

激光修复在高温合金叶片及构件用装备中的应用及发展

陈少峰¹ 李金国² 梁静静² 徐 伟¹
(1.东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室;
2.中国科学院金属研究所师昌绪先进材料创新中心高温结构材料研究部)

摘 要 高温合金由于其优异的高温力学性能和抗腐蚀性能,广泛应用于航空发动机、燃气轮机的叶片等关键热端部件。在高温、高压及腐蚀环境下的长期服役过程中,容易出现裂纹、磨损等损伤,导致零件失效。激光增材制造为高温合金叶片等损伤部件的修复再利用提供了新的可行途径。综述了激光修复技术在高温合金叶片等部件中的应用现状,重点从杂晶及裂纹两个方面分析了目前激光修复高温合金所面临的主要问题及研究现状。总结了激光修复高温合金的新手段新方法,并对激光修复高温合金的未来发展趋势进行了展望。

关键词 激光修复技术;高温合金叶片及构件用装备;杂晶;裂纹

中图分类号 TG132.3⁺2 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.11.007 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application and Development of Laser Repair in Superalloy Blades and Equipment for Components

Chen Shaofeng¹, Li Jinguo², Liang Jingjing², Xu Wei¹
(1.The State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University;
2.Shi-changxu Innovation Center for Advanced Materials, Superalloys Division,
Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences)

Abstract: Due to the excellent high-temperature mechanical properties and corrosion resistance, superalloys are widely used in critical components such as blades of aero-engines and gas turbines. In the long-term service process under high temperature, high pressure and corrosive environment, damages such as cracks and abrasion are easy to appear, leading to the failure of components. Laser additive manufacturing provides a new feasible way for the repair and reuse of damaged components such as superalloy blades. The application status of laser repair technology in superalloy blades and other components was reviewed, focusing on main problems and research status in aspects of stray grain and cracks. The new methods of laser repairing superalloys were summarized, and the future development trend was prospected.

Key Words: Laser Repair Technology, Superalloy Blades and Equipment for Components, Stray Grain, Cracks

收稿日期:2021-06-15
第一作者简介:陈少峰,男,1995 年出生,硕士研究生,沈阳(110016),E-mail:csf1125@126.com
通信作者:李金国,男,1975 年出生,研究员,沈阳(110016),E-mail:jgli@imr.ac.cn
引用格式:陈少峰,李金国,梁静静,等. 激光修复在高温合金叶片及构件用装备中的应用及发展[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(11):1 354-1 360.
CHEN S F, LI J G, LIANG J J, et al. Application and development of laser repair in superalloy blades and equipment for components[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(11):1 354-1 360.

[12] 黄卫东,林鑫,陈静. 激光立体成形——高性能致密金属零件的快速自由成形[M]. 西安:西北工业大学出版社,2007.

[13] 张剑峰,张建华,赵剑峰,等. 激光快速成形制造技术的应用研究进展[J]. 中国学术期刊电子出版社,2002(7):36-37.

[14] 刘录录,孙荣禄. 激光熔覆技术及工业应用研究进展[J]. 热加工工艺,2007,36(11):58-61.

[15] 高阳,佟百运,梁勇,等. 激光熔覆 Ni 基合金涂层的结构与性能[J].材料研究学报,2003,17(1):87-91.

[16] 黄健,姜山. 3D 打印技术将掀起“第三次工业革命”? [J]. 新材料产业,2013(1):62-63.

[17] 赵成磊,刘纪德,李金国,等. 激光增材制造 98M 合金的微观组织[J]. 稀有金属材料与工程,2017, 46 (10): 2 999-3 004.

[18] TAUNT R J, RALPH B. Observations of the fine structure of su-

perdislocations in Ni₃Al by field-ion microscopy[J]. Philosophical Magazine, 1974, 30(6): 1 379-1 394.

[19] HANCOCK J, DILLAMORE I L, SMALLMAN R E. The creep of dispersion-strengthened Ni-Co alloys[J]. Metal Science, 1972, 6(1): 152-156.

[20] GLATZEL U, FELLER-KNIEPMEIER M. Microstructure and dislocation configurations in fatigued[001]specimens of the nickel-based superalloy CMSX-6[J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1991, 25(8): 1 845-1 850.

[21] VEYSSIERE P, YOO M H, HORTON J A, et al. Temperature effect on superdislocation dissociation on a cube plane in Ni₃Al[J]. Philosophical Magazine Letters, 1989, 59(2): 61-68.

(编辑:彭瑾)

高温合金由于其高耐温性和高耐腐蚀性,已广泛用于航空发动机和燃气轮机的涡轮叶片、涡轮盘和燃烧器等关键热端部件。由于高温合金叶片结构复杂,铸造过程中难度大、要求高,容易产生裂纹、缩松、浇不足等铸造缺陷,铸件品质难以稳定控制,部件成品率低。这些昂贵的热端部件需要在高温、高压、腐蚀的服役环境中长期反复使用,并在振动、离心力和流体力的作用下容易出现裂纹、磨损、腐蚀坑等损伤,导致零件失效。除此之外,叶片在后续的机加工过程中出现的加工缺陷也是导致叶片报废的一个重要原因。航空发动机叶轮、叶片等部件生产成本不仅非常昂贵,而且生产周期长,一般来说,其价值占整机价值的 20%~30%,倘若直接更换则会造成严重的经济损失。而发生在叶片表面的损伤大都可以通过修复实现再利用,因此开展高温合金部件修复工艺的研究,延长零件寿命和使用率,减少对新部件的需求量就非常有意义^[1]。目前高温合金热端部件的修复手段主要有真空钎焊、真空涂层法、等离子熔覆等。但这些方法热输入量大,容易出现裂纹和变形,无法满足精密零件修复要求。激光熔覆具有激光能量密度高、热影响区小、稀释率低等特点,可以实现零件的高精度、高效率、低成本的修复^[2],国内外学者对激光修复高温合金开展了大量的研究和试验。

本课题综述了国内外高温合金叶片及构件用装备的发展情况,分析了激光修复过程中缺陷的影响因素及控制方法,并对其在未来的应用和发展进行了展望。

1 激光修复技术

SMEGGIL J G^[3]在 20 世纪 80 年代提出在金属表面熔覆一层金属,称之为激光熔覆技术。激光修复技术是在激光熔覆技术基础上的进一步发展。激光修复技术包括激光熔覆修复(Laser Cladding Repair, LCR)、激光沉积修复(Laser Deposition Repair, LDR)和激光成形修复(Laser Forming Repair, LFR)。激光修复技术与激光 3D 打印技术相近,但更加关注修复过程对基体的热损伤、修复材料与基体的热物性以及修复后零件的整体力学性能等问题。激光修复根据待修复零件的三维模型数据,使材料逐点、逐线、逐层堆积,利用高能激光束辐照基体和粉末形成熔池,熔池中的合金粉末与基体达到良好的冶金结合;高能量激光加热是一个快速熔化快速冷却的过程,对基体热输入量小,稀释率低,基材熔化区可以控制在几十 μm 甚至更小,修复后组织具有均匀细小、无宏观偏析等特点,而且激光修复技术操作灵活,自动化程度高。除此之外,相较于其他修复方法,激光修复在修复零件力学性能和成形性方面也有着

独特的优势:可以使多种材料复合,适应不同零件不同部位的力学性能,而且其柔性化制造特点可以对零件不同形状、不同位置的损伤部位进行修复。目前,激光修复技术已成为工业领域绿色制造不可或缺的重要技术手段,在航空发动机叶片、汽轮机叶片、模具、轧辊、阀门喷嘴以及传动齿轮等众多领域的损伤零部件修复上取得了应用。

2 激光修复技术在高温合金叶片及构件用装备中的应用

20 世纪 80 年代初,Rolls Royce 公司首先将激光熔覆技术用在强化 RB211 发动机涡轮叶片冠部阻尼面。随后,激光修复技术在航空航天及地面装备高温合金零部件修复领域得到重视。1983 年,美国 GE 公司使用激光修复技术修复了发动机叶片,并将激光熔覆技术列为该公司 20 世纪 90 年代十大新技术之一。美国 Sandia 试验室研制的激光工程化净成形(Laser Engineered Net Shaping, LENS)技术,由于其组织致密、力学性能出色、后处理简单等特点,已应用在美国 T700 黑鹰直升机发动机叶片、叶轮和 Abrams M1 坦克燃气涡轮发动机零部件的修复中^[4]。美国 Huffman 公司开发的激光熔覆沉积叶片修复系统已对航空发动机一二级普通高温合金叶片、定向凝固叶片甚至单晶叶片进行了修复。此外,早在 20 世纪 90 年代,美国便开始建立“机动部件医院”(Mobile Parts Hospital, MPH),目的是将激光增材设备移至前线,就地制造、修复所需零件以及损伤零件,截止 2010 年美国陆军已有 4 套 MPH,在使用的第一个十年中便为美国制造和修复了 15 万个以上战场急需零部件,大大缩减了从仓库运输零部件至战场的时间和成本。随后美军又开发出 MPH 2.0 版本“移动技术复合体”(Mobile Technology Complex, MTC)和 MPH 3.0 版本“Ex Lab”(Expeditionary Lab),可以制造和修复更为特殊、复杂的零部件。与此同时,其他国家也将激光修复技术应用于高温合金热端部件的修复中。韩国空军使用激光修复技术修复了 F-15K 战机的涡轮盘部件;意大利米兰工大与 ENEL/CRTN 和意大利 CISE S. P. A Segrate(MI)联合研究了 X-40 导向叶片和 IN718 转子叶片的修复技术,可以将叶片的损伤失效区域激光切除后激光焊接上修复材料^[5]。

国内燃气轮机热端部件激光修复的应用起于 20 世纪 90 年代初对 WP7-201 发动机叶片平行冠磨损减尺的修复^[5]。我国在近十年激光修复技术的研究中也取得了飞速发展。刘其斌等^[6]研究了工艺参数和 Y_2O_3

对 K417G 熔覆层开裂的影响,并成功修复了发动机叶片。卞宏友等^[7]通过激光修复的 GH738 零件室温抗拉强度和屈服强度分别达到了锻件标准的 78.2% 和 85%。卢朋辉等^[8]通过优化试验工艺参数,采用合适的激光功率,光斑直径以及扫描速度,修复得到几乎无裂纹的 K418 高温合金发动机涡轮叶片。林鑫等^[9]对于航空零件的激光修复工艺以及组织性能控制一体化进行了系统研究,并应用在多种型号航空航天飞行器关键零件的修复中。西安交通大学联合华中科技大学及空军装备部武汉汽车修理厂研制了“战场环境 3D 打印维修保障系统”,有望成为新一代“MPH”,为我军下一代战场中修复损伤失效的关键零件提供保障。2020 年,国内首个智能化现场激光增材修复与再制造共享方舱项目在安徽芜湖开工,计划研制移动式激光修复与再制造方舱系统、激光修复与再制造工艺数据库系统,构建智能化现场激光修复与再制造服务平台,推动激光修复与再制造技术在航空航天、舰船装备等多领域的产业化应用。虽然我国在激光修复高温合金叶片及构件的应用已有很大进步,但在移动性和产业化应用等方面与美国等国家相比仍存在差距。

3 激光修复高温合金叶片及构件用装备修复中存在的问题

3.1 杂晶

单晶高温合金显著减少了晶界数量,比多晶高温合金在高温下表现出更好的蠕变抗性,成为航空发动机叶片的首选材料。GÄUMANN M 等^[10]首先提出了激光修复单晶高温合金的可行性。而在激光修复过程中,等轴晶和无取向的柱状晶会打断单晶的外延生长,因此控制熔池中枝晶生长形态在单晶高温合金修复中尤为重要。为了避免激光熔覆过程中的形核,KURZ W 等^[11]提出了柱状晶到等轴晶转变(Columnar to Equiaxed Transition,CET)理论,该理论将温度梯度和凝固速度相关联,通过改善熔池凝固条件,即提高温度梯度与凝固速度的比值可以抑制杂晶的形成。为了方便将 CET 与凝固条件联系起来,GÄUMANN M 等^[12]在 KURZ W 等^[11]研究的基础上,进一步给出复杂多组分合金的简化 CET 准则:

$$\frac{G^n}{v} = K$$

式中, G 为温度梯度; n 和 K 为与材料相关的常量; v 为枝晶生长速度。将得到的工艺-微观结构图与热流模型解析计算出的局部凝固条件与激光加工参数的关系相结合,提出激光修复加工窗口的概念,计算出了 CMSX-

4 实现柱状晶凝固生长所需的温度梯度。只有使工艺参数(激光功率、扫面速度、光束直径等)满足柱状晶生长和基体充分重熔这两个条件时,才有可能实现单晶沉积。

以上研究为激光修复单晶高温合金提供了基本理论支撑,但 GÄUMANN M 等^[12]提出的平均比值 G^n/v 很难反应出真实固液界面处的 CET 转变。因此,后续研究采用了更精确的传热和流体流动计算模型相结合,并预测杂晶的形成。研究发现,随着扫描速度增加,杂晶数量先增加后降低,激光功率的增加则会使杂晶增加^[13~15]。同时,ANDERSON T D 等^[14]发现,在不同择优取向交点处的温度梯度最小,CET 转变倾向最大,随后 WANG L 等^[16]也得出同样的结论,并发现沿 [010] 方向旋转 45° 熔池无交点,CET 转变倾向最小,这使得通过减少交点控制杂晶形成而成功修复高温合金部件成为可能。工艺参数上,除了上述的扫描速度和激光功率,扫描方式也会对杂晶的形成起到影响。LIU Z Y 等^[17]发现在单轨熔覆时,与单向扫描方法相比, X 、 Y 方向交替扫描有助于柱状晶的连续生长。但在多层外延生长中,由于激光扫描方向的改变会导致局部凝固条件如热积累和热流方向的改变,从而诱导外延枝晶沿激光扫描方向偏转或绕外延生长方向旋转,双向激光扫描模式反而阻碍了柱状晶的连续生长^[18]。此外,枝晶偏析也会导致杂晶的形成。LIANG Y J 等^[19]在激光重熔试验时发现,未固溶基体中的枝晶偏析会导致杂晶的形成,而固溶处理后则减轻了杂晶倾向,因此对基体进行适当的固溶处理可以避免杂晶形成。随后 LIU G 等^[20]发现碳化物和共晶相周围出现了取向混乱的杂晶,这是元素偏析形成的碳化物和共晶相的熔化所导致的,而将热输入降低到 50 J/mm 则可以控制碳化物和共晶周围杂晶的形成。

基体的取向对柱状晶的外延生长同样起到关键作用^[16,21]。研究表明,将单晶基板绕 X 、 Y 和 Z 轴旋转,这与 [100]、[010] 和 [001] 晶体学方向一致,基体取向的改变同时改变了枝晶生长速度和温度梯度在枝晶生长方向上的分量,当 (001) 面绕 [010] 旋转 45° 时杂晶控制水平是最优的(见图 1)。目前对基体取向的研究主要集中在传统 (001) 和 (011) 晶面,但最近发现,镍基高温合金在 (111) 面的 [111] 晶向有着最佳杨氏模量,研究 (111) 面的杂晶生长规律显得极为重要。GUO J C 等^[22,23]沿单晶 DD6 (111) 平面的不同晶向进行激光修复研究其杂晶生长情况,并与 (001) 和 (011) 晶面的结果进行比较,发现对杂晶形成的抵抗能力以 (111) < (001) < (011) 的顺序在增强,而在 (011) 面沿 [100] 方向进行修复可以最有效地抑制杂晶的产生,见图 2。

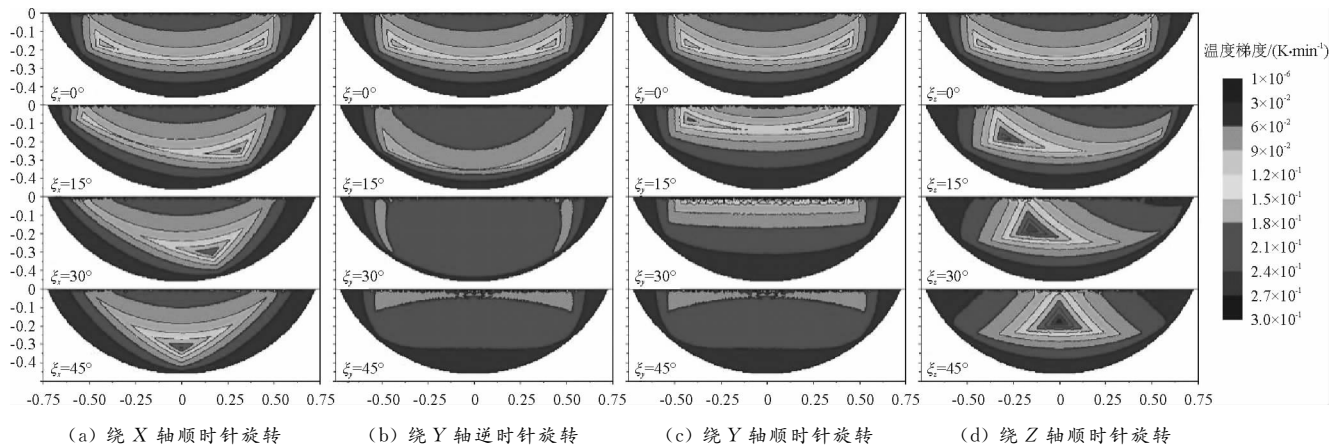


图 1 等轴晶分布随基体取向的变化^[16]

Fig.1 The distribution variation of equiaxed crystals with the orientation of the matrix^[16]

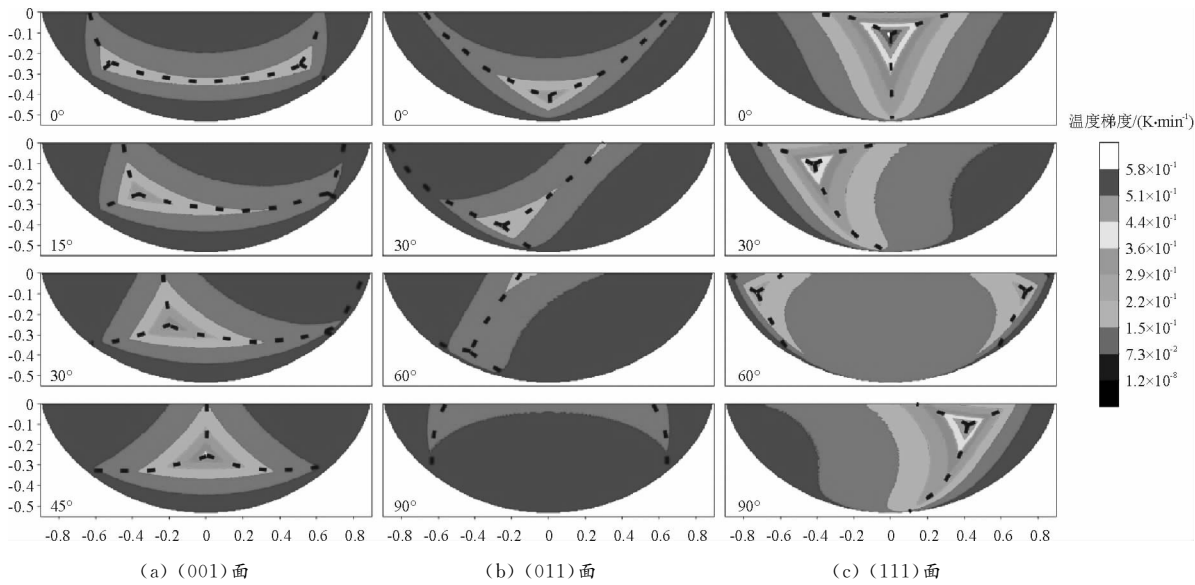


图 2 不同晶面等轴晶分布情况^[23]

Fig.2 Distribution of equiaxed crystals with different crystal planes^[23]

除此之外,LIU Z Y 等^[24]和 NIE J W 等^[25]还研究了基体预设温度对于杂晶生长的影响,发现以较低的基体温度增加熔池中温度梯度可以抑制杂晶的形成。水冷条件下试样外延生长的高度较空冷试样增加了约 50%,见图 3。同时 LIU Z Y 等^[24]提出,对于多层外延生长过程中,基体温度要低于 90℃才能保证多层沉积层中相邻层之间的杂晶完全重熔,达到较好的修复效果。以上激光修复高温合金均是在基材平面的条件下实现的,而在实际应用中,需要修复的高温合金零部件几何形状复杂,在对形状复杂的缺陷进行修复时,缺陷的几何形状可以改变激光熔覆过程中的散热条件,促进局部杂晶的形成。因此 CHEN H 等^[26]通过热流方向和枝晶生长方向决定的离轴热流角(β)来评估杂散晶粒的形成,并成功修复了 V 型槽缺陷。

综上所述,工艺参数对温度梯度和枝晶生长速度的影响,基体预设温度、基体取向,以及枝晶偏析等,都将

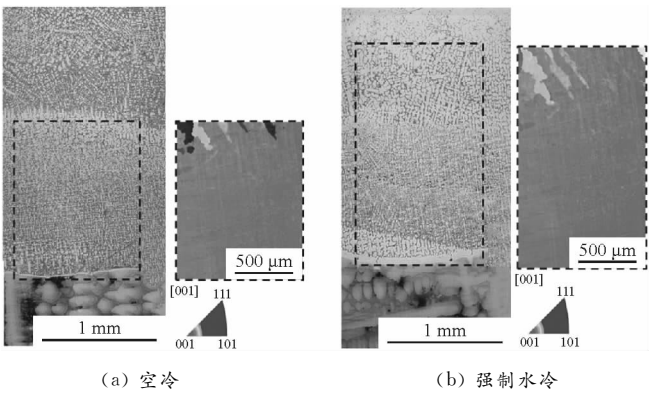


图 3 直接能量沉积(DED)试样纵截面光学显微图
和 EBSD 晶粒结构图^[25]

Fig.3 Optical micrographs and EBSD grain-structure maps of longitudinal section of direct energy deposition (DED) specimens^[25]

影响激光修复中杂晶的产生,在实际生产中应综合考虑诸多因素,尽可能较少或避免杂晶的形成。不过,目前

对于杂晶的研究主要集中在控制 CET 转变,即柱状晶向等轴晶的转变上,而不同取向的柱状晶同样会影响单晶的外延生长,该方面研究还需继续深入。

3.2 裂纹

为了获得良好的蠕变抗性,高温合金中普遍存在 40%~80% 的 γ' -Ni₃(Al,Ti) 金属间化合物,导致高温合金的不可焊性^[27]。因此,在高温合金激光修复过程中,裂纹成为一种常见的缺陷,与杂晶相比对零件的影响更大,可能直接导致零件报废。常见的裂纹有凝固裂纹和热裂纹,凝固裂纹在凝固最后阶段产生,保留在熔覆层顶部,而热裂纹在热影响区形成并保留下来,对于合金的危害更大。目前,对于激光修复单晶高温合金、多晶高温合金以及定向凝固高温合金中热裂形成机制,影响因素以及控制方法都有了一定进展。热裂产生的主要原因是由于凝固时枝晶间或晶界处的液膜被撕裂。由于组分液化或者晶界低熔点相液化,部分长大的晶粒在未封闭的晶界上接触形成了液膜,导致合金流动性不足,在热应力作用下,晶粒间的不稳定接触导致了热裂

的产生^[28]。另外,激光修复的工艺参数对热裂的产生同样起到关键作用,激光功率、扫描速度等都会改变热量传输过程,影响熔池内的热应力分布,同时还会影响杂晶的形成进而产生热裂。研究发现,热裂的敏感度与晶界的位相差高度相关,晶界位相差越大越容易产生热裂,见图 4,而在较小的晶界角度范围内存在一个不发生热裂的临界角度^[27~30]。这是因为在单晶中或者小角度晶界中,相邻枝晶臂相互桥接,将液膜分离成离散的液滴,枝晶臂承担了大部分应力使得液膜处应力集中小,而在大角度晶界中的液膜稳定性高并且高应力集中^[31]。也有研究表明,大角度晶界处的液膜在晶粒聚集前需要克服很大的排斥力,导致液膜处低剪切强度区域延伸,应变高度局域化,导致热裂的产生^[32]。ZHANG Z L 等^[33]在高 Hf 的 K447A 合金中发现,晶间组织的不均匀性会导致液膜的厚度不均匀,初熔区域的液膜最厚,其次是菊花状 γ/γ' 界面处,最薄的液膜在其他晶界处,而厚液膜处热裂的敏感性更大,并提出了判断液膜是否会开裂的两个判据。

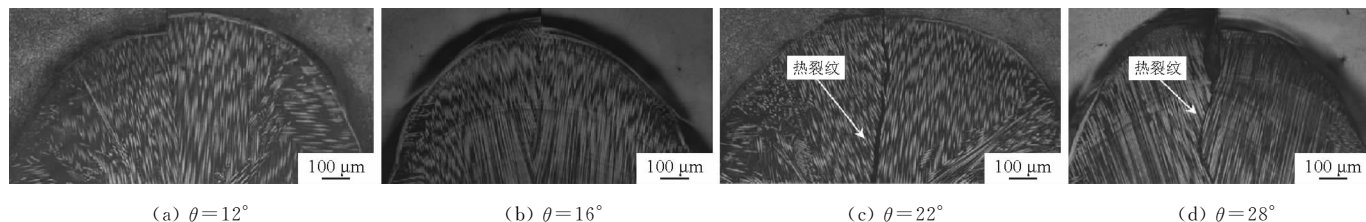


图 4 不同角度晶界位相差双晶焊接微观组织^[30]

Fig.4 Microstructure of welded bicrystals with different angles of grain boundary^[30]

为了减少或消除热裂的产生,降低液膜在枝晶间或晶界处的应力集中,根据合金成分和合金零件实际情况调整工艺参数十分重要。首先,由于杂晶的存在会引入薄弱的晶界,导致热裂倾向加剧,因此提到的减少并消除杂晶的工艺参数也可以参考至此,增大扫描速度,降低功率,可以消除杂晶并避免热裂^[34]。CHEN Y 等^[35]研究表明,当热输入和高度增量不变时,增加扫描速度将增大热裂倾向;当扫描速度和高度增量不变时,热输入增加则会增加热裂倾向。此外,ZHANG X Q 等^[36]还发现,当热输入过高时会形成长直晶界,并对热裂纹的萌生与发展有明显的促进作用,因此减少热输入和采用双向扫描方法可以减少长直晶界数量并消除热裂。图 5 为激光输入角度与裂纹率的关系。CHEN Y 等^[37]发现,通过加大激光输入角改善了横向温度梯度,提高了激光沉积过程中的散热均匀性,有效降低了热影响区热裂的敏感性,XU J J 等^[38]和 BIDRON G 等^[39]在激光修复高温合金基体时进行预热,同样降低了残余应力,抑制了热裂的产生。

将杂晶控制工艺与裂纹控制工艺相结合,能得出一

个更优的加工窗口,针对不同合金体系,还需进行深入探索。

4 激光修复高温合金叶片及构件用装备的新探索

除了对损伤部位进行传统的直接激光沉积,目前还通过一些新的手段在激光修复过程中进行辅助或者作用于修复组织,达到改善组织,提高合金修复后性能的

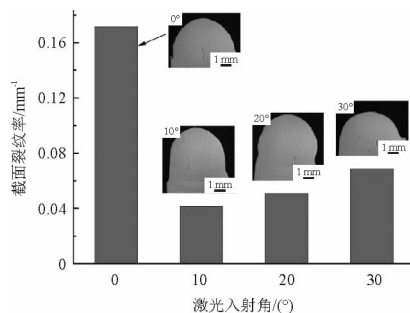


图 5 不同激光输入角度下截面裂纹率的分布^[37]

Fig.5 Distribution of section crack rate at different laser input angles^[37]

目的。CHENG H M 等^[40]采用电磁搅拌辅助激光修复技术(EMS-LR)对带有 V 槽的 Inconel718 合金进行了不同磁场电流下的修复,电磁搅拌对热传递有一定影响,在一定程度上可以改善液态金属的扩散,并抑制由液态金属对流影响的 Laves 相的形成,改善了修复合金的拉伸性能。LI Q Q 等^[41]采用超声微锻造处理作用在 45 号钢上的 GH3039 熔覆层,由于在凝固过程中产生振动引起柱状晶破裂,细化了熔覆层晶粒,而且减少了缺陷,提升了熔覆层的力学性能,也为改善激光修复高温合金零部件提供了一个可能的方法。ZHANG P Y 等^[42]采用激光冲击强化技术对激光熔覆修复的 K403 合金修复区进行表面强化,使表层晶粒得到细化。此外,激光冲击能引入较大的残余应力,这些因素共同作用提高了修复构件的高温拉伸强度。CHEN Y 等^[43]还将碳纳米管加入到激光沉积的 IN718 合金中,发现碳纳米管桥接了 Laves 相和枝晶间结合区域,增强了枝晶间应力传递,抑制了热影响区中的热裂。

5 结 语

激光修复由于其热输入量少,热影响区小,稀释率低,易实现自动化等特点,成为修复高温合金叶片等构件的关键手段。在今后的修复过程中,不仅要针对工艺参数进行优化,防止杂晶以及裂纹的产生,还需实现熔覆材料的突破,研发适合打印的高温合金粉末。另外,不断完善激光修复过程中热场与应力场的模拟研究,为基础研究打下坚实理论基础。最后,加快可移动激光修复系统的研发,将激光修复技术应用到零部件服役现场以及战场,必将成为不可或缺的关键要素。激光修复在未来数十年将为高温合金叶片或构件用装备提供强有力的保障。

参 考 文 献

- [1] WILSON J M, PIYA C, SHIN Y C, et al. Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 80: 170-178.
- [2] 薛蕾,黄卫东,陈静,等.激光成形修复技术在航空铸件修复中的应用[J].*铸造技术*, 2008, 39(3): 391-394.
- [3] SMEGGIL J G, BORNSTEIN N S, BROWN C O. High temperature coating by surface melting. US Patent: 4451299[P]. 1984-5-29.
- [4] 张凯,刘伟军,尚晓峰,等.快速原型技术在国防科技中的应用[J].*工具技术*, 2005, 39(11): 3-13.
- [5] 王茂才,吴维.先进的燃气轮机叶片激光修复技术[J].*燃气轮机技术*, 2001, 4(4): 53-56.
- [6] 刘其斌,李绍杰.航空发动机叶片铸造缺陷激光熔覆修复的研究[J].*金属热处理*, 2006, 31(3): 52-55.
- [7] 卞宏友,翟泉星,李英,等.激光沉积修复 GH738 高温合金的组织与

拉伸性能[J].*中国激光*, 2017, 44(10): 73-78.

- [8] 卢朋辉,刘建睿,薛蕾,等.激光成形修复 K418 高温合金的显微组织与开裂行为[J].*稀有金属材料与工程*, 2012, 41(2): 315-319.
- [9] 林鑫,黄卫东.应用于航空领域的金属高性能增材制造技术[J].*中国材料进展*, 2015, 34(9): 684-688, 658.
- [10] GÄUMANN M, HENRY S, CLÉTON F, et al. Epitaxial laser metal forming: analysis of microstructure formation[J]. *Materials Science and Engineering*, 1999, A271(1-2): 232-241.
- [11] KURZ W, BEZENÇON C, GÄUMANN M. Columnar to equiaxed transition in solidification processing[J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2001, 2(1): 185-191.
- [12] GÄUMANN M, BEZENÇON C, CANALIS P, et al. Single-crystal laser deposition of superalloys: Processing-microstructure maps[J]. *Acta Materialia*, 2001, 49(6): 1 051-1 062.
- [13] ANDERSON T D, DUPONT J N, DEBROY T. Stray grain formation in welds of single-crystal ni-base superalloy CMSX-4[J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2009, A41(1): 181-193.
- [14] 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): 1 441-1 454.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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[J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 411-420.
- [18] CHEN H, HUANG G, LU Y, et al. Epitaxial laser deposition of single crystal Ni-based superalloy: Variation of stray grains[J]. *Materials Characterization*, 2019, 158: 109 982.
- [19] 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.
- [20] LIU G, DU D, WANG K, et al. Epitaxial growth behavior and stray grains formation mechanism during laser surface re-melting of directionally solidified nickel-based superalloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 853: 157 325.
- [21] 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.
- [22] GUO J C, CHEN W J, YANG R N, et al. The effect of substrate orientation on stray grain formation in the (111) plane in laser surface remelted single crystal superalloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 800: 240-246.
- [23] GUO J C, RONG P, WANG L, et al. A comparable study on stray grain susceptibilities on different crystallographic planes in single crystal superalloys[J]. *Acta Materialia*, 2021, 205: 116

- 558.
- [24] 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): 2 116-2 124.
- [25] NIE J W, CHEN C Y, LIU L T, et al. Effect of substrate cooling on the epitaxial growth of Ni-based single-crystal superalloy fabricated by direct energy deposition[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 62: 148-161.
- [26] CHEN H, LU Y Y, LUO D, et al. Epitaxial laser deposition of single crystal Ni-based superalloys: Repair of complex geometry [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 285: 116 782.
- [27] LIU G, DU D, WANG K M, et al. Hot cracking behavior and mechanism of the IC10 directionally solidified superalloy during laser re-melting[J]. Vacuum, 2020, 181: 109 563.
- [28] ZHANG Y C, YANG L, CHEN T Y, et al. Sensitivity of liquation cracking to deposition parameters and residual stresses in laser deposited IN718 alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(11): 5 519-5 529.
- [29] CHAUVET E, KONTIS P, JÄGLE E A, et al. Hot cracking mechanism affecting a non-weldable Ni-based superalloy produced by selective electron beam melting[J]. Acta Materialia, 2018, 142: 82-94.
- [30] RONG P, WANG N, WANG L, et al. The influence of grain boundary angle on the hot cracking of single crystal superalloy DD6[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 676: 181-186.
- [31] 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.
- [32] WANG N, MOKADEM S, RAPPAZ M, et al. Solidification cracking of superalloy single- and bi-crystals[J]. Acta Materialia, 2004, 52(11): 3 173-3 182.
- [33] ZHANG Z L, ZHAO Y, SHAN J G, et al. Evolution behavior of liquid film in the heat-affected zone of laser cladding non-weldable nickel-based superalloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 863: 158 463.
- [34] PARK J W, VITEK J M, BABU S S, et al. Stray grain formation, thermomechanical stress and solidification cracking in single crystal nickel base superalloy welds[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2013, 9(6): 472-482.
- [35] CHEN Y, ZHANG K, HUANG J, et al. Characterization of heat affected zone liquation cracking in laser additive manufacturing of Inconel 718[J]. Materials & Design, 2016, 90: 586-594.
- [36] ZHANG X Q, CHEN H B, XU L M, et al. Cracking mechanism and susceptibility of laser melting deposited Inconel 738 superalloy [J]. Materials & Design, 2019, 183: 108 105.
- [37] CHEN Y, LU F G, ZHANG K, et al. Investigation of dendritic growth and liquation cracking in laser melting deposited Inconel 718 at different laser input angles[J]. Materials & Design, 2016, 105: 133-141.
- [38] XU J J, LIN X, GUO P F, et al. The initiation and propagation mechanism of the overlapping zone cracking during laser solid forming of IN-738LC superalloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 749: 859-870.
- [39] BIDRON G, DOGHRI A, MALOT T, et al. Reduction of the hot cracking sensitivity of CM-247LC superalloy processed by laser cladding using induction preheating[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 277: 116 461.
- [40] CHENG H M, LIU F H, YANG G, et al. Microstructure and tensile property of electromagnetic stirring assisted laser repaired inconel718 superalloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(10): 2 949-2 956.
- [41] LI Q Q, ZHANG Y, CHEN J, et al. Effect of ultrasonic micro-forging treatment on microstructure and mechanical properties of GH3039 superalloy processed by directed energy deposition[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 70: 185-196.
- [42] ZHANG P Y, WANG C, XIE M Y, et al. Effect of laser shock processing on microstructure and properties of K403 alloy repaired by laser cladding[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46 (9): 906 003.
- [43] CHEN Y, LU F G, ZHANG K, et al. Laser powder deposition of carbon nanotube reinforced nickel-based superalloy Inconel 718 [J]. Carbon, 2016, 107: 361-370.

(编辑:彭瑾)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志,是中国科学技术协会主管,中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿,征稿内容包括:各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,此外还包括各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

《特种铸造及有色合金》杂志社

地址:武汉市江岸区江大路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

