

DOI: 10.3901/JME.2023.07.092

激光熔覆陶瓷涂层研究现状与展望^{*}

王伟志^{1,2} 马国政² 韩珩¹ 李洋³ 周雳⁴ 赵海朝⁴
许建峰² 郭伟玲² 王海斗^{2,4}

- (1. 沈阳化工大学机械与动力工程学院 沈阳 110142;
2. 陆军装甲兵学院装备再制造技术国防科技重点实验室 北京 100072;
3. 天津职业技术师范大学机械工程学院 天津 300222;
4. 陆军装甲兵学院机械产品再制造国家工程研究中心 北京 100072)

摘要: 陶瓷材料具有高硬度、高熔点、高耐蚀等特性,常被应用于机械装备关键零部件的表面强化改性和再制造修复。随着装备服役工况日益苛刻,传统金属材料所制备的装备运动部件在服役过程中易于发生磨损、腐蚀、变形等失效,进而导致服役性能退化,严重时甚至引发装备恶性故障。激光熔覆作为一种高效的表面强化和再制造技术,在提升基材表面耐磨、耐蚀、耐热、抗高温氧化等性能方面具有重要应用前景。通过激光熔覆技术在零部件表面制备陶瓷涂层,对于延长关键零部件寿命、提高资源利用率、节约稀贵金属材料具有重要意义。首先按照陶瓷涂层的组织结构和成形机理对激光熔覆陶瓷涂层进行了分类介绍;然后结合激光熔覆制备陶瓷涂层的典型缺陷详细阐述了涂层质量优化的常用方法;而后综述了激光熔覆陶瓷涂层在提升零件耐腐蚀、耐磨损、耐高温性能和提高生物相容性等方面的应用情况;最后,总结了激光熔覆陶瓷涂层技术发展现状,并展望了激光熔覆陶瓷涂层技术的发展趋势。

关键词: 激光熔覆; 陶瓷涂层; 质量优化; 功能涂层

中图分类号: TG174

Research Status and Prospect of Laser Cladding Ceramic Coatings

WANG Weizhi^{1,2} MA Guozheng² HAN Heng¹ LI Yang³ ZHOU Li⁴ ZHAO Haichao⁴
XU Jianfeng² GUO Weiling² WANG Haidou^{2,4}

- (1. School of Mechanical and Power Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142;
2. National Key Laboratory for Remanufacturing, Army Academy of Armored Force, Beijing 100072;
3. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin, 300222;
4. National Engineering Research Center for Remanufacturing, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072)

Abstract: Ceramics materials have the characteristics of high hardness, high melting point, and high corrosion resistance. They are often used in the surface strengthening modification and remanufacturing repair of key parts of mechanical equipment. With the increasingly harsh service conditions of equipment, the moving parts of equipment made of traditional metal materials are prone to wear, corrosion, deformation, and other failures in the service process, which will lead to the degradation of service performance and even lead to malignant faults of equipment. As an efficient surface strengthening and remanufacturing technology, laser cladding has important application prospects in improving the wear resistance, corrosion resistance, heat resistance, and high-temperature oxidation

^{*} 国家自然科学基金(52122508, 52105236, 52130509)和十四五预研(060201)资助项目。20220510 收到初稿, 20220718 收到修改稿

resistance of substrate surface. The preparation of ceramic coating on the surface of parts by laser cladding technology is of great significance for prolonging the service life of key parts, improving resource utilization, and saving rare and precious metal materials. Firstly, laser cladding ceramic coatings are classified and introduced according to the microstructure and forming mechanism of ceramic coatings; Then, combined with the typical defects of the ceramic coating prepared by laser cladding, the common methods of coating quality optimization are described in detail; Then the application of laser cladding ceramic coating in improving the corrosion resistance, wear resistance, high-temperature resistance and biocompatibility of parts are reviewed; Finally, the development status of laser cladding ceramic coating technology is summarized, and the development trend of laser cladding ceramic coating technology prospects.

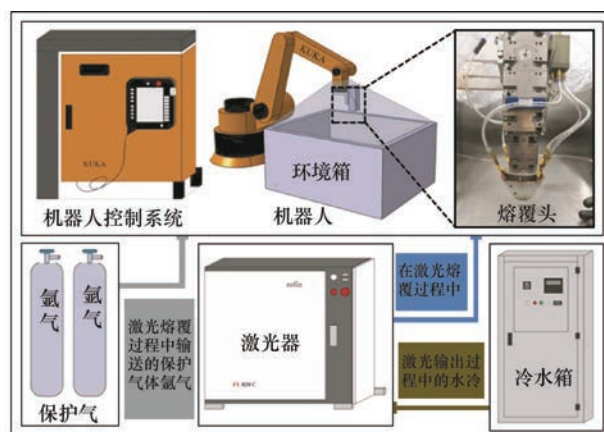
Key words: laser cladding; ceramic coating; quality optimization; functional coating

0 前言

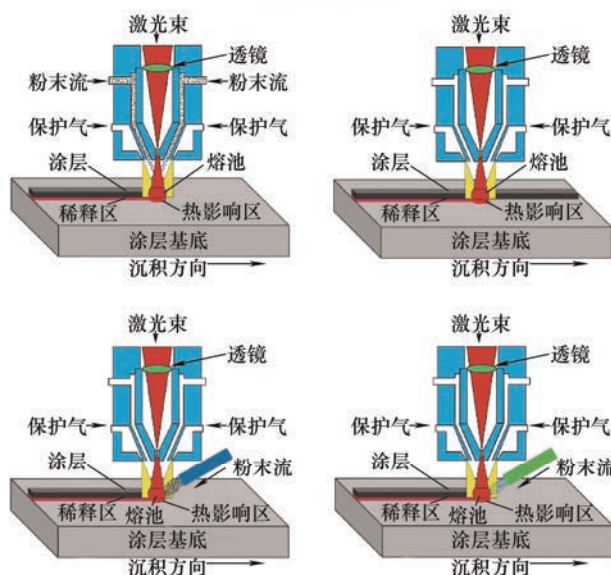
随着我国装备制造业的快速发展,大量的机械装备关键部件在苛刻复杂环境下的失效报废造成了巨大的经济损失和大量装备故障,亟需探索高效、绿色的新兴制造技术对新品装备关键部件进行强化延寿和废旧装备的再制造修复。陶瓷材料因具有熔点高、强度大、导热率低、热膨胀系数低等特点常被用作金属零件表面防护强化材料^[1]。陶瓷涂层可大幅度增强基材的耐磨、耐蚀、和抗高温氧化性能,被广泛应用于航空航天、石油化工、机械制造等领域^[2-3]。

常见的陶瓷涂层制备技术有激光熔覆、高温自蔓延合成、气相沉积和热喷涂等^[4],其中高温自蔓延合成工序简单、能耗低、生产周期短,但需要纯度极高的粉末为原料,不适合大规模生产,且反应过程迅速不便精确控制;气相沉积所制备的陶瓷涂层纯度高、致密度好,但设备价格昂贵,生产效率低;热喷涂陶瓷涂层效率高,厚度可控,工艺简单,可用于复杂形状工件的喷涂,但涂层孔隙等缺陷相对较多、结合力较低;激光熔覆效率较高、熔覆面积精准可控,制备陶瓷涂层兼具性能、成本和环保等优势,但制备的陶瓷涂层也可能存在裂纹和孔隙等缺陷^[5]。

激光熔覆技术将激光技术、计算机辅助制造和自动控制技术相结合(见图 1a^[6]),采用高功率激光束将熔覆材料在基材表面快速熔化、凝固,并与基材表面形成冶金结合的涂覆层^[7]。激光熔覆技术加热和冷却速度快,效率高、无污染,既可应用于新品部件的表面强化,也可应用于失效零部件的再制造修复^[8]。激光熔覆,根据熔覆材料的输入方式可分为同轴送粉式、预置粉末式、旁轴送粉式和送丝式等多种熔覆工艺(见图 1b^[9])。



(a)激光熔覆设备



(b)激光熔覆材料输入方式示意图

图 1 激光熔覆工艺^[6,9]

激光熔覆技术能够熔化陶瓷材料克服其难加工的特性,可制备出高质量的陶瓷涂层^[10]。通过该技术得到的陶瓷涂层具有优异的机械性能、物理和化学性能,有利于延长零部件使用寿命,降低成本,减少资源浪费。表面强化和再制造是绿色制造的重要方向,是实现节能减排、促进经济社会可持续发

展的有效途径^[11]。随着激光熔覆技术不断进步和熔覆设备更迭换代,通过激光熔覆制备陶瓷涂层对复杂环境中零部件表面强化和再制造延寿符合国家所提倡的可持续发展战略理念^[12]。“中国制造 2025”发展规划越来越近,激光熔覆陶瓷涂层进行再制造属于先进增材制造、绿色制造的范畴^[13],有力践行了“十四五”可再生资源发展规划。

本文主要从激光熔覆技术制备陶瓷涂层的种类和质量优化方法进行了总结以及对陶瓷功能涂层应用方向的相关研究进行了综述,提出了目前存在的问题,并对未来的发展趋势进行了展望。

1 激光熔覆陶瓷涂层主要类别

20 世纪 70 年代末,研究学者就以激光为热源熔化陶瓷粉末制备出陶瓷涂层,但由于其光学损耗大、成形效率低实际应用较少^[14]。直到近几十年,随着激光熔覆设备的进步,激光制备陶瓷涂层才得到迅速发展。目前,用于表面强化和再制造的激光熔覆陶瓷涂层按材料组成和成形机理可分为:复相陶瓷涂层、金属-陶瓷复合涂层、激光原位合成陶瓷涂层和纳米复合陶瓷涂层^[15]。

1.1 复相陶瓷涂层

由于纯陶瓷涂层和基材的润湿性差,结合性能弱,容易出现裂纹和孔隙等缺陷,在熔覆过程中很难获得质量优异的涂层,且在恶劣环境中难以满足工况需求,限制了纯陶瓷涂层的应用。因此,研究人员开发了氮化物、硼化物、碳化物、氧化物复合的多种共晶类型的激光熔覆复相陶瓷涂层(如 TiN-TiB₂、TiC-TiB₂、Al₂O₃-TiB₂)。这些由多组分陶瓷组成的复合材料组元间互溶性和亲和力高^[16],可有效地减小陶瓷相的晶粒尺寸,提高涂层的强度和韧性,使涂层获得比单相陶瓷涂层更好的热物理性以及耐磨和耐腐蚀性等优异性能,已经成为当前研究热点^[17]。

目前研究人员已经开发出 Al₂O₃-TiO₂^[18]、TiB₂-TiC^[19]、ZrB₂-SiC-ZrC^[20]、Al₂O₃-TiB₂-TiC^[21]等复相陶瓷涂层。LI 等^[21]在碳钢基材上制备了 Al₂O₃-TiB₂-TiC 复合陶瓷涂层,为保证涂层中 Al₂O₃的含量,在预置粉末中单独添加不同质量分数的 Al₂O₃(10%、30%、50%)观察涂层的微观结构分布和形貌,当单独添加 Al₂O₃的含量达到 30%时,多相复合陶瓷涂层组织均匀致密,具有优良的表面质量。TiB₂和 TiC 颗粒的存在显著提高涂层的显微硬度和耐磨性。涂层性能的提升归因于熔覆过程中 TiB₂、TiC 和

Al₂O₃增强相以及单独添加的 Al₂O₃在高温熔池中混合在一起,均匀分布在涂层中。WANG 等^[22]在 GH4169 镍基高温合金上制备了 Al₂O₃-13%TiO₂ 复合陶瓷涂层,在优化工艺下获得了结构致密、无裂纹、低稀释率的复合涂层,耐磨性相比于纯涂层显著提高。图 2 为复相陶瓷涂层的横截面 SEM 图像,可见涂层结构非常致密、基本无裂纹和孔隙缺陷,其中图 2a 标记的 I、II 和 III 为涂层的三种不同微观结构区域,图 2b、2c、2d 分别为上述区域的细等轴晶体、柱状晶体以及底部区域的极细等轴晶体^[22]。

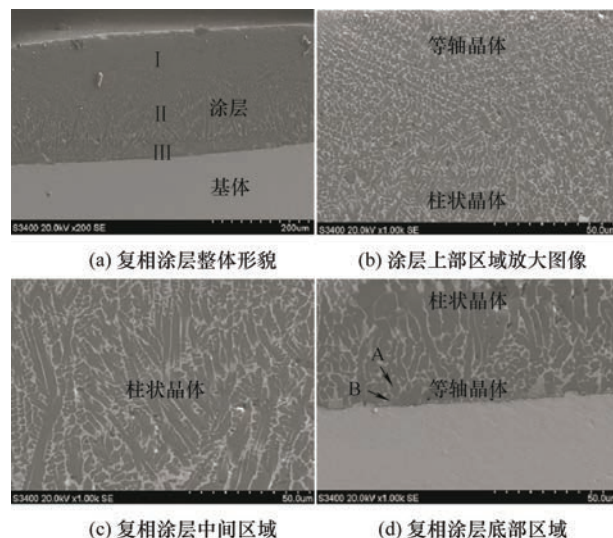


图 2 复相陶瓷涂层的横截面^[22]

在激光熔覆过程中涂层经历了快速凝固过程,有利于涂层晶粒细化、陶瓷相分布均匀,从而提升涂层硬度和耐磨性。此外,不同种类的陶瓷相对涂层的性能影响显著,可对陶瓷相的组成及成分设计,使涂层中各陶瓷相优点互补,从而获得优异性能的多相复合陶瓷涂层。

1.2 金属陶瓷复合涂层

金属陶瓷复合涂层是将陶瓷相(增强相)与金属或合金(粘结相)进行组合,使其获得金属材料良好的润湿性,以及陶瓷相显著的硬度、耐磨、耐腐蚀性^[23]。激光熔覆过程中的快速加热和凝固,细化了金属陶瓷复合涂层中的晶粒,并且将涂层中的难熔性陶瓷强化相均匀分布在粘结相中,起到增加涂层强度,获得金属和陶瓷优异特性的效果。

在设计材料体系时,陶瓷相和金属粉末的选取非常重要,不仅要考虑材料热物理性能的匹配,而且还要使陶瓷相和金属粉末具有一定的溶解度,同时要求不能发生剧烈地化学反应。一般选用碳化物、氮化物、氧化物、碳氮化物为陶瓷相,镍基、铁基和钴基为金属粘结相^[24, 25]。WANG 等^[26]在耐热钢表

面上制备了不同组分的镍基 WC 金属陶瓷复合涂层, 研究了该涂层的高温磨损机理。Ni60+20%WC(质量分数)复合涂层的组织致密细小, 析出物中的硬质颗粒数量较多, 基体的塑性和韧性相对较好。因此, 它在摩擦磨损过程中容易发生塑性变形, 增加摩擦的接触面积, 降低接触应力。涂层在低温下以磨粒磨损为主。随着温度的升高, 逐渐转变为粘着磨损和氧化磨损为主。HU 等^[27]制备了钴基 WC 金属陶瓷复合涂层, 在最佳工艺条件下, 共晶相和 WC 颗粒均匀分布在复合涂层的网络结构中, 获得了无裂纹和孔隙以及无二次碳化物或其他微观缺陷的高密度复合涂层。涂层致密均匀的微观结构以及良好的冶金结合提高了涂层的显微硬度和耐磨性。JIN 等^[28]采用不同种类的不锈钢作为金属粘结相制备了 TiC 基金属陶瓷, 研究这些 TiC-不锈钢金属陶瓷的微观结构、机械和磨损行为。如图 3a 所示 TiC-20% 410L(体积分数)涂层中微观结构均匀, 图 3b 为 TiC-10% 316L 涂层, 图 3d 进行 EDS 分析晶粒核心为 TiC, 其微观结构显示 TiC 的晶粒均匀分布, 图 3c 为图 3b 中的放大区域, 能够观察到金属陶瓷涂层没有界面脱粘, 具有良好的润湿性, TiC 在粘结相中的均匀分布和不存在界面脱粘有望提高复合材料的摩擦学和机械性能。对粘结相含量为 10%~30 % 的样品进行往复磨损测试, 得到的比磨损率随着钢结合相含量和施加载荷的增加而增加, 但在很大程度上与所使用的钢种无关。

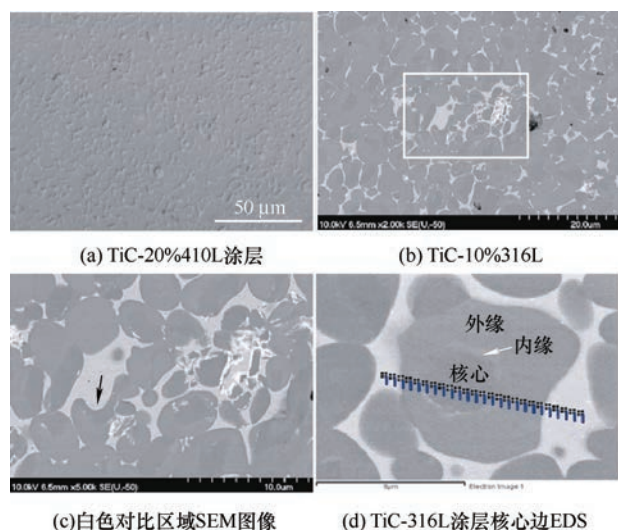


图 3 TiC 金属陶瓷显微图像^[28]

金属陶瓷复合涂层中的陶瓷相和金属均匀分布会提高涂层性能(如硬度、耐磨、耐腐蚀等)。涂层性能也与添加金属以及陶瓷相的种类和含量有关。此外, 激光熔覆的工艺参数同样也会影响涂层的质量和性能, 选择合理的工艺参数可以显著提高涂层

的性能。

1.3 原位合成陶瓷涂层

原位合成陶瓷涂层是通过添加不同元素粉末在高温条件下发生化学反应形成陶瓷相颗粒, 且因为反应形成, 陶瓷颗粒会自发形核和长大, 所以分布均匀、结构致密, 同时增强界面结合并显著减少性能失^[29-30], 克服了直接添加陶瓷相存在的界面结合性差、颗粒聚集、裂纹等缺陷。

因激光熔覆能够带动高能激光束快速地将前驱体材料(经过特殊处理用来原位合成的粉末配合料)熔化, 使它们相互反应, 在基材表面形成新相, 故激光原位合成技术受到了广泛的关注和应用^[31]。WU 等^[32]将钛粉与碳粉按照 TiC 的化学计量数混合并预置在 5CrMnMo 钢上, 然后采用激光熔覆原位生成 TiC 涂层。该涂层生成的 TiC 相均匀分布在枝晶间区域, 使得涂层的显微硬度和耐磨性显著增强。YANG 等^[33]采用激光熔覆和激光氮化技术在 Ti-6Al-4V 合金上制备了 TiCN 陶瓷涂层, 以高纯的 N₂ 为氮化元素、使用纯钛粉和碳粉作为熔覆材料, 在最佳工艺参数下, 涂层与基材之间无缺陷, 涂层中 TiCN 晶粒细化, 平均显微硬度与基体相比提升 4 倍。YUE 等^[34]为提高涂层的成形质量, 在铝合金上利用铝热反应原位生成了 Al₂O₃ 涂层, 如图 4 所示, 形成激光熔覆原位合成典型的微观结构, 在顶部反应层和融合区形成良好的冶金结合, 融合区具有细小的树枝状结构, 在融合区与基底结合层观察到外延晶体生长。通过 XRD 检测发现该涂层主要由 α -Al₂O₃、 γ -Al₂O₃ 和 Al 相, 以及铝热反应产生的各种金属间化合物组成。激光熔覆涂层中原位生成的 Al₂O₃ 颗粒细化了涂层的微观结构, 抑制了裂纹的生长, 提高了硬度和韧性。

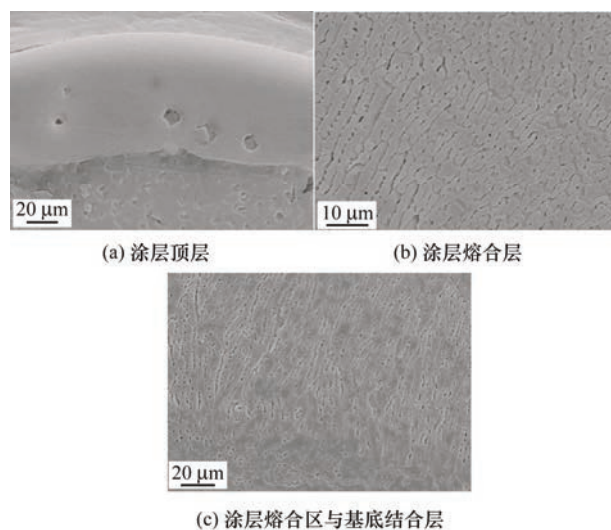


图 4 激光熔覆原位生成 Al₂O₃ 涂层横截面^[34]

RICHARDSON 等^[35]采用激光熔覆原位生成了 MAX 相陶瓷, 通过元素粉末的化学计量比在纯 Ti 基材上进行原位反应, 从而在基材表面生成了以 Ti_2AlC 作为主要相, 同时均匀分布着 $\text{TiC}_{0.64}$ 、 Ti_3Al 和 TiAl 等致密、结合性良好的复合涂层。若直接熔覆 MAX 相陶瓷会导致其显著分解, 影响涂层性能, 而由元素粉末合成会大幅度降低制造成本, 并且可以提高涂层中的 MAX 相陶瓷的纯度。

激光熔覆技术原位生成陶瓷涂层制备工艺简单, 力学和热物理性能好, 能够解决界面结构的润湿性问题, 生成的陶瓷相分布均匀、晶粒细化, 并提高涂层的整体性能。但在原位反应过程中, 生成陶瓷相不可控, 会产生杂质有害相。因此, 如何调控减少有害相的产生是未来研究重点。

1.4 纳米复合陶瓷涂层

激光熔覆因其冷却速度快可使微观组织细化也可应用于纳米陶瓷涂层的制备。纳米陶瓷涂层具有极高的硬度、良好的摩擦学性能、优异的耐腐蚀性和抗氧化性等优良特性被广泛应用于汽车、化工、航空航天等领域^[36]。

纳米复合陶瓷涂层由陶瓷颗粒与金属、合金、陶瓷、稀土氧化物等纳米材料复合而成。在激光熔覆过程中向涂层中添加纳米颗粒可以细化涂层晶粒结构, 并且纳米颗粒的存在会阻碍位错运动, 阻碍晶粒生长, 还降低了裂纹敏感性, 从而改善纳米复合涂层的性能^[37]。已有研究表明, 纳米结构的陶瓷颗粒可以提高润湿性和延展性, 并已被用于增强材料^[38]。LI 等^[39]在钛合金表面合成了纳米结构的 WC 涂层, 其 WC 表现出明显的晶粒细化作用, 抑制了晶粒长大, 限制了块状枝晶的形成。晶粒细化对涂层的耐磨性有积极影响, 归因于细晶粒强化机制提高了涂层耐磨性。因此, 纳米 WC 涂层的耐磨性优于基体, 其中钛合金的磨损质量损失是涂层的 2~4.5 倍。FARAHMAND 等^[40]制备出了由纳米 WC 颗粒与 Ni-60% WC 复合而成的纳米复合涂层, 如图 5 对比了添加不同质量分数的纳米 WC 颗粒对涂层质量的影响。基于图 5a 没有添加纳米 WC 颗粒, 碳化物颗粒在涂层中分布不均匀, 图 5b~5d 表明涂层中添加纳米 WC 颗粒增强涂层中的润湿性来改善 WC 的分布, 该涂层光滑均匀, 没有裂纹和孔隙, 而添加纳米 WC 颗粒也相应地提高了涂层的显微硬度。

WANG 等^[41]将不同质量分数的纳米陶瓷(1%、3%、5%)与金属基粉末混合, 然后依次提升纳米陶瓷含量, 制备出多层纳米陶瓷梯度涂层。该涂层结

构致密, 各层间界面不明显。另外, 由于纳米陶瓷的加入, 涂层的显微组织得到了细化, 并由细小的等晶轴组成。

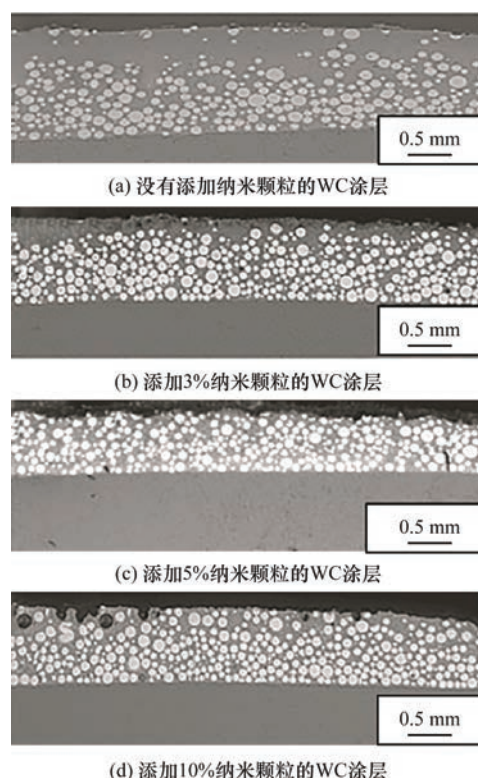


图 5 Ni-WC 涂层横截面的 SEM 图像^[40]

纳米复合涂层微观结构致密, 晶粒细化、性能优异, 其中纳米颗粒具有增韧和强化作用, 使涂层表面具有良好的机械性能和摩擦学性能。此外, 纳米复合涂层的机械、摩擦学和化学性能取决于涂层中存在的纳米颗粒相和化学元素以及涂层的微观结构和表面质量。

2 激光熔覆陶瓷涂层质量优化

2.1 激光熔覆陶瓷涂层常见缺陷

激光熔覆陶瓷涂层在新产品表面改性或损伤零部件再制造中表现出非凡的优势, 但在制备陶瓷涂层的过程中, 也会存在孔隙、元素偏析和裂纹等常见缺陷^[42]。缺陷的存在对涂层的可靠性产生不利影响, 显著降低涂层的疲劳寿命^[43]。

陶瓷粉末在熔覆前因氧化、受潮, 导致熔覆过程中产生气体, 或通入的保护气体过多, 导致涂层中的气体未及时排出, 涂层内部会产生较多孔隙^[44-45]。另外, 陶瓷粉末在造粒过程中添加的粘结剂经过高温挥发也会产生孔隙^[46]。激光熔覆快速熔化和冷却凝固, 凝固的位置会产生先后的时间差, 凝固时间过快、熔池对流不均匀、元素未能均匀的

扩散, 会导致涂层的元素偏析^[47-48]。由于陶瓷材料和基材之间的热物性差异(热膨胀、弹性模量、热导率), 导致熔覆过程中产生很大的热应力, 当热应力超过涂层的内聚力就会产生裂纹^[49-50]。此外, 在激光熔覆过程中不可避免地会产生一些缺陷(如未熔化的材料和孔隙)导致应力集中, 最终形成裂纹^[8]。孔隙和元素偏析会导致涂层的局部韧性降低和应力集中, 增加裂纹的敏感性, 严重影响涂层的微观结构和性能(如耐磨性和耐腐蚀性等)^[46, 51]。

为了提高零件性能和寿命, 必须抑制涂层缺陷的产生, 制备出微观结构致密、性能良好的涂层。研究人员根据激光熔覆制备涂层的原理及特点, 主要从激光熔覆工艺参数、涂层结构、涂层材料体系、多种工艺辅助成形四个方面对陶瓷涂层质量优化。

2.2 激光熔覆工艺参数优化

涂层的成形质量、组织分布以及力学性能是由激光熔覆多项工艺参数共同作用的结果, 例如激光功率、扫描速度、搭接率、送粉率、激光焦点位置等, 改变其中任何一种参数都会影响熔覆的效果。

(1) 激光功率会影响粉末的熔化和熔池的产生, 随着激光功率的提高, 作用在熔池的能量会增加, 粉末融化就越充分, 涂层质量就越好, 而功率过高又会形成较大的熔池, 造成稀释率过高, 导致裂纹的形成, 影响涂层质量^[52]。

(2) 在合适的激光功率下, 扫描速度的降低会使涂层表面质量变好, 归因于扫描速度会影响熔池存在时间、传热过程和冷却速度, 其降低会使熔池吸收能量增加, 促进更多的粉末在熔池中充分熔化, 进而影响涂层的微观结构^[53]。

(3) 随着激光功率和搭接率的不断升高, 涂层表面粗糙度和孔隙率会呈先减少后增大的趋势。这是因为功率增加, 影响熔池中粉末对流, 从而使表面质量变好, 而搭接率适度的调整也会使涂层表面粗糙度变小, 但随着功率和搭接率继续升高, 会产生较大的温度梯度, 造成残余热应力的叠加, 导致涂层表面形成更多的孔隙和裂纹^[54-55]。

(4) 当不断增加气体流量时, 涂层中的孔隙率也会呈现先减少后增加的趋势。气流决定着送粉量, 在气体流量较少的情况下, 粉末完全熔化, 涂层质量较好, 随着气体流量进一步增加会导致粉末利用率降低, 涂层中气体未及时排除形成孔隙^[56]。

(5) 激光焦点与基材表面的距离也会影响涂层的微观结构^[56]。不同的焦点位置会影响涂层的几何形状、微观结构(如孔隙和裂纹的存在)和热影响区^[57]。如图 6a 所示负离焦平面, 导致大部分基体材

料熔化, 而粉末未完全熔化, 粉末沉积率低。如图 6b 所示焦点适中、热影响区小、大量的粉末沉积在表面, 涂层质量好。如图 6c 的正离焦平面, 激光能量密度从光束中心到边缘急剧下降, 熔覆轨道边缘能量密度太低, 无法充分熔化粉末, 未熔化部分与周围部分形成非冶金结合, 若提高功率则会导致涂层稀释率升高, 影响涂层性能。因此, 通过优化工艺参数来获得性能优异和较少缺陷数量的涂层至关重要。

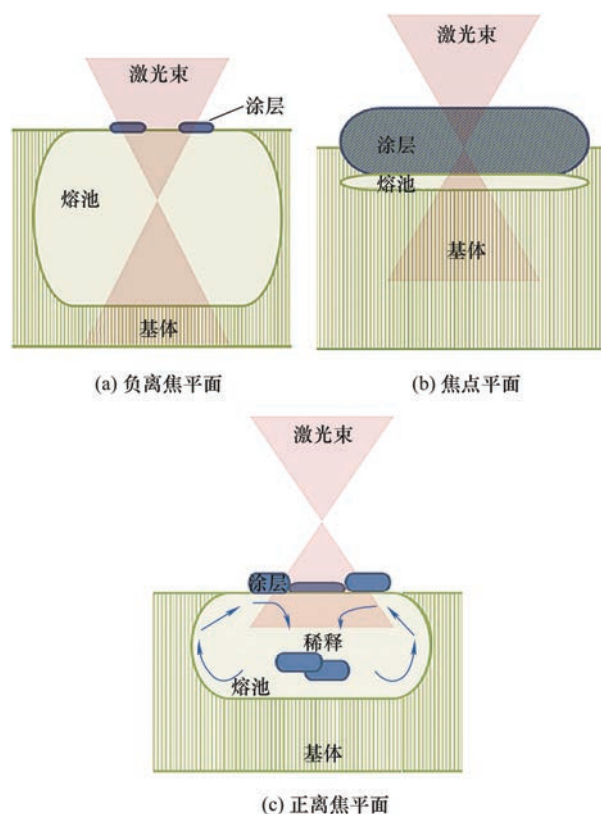


图 6 激光束在不同焦平面上的横截面示意图^[57, 58]

LIAN 等^[59-60]采用响应面法建立了工艺参数(激光功率、扫描速度、搭接率和气体流量)与涂层质量的数学模型, 该模型可以控制涂层几何特征、预测性能和优化工艺参数, 根据模型优化工艺参数而制备的涂层获得了优异的表面质量。CHEN 等^[61]采用田口设计法获得不同工艺参数涂层的质量特性, 并用信噪比和方差进行分析, 最后通过支持向量机建立预测模型, 并对激光功率、送粉率、扫描速度、激光束直径等工艺参数的优化, 获得了高质量的复合陶瓷涂层。MARZBAN 等^[62]基于正交阵列设计工艺参数并使用主成分分析获得影响涂层质量的权重因子, 之后再利用理想解的排序法(TOPSIS)获得最佳工艺参数, 从而对工艺参数优化并获得质量优异的涂层。

总之, 通过对激光功率、扫描速度、搭接率、

激光焦点位置等工艺参数的优化,能够显著提高涂层的冶金质量,减少涂层缺陷的产生。此外,通过建立数学模型对熔覆过程中的熔覆质量进行预测并优化工艺参数,可以有效地改变涂层的表面形貌,以及减少涂层的孔隙和裂纹等缺陷,并且提高熔覆效率、降低成本。

2.3 陶瓷涂层结构优化

由于陶瓷材料与基材热物理性能差异大,导致陶瓷涂层在制备过程中易产生孔隙和裂纹等缺陷。研究人员对涂层的结构进行优化(梯度涂层、过渡层),能够降低缺陷数量,提高涂层的力学性能和质量。

梯度涂层是通过调控熔覆材料成分、涂层层数以及微观结构沿厚度或长度方向连续变化,使其性能呈现梯度变化的涂层,该涂层典型结构如图 7 所示。通过不断的提高涂层中的陶瓷含量,减少沉积层和基板之间的性能不连续性,从而提高相邻层之间的匹配性^[63]。梯度陶瓷涂层结构可有效地减轻熔覆过程中涂层和基材之间热物性差异,降低了涂层的热应力和减少了涂层的应力集中,从而减少涂层裂纹的产生^[64]。LU 等^[65]通过激光熔覆在 Ti-6Al-4V 合金上制备出微观结构致密的氧化钛梯度涂层。发现所有渐变氧化层中均未观察到裂纹,并且在涂层与基材界面处未发现分层的迹象。LIN 等^[66]在钛合金表面制备 TiB₂/TiB 梯度涂层,发现激光熔覆梯度涂层各层之间没有明显的界面,结构致密连续,涂层微观结构得到细化,无裂纹产生,说明梯度涂层结构的设计有助于减少缺陷的产生。

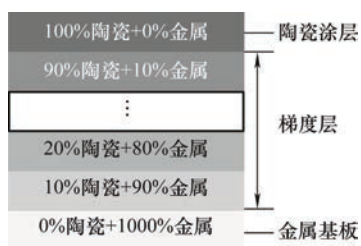


图 7 梯度陶瓷涂层结构示意图^[63]

过渡层的热物理性能常介于涂层和基材之间,通过引入中间过渡层,降低了涂层与基材的固有的热性能不匹配,提高了涂层与基体的结合强度,有效地抑制裂纹的产生,减少缺陷的形成。在熔覆过程中常采用镍基合金作为中间过渡层,主要是因为镍基合金导热率高、韧性好、热膨胀系数常介于金属和陶瓷之间,有利于降低熔覆过程中温度梯度的差异而引起的热应力^[67]。ZANG 等^[68]在制备 NiCr-Cr₃C₂ 涂层过程中引入 Ni45 作为中间过渡层。

如图 8 所示, NiCr-Cr₃C₂ 层中黑色球形晶体为 Cr₃C₂, Ni45 层和 NiCr-Cr₃C₂ 层均无裂纹、孔隙和其他缺陷。Ni45 过渡层缓解了激光熔覆过程中的温度梯度和热应力,减少了裂纹等缺陷的产生。

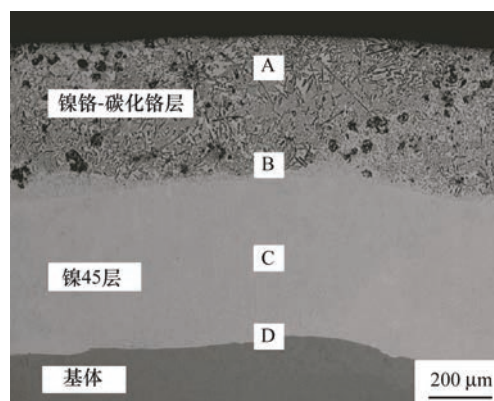


图 8 Ni45/NiCr-Cr₃C₂ 涂层横截面 EPMA 图像^[68]

此外, MCrAlY (M 为 Co、Ni、NiCo 等)也可用作中间层。WANG 等^[69]为了提高 Al₂O₃-13%TiO₂ 的抗裂性,在制备复合涂层之前,在基底上预制备 MCrAlY 金属粘结层。该过渡层能够有效地抑制复合涂层的裂纹拓展,涂层中未发现裂纹。过渡层具有良好的塑性能够对复合的涂层和基材的热影响区起到缓冲作用,降低应力集中而导致开裂的问题。

2.4 涂层材料体系优化

为了提高涂层和基材之间的结合力,细化组织,降低涂层的残余应力,控制涂层缺陷,制备出性能优良、表面质量良好的涂层。研究人员主要通过金属组元复合和添加稀土元素的方式对熔覆材料体系进行优化。

陶瓷材料与金属基材力学和热物理性能(如弹性模量和热膨胀系数等)失配,容易在涂层中产生应力,导致裂纹甚至分层。因此,研究人员通过金属组元与陶瓷复合,即在熔覆材料中添加某种或几种合金元素,它们作为陶瓷相与基材之间的粘结相,具有过渡和缓冲作用,并增加了陶瓷涂层的韧性,有效地降低了残余应力和开裂倾向^[70],提高涂层与基材界面的结合强度^[71]。WANG 等^[72]采用激光熔覆在 Ti-6Al-4V 合金表面成功制备了不同含量的 Ti₃SiC₂ 陶瓷与自熔合金粉末 Ni60 组成的复合涂层,在涂层中未观察到明显的裂纹和孔隙。此外,涂层的底部没有因缺陷而产生的熔合线,表明了涂层与基材的结合性良好。SHEN 等^[73]在碳钢上制备 WC 与 NiCrSiBC 的复合涂层,研究了高陶瓷含量复合涂层的裂纹形成机制。发现 40%WC(质量分数)复合涂层的表面和横截面均未发现明显裂纹,对于 50%和 60%WC 复合涂层出现了裂纹。总体而言,涂层

的孔隙和裂纹随着 WC 质量分数的升高而增加。通过研究发现复合涂层虽然可以有效地控制裂纹、孔隙等缺陷,但必须要控制合金元素与陶瓷的含量在合理地范围内,另外合理设计材料的组成成分才能更好地制备出性能良好、表面质量良好的涂层。

近年来,稀土元素被广泛的应用于陶瓷涂层的表面改性^[74]。大量研究表明,稀土元素的加入可细化微观结构,改善熔池的流动性,加速气体从熔池中逸出,从而减少涂层中的孔隙,提高涂层的质量。此外,稀土对晶界有很强的钉扎作用,在涂层结构中起细化作用,并减少涂层的开裂^[75]。涂层中稀土的存在也会显著提高涂层的韧性,降低开裂倾向^[76]。研究人员制备不同稀土氧化物(La_2O_3 、 CeO_2 和 Y_2O_3)的涂层,如图 9 所示,在不添加稀土氧化物的涂层中观察到许多气孔和裂纹,而添加稀土氧化物的涂层表面光滑,涂层中的孔隙和裂纹数量显著降低^[77]。YANAN 等^[78]研究了不同含量的 CeO_2 对 TiC/Ti₂Ni 激光熔覆涂层开裂敏感性的影响。结果表明,添加 2% CeO_2 (质量分数)有效地消除了裂纹的形成并降低了开裂敏感性。但加入过量的 CeO_2 ,会阻碍显微组织的细化。因此,适量的加入稀土元素有助于减少裂纹的产生,提高涂层的表面质量。

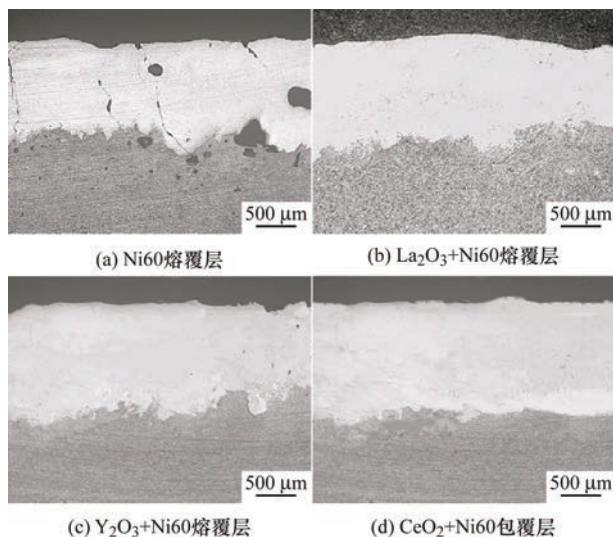


图 9 熔覆层的表面形貌^[77]

2.5 多种工艺辅助成形

许多学者将激光熔覆技术与超声辅助技术、电磁辅助技术、感应加热技术、激光重熔等其他表面辅助技术相结合,从而更好地将激光熔覆技术与辅助成形技术存在的优势发挥出来,弥补激光熔覆的短板,减少涂层组织缺陷,获得组织均匀、晶粒细化、质量优良的陶瓷涂层。

超声振动作为一种物理场,可以显著影响凝固

过程中熔池的微观组织生长,是改善力学性能、提高涂层质量的有效方法之一^[79-80]。超声波振动辅助激光熔覆示意图如图 10 所示,超声波电源为压电陶瓷振动器提供电能,产生超声波振动,超声波振动方向垂直于基材表面,然后通过声学转换器将其传输到基材^[79]。在熔覆过程中引入超声振动技术可降低陶瓷颗粒聚集程度、细化晶粒、降低残余应力以及涂层裂纹敏感性方面具有重要作用^[81-82]。WU 等^[83]将超声辅助技术与激光熔覆复合,观察到熔覆过程中超声振动细化涂层的微观结构,控制涂层内的稀释特性,提高了涂层和基材的结合强度。LI 等^[84]在熔覆 Ni/WC/ La_2O_3 涂层过程中引入了超声振动,在无超声振动的情况下制备的涂层具有明显的剥落坑和裂纹,引入超声振动后碳化钨颗粒分布均匀、显微组织细化、涂层表面形貌好、无裂纹。该辅助工艺在细化晶粒、改善力学性能、降低涂层裂纹敏感性、提升涂层质量等方面具有重要作用。

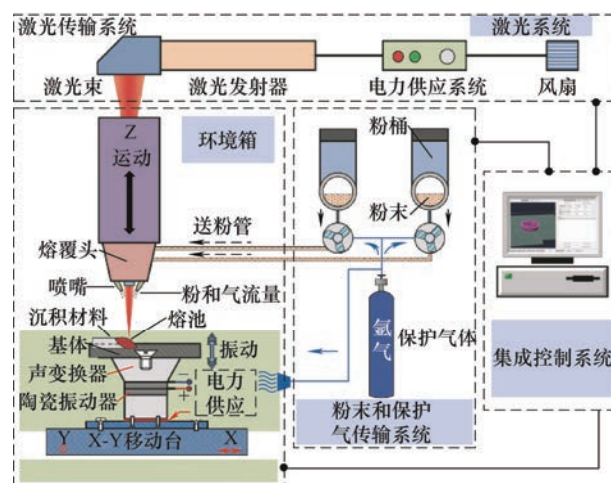


图 10 超声振动辅助激光熔覆示意图^[79]

电磁辅助激光熔覆技术是将电场与磁场相结合,通过改变电场和磁场的强度、方向和频率有效地控制电磁场产生的洛伦兹力,进而通过磁场力的作用达到驱动或抑制熔池的对流运动、调节凝固组织的目的,从而使涂层微观结构均匀化,减少涂层缺陷^[85]。图 11 为电磁辅助激光熔覆工艺设备,在基材上施加稳定电流,两个磁极之间产生磁通密度分布均匀的磁场,加速熔池流动,从而细化涂层的晶粒结构,提高涂层的硬度和耐磨性,并减少涂层的孔隙和裂纹^[86]。ZHANG 等^[87]采用电磁辅助激光熔覆技术熔覆 NiCrBSi 涂层,熔覆涂层中的气孔和裂纹的缺陷数量明显减少,晶粒细化,稀释率降低。ZHAI 等^[88]也观察到在电磁复合场的辅助下,由于电磁搅拌和电流热效应的共同作用改善了涂层的微

观结构,涂层中的裂纹数量减少。此外,还有研究学者为了改变元素偏析和涂层微观结构分布不均的缺陷,采用直流电场、交变磁场和超声波耦合辅助激光熔覆工艺,得到的涂层显微组织细化,元素扩散均匀,力学性能良好^[82]。

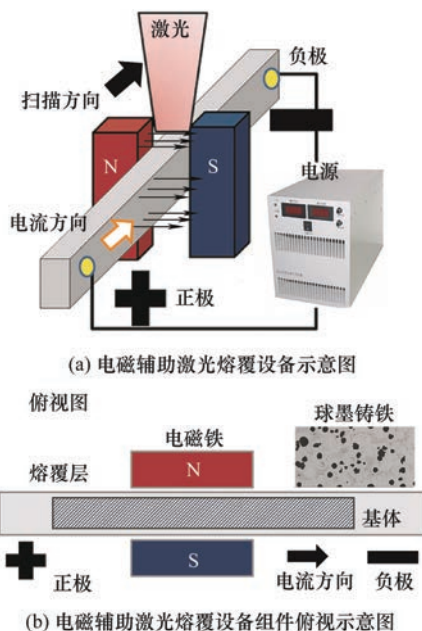
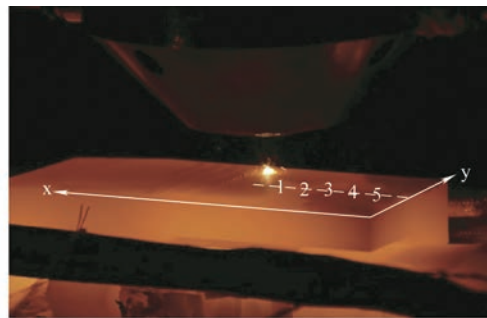


图 11 电磁辅助激光熔覆设备^[86]

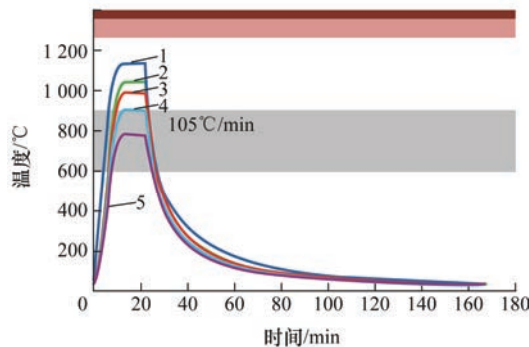
预热是激光熔覆提升表面质量的重要方法,在激光熔覆过程中对基材和粉末的预热能够显著降低工艺因急热和骤冷产生的热应力,因而采用合理的预热温度可以减少涂层缺陷,提高表面成型质量。预热基材虽然能降低涂层和基板之间的温度梯度,但由于预热时间较长,导致激光熔覆效率低。研究人员提出了激光感应混合快速熔覆,即基板预热与激光熔覆同时进行,其基本原理是法拉第定律和安培定律。通过原理得知,施加在感应线圈上的交流电压可以产生交变磁通量,而交变磁通量会在基材内产生感应电流,进而应用涡流感应加热^[89-90]。如图 12 所示为磁感应器对基板预热,并通过熔覆区域附近的 K 型热电偶控制温度^[91]。ZHOU 等^[92]通过引入感应加热器(LCAIH)制备镍基 WC 复合涂层。发现通过感应加热器辅助激光熔覆,缺陷的数量显著减少,可以制备出具有更高重量分数(超过 45%)且无缺陷的 Ni/WC 涂层。随后, FARAHMAND 等^[40]也通过感应加热器辅助激光熔覆制备 Ni-60%WC,在感应加热器的辅助下制备的复合涂层光滑均匀,没有裂纹或孔隙。

激光重熔是提高涂层表面质量和性能的有效方法,已被广泛用于制备具有致密结构和优异性能的涂层^[93-94]。MA 等^[95]研究了激光重熔 Ni60 和 WC

的复合涂层中显微组织的演变和分布情况,重熔后涂层显微组织特征表明,碳化钨在镍基体中分布均匀。重熔可以细化组织,降低涂层粗糙度,减少缺陷产生。ZHOU 等^[96]采用激光熔覆和激光重熔复合的工艺方法制备 WC 增强铁基复合涂层,重熔涂层微观结构更精细,涂层表面光滑。该复合工艺可以减少涂层的裂纹和孔隙,提高其表面质量。



(a) 样品的运行过程



(b) 位于样品表面不同位置的热循环热电偶记录

图 12 使用感应加热的激光熔覆^[91]

综上所述,将激光熔覆与多种成形辅助工艺复合的方式可以显著地改善涂层的微观结构,减少涂层孔隙、裂纹和元素偏析等缺陷。但有关复合工艺对涂层微观结构的作用机理、辅助元器件与激光熔覆工艺的协同匹配等方面有必要进一步深入研究,从而更好地将激光熔覆与辅助工艺结合实现优势互补。

3 激光熔覆陶瓷涂层的应用方向

近年来,机械制造、交通运输、航空航天、石油化工、生物医学等行业中对工件的承载能力和疲劳寿命提出了更高的要求。针对不同工况下存在的问题,科研人员采用激光熔覆表面强化和再制造修复技术制备出了一系列的功能涂层来应对工件失效问题。根据陶瓷材料的功能不同,激光熔覆制备陶瓷功能涂层可以大致分为四种:1) 激光熔覆耐腐蚀陶瓷涂层;2) 激光熔覆耐磨陶瓷涂层;3) 激光熔

覆热障陶瓷涂层; 4) 激光熔覆生物陶瓷涂层。

3.1 激光熔覆耐腐蚀陶瓷涂层

材料在恶劣的腐蚀环境中(例如海上石油、天然气钻井平台、水电站、化工厂、矿山等)需要对工件表面强化以及损伤零件再制造以抵抗侵蚀损坏, 耐腐蚀涂层可以提高设备的使用寿命, 降低维修成本^[97]。

因金属陶瓷复合涂层具有良好的耐腐蚀性、抗冲击和耐侵蚀性, XU 等^[98]采用 IM-6 电化学工作站研究了 AISI304/ Al_2O_3 金属陶瓷复合涂层具有很好的耐腐蚀性。此外, 研究人员还研究了 SiC、VC、WC 等陶瓷增强铁基的耐腐蚀性能, 通过引入陶瓷颗粒, 涂层耐腐蚀提升, 但随着陶瓷含量不断升高, 涂层耐腐蚀性会下降^[99-100]。因 Al_2O_3 具有优异的耐腐蚀性能以及在熔盐中的极低溶解度, SOLEIMANIPOUR 等^[101]在氧化钇稳定氧化锆(YSZ)涂层上熔覆氧化铝用来提高涂层在熔盐环境中的抗热腐蚀性能, 使用 55% V_2O_5 和 45% Na_2SO_4 的混合物(质量分数)作为腐蚀盐在 1000 °C 下进行 30 h 的热腐蚀试验, 通过观察热腐蚀实验后 YSZ 和激光熔覆涂层的表面的微观形貌, YSZ 完全分层而 Al_2O_3 没有发现分层。通过 EDS 分析 YSZ 涂层上产生了与熔盐在高温下反应生成的棒状晶体, 相比之下在 Al_2O_3 涂层中很少见, 证明在 YSZ 表面激光熔覆 Al_2O_3 形成了致密的不渗透层, 熔覆后涂层的抗热腐蚀性显著提高。DIAO 等^[102]通过激光熔覆(功率 3 500 W, 扫描速度分别为 4 mm/s、6 mm/s、8 mm/s)在 TC2 钛合金上制备了 TiC/TiB₂ 复合涂层, 对复合涂层的显微组织和腐蚀性能进行了测试。图 13 为不同复合涂层的电位极化曲线, 复合涂层的腐蚀电流密度降低, 表明激光熔覆制备的复合涂层耐腐蚀性明显强于基材。其中扫描速度 4 mm/s 耐腐蚀性能最好, 归因于扫描速度慢, 复合涂层吸收更多能量, 晶粒细化使钛合金的腐蚀性能得到改善。激光熔覆快速凝固后涂层的晶粒细化以及 TiC/TiB₂ 相的存在使涂层的耐腐蚀性能显著提升^[103]。

金属陶瓷复合涂层通过引入陶瓷相与金属结合形成致密涂层, 可提高涂层耐腐蚀性。激光熔覆快速加热和冷却, 使涂层显微组织均匀、晶粒细化以及陶瓷相均匀分布, 对提高耐腐蚀性至关重要。此外, 研究发现, 添加稀土元素可使涂层中腐蚀电位增加, 腐蚀电流密度降低, 从而提高涂层的耐腐蚀性^[104]。

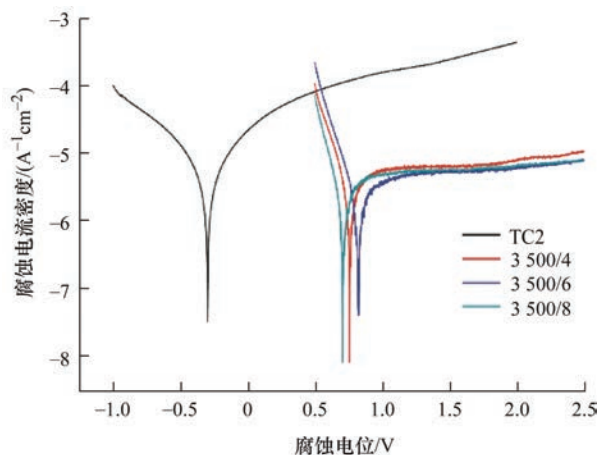


图 13 TC2 钛合金和激光熔覆试样在 3.5wt% NaCl 溶液中的极化曲线^[103]

3.2 激光熔覆耐磨陶瓷涂层

磨损是许多工程材料最常见的失效模式, 在恶劣工况(重载、高温、高速等)下的摩擦和磨损会缩短工件的使用寿命。科研人员通过制备优异抗磨、减摩性能的陶瓷涂层来提高工件硬度和耐磨性, 从而延长使用寿命。

涂层的耐磨性主要取决于陶瓷相的种类、数量和分布。涂层的陶瓷相是影响涂层表面性能的重要因素之一, 其中常见的陶瓷相有 WC、 Al_2O_3 、TiC、TiB₂、TiN、 Cr_3C_2 等高熔点、高硬度陶瓷颗粒^[105]。研究人员在涂层中分别加入 WC 和 Al_2O_3 陶瓷颗粒, 涂层中硬质相的形成显著提高了涂层的显微硬度和耐磨性^[98, 106]。LI 等^[21]在碳钢基体表面制备 Al_2O_3 -TiB₂-TiC 陶瓷涂层, 涂层组织均匀且致密, 基体上分布的大量的 Al_2O_3 、TiB₂ 和 TiC 等硬质强化相显著提高了涂层的显微硬度和耐磨性。当氧化铝的添加量添加到 30% 时, 陶瓷涂层形成了良好的表面质量, 耐磨性最好, 晶界裂纹和晶粒位移减少, 同时由于陶瓷强化相的存在可以产生钉扎来抵抗涂层磨损的影响。ZANG 等^[68]用 SiC 球滑动研究 NiCr- Cr_3C_2 涂层分别在 20、100 和 300 °C 下与基材的摩擦和磨损行为(见图 14)。NiCr- Cr_3C_2 涂层的摩擦因数在 30 分钟的摩擦试验过程中不断上升(见图 14a), 归因于 NiCr- Cr_3C_2 涂层和 SiC 球都是硬质材料, 在摩擦因数保持稳定之前, 该摩擦副需要经历磨合期。从图 14b 和图 14c 可看出, 涂层具有低且稳定的摩擦因数, 而基材的摩擦因数随着温度的升高而升高。图 14d 可看出, 随着温度的升高, 基材的摩擦因数和磨损率显著增加, 但与基材相比, 涂层具有较低的摩擦因数和磨损率, 硬质相 Cr_3C_2 和 Cr_7C_3 的存在提高了涂层中的耐磨性, 显微硬度也远高于基材, NiCr- Cr_3C_2 涂层具有良好的耐磨性。

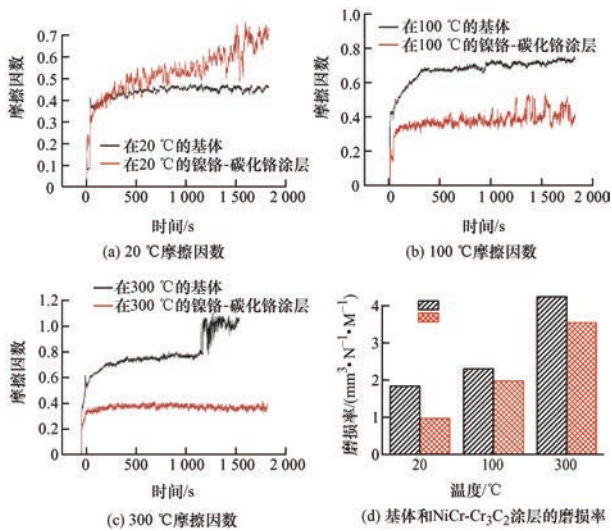


图14 不同温度下的摩擦因数和涂层磨损率^[68]

此外,在熔覆材料中加入固体润滑剂(h-BN^[107]、MoS₂^[108]、Ag^[109]等),可制备出具有优异减摩效果的自润滑性能陶瓷复合涂层。例如,QU等^[110]研究覆层材料中 MoS₂ 含量对涂层宏观和微观结构的影响,当 MoS₂ 的质量分数大于 6% 时,在涂层中原位形成具有有效减摩和保护功能的新型球形润滑相 TiS₂, 显著提高 Ti-6Al-4V 的耐磨性。

激光熔覆耐磨陶瓷涂层中,陶瓷相的存在能显著提高涂层显微硬度和耐磨性。陶瓷相的种类、数量和元素分布影响涂层的耐磨性,目前研究重点是添加多种高硬度陶瓷颗粒或制备金属陶瓷涂层提高涂层耐磨性。此外,也可通过添加固体润滑剂与陶瓷材料结合使涂层达到自润滑、减摩的效果。

3.3 激光熔覆热障陶瓷涂层

热障涂层是将耐高温、抗氧化性、耐腐蚀性的陶瓷材料熔覆在基材,使基材与外界热气体隔离,进而保护零部件免受腐蚀、氧化,改善基材性能、延长零部件使用寿命的热防护层^[111]。该涂层已应用于各种工程领域,包括内燃机,喷气式发动机的燃气轮叶片,热化学后处理装置等^[112]。

热障涂层具有良好的抗开裂性、抗高温氧化性和抗热冲击性能,较高的结合强度、硬度和极少的缺陷。其通常由多层组成的涂层,包括隔热陶瓷面层和金属粘合涂层。面层主要提供热保护作用,粘结层是一种抗氧化金属,常由 NiCrAlY 或 NiCoCrAlY 合金制成,可增加基材与陶瓷面层之间的粘结强度。粘结层和面层之间会形成一层热生长氧化物(TGO)用来作为保护层防止基材的氧化^[113-114]。锆酸镧(La₂Zr₂O₇)是一种用于热障涂层的新型陶瓷材料,HHUANG等^[115]在镍基高温合金上制备无粘结层的 La₂Zr₂O₇ 热障涂层,采用等温氧化

法(1 100 °C、110 h)和热循环法(25~1 100 °C)测试涂层的高温抗氧化性和抗热冲击性能。涂层中 La₂Zr₂O₇ 的存在使涂层比高温合金具有更好的高温抗氧化性能和热冲击性能。氧化钇稳定氧化锆(YSZ)具有高熔点、低导热率、高热膨胀系数和低密度是热障涂层中最广泛的应用材料之一^[116]。SOLEIMANIPOUR等^[117]采用激光熔覆在 YSZ 热障涂层的顶面制备 Al₂O₃ 涂层,通过在 1 000 °C 下加热 15 min 并在冷水中淬火来测试激光熔覆前后涂层的热冲击行为。如图 15 所示为热冲击实验后 YSZ 涂层和 YSZ/Al₂O₃ 复合涂层 FESEM 显微照片。在图 15a YSZ 涂层中观察到平行于表面的水平裂纹,顶层内部裂纹的形成证实了热冲击试验中样品逐渐失重过程中的分层机制。结构缺陷如孔隙和裂纹是 YSZ 涂层形成裂缝和分层的主要来源。图 15b 为涂层在热冲击试验后的断裂横截面,可发现涂层界面处出现明显的分层和剥落。对循环样品称重并观察涂层的表面变化,发现涂层分层导致重量逐渐减轻,分层和剥落两种机制是热冲击试验后两种涂层中失效的主要原因。对两种涂层的热循环寿命比较发现 Al₂O₃ 涂层对 YSZ 抗热冲击性显著提升,减少了不同层之间的热膨胀失配而形成的热应力。此外,Al₂O₃ 的高热稳定性和熔点对提高激光熔覆涂层的抗热震性也有较大作用。

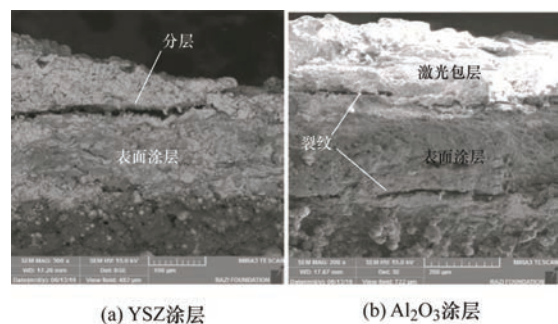


图15 YSZ 和 Al₂O₃ 热冲击试验后的断裂横截面图像^[117]

3.4 激光熔覆生物陶瓷涂层

激光熔覆制备的生物陶瓷涂层与基材的结合性能好、强度高、表面结构精细,具有良好的生物相容性^[118],从而被广泛应用于骨折修复、颅面、关节、心血管植入物(支架、人工瓣膜)、髋关节假体中等。其中具有生物活性的陶瓷材料,例如硅灰石、β-磷酸三钙(β-Ca₂P₂O₇)、羟基磷灰石(HAP)以及氟磷灰石(FA)等常被用作生物陶瓷涂层的制备^[119-120]。

近年来,生物陶瓷涂层的应用研究主要集中在提高涂层与基材之间的界面结合强度、保持或提高涂层的生物活性和生物相容性、改变金属及其合金

的表面性质、增强细胞和骨骼的黏着力。为了提高钛合金(Ti-6Al-4V)的生物活性,LI 等^[120]研究了不同含量的 MgO 对硅灰石基陶瓷涂层显微组织、力学性能和生物学性能的影响。其中 MgO 的加入,细化了陶瓷层的微观结构,进行体外细胞试验,该涂层具有高黏着力和较多细胞增殖,提高了其生物活性。XU 等^[121]在 Ti-6Al-4V 合金表面制备了氮化硅(Si_3N_4)和磷酸三钙($\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$)复合生物陶瓷涂层。采用合适的激光参数, Si_3N_4 和 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$ 复合涂层均能在涂层与基体之间形成致密的结合界面,具有良好的力学性能,复合陶瓷涂层的显微硬度显著提高。在复合涂层中加入 $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$ 可以获得良好的生物活性。羟基磷灰石(HAP)和氟磷灰石(FA) 因其出色的生物相容性也常用于 Ti-6Al-4V 合金生物涂层的制备,而广泛用于医疗领域^[122-123]。此外,研究人员关注新材料的设计来提高涂层表面的耐磨性和机械的可靠性,人们发现生物惰性陶瓷涂层具有优异的机械性能,适用于承重和耐磨的生物医学应用^[124]。CHEN 等^[125]在 Ti-6Al-4V 合金表面制备了 TiC 生物惰性陶瓷涂层,通过纳米压痕和摩擦磨损实验得到了涂层具有优异的耐磨性和很高的硬度,进行体外细胞实验得到该涂层具有良好的细胞相容性。

4 结论与展望

机械装备在苛刻工况下的失效报废对工业生产造成了巨大的经济损失,激光熔覆技术为工件的表面强化和再制造提供了一种快速且环保的方式。采用激光熔覆制备陶瓷涂层可以有效改善基材的耐磨、耐蚀、耐高温氧化等性能,克服了陶瓷材料难加工问题,从而获得实际工况中性能优良的涂层,对降低装备易损部件失效、延长高附加值装备服役寿命,具有重要研究和应用价值。然而,激光熔覆陶瓷涂层的孔隙、裂纹和元素偏析等缺陷控制仍是该技术应用中的关键难题。目前,主要通过数值分析和模拟调控工艺参数、设计涂层结构(如梯度涂层、过渡层)、优化熔覆材料体系(如金属组元复合或加入稀土元素)等方法可以显著改善涂层的微观结构和性能,减少涂层缺陷。此外,其他外场辅助技术与激光熔覆技术结合改变晶粒生长模式、改善微观结构也可减少缺陷产生,从而制备出无裂纹、无孔隙、性能良好的陶瓷涂层。从激光熔覆陶瓷涂层的功能来看,目前常用涂层类型包括耐磨涂层、防腐涂层、热障涂层、生物相容性涂层。

虽然近年来国内外在激光熔覆陶瓷涂层研究中

已经取得了一定的成绩和发展,但仍有诸多关键问题值得进一步深入研究和改进。

(1) 新型陶瓷涂层材料的设计。随着装备服役工况越来越苛刻,以及陶瓷材料与金属材料特性差异较大,因此有必要创新涂层材料设计思路并引入第一性原理计算、高通量性能测试等材料设计与性能验证方法,实现涂层材料同时具备多种优异性能,例如将 MAX 相陶瓷与金属复合可以获得耐磨、耐高温、强韧一体的涂层;自润滑高导电陶瓷材料以及铪/锆系超高温陶瓷等材料同样也具有重要开发和应用价值。材料体系的多样性,能够拓宽其应用范围,为不同工况的使用提供更多的选择。

(2) 激光熔覆新工艺的开发。工艺对于涂层的宏观形貌和微观结构具有重要的影响。虽然激光熔覆与超声振动、电磁辅助、感应加热辅助等技术的工艺复合已得到应用,但对如何降低涂层表面粗糙度、提高熔覆成形效率、改善疲劳特性、提高表面质量等工艺方法还需深入探索,例如超声冲击与激光熔覆复合对于降低涂层表面粗糙度、改善疲劳特性等方面具有重要的研究意义。

(3) 新型激光熔覆设备的研发。充分利用现代信息技术和智能控制技术的发展成果,建立激光熔覆数据库模型,并且利用人工智能技术与激光熔覆工艺结合,研发具备工艺参数自主设计和成形过程自适应反馈调节功能的智能熔覆系统,以适应装备大型、复杂结构零部件高质量熔覆需求;其次面向市场和多场景应用,激光熔覆设备应向着小型化、便携式和低成本的大规模应用方向发展。

参 考 文 献

- [1] 张文毓. 耐磨陶瓷涂层研究现状与应用[J]. 陶瓷, 2013(11): 12-15.
ZHANG Wenyu. Research status and application of wear resistant ceramic coating [J]. Ceramics, 2013(11): 12-5.
- [2] 张景德, 尹衍升, 李静, 等. 陶瓷涂层材料的应用与发展[J]. 机械工程材料, 2002(11): 5-6.
ZHANG Jingde, YIN Yansheng, LI Jing, et al. Application and development of ceramic coating materials [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2002(11): 5-6+16.
- [3] 姬梅梅, 朱时珍, 马壮. 航空航天用金属表面热防护涂层的研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(1): 253-266.
JI Meimei, ZHU Shizhen, MA Zhuang. Research progress of thermal protective coatings on metal surfaces used in aerospace[J]. Surface Technology, 2021, 50(1): 253-266.
- [4] 燕晓涛, 吕耀辉, 林建军, 等. 高性能陶瓷涂层材料制

- 备技术的综述[J]. 信息系统工程, 2017(12): 94-96.
- YAN Xiao Tao, LÜ Yaohui, LIN Jianjun, et al. Review on preparation technology of high-performance ceramic coating materials [J]. Information Systems Engineering, 2017(12): 94-96.
- [5] 张继豪, 宋凯强, 张敏, 等. 高性能陶瓷涂层及其制备工艺发展趋势[J]. 表面技术, 2017, 46(12): 96-103.
- ZHANG Jihao, SONG Kaiqiang, ZHANG Min, et al. Development trend of high-performance ceramic coating and its preparation technology [J]. Surface Technology, 2017, 46(12): 96-103.
- [6] GAO Z, WANG L, WANG Y, 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: 163905.
- [7] 杜学芸, 许金宝, 宋健. 激光熔覆再制造技术研究现状及发展趋势[J]. 表面工程与再制造, 2020, 20(6): 18-22.
- DU Xueyun, XU Jinbao, SONG Jian. Research status and development trend of laser cladding remanufacturing technology [J]. Surface Engineering and Remanufacturing, 2020, 20(6): 18-22.
- [8] 李方义, 李振, 王黎明, 等. 内燃机增材再制造修复技术综述[J]. 中国机械工程, 2019, 30(9): 1119-1127.
- LI Fangyi, LI Zhen, WANG Liming, et al. Review of additive remanufacturing repair technology for internal combustion engine [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(9): 1119-1127.
- [9] LIU Y, Ding Y, YANG L, et al. Research and progress of laser cladding on engineering alloys: A review[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 66: 341-363.
- [10] LER Y, SUN R, TANG Y, et al. Microstructure and phase transformations in laser clad CrxSy/Ni coating on H13 steel[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 66: 181-186.
- [11] 徐滨士, 夏丹, 谭君洋, 等. 中国智能再制造的现状与发展[J]. 中国表面工程, 2018, 31(5): 1-13.
- XU Binshi, XIA Dan, TAN Junyang, et al. Status and development of intelligent remanufacturing in China [J]. China Surface Engineering, 2018, 31(5): 1-13.
- [12] 徐滨士. 新时代中国特色再制造的创新发展[J]. 中国表面工程, 2018, 31(1): 1-6.
- XU Binshi. Innovative development of remanufacturing with Chinese characteristics in the new era[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(1): 1-6.
- [13] 徐滨士, 李恩重, 郑汉东, 等. 我国再制造产业及其发展战略[J]. 中国工程科学, 2017, 19(3): 61-65.
- Xu Binshi, LI Enzhong, ZHENG Handong, et al. Remanufacturing industry and its development strategy in China [J]. Engineering Science, 2017, 19(3): 61-65.
- [14] TOYSERKANI E, KHAJEPOUR A, CORBIN S F. Laser cladding[M]. Boca Raton : CRC Press, 2004.
- [15] 张万红. 激光熔覆陶瓷涂层的研究现状及发展[J]. 热加工工艺, 2009, 38(24): 39-42.
- ZHANG Wanhong. Research status and development of laser cladding ceramic coatings [J]. Hot Working Technology, 2009, 38(24): 39-42.
- [16] MITTERER C, MAYRHOFFER P H, BESCHLIESSER M, et al. Microstructure and properties of nanocomposite Ti-B-N and Ti-B-C coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 120-121: 405-411.
- [17] CAI Y, LUO Z, FENG M, et al. The effect of TiC/Al₂O₃ composite ceramic reinforcement on tribological behavior of laser cladding Ni60 alloys coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 291: 222-229.
- [18] GAO X, TIAN Z, LIU Z, et al. Interface characteristics of Al₂O₃-13%TiO₂ ceramic coatings prepared by laser cladding[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(10): 2498-2503.
- [19] MITTERER C, MAYRHOFFER P H, BESCHLIESSER M, et al. Microstructure and properties of nanocomposite Ti-B-N and Ti-B-C coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 120-121: 405-411.
- [20] 马宝霞, 李金有. ZrC 复相陶瓷表面等离子喷涂 ZrB₂-SiC-ZrC 陶瓷涂层的制备[J]. 材料保护, 2019, 52(11): 91-96.
- MA Baoxia, LI Jinyou. Preparation of ZrB₂-SiC-ZrC ceramic coatings by plasma spraying [J]. Journal of Materials Protection, 2019, 52(11): 91-96.
- [21] LI Z, WER M, XIAO K, et al. Microhardness and wear resistance of Al₂O₃-TiB₂-TiC ceramic coatings on carbon steel fabricated by laser cladding[J]. Ceramics International, 2019, 45(1): 115-121.
- [22] WANG D, TIAN Z, WANG S, et al. Microstructural characterization of Al₂O₃-13wt.% TiO₂ ceramic coatings prepared by squash presetting laser cladding on GH4169 superalloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 254: 195-201.
- [23] FAN P, ZHANG G. Study on process optimization of WC-Co50 cermet composite coating by laser cladding[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2020, 87: 105133.

- [24] BUCHHOLZ S, FARHAT Z N, KIPOUROS G J, et al. The reciprocating wear behaviour of TiC–Ni3Al cermets[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2012, 33: 44-52.
- [25] ALAM M S, DAS A K. Advancement in cermet based coating on steel substrate: A review[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 56: 805-810.
- [26] WANG X H, LIU A M. Microstructure and abrasive-wear behavior under high temperature of laser clad Ni-based WC ceramic coating[J]. *Physics Procedia*, 2013, 50: 145-149.
- [27] HU M, TANG J, CHEN X, et al. Microstructure and properties of WC-12Co composite coatings prepared by laser cladding[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 30(4): 1017-1030.
- [28] JIN C, ONUOHA C C, FARHAT Z N, et al. Reciprocating wear behaviour of TiC-stainless steel cermets[J]. *Tribology International*, 2017, 105: 250-263.
- [29] 张蕾涛, 刘德鑫, 张伟樯, 等. 钛合金表面激光熔覆涂层的研究进展[J]. *表面技术*, 2020, 49(8): 97-104.
- ZHANG Leitao, LIU Dexin, ZHANG Weiqiang, et al. Research progress of laser cladding coatings on Titanium alloy [J]. *Surface Technology*, 2020, 49(8): 97-104.
- [30] LIANG J, YIN X, LIN Z, et al. Microstructure and wear behaviors of laser cladding in-situ synthetic (TiBx+TiC)/(Ti2Ni+TiNi) gradient composite coatings[J]. *Vacuum*, 2020, 176.
- [31] YANG Y, YAO W, ZHANG H. Phase constituents and mechanical properties of laser in-situ synthesized TiCN/TiN composite coating on Ti-6Al-4V[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2010, 205(2): 620-624.
- [32] WU X. In situ formation by laser cladding of a TiC composite coating with a gradient distribution[J]. *Surface and Coatings Technology*, 1999, 115(2): 111-115.
- [33] YANG Y, YAN W, ZHANG D. Phase constituents and mechanical properties of laser in-situ synthesized TiCN/TiN composite coating on Ti-6Al-4V[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2010, 205(2): 620-624.
- [34] YUE T M, HUANG K J, MAN H C. In situ laser cladding of Al2O3 bearing coatings on aluminium alloy 7075 for improvement of wear resistance[J]. *Surface Engineering*, 2007, 23(2): 142-146.
- [35] RICHARDSON P, CUSKELLY D, BRANDT M, et al. Microstructural analysis of in-situ reacted Ti2AlC MAX phase composite coating by laser cladding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 385: 125360.
- [36] CHEN T, WU W, LI W, et al. Laser cladding of nanoparticle TiC ceramic powder: Effects of process parameters on the quality characteristics of the coatings and its prediction model[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 116: 345-355.
- [37] KUMAR DAS A. Recent advancements in nanocomposite coating manufactured by laser cladding and alloying technique: A critical review[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 57: 1852-1857.
- [38] FABIJANIC T A, ALAR Ž, CORIC D. Influence of consolidation process and sintering temperature on microstructure and mechanical properties of near nano- and nano-structured WC-Co cemented carbides[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2016, 54: 82-89.
- [39] LI W, XU P, WANG Y, et al. Laser synthesis and microstructure of micro- and nano-structured WC reinforced Co-based cladding layers on titanium alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 749: 10-22.
- [40] FARAHMAND P, LIU S, ZHANG Z, et al. Laser cladding assisted by induction heating of Ni–WC composite enhanced by nano-WC and La2O3[J]. *Ceramics International*, 2014, 40(10, Part A): 15421-15438.
- [41] WANG D, TIAN Z, WANG S, et al. Preparation technology of nanometer ceramic particles reinforced metal-matrix graded coating by laser multi-layer cladding [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 217-219: 1006-1009.
- [42] 周佳良, 舒凤远, 赵洪运, 等. 激光熔覆在 AlN 陶瓷表面制备铜基金属覆层缺陷分析及控制[J]. *焊接学报*, 2019, 40(11): 133-138.
- ZHOU Jialiang, SHU Fengyuan, ZHAO Hongyun, et al. Analysis and control of defects of copper-based coatings prepared by laser cladding on AlN ceramic surface [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(11): 133-138.
- [43] GAO Y X, YI J Z, LEE P D, et al. A micro-cell model of the effect of microstructure and defects on fatigue resistance in cast aluminum alloys[J]. *Acta Materialia*, 2004, 52(19): 5435-5449.
- [44] 刘贵仲, 钟文华, 高原. 激光熔覆涂层缺陷的形成及防治[J]. *表面技术*, 2012, 41(5): 89-92.
- LIU Guizhong, ZHONG Wenhua, GAO Yuan. Formation and prevention of defects in laser cladding coatings[J]. *Surface Technology*, 2012, 41(5): 89-92.
- [45] 郭华锋, 李志, 熊永超, 等. 激光熔覆成形 Ni 基合金

- 层的缺陷分析及控制[J]. 热加工工艺, 2008(19): 126-129.
- GUO Huafeng, LI Zhi, XIONG Yongchao, et al. Defect analysis and control of Ni-base alloy layer formed by laser cladding [J]. Hot Working Technology, 2008(19): 126-9.
- [46] ZENG C, TIAN W, LIAO W H, et al. Microstructure and porosity evaluation in laser-cladding deposited Ni-based coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 294: 122-130.
- [47] FAN Q, CHEN C, FAN C, et al. Ultrasonic suppression of element segregation in gas tungsten arc cladding AlCoCuFeNi high-entropy alloy coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 420: 127364.
- [48] BARR C, DA S, EASTO M, et al. Influence of macrosegregation on solidification cracking in laser clad ultra-high strength steels[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 340: 126-136.
- [49] FU F, ZHANG Y, CHANG G, et al. Analysis on the physical mechanism of laser cladding crack and its influence factors[J]. Optik, 2016, 127(1): 200-202.
- [50] TECHEL A, BERGE L, NOWOTNY S. Microstructure of advanced TiC-Based coatings prepared by laser cladding[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2007, 16(3): 374-380.
- [51] ZHU L, XUE P, LAN Q, et al. Recent research and development status of laser cladding: A review[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 138: 106915.
- [52] ZHAO Y, GUAN C, CHEN L, et al. Effect of process parameters on the cladding track geometry fabricated by laser cladding[J]. Optik, 2020, 223: 165447.
- [53] CHEN L, YU T, CHEN X, et al. Process optimization, microstructure and microhardness of coaxial laser cladding TiC reinforced Ni-based composite coatings[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 152: 108129.
- [54] ZHOU C, ZHAO S, WANG Y, et al. Mitigation of pores generation at overlapping zone during laser cladding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 216: 369-374.
- [55] CHEN C, LIAN G, JIANG J, et al. Simplification and experimental investigation of geometrical surface smoothness model for multi-track laser cladding processes[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 36: 621-628.
- [56] DEVOJNO O G, FELDSHTEIN E, KARDAPOLAVA M A, et al. On the formation features, structure, microhardness and tribological behavior of single tracks and coating layers formed by laser cladding of Al-Fe powder bronze[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 358: 195-206.
- [57] RIQUELME A, RODRIGO P, ESCALER-RODRIGUEZ M D, et al. Analysis and optimization of process parameters in Al-SiCp laser cladding[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 78: 165-173.
- [58] LIU J, YU H, CHEN C, et al. Research and development status of laser cladding on magnesium alloys: A review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 93: 195-210.
- [59] LINA G, LIU Z, ZHANG Y, et al. The forming control method of multi-track laser cladding on curved surface[J]. METALS, 2020, 10(8).
- [60] LIAN G, YAO M, ZHANG Y, et al. Analysis and prediction on geometric characteristics of multi-track overlapping laser cladding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(5-8): 2397-2407.
- [61] CHEN T, WU W, LI W, et al. Laser cladding of nanoparticle TiC ceramic powder: Effects of process parameters on the quality characteristics of the coatings and its prediction model[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 116: 345-355.
- [62] MARZBAN J, GHASEMINEJAD P, AHMADZADEH M H, et al. Experimental investigation and statistical optimization of laser surface cladding parameters[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(5-8): 1163-1172.
- [63] HU Y, CONG W. A review on laser deposition-additive manufacturing of ceramics and ceramic reinforced metal matrix composites[J]. Ceramics International, 2018, 44(17): 20599-20612.
- [64] 周雳, 邢志国, 王海斗, 等. 等离子喷涂金属/陶瓷梯度热障涂层研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(1): 122-131.
- ZHOU Li, XING Zhiguo, WANG Haidou, et al. Research progress of plasma sprayed metal/ceramic gradient thermal barrier coatings [J]. Surface Technology, 2020, 49(1): 122-131.
- [65] LU M, MCCORMICK P, ZHAO Y, et al. Laser deposition of compositionally graded titanium oxide on Ti6Al4V alloy[J]. Ceramics International, 2018, 44(17): 20851-20861.
- [66] LIN Y, LER Y, LI X, et al. A study of TiB₂/TiB gradient coating by laser cladding on titanium alloy[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 82: 48-55.

- [67] 刘海青, 刘秀波, 孟祥军, 等. 金属基体激光熔覆陶瓷基复合涂层的裂纹成因及控制方法[J]. 材料导报, 2013, 27(11): 60-63.
- LIU Haiqing, LIU Xiubo, MENG Xiangjun, et al. Crack formation, and control method of laser cladding ceramic matrix composite coating on metal matrix [J]. Materials Review, 2013, 27(11): 60-63.
- [68] ZANG C, WANG Y, ZHANG Y, et al. Microstructure and wear-resistant properties of NiCr-Cr₃C₂ coating with Ni₄₅ transition layer produced by laser cladding[J]. Rare Metals, 2015, 34(7): 491-497.
- [69] WANG D, TIAN Z, SHEN L, et al. Preparation of thick ceramic coating by laser multi-layer cladding I-Crack control[J]. Advanced Materials Research, 2013, 785-786, 901-905.
- [70] WENG F, CHEN C, YU H. Research status of laser cladding on titanium and its alloys: A review[J]. Materials & Design, 2014, 58: 412-425.
- [71] 赵亚凡, 陈传忠. 激光熔覆金属陶瓷涂层材料对裂纹的影响及控制[J]. 材料导报, 2005(6): 64-66.
- ZHAO Yafan, CHEN Chuanzhong. Influence of laser cladding cermet coating material on crack and its control [J]. Materials Review, 2005(6): 64-66.
- [72] WANG Y, LIU X, LIU Y, et al. Microstructure and tribological performance of Ni₆₀-based composite coatings on Ti₆Al₄V alloy with different Ti₃SiC₂ ceramic additions by laser cladding[J]. Ceramics International, 2020, 46(18, Part A): 28996-29010.
- [73] SHEN X, HE X, GAO L, et al. Study on crack behavior of laser cladding ceramic-metal composite coating with high content of WC[J]. Ceramics International, 2022, 48(12): 17460-17470.
- [74] QUAZI M M, FAZAL M A, HASEEB A S M A, et al. Effect of rare earth elements and their oxides on tribo-mechanical performance of laser claddings: A review[J]. Journal of Rare Earths, 2016, 34(6): 549-564.
- [75] LIANG C J, WANG C L, ZHANG K X, et al. 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.
- [76] WANG D, LIANG E, Chao M, et al. Investigation on the microstructure and cracking susceptibility of laser-clad V₂O₅/NiCrBSiC alloy coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(8): 1371-1378.
- [77] WANG C, GAO Y, ZENG Z, et al. Effect of rare-earth on friction and wear properties of laser cladding Ni-based coatings on 6063Al[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 727: 278-285.
- [78] YANAN L, RONGLU S, WEI N, et al. Effects of CeO₂ on microstructure and properties of TiC/Ti₂Ni reinforced Ti-based laser cladding composite coatings[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 120: 84-94.
- [79] CONG W, NING F. A fundamental investigation on ultrasonic vibration-assisted laser engineered net shaping of stainless steel[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 121: 61-69.
- [80] LIU X, OSAWA Y, TAKAMOR S, et al. Microstructure and mechanical properties of AZ91 alloy produced with ultrasonic vibration[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 487(1): 120-123.
- [81] ZHANG M, ZHAO G L, WANG X H, et al. Microstructure evolution and properties of in-situ ceramic particles reinforced Fe-based composite coating produced by ultrasonic vibration assisted laser cladding processing[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 403: 126445.
- [82] LI M, HAN B, WANG Y, et al. Investigation on laser cladding high-hardness nano-ceramic coating assisted by ultrasonic vibration processing[J]. Optik, 2016, 127(11): 4596-4600.
- [83] WU D, GUO M, MA G, et al. Dilution characteristics of ultrasonic assisted laser clad yttria-stabilized zirconia coating[J]. Materials Letters, 2015, 141: 207-209.
- [84] LI M, ZHANG Q, HAN B, et al. Microstructure and property of Ni/WC/La₂O₃ coatings by ultrasonic vibration-assisted laser cladding treatment[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 125: 105848.
- [85] ZHAI L L, BAN C Y, ZHANG J W. Microstructure, microhardness and corrosion resistance of NiCrBSi coatings under electromagnetic field auxiliary laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 358: 531-538.
- [86] HU Y, WANG L, YAO J, 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.
- [87] ZHANG Q, ZHANG P, YAN H, et al. Magnetic-field-assisted laser cladding in the preparation of a crack-free Fe-Cr-Mo-C-Y-B amorphous coating on steel[J]. PHILOSOPHICAL MAGAZINE LETTERS, 2020, 100(2): 86-93.

- [88] 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.
- [89] ZHOU S, ZENG X, HU Q, et al. Analysis of crack behavior for Ni-based WC composite coatings by laser cladding and crack-free realization[J]. *Applied Surface Science*, 2008, 255(5, Part 1): 1646-1653.
- [90] JANG J, CHIU Y. Numerical and experimental thermal analysis for a metallic hollow cylinder subjected to step-wise electro-magnetic induction heating[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27(11): 1883-1894.
- [91] 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: 116461.
- [92] ZHOU S, HUANG Y, ZENG X, et al. Microstructure characteristics of Ni-based WC composite coatings by laser induction hybrid rapid cladding[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 480(1): 564-572.
- [93] WANG Q, XI Y, ZHAO Y, et al. Effects of laser re-melting and annealing on microstructure, mechanical property and corrosion resistance of Fe-based amorphous/crystalline composite coating[J]. *Materials Characterization*, 2017, 127: 239-247.
- [94] GAO W, ZHAO S, WANG Y, et al. Effect of re-melting on the cladding coating of Fe-based composite powder[J]. *Materials & Design*, 2014, 64: 490-496.
- [95] MA Q, LI Y, WANG J, et al. Homogenization of carbides in Ni60/WC composite coatings made by fiber laser remelting[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, 30(12): 1417-1424.
- [96] ZHOU S, XU Y, LIAO B, et al. Effect of laser remelting on microstructure and properties of WC reinforced Fe-based amorphous composite coatings by laser cladding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 103: 8-16.
- [97] XU P, LIN C, ZHOU C, et al. Wear and corrosion resistance of laser cladding AISI 304 stainless steel/Al₂O₃ composite coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 238: 9-14.
- [98] XU P, LIN C, ZHOU C, et al. Wear and corrosion resistance of laser cladding AISI 304 stainless steel/Al₂O₃ composite coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 238: 9-14.
- [99] ABIOYE T E, FARAYIBI P K, MCCARTNEY D G, et al. Effect of carbide dissolution on the corrosion performance of tungsten carbide reinforced Inconel 625 wire laser coating[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 231: 89-99.
- [100] ZHANG Z, YU T, KOVACEVIC R. Erosion and corrosion resistance of laser clad AISI 420 stainless steel reinforced with VC[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 410: 225-240.
- [101] SOLEIMANIPOUR Z, BAGHSHAHI S, SHOJA-RAZAVI R, et al. Hot corrosion behavior of Al₂O₃ laser clad plasma sprayed YSZ thermal barrier coatings[J]. *Ceramics International*, 2016, 42(15): 17698-17705.
- [102] DIAO Y, ZHANG K. Microstructure and corrosion resistance of TC2 Ti alloy by laser cladding with Ti/TiC/TiB₂ powders[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 352: 163-168.
- [103] BALYANOV A, KUTNYAKOVA J, AMIRKHANOVA N A, et al. Corrosion resistance of ultra fine-grained Ti[J]. *Scripta Materialia*, 2004, 51(3): 225-229.
- [104] XU Z, WANG Z, CHEN J, et al. Effect of rare earth oxides on microstructure and corrosion behavior of laser-cladding coating on 316L stainless steel[J]. *Coatings*, 2019, 9(10): 636.
- [105] 路世盛, 周健松, 王凌倩, 等. 钛合金表面激光熔覆陶瓷涂层的研究进展[J]. *表面技术*, 2019, 48(11): 82-90.
- LU Shisheng, ZHOU Jiansong, WANG Lingqian, et al. Research progress of laser cladding ceramic coating on titanium alloy surface [J]. *Surface Technology*, 2019, 48(11): 82-90.
- [106] GUO C, ZHOU J, CHEN J, et al. High temperature wear resistance of laser cladding NiCrBSi and NiCrBSi/WC-Ni composite coatings[J]. *Wear*, 2011, 270(7): 492-498.
- [107] CHEN Z, YAN H, ZHANG P, et al. Microstructural evolution and wear behaviors of laser-clad Stellite 6/NbC/h-BN self-lubricating coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 372: 218-228.
- [108] TORRES H, VUCHKOV T, RODRIGUEZ RIPOLL M, et al. Tribological behaviour of MoS₂-based self-lubricating laser cladding for use in high temperature applications[J]. *Tribology International*, 2018, 126: 153-165.
- [109] TORRES H, SLAWIKI S, GACHOT C, et al. Microstructural design of self-lubricating laser claddings

- for use in high temperature sliding applications[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 337: 24-34.
- [110] QU C C, LI J, JUAN Y F, et al. Effects of the content of MoS₂ on microstructural evolution and wear behaviors of the laser-clad coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 357: 811-821.
- [111] TAO W, NING W, YANG L, et al. Study on preparation technologies of thermal barrier coatings [J]. Surface Review and Letters, 2017, 24(4).
- [112] AFRASISBI A, SAREMI M, KOBAYASHI A. A comparative study on hot corrosion resistance of three types of thermal barrier coatings: YSZ, YSZ+Al₂O₃ and YSZ/Al₂O₃[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 478(1): 264-269.
- [113] YANG X, ZHANG J, LU Z, et al. Removal and repair techniques for thermal barrier coatings: A review[J]. Transactions of the Institute of Metal Finishing. 2020, 98(3): 121-128.
- [114] 陈守东. MCrAlY 粘结层的微观组织及制备方法研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(15): 2582-2588.
- CHEN Shoudong. Research progress on microstructure and preparation methods for MCrAlY bond coats[J]. Materials Review, 2019, 33(15): 2582-2588.
- [115] HUANG K J, LI W, PAN K, et al. High temperature oxidation and thermal shock properties of La₂Zr₂O₇ thermal barrier coatings deposited on Nickel-based superalloy by laser-cladding[J]. Coatings, 2020, 10(4): 370.
- [116] SONG M, GUO H, ABBAS M, et al. Thermal deformation of Y₂O₃ partially stabilized ZrO₂ coatings by digital image correlation method[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 216: 1-7.
- [117] SOLEIMANIPOUR Z, BAGHSHAHI S, SHOIA-RAZAVI R. Improving the thermal shock resistance of thermal barrier coatings through formation of an in situ YSZ/Al₂O₃ composite via laser cladding[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(4): 1890-1899.
- [118] LI H C, WANG D G, CHEN C Z, et al. Effect of CeO₂ and Y₂O₃ on microstructure, bioactivity and degradability of laser cladding CaO-SiO₂ coating on titanium alloy[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2015, 127: 15-21.
- [119] WANG Y, LI Y, YU H, et al. In situ fabrication of bioceramic composite coatings by laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 200(7): 2080-2084.
- [120] LI H C, WANG D G, HU C, et al. Microstructure, mechanical and biological properties of laser cladding derived CaO-SiO₂-MgO system ceramic coatings on titanium alloys[J]. Applied Surface Science, 2021, 548: 149296.
- [121] XU X, HAN J G, WANG C M, et al. Laser cladding of composite bioceramic coatings on Titanium alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(2): 656-667.
- [122] CHIEN C S, LIAO T Y, HONG T F, et al. Investigation into microstructural properties of fluorapatite Nd-YAG laser clad coatings with PVA and WG binders[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(10): 3141-3146.
- [123] ING Z, CAO Q, JUN H. Corrosion, wear and biocompatibility of hydroxyapatite bio-functionally graded coating on titanium alloy surface prepared by laser cladding[J]. Ceramics International, 2021, 47(17): 24641-24651.
- [124] MORKS M F, KOBAYASHI A. Development of ZrO₂/SiO₂ bioinert ceramic coatings for biomedical application[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2008, 1(2): 165-171.
- [125] CHEN T, DENG Z, LIU D, et al. Bioinert TiC ceramic coating prepared by laser cladding: Microstructures, wear resistance, and cytocompatibility of the coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 423: 127635.

作者简介: 王伟志, 男, 1997 年出生。主要研究方向为表面工程。

E-mail: 1606524537@qq.com

韩珩, 男, 1979 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为机械结构设计及金属材料增材制造技术。

E-mail: 174876678@qq.com

王海斗(通信作者), 男, 1969 年出生, 博士, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为再制造产品寿命预测及摩擦学。

E-mail: whaidou2021@163.com