

辅助技术在激光熔覆中对缺陷的作用

夏朋朋, 章子乐, 郑伊诺, 袁哲渔, 陈家乐, 邱乐, 张伊诺, 赵向东, 徐梓军, 梁佳琪, 耿燕飞, 方铁辉

温州大学机电工程学院 浙江温州 325035

摘要: 综述了稳态磁场、超声波振动及液氮强制冷却3种辅助技术在激光熔覆过程中的运用, 以及对减少缺陷和改善熔覆层力学性能的影响。稳态磁场通过增强流体黏滞效应, 减缓熔池流速, 进而抑制气孔的形成。超声波振动则借助声流效应和空化效应, 降低熔池温度梯度, 细化晶粒, 并有效抑制裂纹, 从而提升熔覆层的力学和摩擦性能。液氮强制冷却通过加速冷却过程, 提高温度梯度, 减小残余应力, 显著增强熔覆层的硬度和耐磨性。辅助激光熔覆的意义在于其能够解决传统激光熔覆过程中存在的一些难题, 不仅可以推动激光熔覆技术的进步发展, 还可以为材料科学应用领域提供高性能的材料。

关键词: 激光熔覆; 辅助技术; 降低缺陷

The role of auxiliary technology in defect reduction during laser cladding

XIA Pengpeng, ZHANG Zile, ZHENG YINUO, YUAN Zheyu, CHEN Jiale, QIU Le, ZHANG YINUO,

ZHAO Xiangdong, XU Zijun, LIANG Jiaqi, GENG Yanfei, FANG Tiehui

School of mechanical and electrical engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, Zhejiang, China

Abstract: Steady-state magnetic fields, ultrasonic vibration, and liquid nitrogen forced cooling are three auxiliary technologies widely applied in laser cladding. Auxiliary technologies can reduce defects in the cladding layer and enhance its mechanical properties. Steady-state magnetic fields cannot completely eliminate pores, suppressing pore formation by enhancing the fluid's viscosity effect. Ultrasonic vibration can reduce the temperature gradient in the melt pool and decrease the size of grains through the effects of acoustic streaming and cavitation. Ultrasonic vibration can enhance the mechanical and tribological properties of the cladding layer. Liquid nitrogen forced cooling accelerates the cooling process, thereby reducing residual stress, which leads to an increase in the hardness and wear resistance of the cladding layer. The significance of auxiliary technologies in addressing the challenges in traditional laser cladding processes. Auxiliary technologies not only advance laser cladding technology but also provide high-performance materials for the field of materials science.

Keywords: laser cladding; auxiliary technology; defect reduction

1 序言

随着科技的不断发展进步, 各类机械对材料及

其构成的零部件在力学性能上提出了更为严苛的要求。采用激光熔覆技术制备或修复的零部件, 往往

基金项目: 国家自然科学基金项目(51701069); 中央高校专项支持计划(531118040070); 浙江省教育厅一般科研项目(Y202351914)。

第一作者: 夏朋朋, 硕士, 研究方向为增材制造技术, E-mail: 1598638864@qq.com。

通信作者: 耿燕飞, 讲师, 研究方向为增材制造技术, E-mail: 9600838317@qq.com。

需要在极其复杂的极端环境下长时间工作，为了确保这些零部件在极其苛刻的工作条件下能够安全、可靠地发挥作用，需要最大程度地减少熔覆层的缺陷^[1]。

辅助激光熔覆技术的重要性在于解决传统激光熔覆中的难题，如裂纹、气孔和柱状晶粗大等缺陷，这些缺陷极大地限制了激光熔覆技术的发展与应用。激光熔覆作为一种先进的表面处理技术，通过高能激光束将熔覆材料加热至熔化状态，并沉积在基材表面，形成具有特定化学和物理性能的涂层，赋予材料能够适用各复杂环境的特性，比如耐高温、耐腐蚀等。这些特性在航空航天、汽车制造、模具加工、冶金、机械工程、化工及医疗等领域得到了广泛应用，显著提升了产品的质量和耐用性。

然而，受限于激光熔覆的固有属性，一些高性能的特种合金材料在激光熔覆过程中容易出现组织粗大、成分分布不均及残余应力过高的问题。这些问题往往导致缺陷的形成，从而构成了阻碍受损特种合金机械零件再利用的核心技术难题^[2]。为了提升熔覆层质量，减少缺陷，研究者们探索了多种辅助技术，即在激光熔覆过程中引入外部因素，以提高熔覆层质量，细化微观组织，改善性能。这些技术包括稳态磁场、超声振动和液氮强制冷却等，能够细化熔覆层晶粒尺寸，控制成分偏析，降低残余应力水平，减少气孔，抑制裂纹的产生，从而充分发挥激光熔覆技术的优势^[3]。

为了提高熔覆层的质量，减少缺陷，研究者们探索了多种辅助技术，即通过在激光熔覆过程中施加场外因素来提高熔覆层质量的技术，实现提高熔覆层质量、细化微观组织、改善性能的目的。辅助技术具有多样性，可以根据环境、材料等选择合适的辅助方法，以达到最好的效果，其中就包括但不仅限于稳态磁场、超声波振动以及液氮强制冷却。这些辅助技术都可以降低激光熔覆过程中的缺陷，赋予材料更高的性能，这已经成为了激光熔覆发展进步的关键^[4, 5]。

2 稳态磁场辅助激光熔覆

激光熔覆技术涵盖了错综复杂的物理冶金过程，期间极易诱发气孔的形成。这些气孔可能起因

于保护气体的卷入或是界面熔合的不充分，以及熔池中金属粉末与氧的反应等^[6]。在疲劳载荷下，气孔不仅影响零件性能和寿命，甚至可能危及安全。刘勇等^[7]研究发现，稳态磁场辅助激光熔覆技术通过减少球墨铸铁熔池中碳气孔的形成，有效解决了这一问题。稳态磁场通过增加流体黏滞性，降低熔池流速，进而抑制气孔的产生。研究表明，随着磁场强度的增加，熔池整体流速显著降低，气孔的运动轨迹由环状转变为竖直上升，减少了气孔在熔池中的逃逸和相互融合，降低了熔覆层的气孔率。稳态磁场辅助激光熔覆如图1所示。

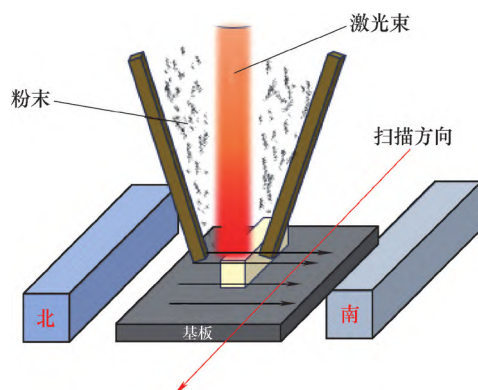


图1 稳态磁场辅助激光熔覆示意

2.1 材料与方法

在研究中采用了球墨铸铁作为基底，熔覆的金属粉末则为奥氏体不锈钢粉。通过线切割获得熔覆层截面，然后经过镶嵌、细致的磨光、抛光，以及腐蚀处理，以便进行后续的观察分析。随后，利用金相显微镜对样本的金相组织结构进行细致观察。为进一步分析，使用扫描电子显微镜来观察样品的微观形貌特征，并利用能谱仪对熔池内部的元素分布情况进行深入的探究。稳态磁场辅助下的激光熔覆过程是一个涵盖多重物理机制的复杂体系，其中涉及固-液转化、熔体的流动与热量传递、气孔的动态迁移，以及磁场的洛伦兹力效应等。鉴于传统观测手段在捕捉熔池内部气孔运动方面的局限性，该模型^[8]创新性地整合了上述所有物理过程，并且在边界条件处理上，通过引入变形网格技术，从而更精确地模拟激光制造过程中的动态变化。

2.2 稳态磁场对熔池速度的影响

图2所示为熔池表层后方流区为高流速区域^[9]，表层最高流速约为0.137m/s，当稳态磁场强度从0增加至1.2T时，熔池整体流速显著降低，主要是因为

施加的稳态磁场增加了流体的黏滞性^[10]，熔池流速降低。不同稳态磁场条件下表面速度分布如图

3所示。由图3可知，表面速度值呈现出山峰特征。随着磁场强度的不断增强，表面速度受到明显的抑

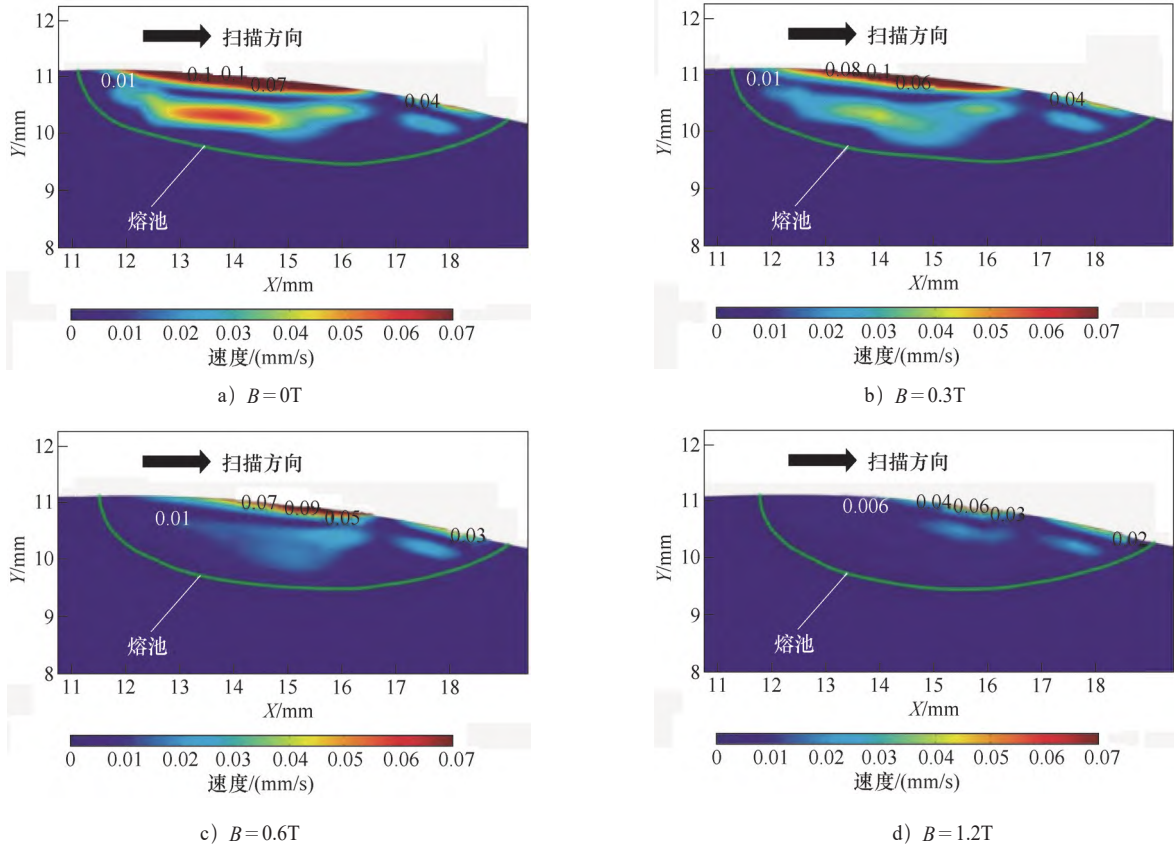


图2 不同磁场强度下激光熔覆熔池流场分布

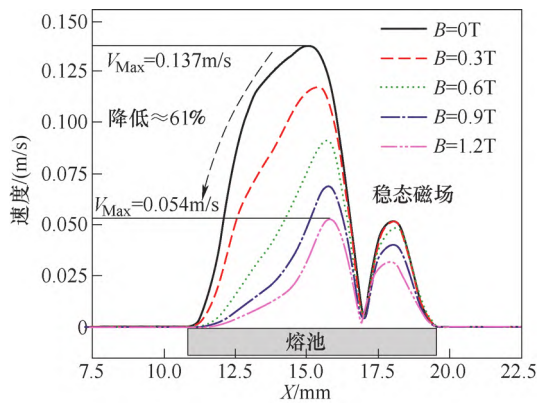


图3 不同稳态磁场条件下表面速度分布

制，具体变现为最大熔池流速差为0.083m/s。

2.3 稳态磁场对气孔运动轨迹影响

为了进行轨迹分析，选取了熔池的前部和后部两个特定位置，即位置 A_1 （位于熔池前部）和位置 B_1 （位于熔池后部），作为分析对象，气孔初始位置如图4所示^[11]。随着气孔直径增大至120~160 μm 时，气孔的浮力增强，最终在熔池表层聚集。在稳

态磁场的作用下，气孔的运动轨迹变为竖直上升，这主要是由于熔池内部流动的抑制，导致气孔运动范围缩小。在激光熔覆工艺中，气孔于熔池内部经历运动与逃逸过程时，其尺寸持续发生变化，并且气孔之间可能发生相互融合现象。图5所示为在无磁场作用条件下，具有不同直径的气孔所呈现的运动轨迹。由图5可发现，气孔在熔池中受到流体拖曳力影响，呈现出环状运动，并不是直线运动。

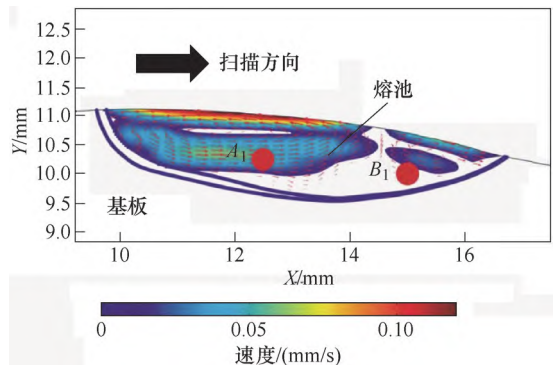
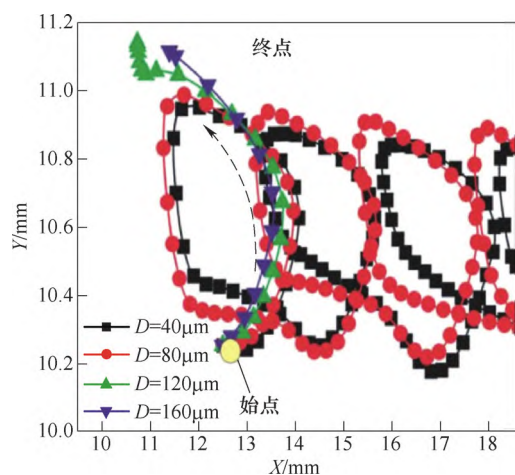
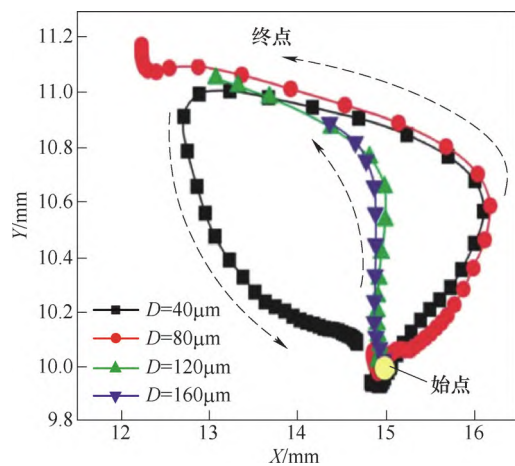


图4 气孔初始位置示意



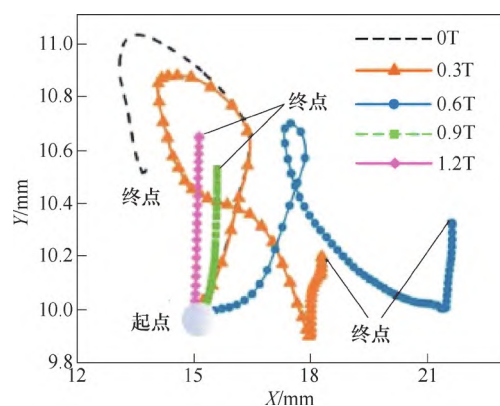
a) A_1 点



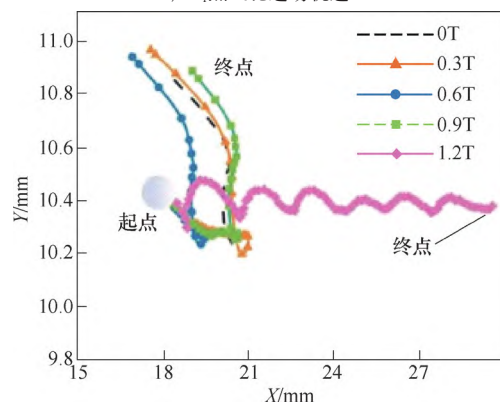
b) B_1 点

图5 不同直径的气孔运动轨迹

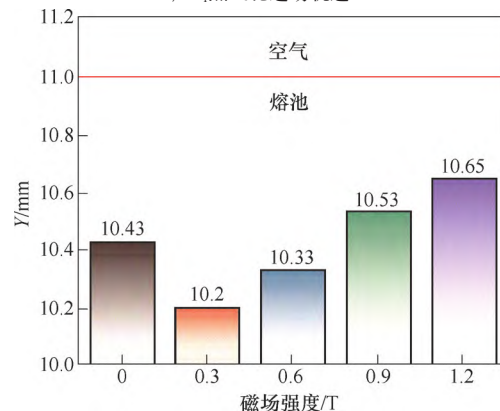
图6所示为在稳态磁场作用下的气孔运动轨迹。从图6可看出,随着磁场强度的不断增强,气孔的运动轨迹发生了显著变化,转变为竖直向上的运动模式。这一现象主要归因于稳态磁场的施加对熔池内部流场的强烈抑制作用,导致流场趋于竖直上升,进而促使气孔也沿此方向运动,这一变化还伴随着气孔运动范围的相应减小。后部气孔因为稳态磁场下熔池等效黏度增加,引起了气孔由环形向上到振荡往复运动的轨迹变化(见图6b),这种运动形式不利于气孔从熔池中排出。在熔池前部的 A_1 点处形成的气孔,随着磁场强度的逐渐增强,其停留位置逐渐趋向熔池表面,然而这些气孔并未被成功排出熔池^[12]。相比之下,在熔池前部 B_1 点处的气孔,在磁场强度达到1.2T时,被固定在了熔池内部。图6c和图6d分别展示了这些气孔的最终停留位置。观察结果显示, A_1 点的气孔随着磁场强度的增大,更加



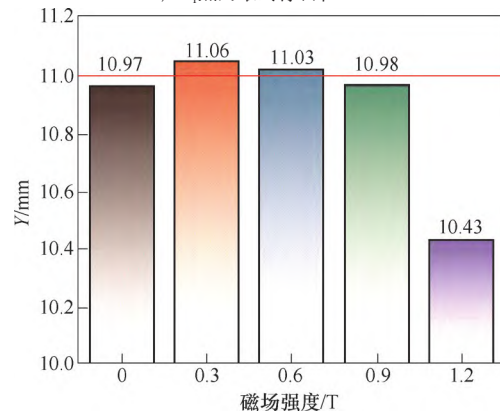
a) A_1 点气孔运动轨迹



b) B_1 点气孔运动轨迹



c) A_1 点的最终停留位置



d) B_1 点的最终停留位置

图6 稳态磁场下的气孔运动轨迹及最终停留位置

靠近熔池表面,但仍未能逸出;而 B_1 点的气孔则在1.2T的磁场强度下,被永久地保留在了熔池中。

2.4 稳态磁场对空隙率的影响

根据图7不同稳态磁场条件下熔覆层孔隙率^[13]统计分析,在磁场强度 $<0.6\text{T}$ 时,对于熔覆层孔隙率影响较小,随着磁场强度的不断增强,孔隙率显著减小,孔隙率的最大差值达到了7.363%。但是,研究结果也表明,磁场只能夠抑制气孔的产生,并不能将其完全消除。

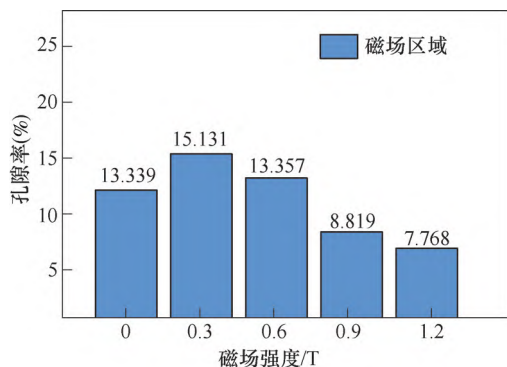


图7 不同稳态磁场条件下熔覆层孔隙率统计

2.5 稳态磁场对气孔的抑制机制

在激光熔覆层中,常见的气孔类型主要包括氮气孔和氢气孔。其中,氮气孔通常呈现为密集且细小的麻点状分布,其直径相对较小;而氢气孔则更多地展现出螺钉状的形态特征^[14]。稳态磁场引发的洛伦兹力对流体运动具有抑制作用^[15],进而减少了气孔形成的倾向。稳态磁场抑制气孔机理如图8所示。

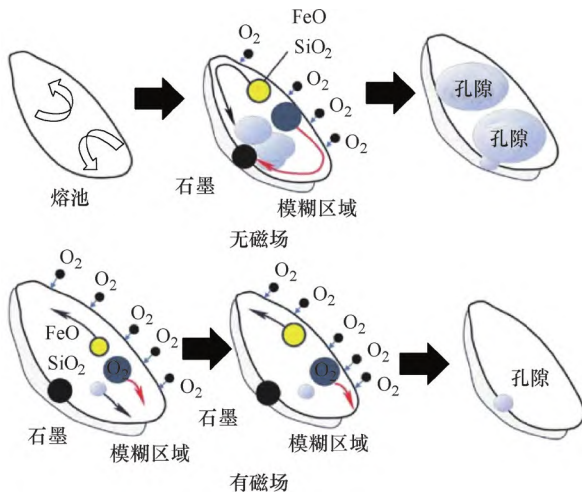


图8 稳态磁场抑制气孔机理

3 超声振动辅助技术

激光熔覆过程中,快速升温 and 冷却导致较大

的温度梯度,增加残余应力,进而产生裂纹,严重影响熔覆层的力学性能。超声波振动辅助技术通过空化效应和声流效应,有效降低熔覆层中的残余应力,减少缺陷。超声波振动在金属熔体中传播时,产生声流和空化等效应^[16],影响液态金属的结晶过程。空化效应形成的高压高温环境抑制了晶粒的长大,促进了微观组织的细化,提高了形核率。声流效应则减小了熔覆层内部液穴的滞后现象,加速了熔池对流和元素扩散,降低了元素偏聚程度。此外,超声波振动还能改变熔覆层中颗粒的分布,使颗粒更加均匀分布,有效减少元素偏析。超声波振动装置^[17]分为接触式和非接触式,如图9所示。

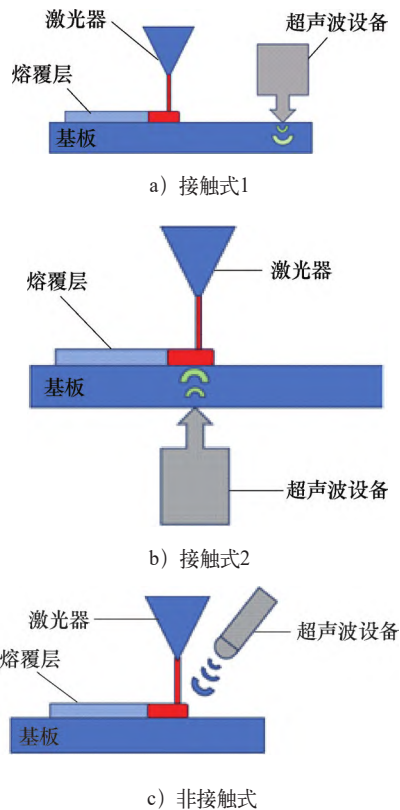


图9 超声振动装置施加方式

3.1 细化晶粒

超声波振动的空化效应是在液体中形成低压空洞,这些空洞在声波作用下发生振动和生长,并不断聚集着声场能量,当能量突破一定阈值时,空化气泡急剧崩溃闭合的过程。这一过程中产生的高温高压对晶粒的长大具有抑制作用,促进了微观组织细化,提高了形核率,减少了柱状晶生长所需要的空间,化学成分的偏析更加均匀^[18]。超声波振动的声流效应能显著减轻熔覆层内部液穴的滞后状况,

使液穴变得较浅且更加平滑，促进了熔池的对流运动和元素的快速扩散，进而降低了元素的局部聚集程度。随着超声波频率的提升，晶粒尺寸显著减小，同时粗大的树枝状Laves相被破碎成均匀分布的细小颗粒状，从而赋予了材料更优异的力学性能。

LÜ等^[19]通过引入超声波振动辅助激光熔覆技术，成功制备了IN718/WC熔覆层，并深入探究

了超声波振动对熔覆层不同区域微观组织的具体影响（见图10）。结果显示，熔覆层的顶部区域经历了完全的晶粒形态转变^[20]，形成了均匀的等轴晶结构；在中间区域，原本存在的柱状晶在超声波振动的作用下发生破碎，并重新结晶为等轴晶；尽管底部区域未观察到等轴晶的转变现象，但粗大的柱状晶尺寸却显著减小。

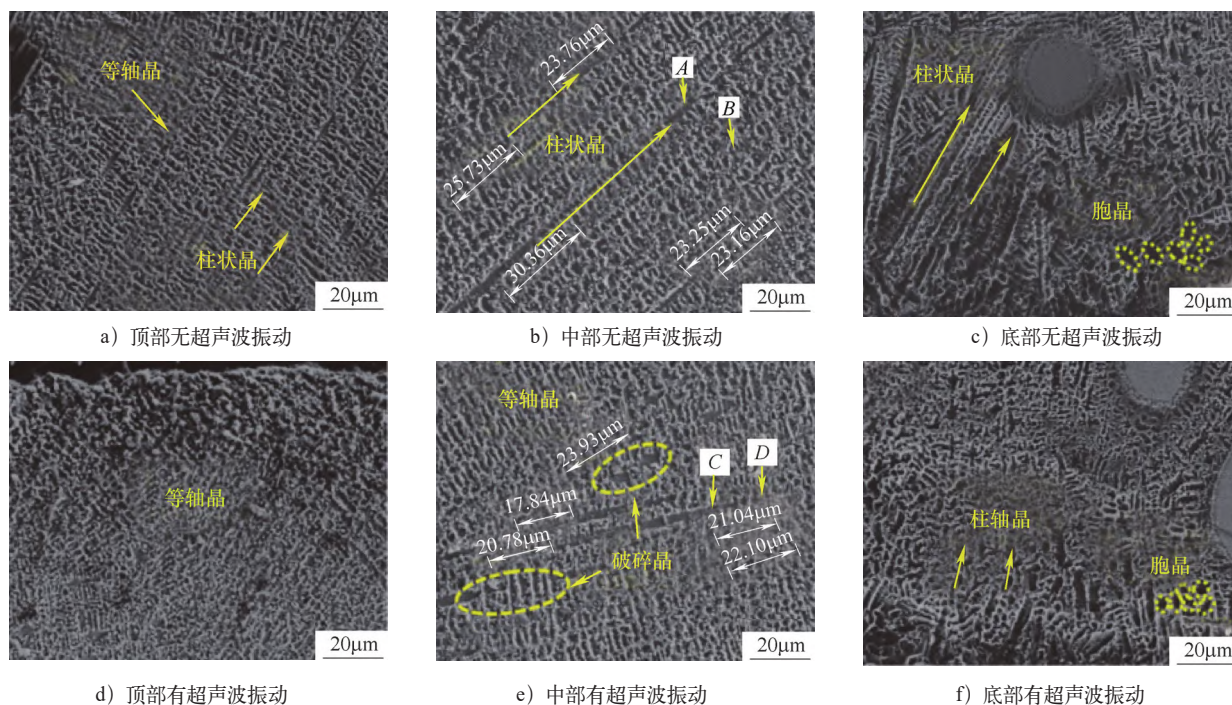


图10 熔覆层截面扫描电镜组织

3.2 抑制偏析

聂学武等^[21]在WC/IN718复合熔覆层的研究中，揭示了超声波振动对WC颗粒在熔覆层内分布状态

的影响，其效果如图11所示，在无超声波辅助的情况下，WC颗粒主要沉积于熔覆层的底部。随着超声波振幅的调节WC颗粒逐渐向中上区域均匀分

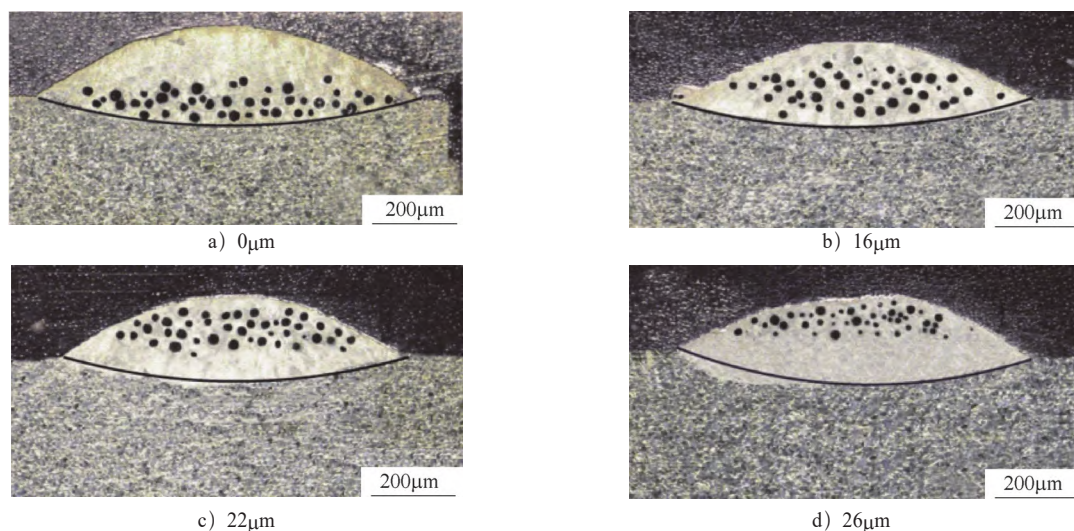


图11 不同超声波振幅下激光熔覆WC/IN718熔覆层的横截面形貌

布,当超声波振幅达到一定强度时,Wc颗粒会聚集在顶部。结果表明,通过合理的超声波振幅可以有效地改善熔覆层中颗粒的分布均匀性,从而显著降低元素的偏析现象。

3.3 消除缺陷

激光熔覆技术在不同材料体系的结合过程中,由于热膨胀系数、熔点等物理性质的差异,容易导致熔覆层与基体间产生裂纹、气孔等缺陷,这些缺陷会影响熔覆层的各项性能。针对这一问题,有研究人员发现超声波振动辅助激光熔覆时,可以显著地抑制这一缺陷^[21]。超声波振动通过其空化效应和声流效应,促进了熔融金属中元素的扩散,减少了气体的积聚,从而有效降低了凝固后的残余应力。这种降低应力的效果有助于减少裂纹和气孔等缺陷的产生,进而提升熔覆层的整体性能。有人探究了超声波振动辅助激光熔覆工艺对Q345钢表面熔覆层缺陷数量和种类的影响规律,发现有无超声波振动的辅助,熔覆层的缺陷数量有着明显的差距,超声波辅助能够有效的抑制裂纹与气孔的产生。

综上所述,超声波振动辅助激光熔覆技术通过其空化和声流效应,不仅能够有效控制熔覆层的微观组织,减少缺陷,还能显著提高熔覆层的力学性能,对于提升材料的应用潜力具有重要意义。

4 液氮冷却辅助技术

熔覆层的表面硬度和耐磨性能也是材料的重要性能,有研究表明,液氮辅助技术能够加快熔覆层的冷却速度,增大温度梯度并减小残余应力,进而提高熔覆层的硬度和耐磨性。为了改善Ti6Al4V钛合金的表面性能,周建忠等^[22]研究员采用了液氮强制冷却技术辅助激光熔覆,制备了含有35%WC的Ni60A复合涂层。通过这种工艺,探究了液氮强制冷却对熔覆层的晶粒尺寸和力学性能的影响。他们设计的液氮强制冷却辅助激光熔覆的方法,有效地改善了熔覆层的质量。在这项研究中,液氮强制冷却的作用是通过加速熔池的冷却速度,提高固液转化的速度,减少晶粒生长所需的时间,进而达到减小熔覆层晶粒尺寸的作用^[23]。此外,液氮强制冷却熔覆层的稀释率较低,这表明液氮冷却能有效降低激光熔覆层的稀释率,提高涂层的硬度和耐磨性。这项技术的应用,不仅提升了熔覆层的性能,还为

钛合金在苛刻环境下的应用提供了新的解决方案。图12所示为其自制的液氮强制冷却激光熔覆装置。

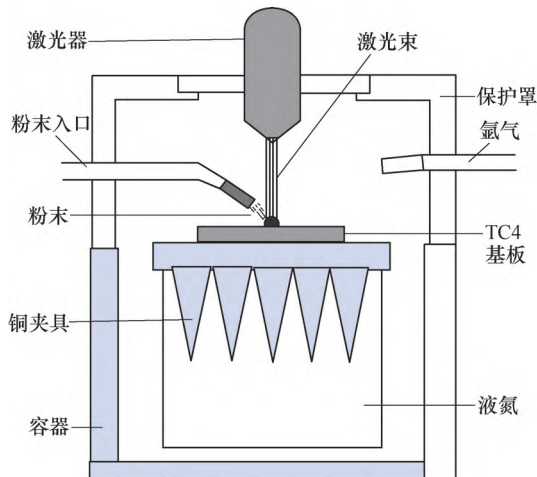


图12 液氮强制冷却激光熔覆示意

4.1 液氮冷却对熔覆层的宏观影响

激光熔覆稀释率^[24]是衡量激光熔覆过程中由于基材熔化混合导致的熔覆合金成分变化的一个关键指标,其对熔覆层的质量有着直接影响。图13所示为在不同冷却条件下(空冷与液氮强制冷却)熔覆层的宏观形态。研究发现,液氮强制冷却熔覆层表面的黄褐色物质是粉末中的元素在表面形成的一种可以减少氧化和气孔的保护层。在图13c、d中,CZ和DZ^[25]分别代表深灰色的熔覆区域和浅灰色的稀释区域,从中可看出,液氮强制冷却熔覆层的稀释区域明显小于空冷熔覆层,且界面更加平整。这是因为液氮强制冷却相较于空气冷却,固液转化的速度更快,这就导致元素的扩散速度减小,对基板的影响也随之减小,从而有效降低了熔覆层的稀释率。

4.2 液氮冷却对熔覆层的微观影响

在激光熔覆过程中,液氮持续对基体进行冷却,这能够保持熔池与基板之间较大的温差,从而显著提高固液转化的速度,这对于熔覆层中的晶粒尺寸有着很大的影响^[26, 27]。横截面微观组织变化如图14所示。从图14可看出,相对于空冷,液氮冷却下的晶粒尺寸明显减小。

研究表明,液氮强制冷却技术辅助激光熔覆制备的含有35%WC的Ni60A复合涂层,其微观组织得到显著细化,晶粒尺寸减小,硬度和耐磨性大幅提高。另外,液氮冷却还能有效降低激光熔覆层的稀

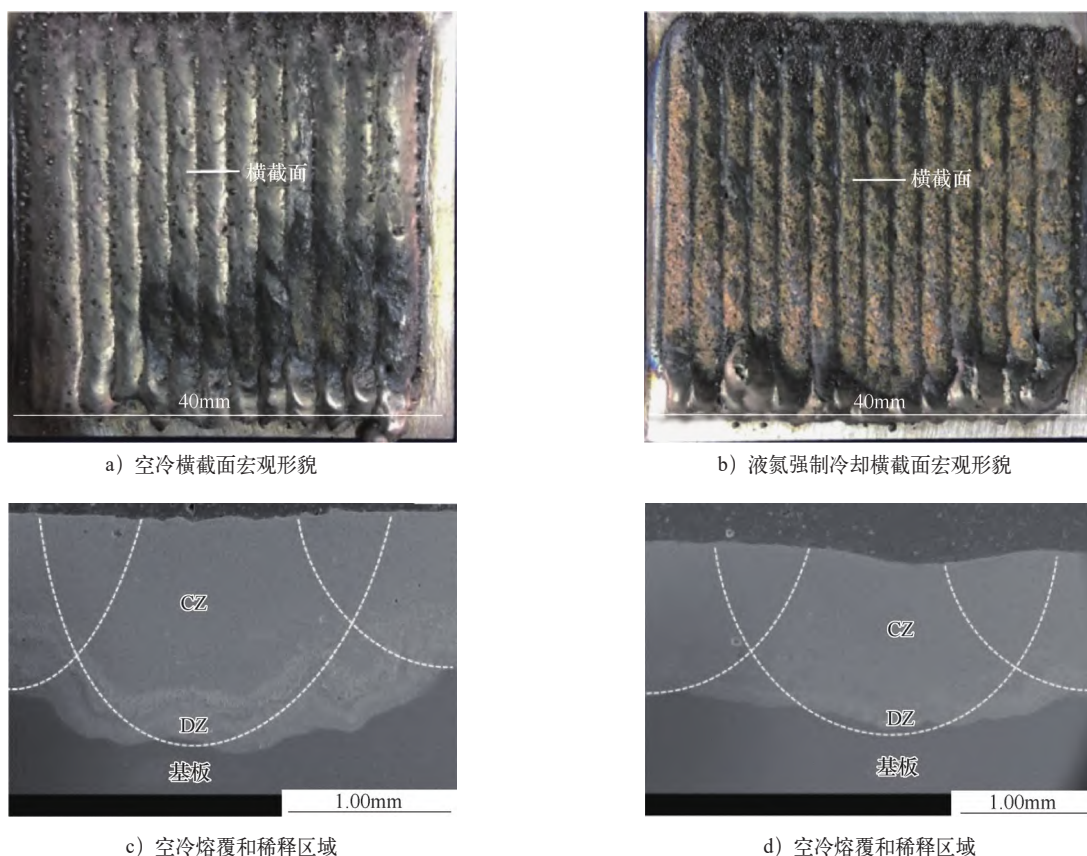


图13 空冷和液氮强制冷却多道熔覆层的表面和横截面宏观形貌

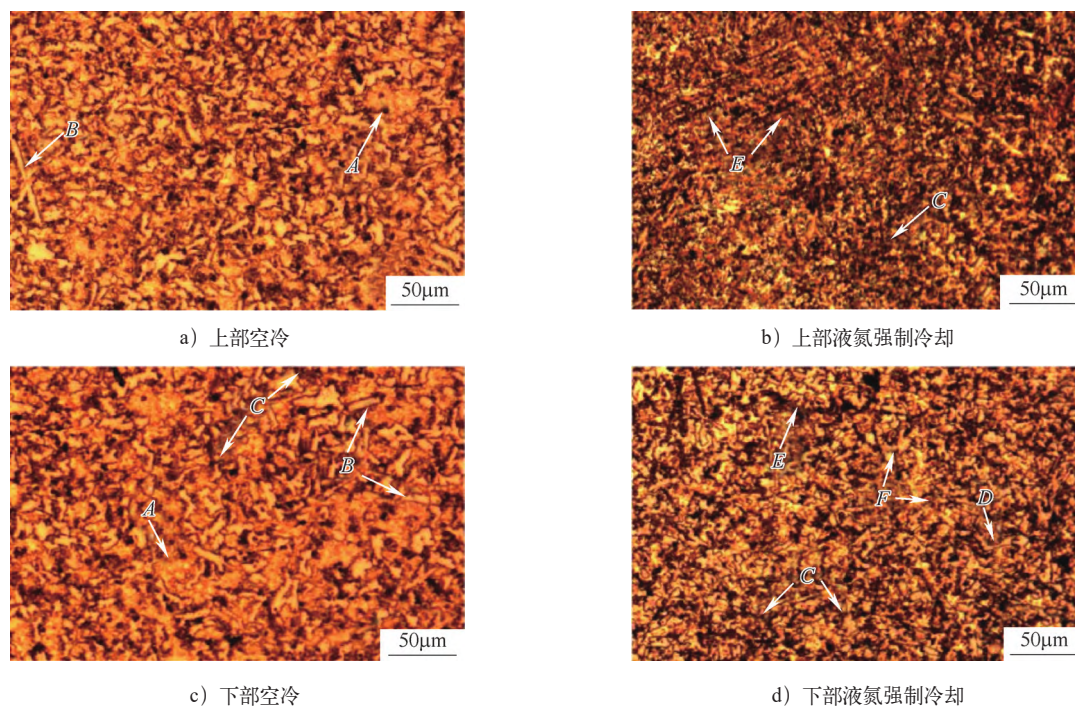


图14 空冷和液氮强制冷却熔覆层横截面的微观组织

释率，提高涂层的性能。然而，液氮冷却也可能增加熔覆层与基体间的热应力，增加裂纹风险，尤其

是针对脆性材料时。因此，需要合理控制液氮冷却的均匀性和可控性。

5 辅助技术在激光熔覆中存在的问题以及展望

综上所述,辅助技术在激光熔覆过程中发挥了重要作用,有效控制了熔覆层的微观结构,减少了气孔和裂纹的产生,促进了晶粒细化,使成分分布更均匀,显著提升了熔覆层的性能。然而,这些辅助技术在实际应用中也面临一些挑战,以超声波振动、磁场和液氮冷却等为例介绍其在激光熔覆中存在的问题。

1) 超声波振动辅助激光熔覆时,通过在熔融金属中传播超声波,引发空化和声流效应,从而细化晶粒并减少微裂纹和气孔等缺陷,达到提升硬度、耐磨性和抗氧化的目的。但是,超声波振动装置的设计和施加方式,以及对其在工作空间的利用仍是研究难题,需要进一步改善,以增强其在激光熔覆过程中抑制缺陷的作用。

2) 磁场辅助激光熔覆通过施加磁场,利用电磁力搅拌熔池,改变传质和传热过程,以此减少熔覆层缺陷的产生,细化微观组织,从而提升熔覆层的质量。不过,磁场的施加方式、强度和方向对熔池的影响较为复杂,需要精确控制以防止不利影响,如可能导致熔池不稳定和涂层不均匀。

3) 液氮冷却技术通过快速冷却减少热影响区域,增强熔覆层的硬度和耐磨性。但液氮冷却可能增加熔覆层与基体间的热应力,增加裂纹风险,尤其是针对某些脆性材料时。同时,液氮冷却的均匀性和可控性也是技术挑战。

因此,采用恰当的辅助技术方法来克服激光熔覆中存在的各种缺陷,最大程度地提升材料的性能,使得激光熔覆制备的材料满足更加复杂的环境,这不仅能够推动激光增材制造技术的创新,同时也能够促进航空航天、医疗等应用领域的发展。

参考文献:

- [1] 秦南南,武晓蓓,张双侠.激光熔覆增材制造研究[J].模具工业,2024,50(8):1-7.
- [2] 王浩,简思捷,李洁,等.激光熔覆技术在船舶修造中的应用研究进展[J].金属加工(热加工),2023(12):11-19.
- [3] 张津超,石世宏,龚燕琪,等.激光熔覆技术研究进展[J].表面技术,2020,49(10):1-11.
- [4] 李浩,李恺伦,杜宝瑞,等.激光熔覆成形过程中变形控制的研究现状及发展趋势[J].热加工工艺,2024,53(12):1-13.
- [5] 谢志颖,刘常升,吴琼,等.激光熔覆制备高硬耐磨涂层的研究综述[J].表面技术,2023,52(7):25-40.
- [6] 王雪娇,吴世品,丁伟,等.激光熔覆层裂纹的控制方法及研究进展[J].金属加工(热加工),2022(10):13-19.
- [7] 胡勇,孟庆鑫,王梁,等.基于稳态磁场阻尼效应的激光熔覆气孔缺陷抑制机制[J].中国表面工程,2024,37(3):14-24.
- [8] HU Y, WANG L, YAO J H, et al. Effects of electromagnetic compound field on the escape behavior of pores in molten pool during laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 383: 125198.
- [9] WANG P F, YANG K, CHEN M Z, et al. Simulation and experimental research on the GH3536 molten pool laser cladding on inclined substrate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(10): 1002121.
- [10] LI G, WANG Z, YAO L, et al. Concentration mixing and melt pool solidification behavior during the magnetic field assisted laser cladding of Fe-Cr-based alloy on 45 steel surface[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 445: 128732.
- [11] 周杰,郭伟玲,王志远,等.基于磁场作用下的金属凝固研究现状[J].中国表面工程,2022,35(3):154-169.
- [12] YUAN W, CHEN H, CHENG T, et al. Effects of laser scanning speeds on different states of the molten pool during selective laser simulation melting: an experiment[J]. Materials & Design, 2020, 189: 108542.
- [13] GUO N, GAO Y, GAO Y K, et al. Microstructure and properties of in-situ nickel-aluminum bronze coating by underwater wire-feed laser cladding[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 6459-6471.
- [14] 闫世兴,董世运,徐滨士,等.灰铸铁表面激光熔覆NiCuFeBSi合金层中碳扩散形式研究[J].稀有金属材料与工程,2014,43(9):2182-2186.
- [15] ZHONG C L, GASSER A, SCHOPPHOVEN T, et al. Experimental study of porosity reduction in

- high deposition-rate laser material deposition[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 75: 87-92.
- [16] 杨凡, 张志强, 张宏伟, 等. CeO_2 对 TiCx 增强钛基激光熔覆层成形质量和组织的影响[J]. 中国表面工程, 2020, 33 (3): 137-151.
- [17] MA Z S, XIA C Q, ZHONG H, et al. Controlled sputter deposition of oxide Nanoparticle-Based composite films [J]. Surface & Coatings Technology, 2023, 455: 129217.
- [18] ZHU L D, YANG Z C, XIN B, et al. Microstructure and property evolution of Fe-based coatings with different WC contents fabricated by laser cladding [J]. Surface & Coatings Technology, 2021, 410: 126964.
- [19] LÜ J, ZHOU J Z, ZHANG T, et al. Microstructure and wear properties of IN718/WC composite coating fabricated by ultrasonic vibration-assisted laser cladding [J]. Coatings, 2022, 12 (3): 412.
- [20] WANG Y L, LI C, JIANG F L, et al. Metal organic frameworks derived single atom catalysts for electrocatalytic energy conversion [J]. Materials Research Express, 2019, 6 (10): 106563.
- [21] 聂学武, 周建忠, 徐家乐, 等. 超声振幅对激光熔覆WC/IN718复合涂层组织及性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49 (9): 206-214.
- [22] 周建忠, 王松涛, 徐家乐, 等. 液氮强制冷却对Ti6Al4V表面激光熔覆制备WC/Ni60A涂层微观组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48 (2): 500-508.
- [23] CUI Z Q, SHI H X, WANG W X, et al. Transactions of nonferrous metals society of china[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25 (5): 1446.
- [24] GE Y, WANG W, SU G, et al. Microstructure and property evolution of Fe-based coatings with different WC contents fabricated by laser cladding [J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2016, 45 (8): 1949.
- [25] 王鹏春, 路阳, 杨效田, 等. 强制冷却对感应重熔Ni60合金涂层组织结构的影响[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26 (2): 375-382.
- [26] 吕晓仁, 马孝威, 董丽虹, 等. 激光熔覆层中孔隙、裂纹缺陷的形成机制及抑制方法研究进展[J]. 功能材料, 2020, 51 (6): 6034-6043.
- [27] 李占明, 王宏宇, 孙晓峰, 等. 超声振动在激光熔覆中的作用机制及研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38 (16): 218-225.

MW 20241108

(上接第7页)

- Nucleation and strengthening mechanism of laser cladding aluminum alloy by Ni-Cr-B-Si alloy powder based on rare earth control[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 294: 117145.
- [29] SU Z, LI J, SHI Y, et al. Effect of Y_2O_3 addition on the organization and tribological properties of Ni60A/ Cr_3C_2 composite coatings obtained by laser-cladding[J]. Ceramics International, 2024, 50 (10): 17261-17273.
- [30] GAO Z, ZHANG S, REN C, et al. Effect of rare-earth La_2O_3 on tribological properties of laser cladding nickel-based coatings on 35CrMoV alloy steel[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33 (2): 651-659.
- [31] LUO F, WANG S, SHI W, et al. Wear behavior and corrosion resistance of laser-clad Ni60-1% carbon nanotubes coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 482: 130686.
- [32] ZHAO Y, FENG K, YAO C, et al. Microstructure and tribological properties of laser clad self-lubricating nickel-base composite coatings containing nano-Cu and h-BN solid lubricants[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 359: 485-494.
- [33] ZHANG Z, CHEN Z, YANG Y, et al. Effect of graphene and niobium carbide on microstructure and mechanical properties of Ni60 composite coatings prepared by laser cladding[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30: 8277-8286.
- [34] FENG L, GUO J, CUI X, et al. In-situ synthesis and wear mechanism of Ni-based self-lubricating composite coating with a dense continuous metal sulfide layer prepared by laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 478: 13044.

MW 20241106