

DOI: 10.11973/jxgccl202308001

激光熔覆层裂纹控制的研究进展

王廷宣¹, 章健^{1,2}, 刘敬^{1,2}, 宋德琨¹

(1. 安徽理工大学机械工程学院, 淮南 232001; 2. 滨州学院机电工程学院, 滨州 256600)

摘要: 激光熔覆技术是一种发展前景广阔的新型表面改性技术, 既满足了材料表面特定性能的要求, 又节约了大量的贵重元素。裂纹问题是制约激光熔覆技术广泛工业化应用与进一步发展的主要阻碍之一。介绍了激光熔覆层裂纹产生的原因, 综述了裂纹的控制措施, 包括熔覆层材料成分设计、设置过渡层、工艺参数优化、基体预热、外场(力)辅助等, 最后对当前激光熔覆层裂纹控制措施中仍存在的问题进行了总结, 并展望了未来的研究方向。

关键词: 激光熔覆; 裂纹; 开裂机理; 残余应力; 控制措施

中图分类号: TG147

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2023)08-0001-07

Research Progress on Crack Control of Laser Cladding Layer

WANG Tingxuan¹, ZHANG Jian^{1,2}, LIU Jing^{1,2}, SONG Dekun¹

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Huainan 232001, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Binzhou University, Binzhou 256600, China)

Abstract: Laser cladding technology is a new type of surface modification technology with broad development prospects, which not only meets the requirements for surface specific properties of materials, but also saves a lot of precious elements. The crack problem is one of the main obstacles restricting the wide industrial application and further development of laser cladding technology. The causes of crack formation in laser cladding layers are described, and the crack control measures are reviewed, including the material composition design of cladding layers, setting the transition layer, process parameter optimization, matrix preheating, external field (force) assistance, etc. Finally the problems existing in the current crack control measures of laser cladding layers are summarized, and the future research direction is prospected.

Key words: laser cladding; crack; cracking mechanism; residual stress; control measure

0 引言

激光熔覆作为一种先进的表面工程技术, 能够显著提高机械部件的耐磨损、耐腐蚀和热稳定性, 从而延长其使用寿命, 降低维护成本, 大幅提高经济效益, 因此在航空航天、能源、汽车以及医疗设备等众多领域得到了广泛应用。然而, 在实际操作过程中, 激光熔覆层易产生裂纹等缺陷, 制约着该技术的进一步发展^[1]。近年来, 国内外学者围绕如何控制熔

覆层裂纹展开大量的研究; 研究主要集中在熔覆材料的成分设计和制备工艺方面。为了给广大研究人员提供参考, 作者总结了熔覆层裂纹产生的原因, 从熔覆层材料成分设计、熔覆层和基体间增设过渡层、工艺参数优化、基体预热、外场(力)辅助等方面梳理了降低熔覆层开裂敏感性的措施。

1 激光熔覆层裂纹产生原因

激光熔覆层在成形过程中的熔化、凝固和冷却均在极短的时间内完成, 急热急冷的特性导致熔覆层在外部的拘束下极易产生内应力。内应力主要包括热应力、组织应力和约束应力, 其中: 热应力是由于熔覆温度与室温相差较大导致较大的温度梯度, 以及基体与熔覆材料的导热系数和热膨胀系数等热物性参数不同而产生的; 组织应力是由于熔覆层与

收稿日期: 2022-09-15; 修订日期: 2023-08-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52205181, 52075047); 山东省高等学校青创科技支持计划项目(2022KJ089)

作者简介: 王廷宣(1998—), 男, 山东费县人, 硕士研究生

通信作者(导师): 章健教授

基体材料的比热容不同,在相变过程中结构转变不均匀而产生的;约束应力是指材料在受热膨胀、遇冷收缩过程中因周边的束缚而产生的压/拉应力^[2-3]。如果内应力无法及时释放,不断累积超过了材料强度,就会导致裂纹的萌生与扩展;此外,激光熔覆过程中的除气、造渣、除氧反应速率很快,熔池存在时间短暂,会出现诸如气孔、夹杂物等缺陷,应力易集中在这些缺陷周围,进而导致裂纹的萌生^[4-5]。

裂纹的形成与熔覆层结构缺陷和内应力密切相关,是冶金和力学2种因素共同作用的产物。通过降低熔覆层形成过程中的内应力,可以有效减小熔覆层开裂概率。

2 激光熔覆层裂纹控制措施

2.1 熔覆层材料成分设计

通常,选择热膨胀系数较小的熔覆材料能够提高熔覆层的结构稳定性,进而减少由热膨胀引起的层间剥离、开裂等问题^[6-7]。张坚等^[8]在45钢表面激光熔覆具有较小的热膨胀系数的Fe-36Ni因瓦合金熔覆层,发现相较于基体,熔覆层的热膨胀系数降低了1个数量级,且单道熔覆层表面平滑,组织均匀致密,没有裂纹缺陷。但是因瓦合金熔覆层的硬度、耐磨性及耐腐蚀性较差,一般通过添加陶瓷材料等增强相来改进。喻世豪^[9]研究发现:添加2%(质量分数,下同)硼和2%SiO₂后,因瓦合金熔覆层的硬度提高了50%左右,在25~600℃温度段的平均线性热膨胀系数为 $6.27 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,保持了较好的因瓦效应;并且熔覆层表面平整,没有孔洞和裂纹等缺陷,显微硬度最高可以达到650HV,远高于45钢基体。

在保证材料性能的前提下,在熔覆层中加入一种或多种合金元素可促进韧性相的生成,使熔覆层组织具有更好的延展性,进而达到抑制裂纹的目的。以因瓦合金为例,镍元素的加入在保证合金涂层硬度的同时,提升了合金的韧性,有效减少了裂纹的产生。此外,钛和铌元素均能起到细晶强化的作用,可有效提高熔覆层的硬度并减小晶间腐蚀倾向;钼元素的加入有利于细小等轴枝晶的生成,从而提高熔覆层的塑韧性,降低熔覆层的开裂敏感性;铬元素可以促使合金的组织从共晶态变为亚共晶态,此过程通常会发生晶体尺寸的减小和组织的细化,从而减少裂纹的产生^[10-11]。张鸿羽等^[12]研究了钼元素对EA4T钢表面激光熔覆Fe-Cr合金熔覆层的影响,

结果表明,钼元素的加入可有效提升熔覆层韧性,除添加70%钼元素的熔覆层有少量裂纹外,添加10%~50%钼元素的熔覆层均未出现裂纹。MA等^[13]研究了铬对激光熔覆镍基复合熔覆层组织和性能的影响,发现铬的添加可以改变原位增强相的组成和含量,细化组织结构,添加2%,4%铬时,熔覆层表面连续且光滑,没有裂纹和孔洞等缺陷,但当铬质量分数增加至6%和8%时,过多碳化物的形成降低了熔覆层的韧性,导致熔覆层在快速冷却过程中发生开裂。

稀土元素通常具有较强的活性,在熔覆时加入稀土元素或其氧化物能够在晶粒细化的同时改善熔池的流动性和表面张力,减少裂纹的产生^[14]。GONG等^[15]指出,适当比例的氧化铈粉末可以有效降低Ni60A合金熔覆层在TC4合金基体上的开裂敏感性。LI等^[16]在碳钢表面激光熔覆制备镍基复合陶瓷熔覆层时,通过添加0.6%的La₂O₃得到了无裂纹的熔覆层。徐欢欢^[17]在42CrMo钢表面激光熔覆制备镍包碳化钨复合涂层时发现:添加1.0%CeO₂的熔覆层表面平整光滑,没有任何裂纹;添加0.5%CeO₂时,熔覆层的表面不够平滑且出现了贯通裂纹;当添加1.5%~2.0%CeO₂时,熔覆层表面粗糙,裂纹也明显增多。张光耀等^[18]指出:在熔覆材料中分别添加La₂O₃、Y₂O₃和CeO₂,所制备的熔覆层在气孔和裂纹减少的同时硬度和耐磨性得到了提高;稀土氧化物添加质量分数控制在0.4%~1.0%为宜,过少对涂层开裂的缓解效果不明显,过多则会减弱固溶强化作用,使得组织中生成大量脆性相而导致熔覆层开裂。

综上所述,选择热膨胀系数较小的熔覆材料,在合金中添加增韧、增塑元素,稀土元素或其氧化物均能够在一定程度上减少熔覆层裂纹,提高熔覆层质量。

2.2 设置过渡层

研究^[19]表明,熔覆层和基体具有不同的热物性参数,存在较大的温度梯度,因此容易积累热应力,导致界面裂纹的形成。在熔覆目标合金前预置与两者均具有良好热物性匹配的过渡层,可以改善熔覆层和基体的结合性能,进而抑制界面裂纹的萌生及向熔覆层内部的扩展。

THAWARI等^[20]以Inconel625合金层为过渡层在SS316不锈钢基体上激光熔覆钴基耐磨合金层,与未加过渡层相比,加入过渡层后的熔覆层晶粒

更加细小,无明显裂纹并表现出更小的孔隙率。陆巍巍^[21]在 $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ 合金表面预置纯镍、纯钛和纯铌层后,通过激光熔覆制备了 TC4 合金熔覆层,结果表明,3 种过渡层均能有效减少裂纹的产生,并提高熔覆层和基体的结合质量。纯镍层的热膨胀系数分别接近于 $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ 合金基体和 TC4 合金熔覆层,有利于减小熔覆层中的内应力,从而降低开裂概率;纯钛层中的钛原子可通过冶金反应,避免熔覆层中脆性金属间化合物的产生,使得熔覆层组织中脆性相减少,韧性相增加,有利于缓解残余应力,减少裂纹的产生;纯铌的热膨胀系数和弹性模量与 $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ 合金基体接近,并且当铌元素质量分数在 40% 以上时可与钛形成无限固溶体,消除了由脆性第二相析出导致的开裂。苏轩^[22]在碳纤维增强热塑性复合材料表面激光熔覆 TC4 合金时,先以含 10% AlSi10Mg 合金粉的 TC4 合金粉为原料在复合材料表面制备了一层过渡层,这使得结合界面处的晶粒发生细化,应力集中现象得到缓解,抑制了裂纹的产生,提高了熔覆层和基体的结合强度。张弛一克^[23]在镁锂合金基体表面激光熔覆 NiTi 合金时,先制备了一层过渡层,结果表明,与纯铝过渡层相比,添加 1.5% Y_2O_3 的 Al-Si-Y 合金过渡层的晶粒获得进一步细化,裂纹和孔洞等缺陷更少,在此过渡层上制备的熔覆层呈现出较好的界面形貌和结合效果,无明显裂纹产生。

2.3 工艺参数优化

激光能量密度是指激光束在单位面积上的能量分布。在激光熔覆过程中,激光功率、扫描速度、光斑尺寸等作为关键工艺参数直接影响熔池输入的激光能量密度^[24]。激光能量密度过大会导致熔池温度过高和热应力增大,增加裂纹形成风险;激光能量密度过小,会造成熔池熔化不充分、与基体间结合不强,导致组织缺陷和裂纹的产生。因此,通过优化工艺参数调节激光能量输入,可以减少裂纹的产生,提高熔覆层成形质量和性能。

衡钊等^[25]在 1 500~2 000 W 激光功率下对 27SiMn 钢表面进行激光熔覆,保持扫描速度 $20\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、送粉量 $18\text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ 和光斑直径 2 mm 不变,熔覆层的塑性随功率增大先增高后降低,在 1 800 W 时与基体呈良好冶金结合,显微组织主要为胞状晶,抗拉强度和断后伸长率等拉伸性能达到最优,避免了因残余应力超过材料极限强度而产生裂纹。XIAO 等^[26]利用超高速激光熔覆工艺制备

了铁基非晶合金熔覆层,发现扫描速度增大使得熔覆层厚度减小,降低了应力集中,减少了裂纹的产生。另外,众多研究也表明,扫描速度的减小会导致温度梯度增大,热应力也随之增大,开裂敏感性增大^[27-28]。因此,在能量密度达到要求的情况下,可以适当地增大扫描速度。LI 等^[29]在 45 钢上制备了 Fe-Cr-Mo-B-C 合金熔覆层,当激光功率为 1 400 W、搭接率为 30%、扫描速度为 $10\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,熔覆层中几乎没有出现孔隙和裂纹等缺陷,随着激光功率和搭接率的增大,熔覆层开始产生孔隙和裂纹。郭士锐等^[30]在 HT250 灰铸铁表面激光熔覆多道铁基合金涂层,保持激光功率 1 400 W、扫描速度 $6\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 不变,当搭接率为 35% 时,熔覆层显微组织由下而上依次为粗大的树枝晶与胞状晶、交叉生长的柱状晶、等轴晶,无裂纹产生;当搭接率超过 35% 时,熔覆层中产生明显的宏观裂纹。张蕾涛^[31]通过正交试验,得出影响熔覆层开裂的因素由大到小排序为扫描速度、搭接率、激光功率、熔覆道数、送粉速率,其中:扫描速度过快,能量密度降低,裂纹发生率增加;激光功率增加,开裂倾向下降;熔覆道数增加,裂纹数量和开裂概率增加;搭接率和送粉速率过大或过小都会对熔覆层造成不利影响,其数值大小应该根据熔覆材料的不同进行具体分析,通常情况下,搭接率选择为 30%~50%,送粉速率选择在 $15\text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ 左右。

2.4 基体预热

在激光熔覆前对基体进行预热,可以有效减小熔覆层与基体间的温度梯度,减缓冷却速率,进而降低热应力,减少裂纹的产生。在一定范围内,温度梯度随基体预热温度升高而降低,但预热温度过高会造成晶粒粗大,对熔覆层性能产生不利影响^[32]。因此,在选择基体预热温度时需要综合考虑熔覆材料的性质、工艺参数等因素。适当的预热温度可以减少激光熔覆过程中裂纹的形成,改善熔覆层与基体之间的结合,提高熔覆层的质量和性能。

李洪玉等^[33]在铸钢基体上激光熔覆铁基合金粉末,研究了 100~300 °C 预热温度下熔覆层的应力分布,结果表明,随温度升高,熔覆层中平行和垂直于扫描方向的残余应力先减小后增大。需要注意的是,对基体预热后,如果没有良好的保温措施,预热温度与室温相差较大,将导致基体温度骤降,无法起到减少裂纹产生的作用。LIU 等^[34]提出了一种动态预热方法,即利用附加热源来加热熔池前的局部

区域,预热热源和熔覆热源以相同的扫描速度和恒定的距离同步移动,此方法有效解决了预热后基体温度骤降的问题;通过动态预热,熔覆层的冷却速率和温度梯度减小,热应力和开裂概率降低。吴祖鹏^[35]在激光熔覆 Ni60A 合金时,通过预热保温复合工艺将基体预热到 300 ℃,成功消除了裂纹。李聪玮^[36]研究了在不同预热温度下熔覆层裂纹断口形貌,结果表明:随着预热温度的升高,熔覆层断裂方式由脆性断裂转变为韧性断裂;与未预热相比,预热 100 ℃ 后断后伸长率增加 6.2%,说明其塑性提高,这有利于缓解释放应力,减少裂纹。

2.5 外场(力)辅助

在激光熔覆过程中或熔覆后引入外场(力)作用,对降低熔覆层温度梯度和残余应力有着显著成效。常见的外场(力)辅助有超声振动、电磁场辅助、激光冲击和高频微锻,其中激光冲击与高频微锻属于后处理方法。未处理的沉积态熔覆层在放置较长时间内,能听到清脆的金属断裂声,这来源于残余应力逐渐释放导致的材料开裂;此现象可通过后处理缓解残余应力而消除。

超声振动通过对熔池凝固过程进行干预使应力场趋于均匀化,避免应力集中,减少裂纹的产生。刘大宇^[37]在 H13 钢表面激光熔覆制备镍基合金熔覆层时,从基体底部引入超声振动,通过有限元数值模拟发现:经超声振动辅助后,熔覆层的残余内应力降低了 537 MPa;随着振幅的增大,熔池峰值温度升高,残余应力先降低后升高。残余应力是引起裂纹的主要原因,开裂敏感性随残余应力的减小而降低。ZHUANG 等^[38]研究了超声振动对激光熔覆 316L 不锈钢熔覆层组织和性能的影响,结果表明,不同振幅的超声振动均能起到均匀组织、细化晶粒、减少裂纹和孔洞的作用。申井义等^[39]将振动装置施加角度设置为 45°,将 Q235 低碳钢基体与声源间距设置为 30 cm,在恒定功率、20 kHz 下利用空气为载体对熔覆区进行超声振动,结果表明施加超声振动后熔覆层的晶粒和组织更加细密,裂纹和气孔等缺陷明显减少。在实际操作中,需要综合考虑超声振动的引入形式,比如:在基体底部引入时,需要注意超声振动的强度大小,以实现对整个熔覆区域的有效干预;以空气为载体对熔覆区进行超声振动时要防止超声波的衰减,同时要考虑振动角度对熔覆质量的影响。

在激光熔覆中还可以通过施加稳态磁场、旋转

磁场和交变磁场等方式来减缓熔池对流,抑制晶粒生长,减小应力集中与温度梯度,从而达到减少裂纹的目的^[40]。QI 等^[41]在 42CrMo 合金基体上,在附加磁场作用下制备了 Co-Fe-Cr-B-C 合金熔覆层,受熔覆过程中磁致伸缩效应的影响,熔覆层和基体间的热膨胀系数和弹性模量差值变小,熔覆层开裂敏感性降低。ZHAI 等^[42]研究了交流电(AC)对激光熔覆 Ni-Cr-B-Si 合金的影响,发现施加交流电场可以提高晶体成核速率并细化晶粒尺寸,促使熔覆层底部的组织由枝晶转变为等轴晶,最终使熔覆层中的裂纹数量减少了约 60%。ZHAI 等^[43]还在电磁复合场的辅助下,在纯铁上制备了激光熔覆镍基合金熔覆层,结果表明,施加电磁场后 γ -(Fe,Ni)硬质相呈现出等轴晶形貌,提高了熔覆层的塑性,同时链状 Cr_7C_3 转变为棒状分布,增加了基体的连续性,降低了开裂敏感性。李金东^[44]通过有限元数值模拟分析认为,电磁场的加入会降低熔池的最高温度,使得温度场分布更加均匀,减小了温度梯度,从而有效缓解应力集中现象。陈发强^[45]在纯铁基体表面激光熔覆制备高硬镍基合金熔覆层,研究了稳态磁场和交变电流对熔覆层的协同影响,结果表明电磁场的施加可以加快枝晶间液体流动,避免低熔点杂质的汇聚,从而降低熔覆层的开裂敏感性。

激光冲击强化技术利用强激光束在极短时间内发出的冲击波对熔覆试样表面进行辐照,通过改变材料表面组织,使应力场分布趋于均匀化,降低熔覆层中的残余内应力,从而减少开裂。曹宇鹏等^[46]将铝箔用作吸收层,去离子水用作约束层,研究了激光冲击对熔覆 E690 高强钢的影响,结果表明,经激光冲击后,熔覆层组织为等轴晶,减小了应力集中,降低了开裂敏感性。万天一^[47]利用激光熔凝-激光冲击-石墨化退火复合强化技术对 HT200 灰铸铁进行表面改性,结果显示,激光冲击后的熔覆层晶粒更加细小且均匀分布,应力集中现象得到缓解,韧性提高,从而有效抑制了裂纹的扩展。但激光冲击技术的局限性在于,试验前需要在熔覆试样表面添加能量吸收涂层,这使得工艺变得繁琐,强化效率较低。

利用高频锻造头对刚扫描结束的熔覆层进行快速锻打,一方面使熔覆层发生微小的塑性变形,另一方面锻打时产生的应力可与熔覆层内部的残余应力相抵消,从而抑制裂纹的产生。余金水^[48]在激光熔覆 304 不锈钢的过程中同步进行机械式高频微锻处理,熔覆完成后进行超声频微锻处理,有效降低了熔

覆层中的裂纹数量,并且在一定程度上提高了熔覆层的拉伸强度等力学性能。然而在激光熔覆过程中,熔覆层已经在短时间内因应力集中而产生了裂纹,在后续微锻过程中若熔覆层温度太高,则会因锻打而引发裂纹,若熔覆层温度太低,则锻打产生的应力场不能有效抵消熔覆层内的残余应力。因此,为了更好地消除裂纹还应综合考虑其他处理手段。

2.6 其他方法

在激光熔覆过程中,较高的热输入和快速冷却过程会使熔覆层产生一定的内应力。激光重熔可以通过对熔覆层再次加热并保持在熔化温度范围内,使材料发生再结晶和再结合,释放和减少残余应力,从而降低熔覆层开裂的风险。鲁耀钟等^[49]制备了K418/Inconel718合金熔覆层,发现经激光重熔处理后,熔覆层组织更加细密均匀,偏析现象得到缓解,残余应力与应力集中减小,从而有效地抑制了裂纹的产生。LIU等^[50]利用激光3D打印技术制备 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ 复合熔覆层,发现激光打印时熔池中的诱导压力比定向凝固中的诱导压力小,熔池流动性得以提高,熔覆层中的裂纹明显减少。周圣丰等^[51]在A3钢表面制备WC增强镍基合金复合熔覆层时发现,与传统的激光熔覆技术相比,激光-感应复合熔覆法的效率提高了近5倍,并且熔覆过程中的温度梯度明显减小,可得到无裂纹的熔覆层。LU等^[52]为降低热应力采用了三重激光扫描策略,首先激光扫描加热基体,减小温度梯度,熔覆结束后扫描熔覆层使其产生非晶涂层,然后立即对熔覆层进行第三次激光扫描,使残余应力释放的同时,熔覆层部分熔化,填充和修复裂纹,从而得到无裂纹的铁基非晶态熔覆层。ZHANG等^[53]研究了基体喷丸处理对K447A镍基高温合金在激光熔覆过程中液化裂解的影响,对基体进行喷丸处理后,激光熔覆层纵截面的液化裂纹总长度从1 649 μm 减小到248.8 μm ,液化开裂的趋势减小。

超高速激光熔覆技术与传统激光熔覆技术相比具有更低的稀释率,更小的基体热影响区和温度梯度。超高速激光熔覆技术通过使用高能量、高频率的激光脉冲,能够在短时间内迅速加热和冷却材料,有利于减少内应力的生成,从而降低了开裂的风险。黄海博等^[54]通过优化超高速激光熔覆工艺参数,调控热输入,减少了热应力的积累,在45钢表面制备了无明显气孔和裂纹等缺陷的Fe-Si-B非晶合金熔覆层。张煜等^[55]通过超高速激光熔覆技术制备了

WC/镍基合金涂层,相较于传统激光熔覆,高速激光熔覆具有更高的冷却速率及更小的熔覆层厚度,所制备的熔覆层组织更加细密,因此抗裂性提高。

3 结束语

激光熔覆技术是一种经济高效的表面改性技术,但随着熔覆材料硬度的提高,熔覆层裂纹问题更加突出,亟待解决。目前,学者们普遍认为,熔覆开裂主要由残余应力引起。通过合理选择熔覆材料、增设过渡层、优化熔覆工艺参数、基体预热、外场(力)辅助等措施可以有效减小熔覆层内应力,从而降低开裂。但激光熔覆是一个极其复杂的过程,获得一组合理的熔覆材料,合适的工艺参数以及有效的处理方法较困难,并且单纯以熔覆层无裂纹为目的去调节成分及参数,可能会导致熔覆层使用性能的降低。为获得裂纹更少、质量更高的熔覆层,今后的研究工作可在以下几个方面开展。

(1) 在熔覆层材料成分合理设计的基础上,研究熔覆工艺参数和添加元素的交互作用,针对不同的成分体系设计合理的熔覆工艺,在提高熔覆质量的同时减少裂纹的产生。

(2) 探究磁场和温度场等复合物理场对裂纹的控制机制和效果,研究多个物理场的联合作用效果,以最小的成本实现减少裂纹的目的。

(3) 针对激光熔覆快速升温、快速冷却的特性,开发稳定的保温系统,减小温度梯度,降低残余应力。

(4) 配合声发射检测、红外热成像检测等裂纹监测手段,准确掌握裂纹产生的时间、位置和熔池的熔凝状态,从而更加有效地解决熔覆层的开裂问题。

参考文献:

- [1] LI C, HAN X, ZHANG D C, et al. Quantitative analysis and experimental study of the influence of process parameters on the evolution of laser cladding[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2022, 36(17): 1894-1920.
- [2] ZHANG H, PAN Y J, ZHANG Y, et al. Effect of laser energy density on microstructure, wear resistance, and fracture toughness of laser cladded Mo_2FeB_2 coating [J]. Ceramics International, 2022, 48(19): 28163-28173.
- [3] CHEN J, YANG H O, LI Y M, et al. The research on two kinds of cracking behavior and mechanism of cladding in rapid laser forming process[J]. Applied Laser, 2002, 22(3): 300-304.
- [4] OUYANG W T, XU Z F, CHAO Y, et al. Effect of electrostatic field on microstructure and mechanical properties

- of the 316L stainless steel modified layer fabricated by laser cladding[J]. *Materials Characterization*, 2022, 191: 112123.
- [5] ZHANG H, PAN Y J, ZHANG Y, et al. Influence of laser power on the microstructure and properties of in-situ NbC/WCoB-TiC coating by laser cladding[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2022, 290: 126636.
- [6] 郭华锋, 孙涛, 李菊丽, 等. 激光表面改性提高钛合金耐磨性能的研究进展[J]. *热加工工艺*, 2012, 41(18): 124-129.
- GUO H F, SUN T, LI J L, et al. Research progress of improving wear resistance performance of Ti alloy by laser surface modification technology[J]. *Hot Working Technology*, 2012, 41(18): 124-129.
- [7] 李振纲, 彭波. 激光熔覆层裂纹的形成机理及控制措施[J]. *材料保护*, 2016, 49(11): 61-66.
- LI Z G, PENG B. Cracking formation mechanism and control methods for laser cladding coatings[J]. *Materials Protection*, 2016, 49(11): 61-66.
- [8] 张坚, 王震, 赵龙志, 等. 激光功率对激光熔覆 Fe-36Ni 因瓦合金涂层组织与耐磨性的影响[J]. *应用激光*, 2017, 37(1): 27-31.
- ZHANG J, WANG Z, ZHAO L Z, et al. Effect of laser power on microstructure and wear resistance of laser cladding Fe-36Ni Invar alloy coating[J]. *Applied Laser*, 2017, 37(1): 27-31.
- [9] 喻世豪. 激光熔覆因瓦合金基 Fe-Ni-SiO₂-B 涂层研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2020.
- YU S H. Research on Invar alloy matrix Fe-Ni-SiO₂-B coating by laser cladding [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2020.
- [10] 陈滋鑫, 周后明, 徐采星. 激光熔覆裂纹研究现状[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(7): 0700006.
- CHEN Z X, ZHOU H M, XU C X. Cladding crack in laser cladding: A review[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(7): 0700006.
- [11] 李响, 来佑彬, 于锦, 等. 高能束熔覆制备耐磨涂层技术研究现状与展望[J]. *表面技术*, 2021, 50(2): 134-147.
- LI X, LAI Y B, YU J, et al. Research status and prospect of wear-resistant coating prepared by high power density beam cladding[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(2): 134-147.
- [12] 张鸿羽, 余敏, 华俊伟, 等. Mo 元素对 Fe-Cr-Mo 激光熔覆层组织及性能的影响[J]. *中国激光*, 2021, 48(22): 2202010.
- ZHANG H Y, YU M, HUA J W, et al. Effects of Mo on microstructure and properties of Fe-Cr-Mo laser cladding layer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(22): 2202010.
- [13] MA Q S, CHEN H Z, ZHANG H, et al. The alloying effects of Cr on in situ phase evolution and wear resistance of nickel composite coatings fabricated by wide-band laser deposition [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 397: 126019.
- [14] 焦雄, 吴钢. 激光熔覆层裂纹问题的研究[J]. *科技信息*, 2013(1): 223-224.
- JIAO X, WU G. Research on cracking of laser cladding[J]. *Science & Technology Information*, 2013(1): 223-224.
- [15] GONG Y L, WU M P, MIAO X J, et al. Effect of CeO₂ on crack sensitivity and tribological properties of Ni60A coatings prepared by laser cladding [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2021, 13(4): 821-829.
- [16] LI M Y, HAN B, WANG Y, et al. Effects of La₂O₃ on the microstructure and property of laser cladding Ni-based ceramic coating[J]. *Optik*, 2017, 130: 1032-1037.
- [17] 徐欢欢. 42CrMo 钢表面激光熔覆 Ni 基 WC+CeO₂ 涂层组织与性能的研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.
- XU H H. Study on the microstructure and properties of laser cladding Ni-based WC + CeO₂ coatings on the surface of 42CrMo steel[D]. Qingdao: Qingdao Tehcnology University, 2021.
- [18] 张光耀, 王成磊, 高原, 等. 稀土对 6063Al 镍基激光熔覆层组织及摩擦磨损性能的影响[J]. *摩擦学报*, 2015, 35(3): 335-341.
- ZHANG G Y, WANG C L, GAO Y, et al. Effect of rare earth on the microstructure and tribological properties of laser cladding Ni-based coatings on 6063Al[J]. *Tribology*, 2015, 35(3): 335-341.
- [19] 徐大鹏, 周建忠, 郭华锋, 等. 激光熔覆裂纹产生机理及控制方法分析[J]. *工具技术*, 2007, 41(4): 24-28.
- XU D P, ZHOU J Z, GUO H F, et al. Investigation of generation mechanism and controlling method of cladding layer ranking by laser cladding[J]. *Tool Engineering*, 2007, 41(4): 24-28.
- [20] THAWARI N, GULLIPALLI C, KATIYAR J K, et al. Influence of buffer layer on surface and tribomechanical properties of laser clad Stellite 6[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2021, 263: 114799.
- [21] 陆巍巍. NiTiNb/TC4 激光微焊接裂纹形成机理与控制方法研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.
- LU W W. Study on crack formation mechanism and control methods of laser micro-welded NiTiNb and TC4 dissimilar alloys[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2015.
- [22] 苏轩. CFRP 表面激光熔覆 TC4 过渡层界面反应机理与性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- SU X. Research on interface reaction mechanism and property of laser clad transition layer of TC4 on the surface of CRFP[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [23] 张弛一克. 镁合金激光熔覆 NiTi、NiCrTi 涂层及其性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
- ZHANG C Y K. Study on the coating properties of laser cladding NiTi and NiCrTi coating on magnesium alloy[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021.
- [24] 成恩超, 刘敬, 章健, 等. 激光熔覆 Fe-Cr-Ni 合金涂层的微观组织及摩擦磨损性能[J]. *材料热处理学报*, 2022, 43(8): 143-152.
- CHENG E C, LIU J, ZHANG J, et al. Microstructure and friction and wear properties of laser cladding Fe-Cr-Ni alloy layer[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2022, 43(8): 143-152.
- [25] 衡钊, 舒林森. 激光功率对 27SiMn 钢激光熔覆力学性能的影响

- 响[J]. 中国激光, 2022, 49(8):0802011.
- HENG Z, SHU L S. Effect of laser power on mechanical properties of laser clad 27SiMn steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(8):0802011.
- [26] 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.
- [27] SAVANTH T, SINGH J, GILL J S. Laser power and scanning speed influence on the microstructure, hardness, and slurry erosion performance of Colmonoy-5 claddings[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2020, 234(7):947-961.
- [28] 陈翔, 张德强, 孙文强, 等. 扫描速度对激光熔覆薄板高速钢变形与组织的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(9):150-157.
- CHEN X, ZHANG D Q, SUN W Q, et al. Effect of scanning speed on deformation and microstructure of thin plate high-speed steel by laser cladding[J]. Surface Technology, 2019, 48(9):150-157.
- [29] LI C Y, ZHAI J S, TIAN L, et al. Fabrication of Fe-based amorphous composite coating by laser cladding[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2022, 589:121648.
- [30] 郭士锐, 赵阳, 崔陆军, 等. 基于灰铸铁表面多道搭接熔覆成形质量及组织性能研究[J]. 有色金属工程, 2022, 12(4):31-35.
- GUO S R, ZHAO Y, CUI L J, et al. Study on forming quality, microstructure and properties of multi-lap cladding on the surface of gray cast iron[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(4):31-35.
- [31] 张蕾涛. 45 钢激光熔覆 Ni60/WC 涂层的裂纹成因及控制研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- ZHANG L T. Crack formation and control of Laser cladding Ni60/WC coatings on 45 steel[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [32] HUANG Y J, ZENG X Y, HU Q W, et al. Microstructure and interface interaction in laser induction hybrid cladding of Ni-based coating[J]. Applied Surface Science, 2009, 255(7):3940-3945.
- [33] 李洪玉, 魏连峰, 王泽明, 等. 预热温度对激光熔覆层组织和应力的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7):0714004.
- LI H Y, WEI L F, WANG Z M, et al. Effect of preheating temperature on microstructure and stress of laser cladding layer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7):0714004.
- [34] LIU H, DU X T, GUO H F, et al. Finite element analysis of effects of dynamic preheating on thermal behavior of multi-track and multi-layer laser cladding[J]. Optik, 2021, 228:166194.
- [35] 吴祖鹏. Ni60A 合金激光熔覆裂纹气孔控制方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- WU Z P. Study on crack and porosity control methods of laser cladding Ni60A alloy coating[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [36] 李聪玮. 27SiMn 钢表面激光熔覆铁基合金组织和性能研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2021.
- LI C W. Microstructure and properties of laser cladding Fe-based coatings on 27SiMn steel[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021.
- [37] 刘大宇. 超声辅助模具磨损表面激光熔覆修复层的数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.
- LIU D Y. Numerical simulation of ultrasonic-assisted laser cladding repair layer on worn surface of mold[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2021.
- [38] ZHUANG D D, DU B, ZHANG S H, et al. Effect and action mechanism of ultrasonic assistance on microstructure and mechanical performance of laser cladding 316L stainless steel coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 433:128122.
- [39] 申井义, 林晨, 姚永强, 等. 超声振动对激光熔覆涂层组织与性能的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(12):226-232.
- SHEN J Y, LIN C, YAO Y Q, et al. Effect of ultrasound vibration on microstructure and properties of laser cladding coatings[J]. Surface Technology, 2019, 48(12):226-232.
- [40] 王晓明, 朱胜, 杨柏俊, 等. 磁场辅助激光熔覆铝基金属玻璃覆层[J]. 航空学报, 2018, 39(11):422142.
- WANG X M, ZHU S, YANG B J, et al. Aluminum-based metallic glass coatings prepared with magnetic field assisted laser cladding[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(11):422142.
- [41] QI K, YANG Y, SUN R, et al. Effect of magnetic field on crack control of Co-based alloy laser cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 141:107129.
- [42] 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):16873-16879.
- [43] ZHAI L L, BAN C Y, ZHANG J W. Investigation on laser cladding Ni-base coating assisted by electromagnetic field[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 114:81-88.
- [44] 李金东. 电磁/超声辅助 42CrMo 钢拉矫辊激光熔凝改性研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.
- LI J D. Study on electromagnetic/ultrasonic-assisted laser surface melting modification of 42CrMo steel tension-straightening roll[D]. Qingdao: Qingdao Tehcnology University, 2021.
- [45] 陈发强. 电磁场辅助激光熔覆镍基合金涂层组织性能与残余应力的研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2021.
- CHEN F Q. Study on microstructure, properties and residual stress of Ni-based alloy coating by electromagnetic-assisted laser cladding[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2021.

- WANG P, WANG X H, HAN L H, et al. Completion fluid induced stress corrosion cracking in HPHT well tubing[J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(S1): 191-194.
- [18] 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): 1002003.
- BIAN H Y, ZHAI Q X, LI Y, et al. Microstructure and tensile properties of laser deposition repair GH738 superalloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1002003.
- [19] 宋威振. 预置应力对铝合金疲劳裂纹扩展性能影响规律的研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- SONG W Z. Research on effect of pre-stress on fatigue crack growth behavior of Al-alloy[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [20] 翟战江, 彭云, 刘涛, 等. 应力比对 25Cr2Ni2MoV 钢疲劳裂纹扩展门槛值的影响[J]. 物理测试, 2019, 37(1): 9-13.
- ZHAI Z J, PENG Y, LIU T, et al. Effect of stress ratio on fatigue crack propagation threshold value of 25Cr2Ni2MoV steel[J]. Physics Examination and Testing, 2019, 37(1): 9-13.
- [21] 李树肖, 李时磊, 王西涛, 等. 热老化对核电厂一回路管道失效概率的影响[J]. 核动力工程, 2013, 34(6): 138-142.
- LI S X, LI S L, WANG X T, et al. Effect of thermal aging on failure probability of a nuclear primary pipe[J]. Nuclear Power Engineering, 2013, 34(6): 138-142.
- [22] 徐文志. 气田封隔液高温高压条件下 CO₂ 腐蚀研究[J]. 长江大学学报(自科版), 2015, 12(31): 37-40.
- XU W Z. The CO₂ corrosion packing fluid for gas fields at HTHP[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2015, 12(31): 37-40.
- [23] LIU J, GUO X Q, WANG G R, et al. Bi-nonlinear vibration model of tubing string in oil & gas well and its experimental verification[J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 81: 50-69.
- [24] 冯诚诚. Ti-TiN-Zr-ZrN 多层膜残余应力及疲劳性能的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- FENG C C. Study on residual stress and fatigue properties of Ti-TiN-Zr-ZrN multilayer coatings[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [25] 程靳, 赵树山. 断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- CHENG J, ZHAO S S. Fracture mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [26] 果冲. 不同腐蚀条件下 4130X 材料疲劳裂纹扩展速率研究及寿命预测[D]. 北京: 北京工业大学, 2020.
- GUO C. Research on fatigue crack growth rate and life prediction of 4130X material under different corrosion conditions[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2020.
- (上接第 7 页)
- [46] 曹宇鹏, 王帅, 施卫东, 等. 激光冲击对 E690 高强钢激光熔覆修复微观组织的影响[J]. 光子学报, 2021, 50(4): 99-109.
- CAO Y P, WANG S, SHI W D, et al. Effect of laser shock on microstructure of the repair layer of E690 high strength steel by laser cladding[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(4): 99-109.
- [47] 万天一. 激光熔凝-激光冲击-石墨化退火灰铸铁组织及性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
- WAN T Y. Study on microstructure and properties of gray cast Iron after laser surface melting-laser shock processing-graphitization annealing[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.
- [48] 余金水. 高频微锻造对激光成形 304 不锈钢试件力学性能的影响[D]. 衡阳: 南华大学, 2012.
- YU J S. Influence of high-frequency micro-forging on mechanical properties of 304 stainless steel specimens by laser rapid forming[D]. Hengyang: University of South China, 2012.
- [49] 鲁耀钟, 雷卫宁, 任维彬, 等. 激光熔覆 Inconel718 合金裂纹分析及裂纹控制研究[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 233-243.
- LU Y Z, LEI W N, REN W B, et al. Crack analysis and control of laser cladding Inconel718 alloy[J]. Surface Technology, 2020, 49(9): 233-243.
- [50] LIU Z, SONG K, GAO B, et al. Microstructure and mechanical properties of Al₂O₃/ZrO₂ directionally solidified eutectic ceramic prepared by laser 3D printing[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(4): 320-325.
- [51] 周圣丰, 曾晓雁, 胡乾午, 等. 激光-感应复合熔覆 Ni 基 WC 复合层的工艺研究[J]. 激光技术, 2009, 33(2): 124-126.
- ZHOU S F, ZENG X Y, HU Q W, et al. Process study of Ni-based WC composite coatings by means of laser-induction hybrid cladding[J]. Laser Technology, 2009, 33(2): 124-126.
- [52] LU Y Z, HUANG G K, WANG Y Z, et al. Crack-free Fe-based amorphous coating synthesized by laser cladding[J]. Materials Letters, 2018, 210: 46-50.
- [53] ZHANG Z L, ZHAO Y, SHAN J G, et al. The role of shot peening on liquation cracking in laser cladding of K447A nickel superalloy powders over its non-weldable cast structure[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 823: 141678.
- [54] 黄海博, 孙文磊, 黄勇. 超高速激光熔覆 Fe 基非晶合金单道工艺分析[J]. 表面技术, 2022, 51(7): 410-419.
- HUANG H B, SUN W L, HUANG Y. Analysis on the process of single track Fe based amorphous alloy during ultra high speed laser cladding[J]. Surface Technology, 2022, 51(7): 410-419.
- [55] 张煜, 姜丽艳, 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.