工艺参数对微观偏析的影响。Körner 等^[40—41]利用选区电子束熔化 (Selective Electron Beam Melting, SEBM) 制备 CMSX-4 单晶高温合金,发现其一次枝晶臂间距以及成分偏析都远小于铸态组织,经热处理后成分偏析基本消除。热处理后试样的力学性能基本与铸件相当,一些性能甚至优于铸件。这主要都是由于激光加工过程属于快速凝固过程,因此可以获得比铸件更加细小的柱状树枝晶,因此一次枝晶臂间距也更小。一次枝晶臂间距、枝晶间区域的偏析和第二相的析出,对高温合金的性能产生很大的影响。Liang 等^[42]通过开发数值模型来研究激光加工参数对一次枝晶臂间距的影响,结果表明,一次枝晶臂间距在较低的激光功率下随扫描速度的增加先减小后保持不变或略微增加,而在较高的激光功率下随扫描速度的增加而减小,并且较小的激光斑点热量输入较小,这有利于获得较小的一次枝晶臂间距。最近,Chauvet 等^[43]控制 SEBM 工艺窗口,在没有选晶器和籽晶的情况下,经过前几层中不同晶粒的生长竞争后,在不锈钢基板上也成功制备出单晶高温合金。这说明利用激光增材制造技术直接制备单晶高温合金是具有可行性的。Zhou 等^[44]对单晶高温合金沉积过程中裂纹的原因进行研究,发现大角度取向差的晶界在裂纹萌生和裂纹扩展中起重要作用,凝固裂纹归因于缩孔和高熔点枝晶间碳化物,而液化裂纹主要是由低熔点化合物导致的。

3 结论与展望

激光增材制造技术作为一种新兴的制造技术,在零件制造以及修复领域的应用前景都是十分广阔的。目前就单晶高温合金制造过程而言,其制造过程仍存在许多问题,如:① 由于无法精确控制温度场,激光增材制造凝固组织中较易形成杂晶,难以得到良好且单一的单晶组织,因此更难以获得具有形状几何形状的单晶零件;② 激光与粉末之间的作用以及能量吸收机制尚未研究透彻;③ 激光加工这一快速凝固

过程的理论模型不够准确、完善,对激光加工过程的组织演化过程认识不够深入;④ 对加工过程的冶金缺陷形成机制研究不够透彻,难以很好地控制成形过程中的缺陷。这些存在的问题不仅仅存在于单晶高温合金增材制造过程中,也存在于其他金属增材制造过程中。此外,外场对金属激光增材制造的影响也研究不足,这些都是值得我们继续深入研究的问题。笔者认为如何更好地控制熔池中这一微小区域内的温度梯度以及凝固速度是研究激光快速凝固过程的重点方向。

参考文献:

- [1] 杨强,鲁中良,黄福享,等. 激光增材制造技术的研究现状及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2016, 507(12): 26—31.
YANG Qiang, LU Zhong-liang, HUANG Fu-xiang, et al. Research Status and Development Trend of Laser Additive Manufacturing Technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 507(12): 26—31.
- [2] 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.
WANG Hua-ming. Materials' Fundamental Issues of Laser Additive Manufacturing for High-Performance Large Metallic Components[J]. Acta Aeronauticae Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2690—2698.
- [3] VISWANATHAN I, GANDY D, FINDLAN S. Power Industry Experiences Surge in Welding Research[J]. Welding Journal, 2003, 82: 40—43.
- [4] VILAR R, ALMEIDA A. Repair and Manufacturing of Single Crystal Ni-Based Superalloys Components by Laser Powder Deposition-A Review[J]. Journal of Laser Applications, 2014, 27(S1): s17004.
- [5] VILAR R, ALMEIDA A, SANTOS E C. Multilayer Laser-Assisted Deposition on Single Crystal Superalloy Substrates[J]. International Journal of Microstructure and Materials Properties, 2013, 8(1/2): 4—16.
- [6] HUNT J D. Steady State Columnar and Equiaxed Growth of Dendrites and Eutectic[J]. Materials Science and Engineering, 1984, 65(1): 75—83.
- [7] GÄUMANN M, TRIVEDI R, KURZ W. Nucleation Ahead of the Advancing Interface in Directional Solidification[J]. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 1997, 226: 763—769.
- [8] GÄUMANN M, HENRY S, CLÉTON F, et al. Epitaxial Laser Metal Forming: Analysis of Microstructure Formation[J]. Materials Science and Engineering: A, 1999, 271(1): 232—241.
- [9] GÄUMANN M, BEZENÇON C, CANALIS P, et al. Single-Crystal Laser Deposition of Superalloys: Processing-Microstructure Maps[J]. Acta Materialia, 2001, 49(6): 1051—1062.

- [10] KURZ W, GIOVANOLA B, TRIVEDI R. Theory of Microstructural Development During Rapid Solidification[J]. *Acta Metallurgica*, 1986, 34(5): 823—830.
- [11] WANG G W, LIANG J J, ZHOU Y Z, et al. Prediction of Dendrite Orientation and Stray Grain Distribution in Laser Surface-melted Single Crystal Superalloy[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2017, 33(5): 499—506.
- [12] VITEK J M. The Effect of Welding Conditions on Stray Grain Formation in Single Crystal Welds-Theoretical Analysis[J]. *Acta Materialia*, 2005, 53(1): 53—67.
- [13] ANDERSON T D, DUPONT J N, DEBROY T. Origin of Stray Grain Formation in Single-Crystal Superalloy Weld Pools from Heat Transfer and Fluid Flow Modeling[J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(4): 1441—1454.
- [14] ANDERSON T D, DUPONT J N. Stray Grain Formation and Solidification Cracking Susceptibility of Single Crystal Ni-Based Superalloy CMSX-4[J]. *Welding Journal*, 2011, 90(2): 27—31.
- [15] LIANG Y J, WANG H M. Origin of Stray-grain Formation and Epitaxy Loss at Substrate during Laser Surface Remelting of Single-Crystal Nickel-Base Superalloys[J]. *Materials & Design*, 2016, 102: 297—302.
- [16] WANG G W, LIANG J J, ZHOU Y Z, et al. Variation of Crystal Orientation during Epitaxial Growth of Dendrites by Laser Deposition[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(4): 732—735.
- [17] TRAPP J, RUBENCHIK A M, GUSS G, et al. In situ Absorptivity Measurements of Metallic Powders during Laser Powder-Bed Fusion Additive Manufacturing[J]. *Applied Materials Today*, 2017, 9: 341—349.
- [18] LIANG Y J, CHENG X, LI J, et al. Microstructural Control During Laser Additive Manufacturing of Single-Crystal Nickel-Base Superalloys: New Processing-Microstructure Maps Involving Powder Feeding[J]. *Materials & Design*, 2017, 130: 197—207.
- [19] ACHARYA R, BANSAL R, GAMBONE J J, et al. A Coupled Thermal, Fluid Flow, and Solidification Model for the Processing of Single-Crystal Alloy CMSX-4 Through Scanning Laser Epitaxy for Turbine Engine Hot-Section Component Repair (Part I)[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2014, 45(6): 2247—2261.
- [20] ACHARYA R, BANSAL R, GAMBONE J J, et al. A Microstructure Evolution Model for the Processing of Single-Crystal Alloy CMSX-4 Through Scanning Laser Epitaxy for Turbine Engine Hot-Section Component Repair (Part II)[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2014, 45(6): 2279—2290.
- [21] SANTOS E C, KIDA K, CARROLL P, et al. Optimization of Laser Deposited Ni-Based Single Crystal Superalloys Microstructure[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 154/155: 1405—1414.
- [22] LIU Z Y, QI H. Effects of Processing Parameters on Crystal Growth and Microstructure Formation in Laser Powder Deposition of Single-Crystal Superalloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 216: 19—27.
- [23] LIU Z Y, QI H. Mathematical Modeling of Crystal Growth and Microstructure Formation in Multi-Layer and Multi-Track Laser Powder Deposition of Single-Crystal Superalloy[C]// 8th International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering (Lane 2014), 2014, 56: 411—420.
- [24] LIU Z Y, QI H. Numerical Simulation of Transport Phenomena for a Double-Layer Laser Powder Deposition of Single-Crystal Superalloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science*, 2014, 45A(4): 1903—1915.
- [25] LIANG Y J, LI J, LI A, et al. Experimental Optimization of Laser Additive Manufacturing Process of Single-Crystal Nickel-Base Superalloys by a Statistical Experiment Design Method[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 697: 174—181.
- [26] WANG G W, LIANG J J, YANG Y H, et al. Effects of Scanning Speed on Microstructure in Laser Surface-Melted Single Crystal Superalloy and Theoretical Analysis[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(8): 1315—1324.
- [27] LIU Z, JIANG L, WANG Z, et al. Mathematical Modeling of Transport Phenomena in Multi-Track and Multi-Layer Laser Powder Deposition of Single-Crystal Superalloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2018, 49(12): 6533—6543.
- [28] 刘朝阳, 齐欢. 镍基单晶高温合金激光多道搭接熔覆过程晶体生长行为和微观组织分布的研究[J]. *电加工与模具*, 2014, 1(1): 41—46.
- LIU Zhao-yang, QI Huan. Study of Crystal Growth and Microstructure Formation in Multi-Track Laser Powder Deposition of Nickel-Base Single Crystal Superalloy[J]. *Electromachining & Mould*, 2014, 1(1): 41—46.
- [29] 罗登, 路媛媛, 郭溪溪, 等. 单晶高温合金 V 槽的激光修复工艺研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 31—37.
- LUO Deng, LU Yuan-yuan, GUO Xi-xi, et al. Laser Repairing Process of V-Groove in Single-Crystal Superalloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 31—37.
- [30] LIU Z Y, WANG Z. Effect of Substrate Preset Temperature on Crystal Growth and Microstructure Formation in Laser Powder Deposition of Single-Crystal Superalloy[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(11): 2116—2124.
- [31] WANG L, WANG N, YAO W J, et al. Effect of Substrate Orientation on the Columnar-to-Equiaxed Transition in Laser Surface Remelted Single Crystal Superalloys[J]. *Acta Materialia*, 2015, 88: 283—292.
- [32] WANG L, WANG N. Effect of Substrate Orientation on the Formation of Equiaxed Stray Grains in Laser Surface Remelted Single Crystal Superalloys: Experimental Investigation[J]. *Acta Materialia*, 2016, 104: 250—258.
- [33] WANG G W, LIANG J J, ZHOU Y Z, et al. Effects of

- Substrate Crystallographic Orientations on Microstructure in Laser Surface-Melted Single-Crystal Superalloy: Theoretical Analysis[J]. *Acta Metallurgica Sinica-English Letters*, 2016, 29(8): 763—773.
- [34] ZHANG F Y, TAN H, CHEN J. Elimination of Turned Dendrite in Laser Multilayer Deposition of Rene88DT Superalloy on DD3 Single Crystal[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(4): 22—25.
- [35] LIU Z Y, QI H. Effects of Substrate Crystallographic Orientations on Crystal Growth and Microstructure Formation in Laser Powder Deposition of Nickel-Based Superalloy[J]. *Acta Materialia*, 2015, 87: 248—258.
- [36] LIU Z Y, QI H, JIANG L. Control of Crystal Orientation and Continuous Growth through Inclination of Coaxial Nozzle in Laser Powder Deposition of Single-Crystal Superalloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 230: 177—186.
- [37] 梁静静, 杨彦红, 周亦胄, 等. 激光立体成形镍基单晶高温合金显微组织研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(12): 3753—3759.
- LIANG Jing-jing, YANG Yan-hong, ZHOU Yi-zhou, et al. Microstructures of Nickel-Base Single-Crystal Superalloy Prepared by Laser Solid Forming[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(12): 3753—3759.
- [38] BASAK A, DAS S. Additive Manufacturing of Nickel-Base Superalloy René N5 through Scanning Laser Epitaxy (SLE)-Material Processing, Microstructures, and Microhardness Properties[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2017, 19(3): 1600690.
- [39] LIANG Y J, CHENG X, WANG H M. A New Microsegregation Model for Rapid Solidification Multi-component Alloys and Its Application to Single-Crystal Nickel-Base Superalloys of Laser Rapid Directional Solidification[J]. *Acta Materialia*, 2016, 118: 17—27.
- [40] KÖRNER C, RAMSPERGER M, MEID C, et al. Microstructure and Mechanical Properties of CMSX-4 Single Crystals Prepared by Additive Manufacturing[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science*, 2018, 49(9): 3781—3792.
- [41] RAMSPERGER M, SINGER R F, KÖRNER C. Microstructure of the Nickel-Base Superalloy CMSX-4 Fabricated by Selective Electron Beam Melting[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science*, 2016, 47(3): 1469—1480.
- [42] LIANG Y J, LI A, CHENG X, et al. Prediction of Primary Dendritic Arm Spacing During Laser Rapid Directional Solidification of Single-Crystal Nickel-Base Superalloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 688: 133—142.
- [43] CHAUVET E, TASSIN C, BLANDIN J J, et al. Producing Ni-Base Superalloys Single Crystal by Selective Electron Beam Melting[J]. *Scripta Materialia*, 2018, 152: 15—19.
- [44] ZHOU Z, HUANG L, SHANG Y, et al. Causes Analysis on Cracks in Nickel-Based Single Crystal Superalloy Fabricated by Laser Powder Deposition Additive Manufacturing[J]. *Materials & Design*, 2018, 160: 1238—1249.