

能场辅助激光熔覆高熵合金涂层的研究进展

沈炎斌¹ 曹雨聪¹ 吴 韬² 曹泽银¹

(1. 浙江科技大学机械与能源工程学院, 杭州 310023; 2. 浙江机电职业技术大学增材制造学院, 杭州 310053)

摘要 激光熔覆高熵合金涂层具有良好的抗压、耐磨及耐蚀等性能, 施加物理场可以对高熵合金凝固过程进行调控, 改善涂层的气孔、裂纹等缺陷。本综述系统分析了超声场、磁场、温度场及电场等单一物理场在高熵合金成形过程中的作用机理及对涂层组织改善情况, 提出单一物理场辅助激光熔覆高熵合金涂层的局限, 并对复合场在该领域的应用进行了展望。

关键词 激光熔覆; 高熵合金涂层; 物理场; 复合场

中图分类号 TG665; G353.11

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250208

Research Progress in Energy Field-assisted Laser Cladding of High-entropy Alloy Coatings

SHEN Yanbin¹, CAO Yucong¹, WU Tao², CAO Zeyin¹

(1. School of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023; 2. School of Additive Manufacturing, Zhejiang Polytechnic University of Mechanical and Electrical Engineering, Hangzhou 310053)

Abstract: Laser clad high-entropy alloys (HEAs) coatings exhibit high compressive strength, excellent wear resistance, and superior corrosion resistance. Application of physical fields can regulate the solidification process of HEAs and eliminate defects such as pores and cracks in coatings. The action mechanism of single physical fields, including ultrasonic fields, magnetic fields, thermal fields, and electric fields, on the formation process of HEAs, as well as effects on improving the microstructure of coatings were reviewed. The limitations of single physical fields in assisting laser cladding of HEA coatings were proposed, and the application of composite fields in the field was forecast.

Key Words: Laser Cladding, High Entropy Alloy Coating, Physical Field, Composite Field

高熵合金(HEAs)突破传统金属材料单一主元的限制, 为金属材料成分设计和性能提升提供了更多的发展和可能性^[1-2]。目前, 高熵合金已展现出良好的抗压、耐蚀及耐磨等优异性能^[3-4]。激光熔覆高熵合金(LC-HEAs)技术作为一种高熵合金涂层的重要制备手段, 具有冷却速度快、热影响区小、涂层基体完全冶金结合、节约材料及便于自动化等特点, 较铸造、磁控喷射及等离子弧熔覆等技术更具潜力^[5]。由于激光熔覆的快热快冷的加工特性, 高熵合金涂层易出现孔隙、裂纹及成分不均等问题。

LC-HEAs制备过程中, 孔隙、裂纹、偏析问题是常见的缺陷, 会引起性能衰退、缩短使用寿命等问题, 对涂层耐腐蚀性、耐磨损性不利。崔宸^[6]在熔覆FeCoNi-CrMo高熵合金涂层过程中, 观察到粉末流的冲击及重

力作用下, 未熔化粉末后端于熔池中形成锥形空腔, 当熔池流速缓慢且存在时间较短时, 气泡难以及时逸出, 从而滞留在熔池中并形成孔隙。ZHU Q等^[7]发现选择性激光熔化具有极快冷却速率, 制备的CoCrFeNi分布均匀, 无元素偏析。激光熔覆相较于选择性激光熔化冷却速率慢, 涂层中偏析情况不能被完全抑制。

激光熔覆加工过程能量密度高, 金属材料瞬时内熔化、凝固, 速热速冷的过程会产生内应力, 如热应力、组织应力和约束应力等, 这些内应力极易导致涂层产生裂纹。GAO Z N等^[8]对制备FeCoCrNi高熵合金涂层过程中出现裂纹的产生原因及形成过程进行研究, 发现材料快速熔化和凝固导致大部分热能积聚在熔池附近基体中, 形成较大的温度梯度, 导致熔覆层与周围基体间产生热应力, 并且热应力与涂层和基材热膨胀

收稿日期: 2025-05-21; 修订日期: 2025-09-11

基金项目: 浙江省“尖兵、领雁”重点研发资助项目(2024C01196, 2024C04051, 2025C01050, 2025C04003)

第一作者: 沈炎斌, 男, 1999年出生, 硕士研究生, E-mail: shenyanbin99@yeah.net

通信作者: 吴韬, 男, 1989年出生, 副教授, E-mail: wutao2@zime.edu.cn

引用格式: 沈炎斌, 曹雨聪, 吴韬, 等. 能场辅助激光熔覆高熵合金涂层的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(6): 815-824.

SHEN Y B, CAO Y C, WU T, et al. Research progress in energy field-assisted laser cladding of high-entropy alloy coatings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(6): 815-824.

系数之差、熔覆层温度与腔室温差呈正相关。热量输入增加,熔池内部的温度分布不均加剧,内应力集中诱发裂纹源,同时温度分布不均导致组织结构差异大,使裂纹更易扩展。激光熔覆过程中的物理因素会导致涂层产生裂纹,高熵合金元素相互作用同样会导致裂纹出现。GUO Y X等^[9]在制备MoFeCrTiWAlNb高熵合金涂层时,观察到涂层内大量的大尺寸W、Mo原子存在,带来严重晶格畸变,引发高强度的内应力,导致许多微裂纹产生。

为解决这些缺陷对高熵合金涂层带来的影响,研究者尝试在激光熔覆高熵合金涂层过程中引入物理场,通过多物理场辅助来调控熔池行为。物理场辅助激光熔覆技术是在激光熔覆过程中,施加超声、磁场、电场及温度场等辅助物理场,调控熔体流速、减小温度梯度、成分不均,达到减少孔隙和裂纹、偏析^[10]、细化晶粒的效果,并且具有非接触、灵活、集成度更好等特点^[11]。根据施加场的数量,可将物理场分为单一物理场和复合物理场,复合物理场由两个或多个单一物理场组合而成,如电磁复合场、电磁超声复合场等。在激光熔覆高熵合金涂层的过程中,施加物理场能够有效抑制高熵合金涂层中的孔隙、裂纹等问题,进一步提升涂层性能。本综述着重探讨物理场辅助激光熔覆高熵合金涂层的研究现状,分别从单一的辅助能场和复合物理场进行介绍,并进一步深入分析了辅助物理场对激光熔覆高熵合金涂层熔池行为控制以及缺陷控制的积极效果,为激光熔覆制备高质量高熵合金涂层的技术方案提供参考。

1 单一辅助能场

1.1 超声场

超声波作用于金属熔体上会产生空化效应、声流效应、热效应和谐振效应等^[12],可以有效减少涂层内部气孔缺陷、细化晶粒及均匀元素分布。超声波在传统制造中目的主要是降低表面粗糙度、改善表面形貌,如铸造、焊接^[13]。目前超声场作用于激光熔覆的3种施加方式见图1。

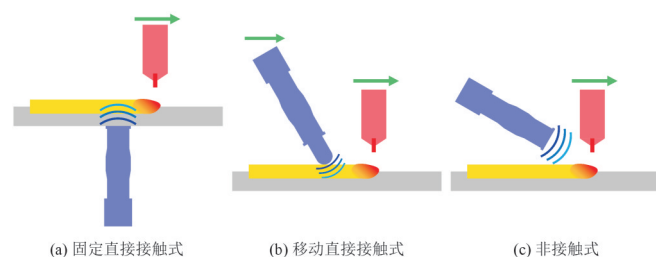


图1 不同超声施加方式

Fig.1 Different methods of applying ultrasound

超声波在熔池中产生的热效应会增加涂层热量输入。TAO W W等^[14]在熔覆AlCoCrFeNi高熵合金的过程中,通过对比未施加和施加超声场的涂层,发现超声场具有显著的细化晶粒作用。施加超声场的涂层显微组织几乎完全由均匀细小的等轴晶组成,减少孔隙等缺陷,大幅提升了涂层的耐磨、耐腐蚀性能。此外,在提高超声功率的过程中,发现超声波能够促进粉末的熔化。ZHAO Y等^[15]在超声场辅助熔覆WTa NbMo难熔高熵合金时,发现超声场影响下WTa NbMo难熔高熵合金粉末的熔化率显著增加,其原因是超声波振动引起的热振动效应增加了激光熔覆过程中的热量输入,从而促进了粉末熔化。超声波在熔池内传递,介质间相互摩擦,机械波能量转换为热能,从而提高熔池温度,其应用于难熔高熵合金涂层,可在较低激光功率的情况下,实现粉末完全熔化,从而降低因熔化难熔粉末时输入过大激光功率而导致的涂层高稀释率问题。

超声辅助场的声流和空化作用还会使得高熵合金涂层发生显著的晶粒细化现象。ZHANG M N等^[16]研究超声振幅对AlCuFeCoNi高熵合金涂层的影响,发现在超声场诱导的空化和声流作用下,晶粒尺寸随着超声振幅的增加而减小。图2为不同超声振幅作用下的AlCuFeCoNi HEA涂层的SEM组织。发现在超声振幅从15%提升至30%时,涂层网状析出转变为点状析出,但当超声振幅达到60%时,重新出现明显的网状析出现象,同时过大的超声振幅导致稀释率增加,基材的Fe、Cr等元素渗入涂层,在涂层中部及底部形成新相。选择合适的超声振幅对涂层的显微组织具有显著的调控作用。一方面,其可以有效破碎底部的柱状晶粒,促使等轴晶粒的形成;另一方面,能够破碎柱状晶粒的顶部,产生细小的形核点,并扩大顶部等轴晶粒区域的范围。ZHAO S等^[17]研究超声场对NbMoTaTiNi熔覆过程影响时,发现超声波能破碎涂层中生长的枝晶,形成等轴晶,晶粒尺寸从2.1 μm 减小到0.77 μm ,晶粒纵横比从4.3减小到1.8,并促使非凝固形核中心的产生,进而形成更多的等轴晶,结合力强,且晶界呈锯齿状,摩擦因数从0.62减至0.42。因此,在声流作用和空化作用下,晶粒转变主要由熔池底部粗大晶粒击碎细化及小的形核点增加,从而使大晶粒变小、小晶粒增多,实现涂层晶粒全面细化的效果,晶粒细化涂层的硬度、耐磨性等性能同步提升。然而,过大的超声功率亦会造成涂层稀释率升高,因此需要选择适宜的超声参数。

此外,超声场可以应用于材料后处理加工,对涂层进行超声轧制或冲击,在静压力挤压和超声振动冲击作用下,涂层表面材料发生弹性和塑性变形,形成一定深度的严重塑性变形层,残余拉应力转变为压应力,同时晶粒得到细化,表面变得更加致密。LI M Y等^[18]在

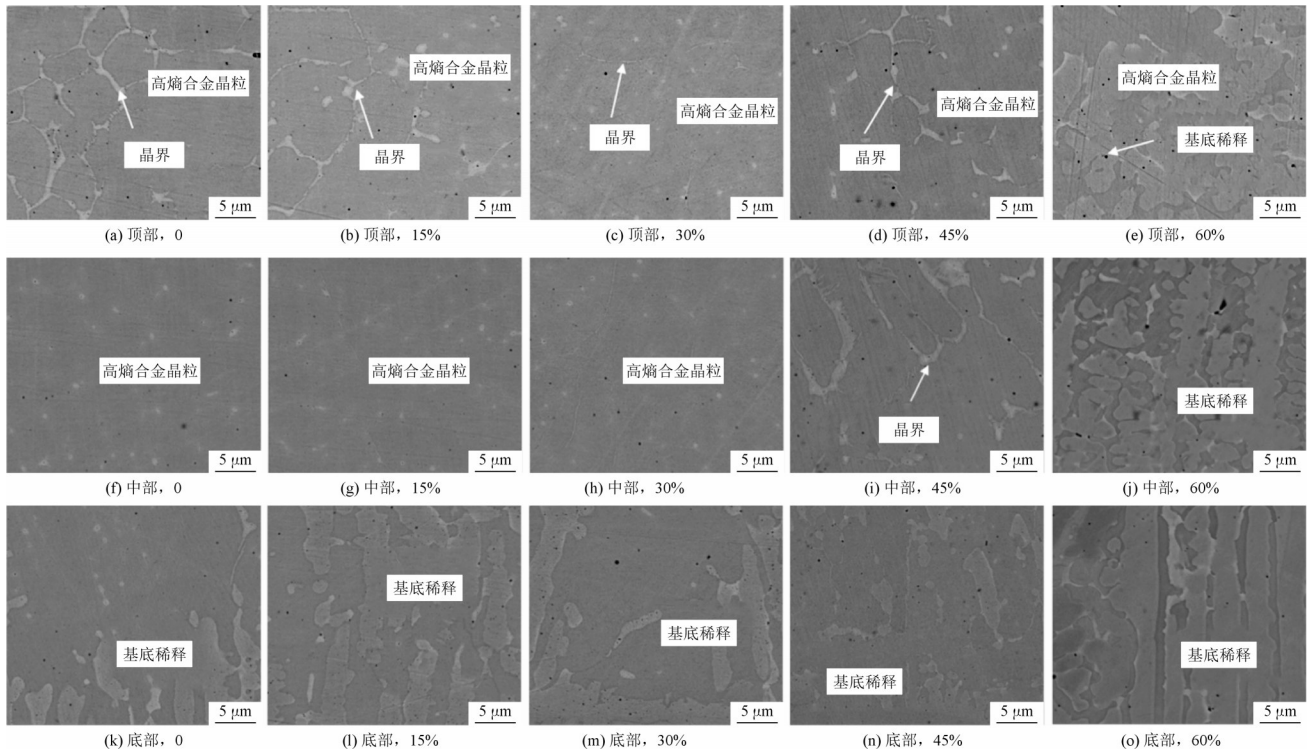


图2 不同超声振幅作用的AlCuFeCoNi HEA涂层的SEM组织^[16]

Fig.2 SEM images of AlCuFeCoNi HEA coatings with different ultrasonic amplitudes^[16]

熔覆 CoCrFeNiMo_x ($x=0, 0.25, 0.5, 0.75$) 高熵合金涂层后,对涂层表面进行超声冲击(UIT)处理,在塑性变形作用下,晶界粗糙化,原始晶粒分裂为更细的晶粒,变形程度随着离涂层表面距离的增加而逐渐减小。在位错强化和细化强化作用下,涂层的显微硬度、耐磨性和耐蚀性均得到提高,但在 $x=0.75$ 时涂层表现出高硬度,而UIT对提升涂层硬度效果有限。GUBP等^[19]在熔覆CrMnFeCoNi高熵合金涂层后,采取UIT可促使涂层粗大柱状晶体细化,UIT增加位错密度、减小晶粒尺寸,并将残余拉应力转化为压应力。UIT处理后的高熵合金涂层位错密度增加使表面变得致密,见图3,同时由于残余拉应力的降低,钝化膜在腐蚀过程中更不容易开裂,腐蚀更难进入涂层内部,从而提升了涂层显微硬度及防腐蚀性能。

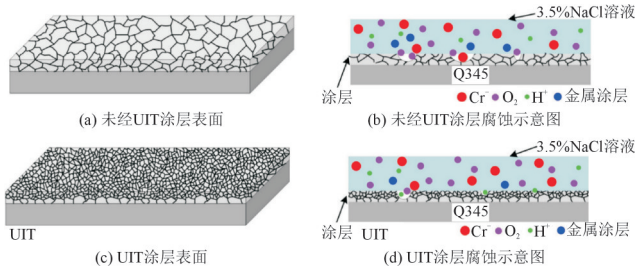


图3 UIT前后CrMnFeCoNi高熵合金涂层的电化学腐蚀机理^[19]

Fig.3 Electrochemical corrosion mechanisms of CrMnFeCoNi high-entropy alloy coatings before and after UIT^[19]

1.2 磁场

磁场对熔融态金属的影响分为洛伦兹力(Lorentz)和热电磁力作用、磁化力作用、磁化能作用、磁转矩及磁取向作用及焦耳热作用等^[20],这些作用通过影响熔体内部的流场、温度场和成分场来影响凝固温度、溶质分布及熔体流动,最终实现细化晶粒^[21]、改善凝固组织力学性能的目的。

磁场辅助激光熔覆的应用中,按磁场属性可分为稳态和非稳态,按磁场方向与基底的相对空间位置可分为纵向与横向。稳态磁场施加方式见图4。

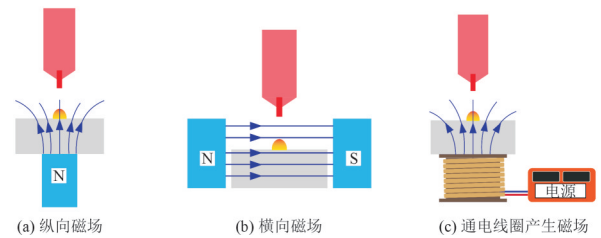


图4 不同的激光熔覆磁场施加方式

Fig.4 Different methods of applying laser cladding magnetic field

静磁场在辅助熔覆涂层时具有方向性,晶粒生长或涂层中的颗粒排布会受磁场方向影响。LIANG G等^[22-24]利用静磁场辅助激光熔覆技术在Ti-6Al-4V合金上成功熔覆TiN增强AlCoCrCuNiTi高熵合金涂层,形成BCC相、 $(\text{Ni}, \text{Co})\text{Ti}_2$ 金属间化合物和TiN。无磁场涂层中,TiN颗粒相呈近似球形,降低了表面能,并且TiN在 $(\text{Ni}, \text{Co})\text{Ti}_2$ 相中偏析,而施加磁场的

涂层 TiN 颗粒相表现为平行于磁场方向的“十”字形定向阵列,并且涂层顶部的 TiN 颗粒相数量明显多于中部。通过改变磁场强度发现,磁场可增加相变的驱动力,使 DR 区域形核速率提高、晶粒生长速率降低,见图 5,其中 0 T 与 1 T 条件下的 DR 晶粒平均尺寸差值约为 4.62 μm 。同时,在细化晶粒的过程中,磁场对熔池的搅拌作用还能将更多 TiN 颗粒从中下层带至上层。对不同轨迹和载荷下的摩擦因数和磨损质量

损失进行比较,见图 6,发现施加 1T 磁场的涂层在 200 N 和 300 N 载荷下摩擦因数最小,磨损损失质量也最小,施加 1T 磁场的 AlCoCrFeNiTi 高熵合金涂层展现出更优异的耐磨性能。在静磁场的恒定方向磁场作用下,晶粒生长或颗粒会受到磁场方向影响,呈现出涂层轴向与径向的性能存在差异或颗粒的有规律排布,定向的优化性能在一些特殊应用场景具有潜力。

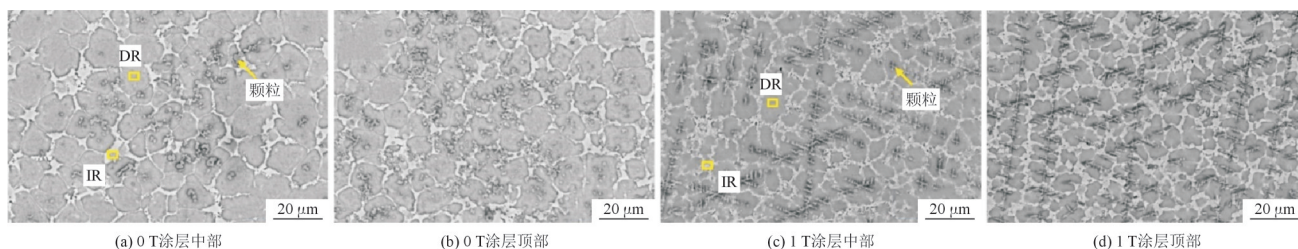


图 5 0 T 和 1 T 磁场作用下 AlCoCrFeNiTi 涂层中部和顶部的微观形貌(DR 为枝晶区,IR 为枝晶间区)^[22]

Fig.5 Micro morphologies of AlCoCrFeNiTi coatings in the middle and top regions under 0 T and 1 T magnetic fields^[22]

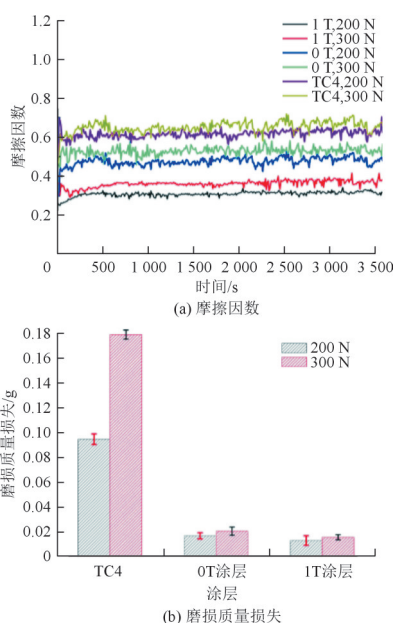


图 6 不同试验载荷及磁场强度下涂层与 TC4 合金的摩擦因数和磨损体积损失^[24]

Fig.6 Friction coefficient and wear volume loss of coating and TC4 alloy under different test loads and magnetic field intensity^[24]

QI K 等^[25]在 Ti-6Al-4V 合金表面熔覆 FeCoNiCr_{0.2}B_{0.2} 高熵合金涂层时施加静磁场,熔覆过程中,Ti 从基体扩散到涂层区域,冷却过程中发生 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变,细小的二次 α 相会从初次 α 相中析出,具有较好的力学性能,施加磁场的涂层二次 α 相数量会显著增加。EDS 检测显示涂层中含有大量 O 元素,但并未出现裂纹,这表明在磁场作用下,涂层的元素分布更为均匀,O 元素难以聚集,从而降低了涂层对裂纹的敏感性。当磁场强度增至 45 mT 时,二次 α 相尺寸开始增大,其原因是流动熔体在强磁场中因切割磁感线产生感应电

流,进而产生较高的焦耳热,相当于增加了涂层的热量输入,进而减缓了冷却速率,导致晶粒尺寸增大。

非稳态磁场一般包括交变磁场、脉冲磁场。CHEN Z X 等^[26]采用不同的磁场形式辅助熔覆 Ni60A 涂层,观察到稳态磁场对驱动熔池流动的马兰戈尼流几乎没有影响,并且出现环状偏析区,交变磁场作用下熔池中产生两个相反的旋转运动,促进物质对流,便于传热、传质,破坏初生枝晶形成和细化等轴晶体结构,但强对流并不一定是正对流,导致 CrB 偏析。脉冲磁场方向恒定,作用时间呈间断周期性变化,在控制裂纹、细化晶粒方面表现出较好的作用,但出现更严重 CrB 偏析。非稳态磁场因磁场方向呈周期性变化,在传热传质及晶粒细化方面的效果优于稳态磁场。对于多元高熵合金而言,这种高效的传热传质过程更有助于促进元素的均匀分布。

交变磁场的磁场方向随周期变化,对熔池具有更好的搅拌作用,传热传质方面更具优势。蒋鹏程^[27]和 ZHAO Y 等^[28]在 Inconel 718 合金基材上熔覆 WTa NbMo 高熵合金涂层,发现随着辅助的磁场强度的增加,涂层的显微硬度、组织均匀程度增加,施加交变磁场后,各涂层物相均为 BCC 的 WTa NbMo 固溶体相和 $\gamma-(\text{Ni}, \text{M})$,物相不变,旋转磁场作用下熔池流动速度加快,并产生感应电流,见图 7。感应电流在熔池中随着交变磁场周期变化而周期产生,交变磁场产生洛伦兹力可以改善熔池流动模式,加速熔池流动,不同强度磁场(30、45、60 和 90 mT)下涂层平均显微硬度相较不施加磁场涂层分别提高 2.59%、1.66%、4.64% 和 6.72%。当磁场强度为 45 mT 时,致密氧化层的成形速

度最快,原因在于涂层晶界数量增加后,Cr元素从基底向上扩散,能在涂层表面快速形成致密的Cr₂O₃氧化层。交变磁场的搅拌作用强,利于元素均匀分布,对于

难熔高熵合金熔点高、金属熔体流动性差具有良好的优化效果,但交变磁场会同步产生感应电流,增加涂层的热量输入,使晶粒变大增粗。

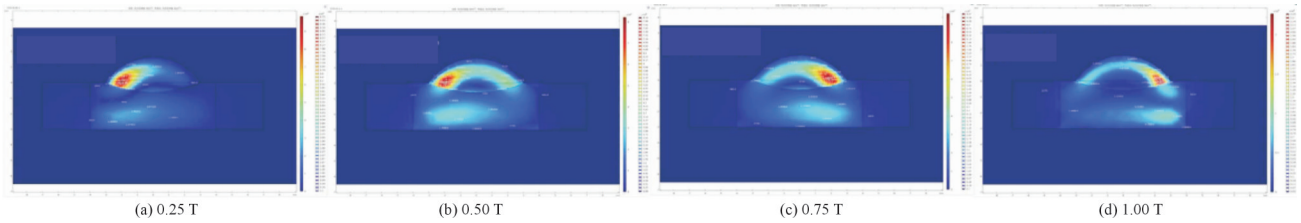


图7 辅助旋转磁场后熔池XZ方向电流密度模分布图^[27]

Fig.7 Current density mode distribution of molten pool along XZ direction assisted with auxiliary rotating magnetic field^[27]

1.3 温度场

激光熔覆过程中输入外部热量能够显著改善熔池的热力学状态,减小熔覆热应力产生,降低裂纹产生可能性,减缓熔池的凝固速度,使应力得到释放,抑制了裂纹扩展^[29]。辅助热场形式包括电阻丝接触基底预热、电磁感应加热和激光同步预热:①基底预热以电热阻丝为热源装置,置于基材底部,通过自下向上接触传导至涂层表面,对熔池温度梯度调控。②电磁感应加热的热场由线圈中金属因电磁感应产生涡流形成,通常由感应电源、感应线圈、红外测温仪及温度控制器耦合组成。③激光同步预热是利用低功率激光扫描成形成区域,对所需区域精准地实施预热。

热场通过对基板输入热量,从而减小涂层与基板之间的热量梯度,以达到减小应力、减少裂纹及增加冶金结合度的效果。LIU J等^[30]和LIU H等^[31]在熔覆AlCoCrFeNi和AlCoCrFeNiTi_x的过程中,对基板均预热至200℃,预热方式见图8,涂层晶粒相互结合良好,涂层与基底冶金结合度良好,熔覆得到致密的无孔洞、无裂纹等缺陷的涂层。冶金结合界面向上晶粒由平面晶变为柱状晶,再转变为柱状枝晶,平面晶体的厚度约

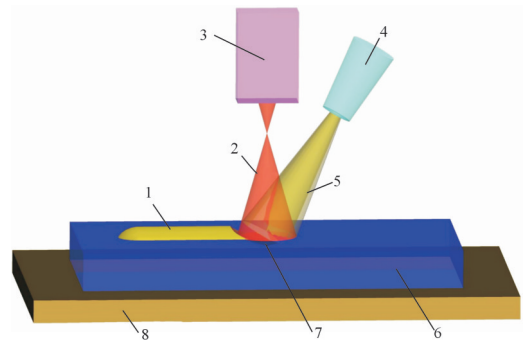


图8 热场施加方式^[30]

Fig.8 Method of applying thermal fields^[30]

1.涂层 2.光斑 3.激光源 4.粉末 5.氩气 6.基底 7.熔池 8.加热平台

为5 μm。晶粒形貌的转变在于凝固过程中熔池垂直方向温度梯度(G)和晶体生长速度(v)的变化。离熔池底部距离增加, G 减小, v 增大,较大的 G 和较小的 v 为平面晶体的形成创造了条件。向熔池中心区域靠近, G 减小和 v 的增大导致柱状晶体形成树突状晶体。GU B P等^[32]研究热场辅助对激光熔覆CrMnFeCoNi高熵合金,见图9。涂层搭接缺陷随温度提升而消失,孔隙率也同步降低,但预热温度提升至450℃时,过高的热量输入导致Mn元素蒸发,涂层再次出现大量孔隙。

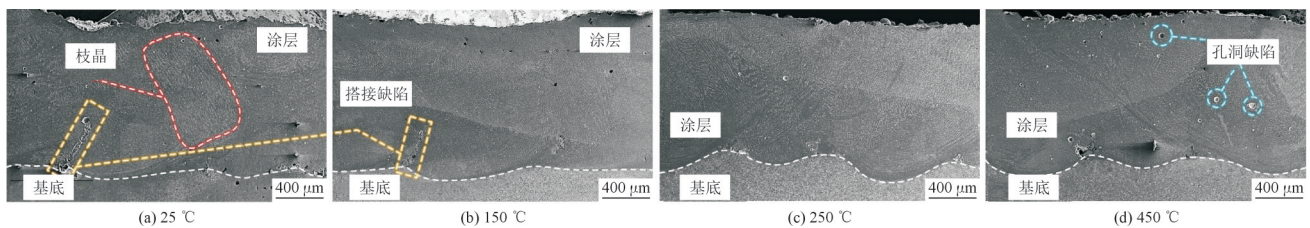


图9 不同预热温度下的涂层形貌^[32]

Fig.9 Morphologies of coatings at different preheating temperatures^[32]

低温场则与热场相反,低温场加大了温度梯度和冷却速率,晶粒生长的时间被大幅缩短,提高了组织相变驱动力,导致形成细小晶粒,从而提高涂层的硬度和耐磨性。王凯明等^[33]采用液氮辅助冷却FeCoNiCrNb_{0.5}高熵合金,避免传统凝固过程中可能出现的气孔和夹

杂等缺陷,熔池受凝固引发的极大热应力和组织转变应力,在熔覆层中导致位错运动和堆积,提高固溶极限,促进固溶体组织的生成使晶粒得到细化。在液氮辅助冷却下,较空气自然冷却,涂层显微硬度提升至1.3倍,磨损体积减少了55.4%。然而,低温场会引发较

为严重的冶金结合问题,见图10,低激光功率下,液氮辅助冷却会因热量不足难以熔化基体,导致贯穿热影响区的裂纹产生,严重影响冶金涂层与基体的结合质

量,涂层效果不如自然空气冷却的。因此采取低温场辅助需要提高激光功率增加基材熔化率,温度梯度进一步增大,增加裂纹产生的可能,适用材料范围较窄。

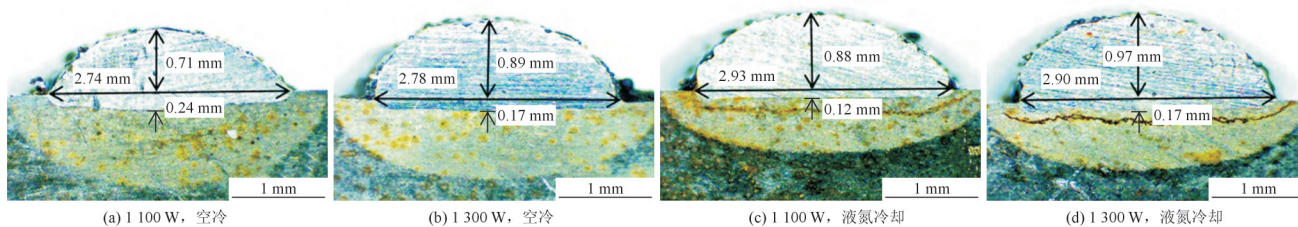


图10 不同激光功率和冷却条件下FeCoNiCrNb_{0.5}高熵合金熔覆层的横截面形貌^[33]

Fig.10 Cross-sectional morphologies of FeCoNiCrNb_{0.5} high-entropy alloy cladding layers under different laser powers and cooling conditions^[33]

热场与低温场辅助熔覆高熵合金的本质都是通过温度场调控改变高熵合金涂层形成时的温度梯度与冷却速率。两者在实际应用中差异显著,低温场施加需要复杂温控系统,在熔覆中维稳难度大,且会加剧脆性涂层的应力集中,适用范围受限,而热场调控更简便,通过红外加热等成熟手段即可实现。对于难熔高熵合金涂层,既能提升粉末熔化率,增加冶金结合度,同时缓解温度梯度以降低内应力和裂纹,应用前景更广阔。

1.4 电场

金属液中离子在电场作用下会发生定向迁移,不同金属离子携带电量不同,在电场的作用下,运动速度各异,导致液态金属的内部流动。高熵合金成分多样复杂,内部流动会更加不规则,同时电流的通入引起的焦耳热会引起熔体温度变化,影响金属凝固过程^[34]。

直流电流流过熔池极小,并且产生热量,晶粒尺寸增加,导致晶粒变大变粗^[35]。交变电流在熔池凝固时的形核势垒得到一定程度的降低,形核更为容易,提高了形核率,从而细化晶粒^[36]。电流对晶粒细化的影响主要集中在涂层的顶部和底部,趋肤效应使电流集中在导电熔体表面,因此电流对涂层顶部和底部都有明显的晶粒细化作用,但对涂层底部的作用更为显著^[37]。脉冲电流作用下,降低金属表面上自由电子的密度,允许一部分激光穿过自由电子势垒被金属材料内部的束缚电子以能量的形式吸收,稀释率的提高和热影响区宽度的减小增加了冶金结合的水平^[38]。试验证明脉冲电流的均值和频率增加可以减少孔隙,增加形核时过冷度,减小晶粒尺寸^[39]。因此,交变电流和脉冲电流较直流电流具有更好的应用前景。

XIE S Y等^[40]采用电流辅助Al_{0.3}CoCrFeNi高熵合金退火,通过对比有无电流辅助涂层中B2(有序BCC)颗粒的影响,根据B2粒子析出过程中界面迁移速率 v 随晶粒半径 r 的假设sigmoid型生长曲线,得出 $t-v$ 曲

线,见图11, t 为退火时间。在B2颗粒析出的初期阶段,电流显著地提高了 v ,通电流较不通电流的情况下高出近200倍,证明电流可以降低B2颗粒扩散活化能,相比常规真空退火Al_{0.3}CoCrFeNi高熵合金中的B2颗粒生长缓慢。电流辅助下的常规真空退火,B2颗粒能够更快地析出,见图11b,电流辅助下的高熵合金涂层抗拉强度达到了常规真空退火1200 min的效果。在电流辅助下,B2颗粒能够在Al_{0.3}CoCrFeNi高熵合金涂层中短时间内快速析出。电场辅助激光熔覆高熵合金,对于激光熔覆速冷速热的特性以及高熵合金元素复杂具有良好的契合度和改善效果。结合现有物理场辅助激光熔覆研究,归纳物理场对高熵合金涂层的调控机理,见图12。

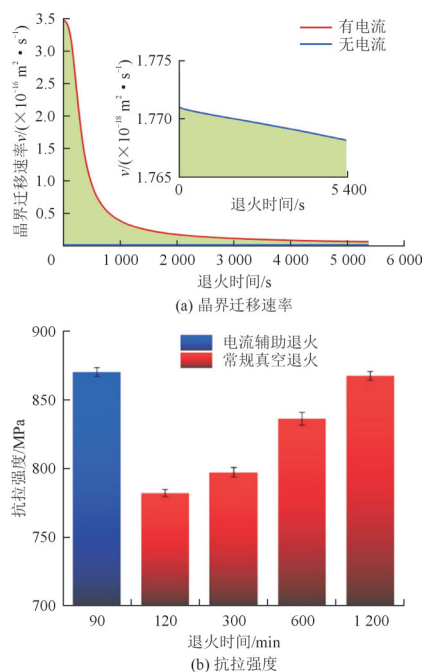


图11 电流对晶界迁移速率影响及电流辅助退火与常规真空退火试验比较^[40]

Fig.11 Effects of current on grain boundary migration rate and experimental comparison of current-assisted annealing and conventional vacuum annealing^[40]

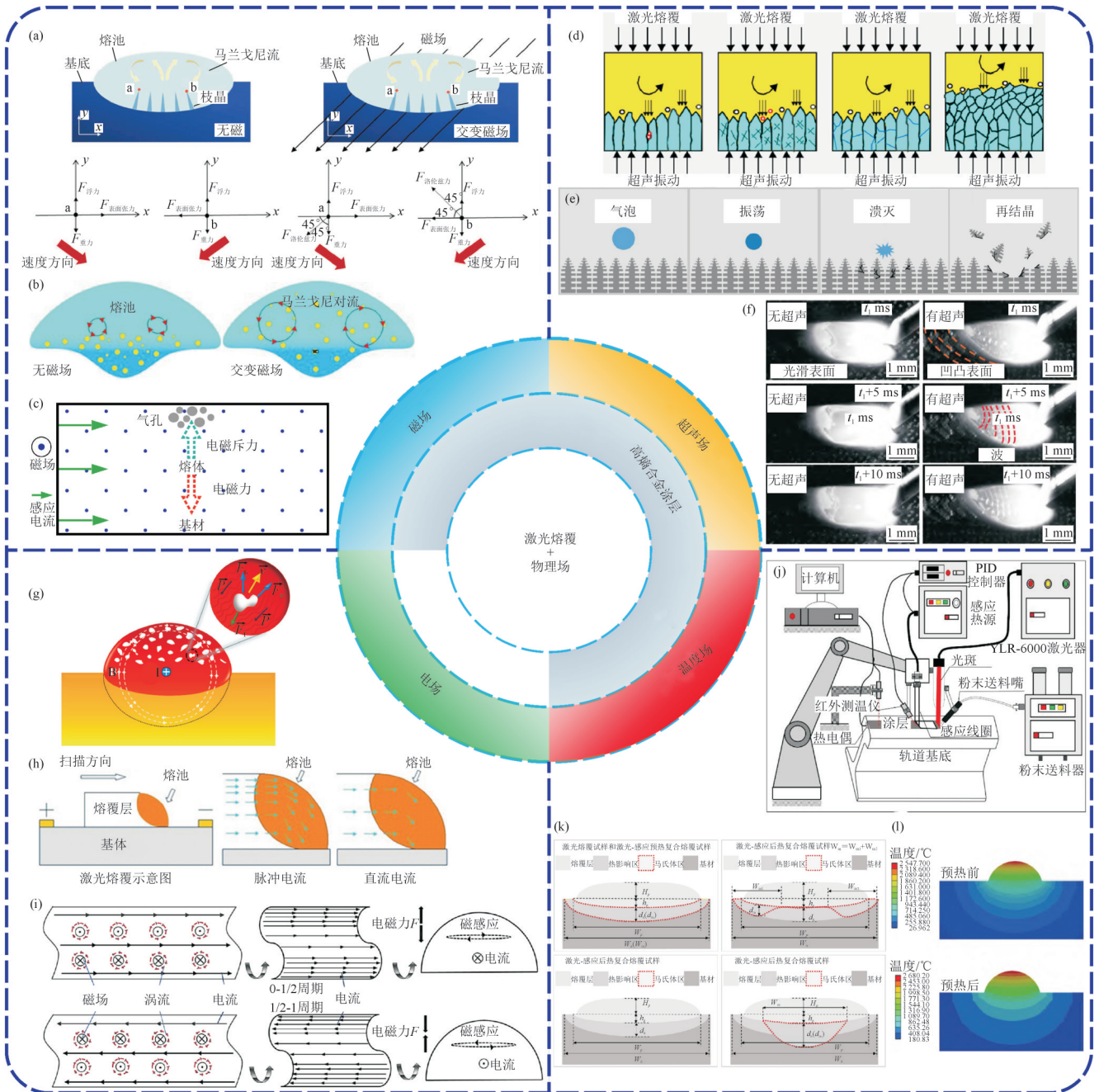


图 12 物理场影响涂层作用 [27,37,41-48]

Fig.12 Effect of physic field on coatings [27,37,41-48]

- (a) 交变磁场下某点的流动状态和受力分析; (b) 交变磁场强化熔池对流; (c) 静磁场下产生电磁力对熔体的定向作用; (d) 超声辅助激光熔覆柱状晶粒组织演变; (e) 声空化对金属凝固成形的作用机制; (f) 有/无超声熔覆时的熔池流动; (g) 脉冲电流影响熔池内部运动的示意图;
- (h) 不同电流形式下熔池内电场分布; (i) 交流电流在纵截面上的分布和熔池横截面上的感应电磁力; (j) 激光感应复合熔覆加工系统;
- (k) 不同热场施加方式和工艺参数的变化对单道涂层截面形貌影响; (l) 基体预热前后的涂层横截面温度分布

2 复合辅助能场

在熔池的形成与调控过程中,单一物理场虽然在一定程度上对熔池的流动、传热和凝固过程产生影响,但其作用范围和效果往往受到自身特性的限制,并且存在一些负面效应。GAO T Z等^[49]发现当超声功率增大时,在熔池中会引起大的湍流,导致流动不稳定和分子相互

作用增强,从而使元素沉淀和聚集。刘洪喜等^[50]发现熔池金属液表面产生趋肤效应和交变电磁力,使凝固后熔覆层的表面形态呈波浪式分布。复合物理场的协同作用不仅可以充分发挥各单一物理场的优势,还能在单一物理场的基础上实现相互促进和进一步的放大效应。同时有效规避单一物理场可能带来的负面效应,从而实现对熔池的全方位优化,精准调控涂层的优化过程,为高熵合金涂层的性能提升提供了更为有效的技术手段。

ZHANG N等^[51]采用稳态磁场与电场复合成电磁复合场,通过改变通入的直流电大小,改变复合场整体强度,研究电磁复合场对涂层孔隙的影响。发现当电磁复合场产生的安培力与重力方向相反时,安培力阻碍熔体向下运动,气体难以向上运动,并且孔隙增加,合并成为更大不规则孔隙,严重影响涂层成形质量。反之,熔体在安培力作用下向下运动,气泡向表面运动逸出,便于后续表面处理,将杂质与孔隙去除。随着电流增大,电磁复合场的强度也增强,熔体流动速度加快,涂层的孔隙率越低,但熔体对基底的冲刷更加剧烈,传热传质更加高效,从而导致稀释率增加。王浩^[52]采用电磁复合场辅助激光熔覆技术制备AlCoCrFeNi/Ti(C,N)复合涂层,实现方案见图13。不同条件下熔池的受力状态与熔体流动规律见图14。在无物理场的情况下,熔池某点受到浮力、重力和流体对该点的阻力,该点运动轨迹向熔池底部,在稳态磁场下,该点在磁场中受到洛伦兹力,降低了阻力,抑制流体向底部的运动。在电磁复合场下,该点受到电场与稳态磁场相互作用的洛伦兹力,大幅抑制熔池运动并促进晶粒的稳定生长。仅采取磁场辅助激光熔覆时,AlCoCrFeNi-Ti(C,N)涂层的微观结构发生转变,凹陷结构的尺寸增加,轮廓变得更加规则,网状结构更宽更连续。进一步引入电场,形成电磁复合场,涂层的微观结构发生了显著改善,涂层中凹陷结构变得连通,原本凸起的网状结构转变为中空带状结构。结构变化主要归因于定向凝固过程中电磁力引起的溶质迁移,电磁力的作用使得熔池中的溶质分布更加均匀,从而抑制宏观偏析现象。同时,均匀的溶质分布增加了相变的驱动力,类似提高过冷度的效果,使晶核形成速率显著增加,涂层的微观结构因此得以精细化。静磁场具有恒定的磁场方向,对调控熔池流动具有方向性,与熔池流动方向相同便促进流动,反之则抑制。由于流动的金属熔体在磁场切割磁感线,会产生感应电流,称电磁场,但电磁复合场具有更多可调节性,可以改变磁场或者电流大小,来调控熔池的流动,但电磁场是由单一磁场或电场同时伴生其他物理场,不易调控。

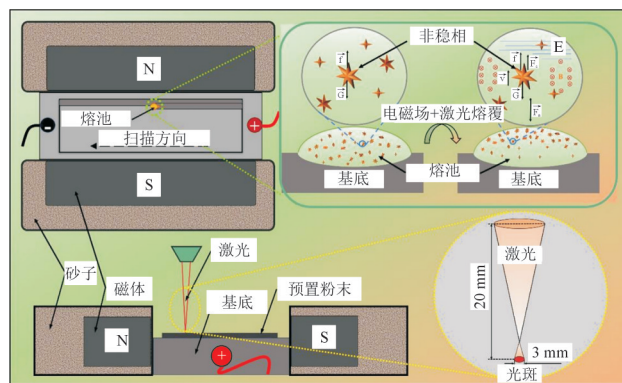


图13 电磁复合场辅助激光熔覆示意图^[52]
Fig.13 Schematic diagram of electromagnetic composite field-assisted laser cladding^[52]

GUO H F等^[53]采取超声场与温度场复合辅助熔覆WC-Ni涂层,发现在超声场的空化和声流作用下,材料的固溶现象改善,内部温度梯度减小,晶粒形核加速,外延晶体细化,但在温度场作用下,材料的冷却速率减缓,导致部分晶粒再结晶,形成粗大晶粒,在复合场的作用下,WC均匀分布在涂层中,镍基粘结相晶粒生长被限制,导致WC颗粒周围的镍基粘结相晶粒细化效果更显著。WEN X等^[54]采取基底预热和超声场辅助的形式在316 L基材制备FeCrCoAlMn_{0.5}Mo_{0.1}高熵合金,发现在超声场作用下熔池的快速凝固特性能够显著抑制晶粒的生长,同时在涂层微观结构中引入了更多的晶界。基板预热至450℃,能有效减小温度梯度,从而降低因内应力导致的涂层开裂可能性,同时,合适的预热温度可提高稀释率,有助于提升熔体的成形质量,并增强涂层与基底材料的冶金结合效果。施加热场是常见的减小应力、增加涂层和基底冶金结合的辅助方式,但热量的输入会延长熔池凝固时间,引入超声场则可进一步缩小温度梯度,其产生的声流搅拌作用既能加速涂层冷却凝固,又能破碎粗大晶粒,从而有效规避单一热场带来的弊端。

ZHANG T等^[55]观察到在超声电磁复合场下,涂层中的WC颗粒在声流作用下运动阻力降低,同时受电磁场产生的洛伦兹力进一步减小阻力,由此扩大分布

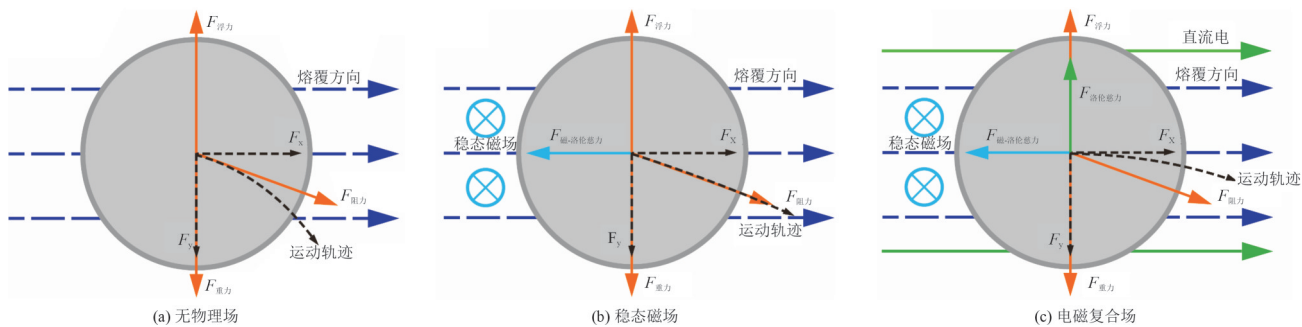


图14 熔体受力图

Fig.14 Schematic diagram of melt force

范围并提升了均匀程度。在超声和电磁场作用下,WC颗粒的裂纹减少,并且由于复合场的强烈搅拌作用,过冷度增加,减少WC颗粒溶解,在其周围析出细小球状碳化物,抑制涂层中裂纹的扩展。超声电磁复合场能够扩大熔池的流动范围并提高其流动速度,从而实现单一场无法达成的优化效果。目前在辅助激光熔覆高熵合金这一领域,此类复合场的应用尝试尚未开展,因此具有极大的探索潜力与应用价值。

复合场辅助熔覆工艺结合不同物理场的优势,有效突破单一物理场的局限性,减少单一场的负面效应,如不合适的超声场强度会导致涂层表面成形质量差、稀释过大,温度场中热场会增加涂层热量输入,虽然减小了温度梯度,但因延长晶粒生长时间导致晶粒粗大等。高熵合金元素多样复杂,单一物理场的作用效果和范围有限,复合场可以扩大物理场的作用范围。另外,单一超声场中超声传播具有方向性,通过与磁场、电场进行复合,与电磁场的切向搅拌作用结合,可以大幅放大超声场的声流运动的影响范围和熔池流动速度,同时也可以引入热场,延长熔池的存在时间,进一步扩大物理场的作用时间。然而,复合场的数量增多,导致所需配套设备增加。在有限的操作空间内,设备增多会进一步压缩可操作的活动范围,导致操作自由度降低,还会因设备密集而阻碍热量散发,限制整体工艺的可操作性与优化空间。

3 总结与展望

(1)超声场的声流和空化作用能减小涂层孔隙率、细化晶粒、减少偏析,但超声波传播衰减大,作用效果沿传播方向减弱且难以覆盖全部熔池区域。多维超声可在多个方向施加超声场,形成立体作用区域,使熔池各部位均受超声作用。

(2)稳态磁场可调节熔体流速,加速流动时促进热传质和气泡排出,减缓流动时减少气体进入熔池和基材稀释;非稳态磁场能加速熔体流动、产生感应电流优化涂层,但过强的磁场会导致集肤效应和焦耳热效应,影响涂层质量,其高熵合金激光熔覆中应用较少,脉冲磁场虽未广泛实践,但良好的调控作用和非接触性优点使其具有巨大应用潜力。

(3)热场通过加热提升粉末熔化效率,降低熔池温度梯度和热应力,减少裂纹;低温场通过加大温度梯度加快晶粒冷却,得到细小均匀的晶粒,显著改善涂层力学性能。对于高熵合金,热场辅助作用更广泛,尤其对难熔高熵合金,其熔点高、涂层应力大,热场可同时优化粉末熔化不充分和涂层应力过大的问题。

(4)电场可增加金属凝固过程中的过冷度,提高形

核率,交变电流和脉冲电流还具备击碎晶粒,快速促进晶体析出的作用,对应激光熔覆速冷速热的加工特点,电场辅助具有较高的契合度和应用前景。

(5)复合场(超声场、磁场、电场、温度场)协同作用可更全面优化高熵合金性能。其中超声场加速熔池流动,交变磁场扩大流动范围,两者协同显著提升熔池流动性和流动空间,若再引入温度场,可以增加熔池的流动时间。多场互补作用覆盖熔池不同区域(超声场作用于底部,磁场调控中部,电场细化底部和表面),快速广泛的流动对于密度高的高熵合金具有良好的调控作用,更适用于难熔高熵合金。目前该技术研究尚处起步阶段,但已展现出重要发展前景。

参 考 文 献

- [1] YE H J W, LIN S J, CHIN T S, et al. Formation of simple crystal structures in Cu-Co-Ni-Cr-Al-Fe-Ti-V alloys with multiprincipal metallic elements [J]. *Metallurgical & Materials Transactions*, 2004, A35(8): 2 533-2 536.
- [2] 吕昭平,雷智锋,黄海龙,等.高熵合金的变形行为及强化[J].*金属学报*, 2018, 54(11): 1 553-1 566.
- [3] ZHANG W, CHABOK A, KOOI B J, et al. Additive manufactured high entropy alloys: A review of the microstructure and properties[J]. *Materials & Design*, 2022, 220: 110 875.
- [4] LIU Y S, XIANG D D, WANG K M, et al. Corrosion of laser cladding high-entropy alloy coatings: A review[J]. *Coatings*, 2022, 12(11): 1 669.
- [5] ZHONG M, LIU W. Laser surface cladding: The state of the art and challenges[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2010, C224(5): 1 041-1 060.
- [6] 崔宸.激光熔覆LaB₆/FeCoNiCrMo高熵合金涂层组织演变机理及性能调控研究[D].江苏无锡:江南大学,2024.
- [7] ZHU Q, LIU Y, ZHANG C Y. Laser cladding of CoCrFeNi high-entropy alloy coatings: Compositional homogeneity towards improved corrosion resistance [J]. *Materials Letters*, 2022, 318: 132 133.
- [8] GAO Z N, WANG L L, WANG Y N, et al. Crack defects and formation mechanism of FeCoCrNi high entropy alloy coating on TC4 titanium alloy prepared by laser cladding [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 903: 163 905.
- [9] GUO Y X, LIU Q B. MoFeCrTiWAlNb refractory high-entropy alloy coating fabricated by rectangular-spot laser cladding [J]. *Intermetallics*, 2018, 102: 78-87.
- [10] 王宇豪,周后明,王泽达,等.电磁场对激光熔覆镍基涂层组织性能的影响[J].*表面技术*, 2024, 53(21): 198-207.
- [11] 张腾.超声-电磁辅助激光熔覆IN718/WC涂层组织演变及性能研究[D].江苏镇江:江苏大学,2023.
- [12] 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.
- [13] CHEN C, FAN C L, LIN S B, et al. Effect of ultrasonic pattern on weld appearance and droplet transfer in ultrasonic assisted MIG welding process [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 35: 368-372.
- [14] TAO W W, LI Q T, ZHOU T Y, et al. The influence of ultrasonic assistance on microstructure and properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy prepared by laser cladding [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 29: 5 161-5 165.
- [15] ZHAO Y, WU M F, HOU J C, et al. Microstructure and high temperature properties of laser clad W-Ta-Nb-Mo refractory high

- entropy alloy coating assisted with ultrasound vibration[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 920: 165-888.
- [16] ZHANG M N, WANG Y S, WANG D F, et al. Grain refinement and mechanical properties improvement of AlCuFeCoNi high-entropy alloy coatings fabricated by resonant ultrasonic assisted laser cladding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 182: 112-233.
- [17] ZHAO S, TAHERI M, SHIRVANI K, et al. Microstructure of NbMoTaTiNi Refractory high-entropy alloy coating fabricated by ultrasonic field-assisted laser cladding process[J]. *Coatings*, 2023, 13(6): 995.
- [18] LI M Y, GUO L H, LI J L, et al. Effect of ultrasonic impact treatment on the microstructure and properties of laser clad CoCrFeNiMox high entropy alloy coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2024, 476: 130-243.
- [19] GU B P, CHU J H, WANG Y S, et al. Effects of ultrasonic impact treatment on the corrosion resistance of laser-clad CrMnFeCoNi high-entropy alloy coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2024, 489: 131-102.
- [20] 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.
- [21] 陈国军. 低频脉冲磁场金属凝固晶粒细化机理研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- [22] LIANG G, JIN G, CUI X F, et al. Designing AlCoCrFeNiTi high-entropy alloy with the directional array TiN by magnetic field-assisted laser cladding[J]. *Applied Physics*, 2021, A127: 350.
- [23] LIANG G, JIN G, CUI X F, et al. Synthesis and characterization of directional array TiN-reinforced AlCoCrCuNiTi high-entropy alloy coating by magnetic-field-assisted laser cladding[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, 30(5): 3 568-3 576.
- [24] LIANG G, JIN G, CUI X F, et al. The directional array TiN-reinforced AlCoCrFeNiTi high-entropy alloy synthesized in situ via magnetic field-assisted laser cladding[J]. *Applied Surface Science*, 2022, 572: 151-407.
- [25] QI K, JIANG L. Microstructure and wear resistance of FeCoNiCr_{0.2}B_{0.2} alloy prepared by magnetic field-assisted laser cladding on Ti-6Al-4V alloy[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2025, 34(2): 1 759-1 770.
- [26] CHEN Z X, ZHOU H M, LI M F, et al. Effect of magnetic field waveform on microstructure and properties of laser cladding [J]. *Materials Letters*, 2021, X11: 100-084.
- [27] 蒋鹏程. 旋转磁场辅助激光熔覆难熔高熵合金涂层的工艺与性能研究[D]. 江苏镇江: 江苏科技大学, 2023.
- [28] ZHAO Y, WU M F, JIANG P C, et al. Microstructure of WTaNbMo refractory high entropy alloy coating fabricated by dynamic magnetic field assisted laser cladding process[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 20: 1 908-1 911.
- [29] 梁少端, 张安峰, 王潭, 等. 感应加热消除激光直接成形DD4零件裂纹[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 202-003.
- [30] LIU J, LIU H, CHEN P J, et al. Microstructural characterization and corrosion behaviour of AlCoCrFeNiTi_x high-entropy alloy coatings fabricated by laser cladding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 361: 63-74.
- [31] LIU H, LIU J, CHEN P J, et al. Microstructure and high temperature wear behaviour of in-situ TiC reinforced AlCoCrFeNi-based high-entropy alloy composite coatings fabricated by laser cladding [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 118: 140-150.
- [32] GU B P, ZHANG H X, WANG Y S, et al. Microstructure and corrosion properties of CrMnFeCoNi high entropy alloy coating by temperature field-assisted laser cladding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2024, 494: 131-473.
- [33] 王凯明, 姜芙林, 卜善飞, 等. 液氮辅助激光熔覆温度场仿真及熔覆层摩擦磨损性能分析[J]. *金属热处理*, 2024, 49(6): 239-247.
- [34] 张泽桦, 李小强, 朱德智, 等. 电流对7075-T6铝合金双丝脉冲冷金属过渡焊接接头组织和力学性能的影响[J]. *焊接学报*, 2022, 43(11): 68-77.
- [35] XIE D Q, ZHAO J F, QI Y G, et al. Decreasing pores in a laser cladding layer with pulsed current[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(11): 111-401.
- [36] 张颖, 谢德巧, 沈理达, 等. 交变电流辅助激光熔覆的基体电场仿真[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(6): 138-141.
- [37] ZHAI L L, WANG Q, ZHANG J W, et al. Effect of alternating current electric field on microstructure and properties of laser cladding Ni-Cr-B-Si coating[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(14): 16 873-16 879.
- [38] LI X, WANG X L, YU Y. The electromagnetic effect on microscopic features of Co-6 coatings on U71Mn by pulse current-assisted laser cladding[J]. *Materials Letters*, 2024, 375: 137-212.
- [39] 刘清梅. 脉冲电磁场凝固组织细化技术及其应用[J]. *特种铸造及有色合金*, 2024, 44(12): 1 626-1 634.
- [40] XIE S Y, ZHANG J X, LI R D, et al. Accelerated precipitation of the B2 particles and its effect on Al_{0.3}CoCrFeNi high-entropy alloy by electric current assisted annealing [J]. *Materials Characterization*, 2021, 181: 111-434.
- [41] 朱宇旭. 交变磁场辅助激光熔覆制备WC/Ni60复合涂层组织及性能研究[D]. 湖南湘潭: 湘潭大学, 2022.
- [42] 彭方超. 双超声能场辅助激光熔丝增材制造Ti-6Al-4V合金组织性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
- [43] 俞晓文. 超声振动在激光熔覆成形中的作用机制及其建模方法[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.
- [44] 姚喆赫, 杨诗轩, 祝毅, 等. 超声振动对激光熔覆过程应变场的影响研究(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2024, 53(11): 1-13.
- [45] LIU Z, LIU P, ZHOU L F, et al. Effects of pulsed current on the microstructure and properties of laser clad TC17 titanium alloy[J]. *Materials*, 2023, 17(1): 91.
- [46] 谢德巧. 脉冲电流辅助激光快速成形镍基高温合金的工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [47] 孟丽. 钢轨表面激光-感应复合熔覆技术基础研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [48] 刘立培, 陈皓, 杨仁人, 等. 基体预热对激光熔覆制备M2钢熔覆层表面硬度均匀性的影响[J]. *中国激光*, 2024, 51(20): 95-109.
- [49] GAO T Z, ZHANG N N, BAI H G, et al. Microstructure evolution and wear properties of Ni60-based coating by ultrasonic power-assisted laser cladding [J]. *Materials Characterization*, 2024, 215: 114-149.
- [50] 刘洪喜, 蔡川雄, 蒋业华, 等. 交变磁场对激光熔覆铁基复合涂层宏观形貌的影响及其微观组织演变[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11): 2 402-2 410.
- [51] ZHANG N, LIU W W, DENG D W, et al. Effect of electric-magnetic compound field on the pore distribution in laser cladding process[J]. *Optics and Laser Technology*, 2018, 108: 247-254.
- [52] 王浩. 电磁场辅助激光熔覆AlCoCrFeNi/Ti(C,N)梯度结构复合涂层的制备及性能研究[D]. 郑州: 中原工学院, 2024.
- [53] GUO H F, LIU C, WANG M Y, et al. Study on performance of laser cladding of 60%WC-Ni coating with ultrasonic/temperature composite energy field[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1 034: 181-344.
- [54] WEN X, CUI X F, JIN G, et al. Design and characterization of FeCrCoAlMn_{0.5}Mo_{0.1} high-entropy alloy coating by ultrasonic assisted laser cladding[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 835: 155-449.
- [55] ZHANG T, ZHOU J Z, WANG J Z, et al. Effect of hybrid ultrasonic-electromagnetic field on cracks and microstructure of Inconel 718/60%WC composites coating fabricated by laser cladding[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(22): 33 901-33 913.

(编辑: 彭瑾)