

激光熔覆耐磨铁基合金涂层研究现状

尚凡敏¹, 陈建志², 马明志³, 杨鹏¹, 芦笙¹, 陈靓瑜¹, 陈书锦¹, 王善林⁴

1. 江苏科技大学材料科学与工程学院 江苏镇江 212003

2. 江苏科技大学机械工程学院 江苏镇江 212003

3. 中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司 江苏常州 213011

4. 南昌航空大学轻合金加工国防重点学科实验室 江西南昌 330063

摘要: 磨损失效作为机械部件的主要失效形式之一, 会造成巨大的能源消耗和材料损失。激光熔覆技术作为我国重点发展的再制造技术之一, 具有修复效率高、性能优异、绿色环保的特点。综合考虑熔覆层与基体材料的热膨胀系数、熔点及润湿性等匹配性因素, 铁基合金成为激光熔覆再制造的主要合金材料之一。结合国内外最新相关研究成果, 从合金成分、外加强化相、激光熔覆工艺参数(激光功率、扫描速率、送粉率)等方面对激光熔覆铁基合金耐磨性能的影响进行了综述, 系统讨论了合金成分、外加强化相、激光熔覆工艺参数对铁基熔覆层耐磨性能的影响机理, 并介绍了铁基熔覆层的磨损失效机理。最后对激光熔覆高耐磨铁基合金涂层的未来发展方向进行了展望。

关键词: 激光熔覆; 合金涂层; 耐磨; 铁基合金

Research process on laser cladding iron-based alloy coating with wear resistance

SHANG Fanmin¹, CHEN Jianzhi², MA Mingzhi³, YANG Peng¹, LU Sheng¹, CHEN Liangyu¹,

CHEN Shujin¹, WANG Shanlin⁴

1. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, Jiangsu, China

2. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, Jiangsu, China

3. CRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu, China

4. Nanchang Hangkong University, Jiangxi Key Laboratory Forming & Joining Technology Aerospace Component, Nanchang 330063, Jiangxi, China

Abstract: as one of the main failure forms of mechanical parts, wear failure causes huge energy expend and material loss. Laser cladding technology is one of the key remanufacturing technologies with the characteristics of high repair efficiency, excellent performance and green environmental protection. Considering the matching factors of thermal expansion coefficient, melting point and wettability between cladding layer and base material, iron-based alloy

基金项目: 中国博士后科学基金第73批面上资助项目 (No.2023M731394, No.2023M730939); 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室开放课题资助 (No.EG202380296); 江苏科技大学科研启动经费 (No.1062932213)。

通信作者: 陈建志, 工学博士, 讲师, 主要从事工程结构抗疲劳工艺设计、数字化与服役寿命评价等科研工作,

E-mail: jzchen@just.edu.cn。

王善林, 教授, 主要从事铁基非晶合金应用、钛合金及铝合金等轻金属的特种连接技术等方面的研究,

E-mail: slwang70518@nchu.edu.cn。

has become one of the main alloy materials for laser cladding remanufacturing. Combined with the latest relevant research results, the wear resistance of iron-based alloys fabricated by laser cladding is reviewed from the aspects of alloy composition, enhanced phase, laser cladding process parameters (laser power, scanning rate, powder feeding rate), etc. The influence mechanism of alloy composition, enhanced phase and laser cladding process parameters on the wear resistance of iron-based cladding layers is systematically discussed. The wear failure mechanism of iron-based cladding layer is also introduced. Finally, the future development direction of high wear-resistant iron-based alloy coating by laser cladding is prospected.

Keywords: laser cladding; alloy coating; wear resistance; iron-based alloy

1 序言

我国是航空航天、汽车、铁路、船舶、电力工业及冶金等行业机电产品制造大国,年经济规模达数万亿元。微动损伤普遍存在于机电产品的过盈配合部件中,随着高科技领域对高精度、长寿命、高可靠性的要求,以及各种工况条件的苛刻,微动损伤的危害日益凸显,现已成为一些机电设备关键零部件失效的主要原因之一,我国因微动损伤导致的经济损失约高达3400亿元,造成了严重的环境污染、资源浪费和安全隐患^[1-3]。

再制造可实现废旧机电产品高技术修复、改造的产业化,是缓解资源短缺与资源浪费矛盾、推动资源综合利用和环境保护的有效途径^[4, 5]。激光再制造是近10年快速发展起来绿色制造技术^[6],是国家推荐的再制造领域主流工艺之一,其通过熔覆、分层-累加的方式对受损零部件进行修复,从而大大缩短制造周期,减少材料使用,减少后续加工工序,可以很好地解决目前我国机电制造和再制造领域存在的能耗大、资源浪费严重,以及机械加工过程切削液、粉尘、油污等污染大的绿色制造问题^[7, 8]。

综合考虑熔覆层与基体材料的热膨胀系数、熔点及润湿性等匹配性因素,铁基合金成为激光熔覆再制造的主要合金材料之一^[9]。与其他体系合金材料相比,铁基合金具有价格低廉、耐磨性较好、硬度可控和工艺要求简单等特点^[10]。

本文将从合金成分、强化相、激光熔覆工艺参数等方面对激光熔覆耐磨铁基合金涂层的国内外最新研究成果进行综述,总结激光熔覆制备不同类型合金体系铁基合金的特点,讨论了激光熔覆铁基合金耐磨性的影响机制,最后对激光熔覆耐磨铁基合金研究领域下一阶段的发展方向进行了展望。

2 激光熔覆铁基合金耐磨性能影响因素

2.1 合金成分对合金涂层耐磨性能的影响

合金元素对铁基熔覆层有很大的影响,通过调节合金元素含量能够有效控制熔覆层相变,进而有效调控熔覆层的硬度和耐磨性能。W、V等强碳化物形成元素在熔覆过程中会形成高硬度碳化物,有利于提高熔覆层整体的硬度和耐磨性^[11]。当向熔覆层中添加奥氏体形成元素如Ni、Co时,熔覆层中奥氏体含量会随之增加,熔覆层的塑性和抗裂性也会变好,但硬度会相应下降。此外,合金元素对激光熔覆的成形效果、裂纹、气孔等也有明显的作用^[12]。

综合考虑合金元素的冶金效果及涂层的性能需求,叶界梁等^[13]以Cr为主加元素,Nb、V为附加元素采用激光熔覆方式制备了不同元素配比的Fe-Cr-C-Si-Ni-Mo-Mn-(Nb, V)涂层,发现涂层的硬度和耐磨性均较基材42CrMo钢有较大提高,这与涂层内的马氏体含量和碳化物的颗粒强化作用有关。LI等^[14]采用激光熔覆方式在45钢表面制备了硼含量不同的铁基合金涂层,并系统研究了硼含量对涂层相组成、显微组织演变和耐磨性能的影响。研究结果表明,随着硼含量的增加,硼化物相(Fe_2B)的比例逐渐增加,形貌转变为网状→簇状→长条状→板状,硬质相的增加显著提高了涂层的硬度和耐磨性。SHANG等^[15]研究了Si、B含量的变化对激光熔覆制备W10V5Co4合金涂层的成形性和耐磨性的影响。研究表明,随着Si、B含量的增加,熔池流动性增加,熔池内气孔和熔渣等缺陷逐渐减少,熔覆层成形性增加。熔覆层的耐磨性随Si、B含量的增加呈逐渐增加的趋势,与熔覆层内网状硼碳化物含量的增加有关。同时,以硼碳化物为修正量对经典的磨损率计算方程Archard公式进行了修正,修正后的方

程与试验结果吻合较好,如图1所示。

2.2 强化相的添加对合金涂层耐磨性能的影响

添加硬质强化相是增强合金涂层耐磨性能的常用方法之一。在激光熔覆过程中,外加强化相会作为形核质点,使得熔覆层晶粒尺寸减小,进而有利于熔覆合金涂层耐磨性能的提高;同时,在磨损过程中硬质相会阻碍涂层在剪切力作用下的塑性变形,提高合金涂层耐磨性^[16, 17]。

LI等^[18]在研究激光熔覆制备WC增强复合铁基涂层的耐磨性能时发现,随着WC含量的增加,晶界析出网状 $M_{23}C_6$ -WC的含量呈增加趋势,WC和 $M_{23}C_6$ 的形成公式为



$$\Delta G \text{ (kJ}\cdot\text{mol}^{-1}) = 38.593015 - 0.002738T \\ (298K < T < 2000K)$$



$$\Delta G \text{ (kJ}\cdot\text{mol}^{-1}) = 309.616 - 0.0774T \\ (298K < T < 2000K)$$

在细晶强化、固溶强化和晶界网状 $M_{23}C_6$ -WC析出强化的共同作用下,当WC的添加量为20%时,涂层的激光成形性最好,硬度为827.2HV_{0.5},具有最佳的耐磨性能,磨损形式为轻微的磨料磨损;继续增加WC添加量,涂层内开始出现大量的裂纹,不利于耐磨性的提升。MA等^[19]研究了MoS₂对激光熔覆制备AlSiM2合金涂层磨损机制的影响。研究表明,合金涂层的磨损率随MoS₂复合量的增加而逐渐减小,其变化趋势与两个方面有关:Mo含量的增加会使涂层晶粒尺寸减小,涂层硬度增加;同时MoS₂的添加会使涂层内形成FeS,也有利于涂层耐磨性的提高。WANG等^[20]探究了纳米ZrO₂对激光熔覆制备

铁基合金耐磨性能的影响机理。研究表明,由于纳米ZrO₂的稳定微观结构和较高的硬度,因此使熔覆层的耐磨性得以提高。

何松亚等^[21]研究了激光熔覆碳纤维增强316L不锈钢的显微组织和耐磨性。研究发现,316L不锈钢中的Cr、Fe、Ni等合金元素会与碳纤维作用并形成分布于 γ -Fe和 α -Fe之间的 $M_{23}C_6$,同时碳纤维的加入也会起到细化晶粒的作用,在硬质相 $M_{23}C_6$ 、细晶强化和 α -Fe的共同作用下,316L熔覆层的硬度和耐磨性得到显著提高。王植等^[22]采用激光熔覆方法在45钢基体上制备含 $w_{TiC}=20\% \sim 50\%$ 的Fe基TiC复合涂层。结果表明,当TiC含量为30%时,涂层组织致密,TiC颗粒分布均匀、部分溶解、尺寸减小;涂层主要是由 α -Fe固溶体、FeC、FeB、B₄C、B₄Si、Cr₅B₃、TiB,以及未溶解的TiC等组成;当TiC含量为30%时,熔覆层平均维氏硬度为783.8HV,磨损率为45钢基体的1/38。FORDYCE等^[23]研究了碳化物和冲蚀粒子大小对DLD制备Fe-28Cr-2.7C合金冲蚀磨损性能的影响(见图2)。结果表明,亚微米尺寸碳化物对亚表面变形产生保护作用,熔覆层磨损体积随碳化物尺寸和碳化物之间平均距离的减小而增大。当粒子直径较大时,则会导致亚表面的变形和碳化物的断裂,如图2a所示;而当冲蚀磨损粒子直径较小时,基体和碳化物之间存在明显的相互作用,如图2c所示。

2.3 激光熔覆工艺参数对合金涂层耐磨性的影响

除熔覆材料本身性质外,激光熔覆工艺参数也是对铁基合金涂层耐磨性能起重要影响的因素之一,主要参数包括激光功率、激光扫描速率、送粉量等^[24-26]。激光熔覆工艺参数主要通过影响热量输入、材料热

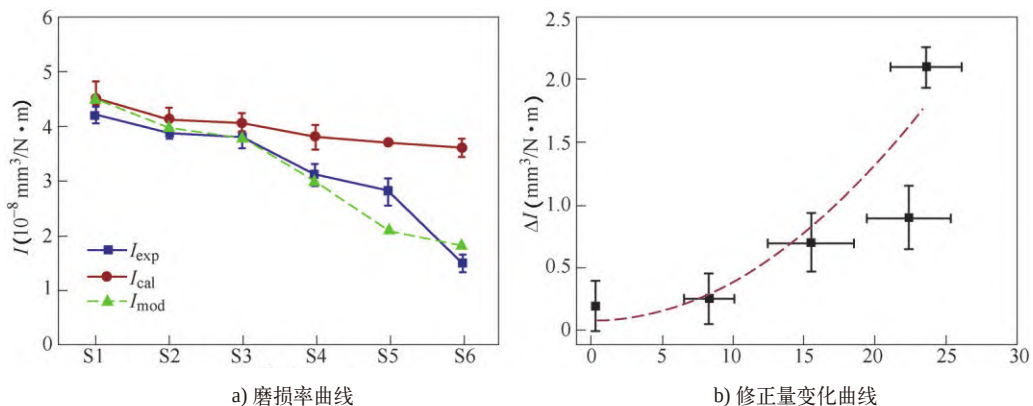


图1 磨损率与修正量变化曲线^[15]

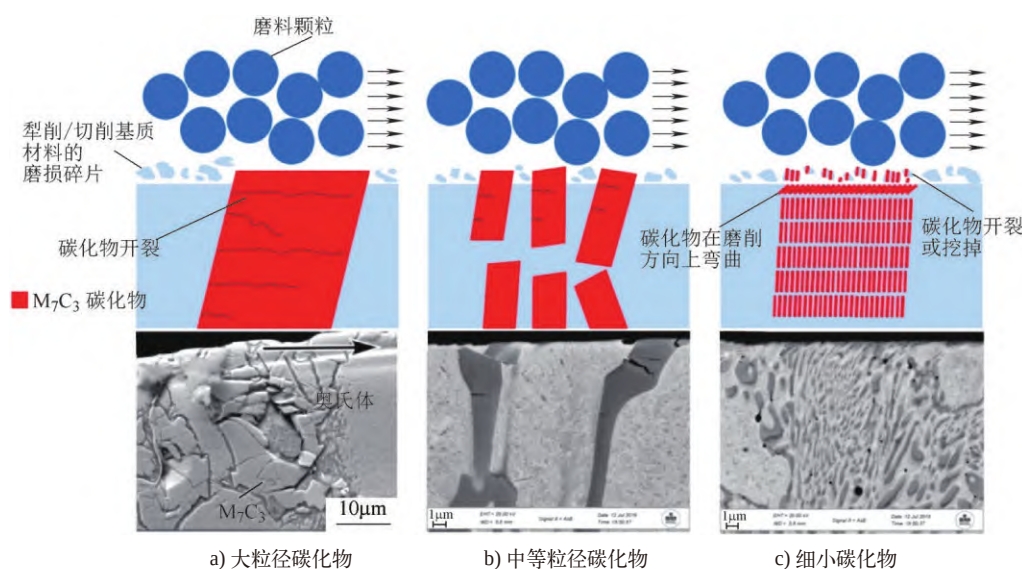


图2 冲蚀磨损的机理示意^[23]

量吸收效率、冷却效率等进而影响铁基合金的相转变过程，最终影响材料的耐磨性能^[27]。

(1) 激光功率对铁基熔覆层耐磨性能的影响
激光功率的作用是提供热源，决定了输出热量的多少。若激光功率过小，则会导致合金粉末熔化不充分，熔池流动性差，熔覆层内气孔、熔渣等缺陷来不及逸出，熔覆层呈现较差的成形性；若激光功率过大，则会导致合金粉末吸收能量过多，熔池过热，冷却速率减小，熔覆层内组织粗大，不利于合金涂层耐磨性能的提高。张坚等^[28]研究了激光功率对Fe-36Ni合金熔覆涂层组织与耐磨性能的影响。研究发现，枝晶组织的尺寸随激光功率的增加而增大，逐步转变为粒状晶和柱状晶，导致熔覆层的硬度和耐磨性呈现先增后降的变化趋势。罗子祺等^[29]研究了在45钢表面熔覆H13钢沉积层的组织演变及耐磨性能，研究发现，随着激光功率增大，H13钢

修复层的晶粒逐渐细化，渗碳体溶解，耐磨性提高。其发现激光功率的增加，熔池冷却速率增加，导致熔覆层内形成马氏体含量增加，提高了熔覆层整体的硬度和强度；另外，渗碳体溶解形成的细小析出相与磨损碎屑、氧化物等一起在涂层磨损表面形成自润滑膜，从而降低磨损损失。SHANG等^[30]通过调整激光功率研究了激光能量密度对激光熔覆30Cr15MoY合金涂层耐磨性的影响。研究发现，随着激光能量密度的增加，合金涂层磨损率呈现先减小后增加的变化趋势，如图3所示。这与激光能量密度的变化导致合金涂层冷却速率的变化进而导致熔覆层微观组织含量不同有关。

(2) 激光扫描速率对铁基熔覆层耐磨性能的影响
激光扫描速率决定了激光束对粉末的熔化程度。若扫描速率越慢，则激光对粉末的加热时间越长，传输热量越大，粉末熔化也越充分，熔覆层致

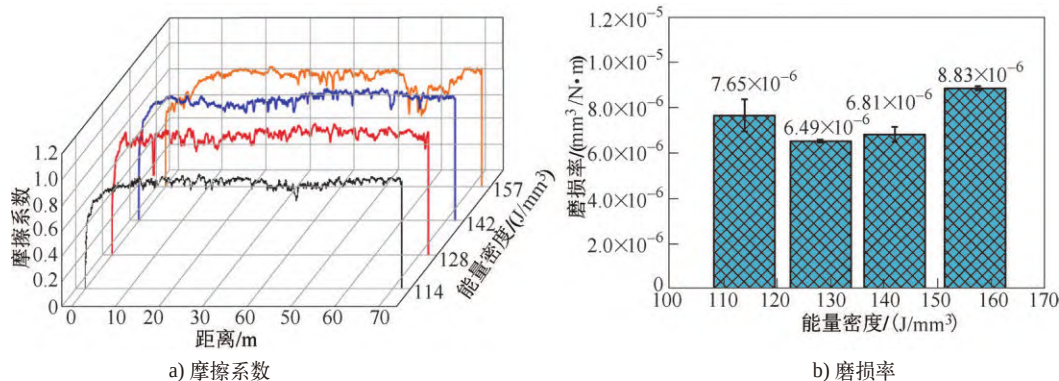


图3 激光熔覆制备30Cr15MoY合金涂层耐磨性能^[30]

密性也就越好,但易导致熔覆层组织粗大;若扫描速率过快,激光对粉末加热时间不足,传输热量较小,则导致粉末熔化不充分,熔覆层致密性差,表面粗糙。赵一俏等^[31]研究了激光扫描速率对M2高速钢沉积层显微组织和硬度的影响。研究表明,随着激光扫描速率的增加,熔池的热交换速率和激光冷却速率加快,高速钢的平均晶粒尺寸减小,碳化物晶界偏析减弱,硬度略有增加。LI等^[32]采用激光熔覆技术在45钢表面制备了铁基合金涂层。研究发现,随着激光扫描速率的增加,涂层表面粗糙度降低,涂层表面逐渐光滑;涂层的残余应力和热膨胀系数逐渐减小,同时涂层的硬度和耐磨性呈现逐渐增加的趋势。XU等^[33]研究了激光扫描速率对激光熔覆马氏体时效钢显微组织及磨损性能的影响。研究发现,随着扫描速度的增加,奥氏体含量和 Fe_2Mo 相含量逐渐减少,而马氏体和奥氏体的晶格畸变都有所增加。当激光扫描速率为1000mm/min时,熔覆层的硬度最高且呈现最佳耐磨性能(见图4),磨损机制包括黏着磨损、磨粒磨损和氧化磨损。

(3) 送粉速率对铁基熔覆层耐磨性能的影响
送粉速率是单位时间内送入熔池的粉末量。若送粉速率过小,则会导致熔覆层厚度过小,影响成形质

率;若送粉速率过大,则会导致粉末熔化不充分,影响成形质量。刘喜明等^[34]研究了送粉速率对熔覆层/基体结合界面形态的影响。研究发现,随着送粉速率的增加,熔覆层与基体的结合界面逐渐由明显的互混界面向无明显互混界面转化,宏观界面由曲面向平直面发展。原因是:在一定的激光能量下,送粉速率越大,单个粉末吸收的能量越小,熔池温度降低,界面处原子相互扩散减少。范伟光等^[35]研究了送粉速率变化对熔覆层组织和性能的影响。研究发现,随着送粉速率的增加,熔覆层宽度增加,基体熔化深度降低,熔覆层厚度增加,熔覆层组织趋于细化,其对熔覆层硬度影响较小。针对Q235钢表面改性、修复和再制造的需求,王永霞等^[36]在不同送粉速率下制备了铁基激光熔覆涂层。研究发现,随着送粉速率的增加,熔覆层下层粗大柱状晶所占面积减小,形状转变为柱状树枝晶和树枝晶,熔覆层中层组织发生细化,且快速向等轴晶转变,熔覆层表层等轴晶尺寸急剧变小。HUANG等^[37]研究了送粉速率对激光强度分布和颗粒温度的影响。研究发现,送粉速率的变化对激光强度分布影响较小,但随着送粉速率的增加,激光强度的峰值逐渐减小,同时,粒子温度峰值增大,粒子温度分布逐

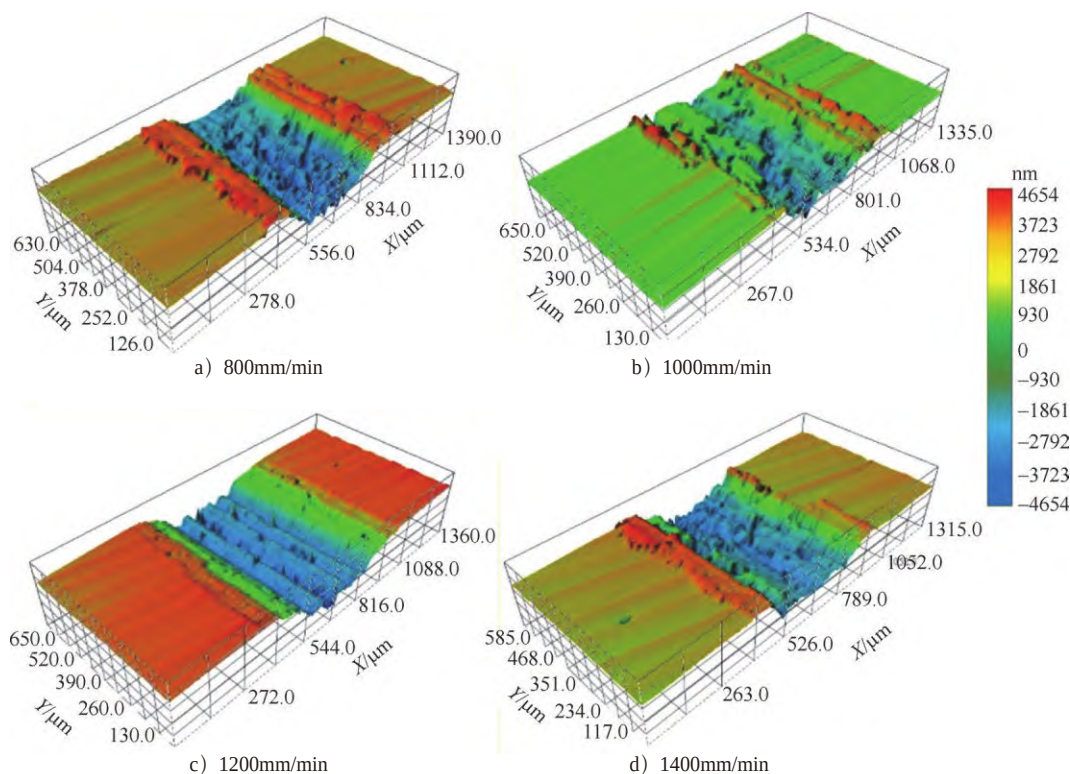


图4 不同扫描速率激光熔覆合金涂层3D形貌^[33]

渐趋于中心对称。

综上所述,合金的耐磨性受多种因素的影响。对于DLD成形铁基合金来说,其耐磨性能不仅受到合金成分的影响,而且与DLD工艺参数有关,工艺参数的变化会导致合金组织类型及含量、晶粒尺寸以及应力状态的不同。因此,要获得具有最佳耐磨性能的熔覆涂层并非由单一的合金成分、强化相含量或激光熔覆工艺参数所决定,而是各种因素综合作用的结果。

3 激光熔覆铁基合金磨损机理

材料的磨损过程非常复杂,磨损机制受到外部因素(磨损面材料强度、摩擦副表面性能、磨损介质、磨损载荷、磨损距离等)和内部因素(相组成、晶粒尺寸、合金元素、位错密度)多个因素的影响,且磨损过程中往往存在多种混合磨损机制。

钱绍祥^[38]在研究激光熔覆制备Fe-Co-Cr合金涂层的显微组织以及耐磨性能时发现,在碳化物、合金元素固溶强化和晶粒细化的共同作用下,熔覆层的硬度高达992HV。另外,他还研究了磨损载荷对磨损机制的影响,发现磨痕深度随载荷的增加呈不断增大趋势,导致磨损温度的升高和材料的软化,

磨损机制逐渐由磨粒磨损和黏着磨损的混合磨损转变为以黏着磨损为主。曹俊等^[39]研究了WC对激光熔覆AISI H13热作模具钢组织以及磨料磨损性能的影响。研究发现,加入WC颗粒后的显微组织发生明显细化, $w_{wc}=9\%$ 熔覆层的硬度为685.4 HV,具有最佳的耐磨性能,其磨损形式主要是磨料磨损和黏着磨损的混合磨损机制。HE等^[40]研究了激光熔覆316L不锈钢的磨损和腐蚀磨损行为。结果表明,腐蚀磨损的质量损失约为磨损质量损失的3倍,如图5所示。其认为造成该现象的原因可能有两点。

1) 腐蚀样品表面会形成大量的显微裂纹,会促进磨损样品表面的破坏。

2) 腐蚀表面会形成疏松且硬度低的氧化层,并在磨损过程中会被挤压到磨痕外,从而加速腐蚀磨损过程的质量损失。

综上所述,在磨损过程中,材料表面在剪切力的作用下发生变形,熔覆层内不同的显微组织含量、类型、晶粒尺寸、位错密度等均会与剪切力产生不同的作用效果。因此,理清激光熔覆成形铁基合金样品磨损性能与上述因素之间的本质关系,是明确其磨损机制,进而通过调整合金成分或激光熔覆工艺获得高耐磨铁基合金的关键。

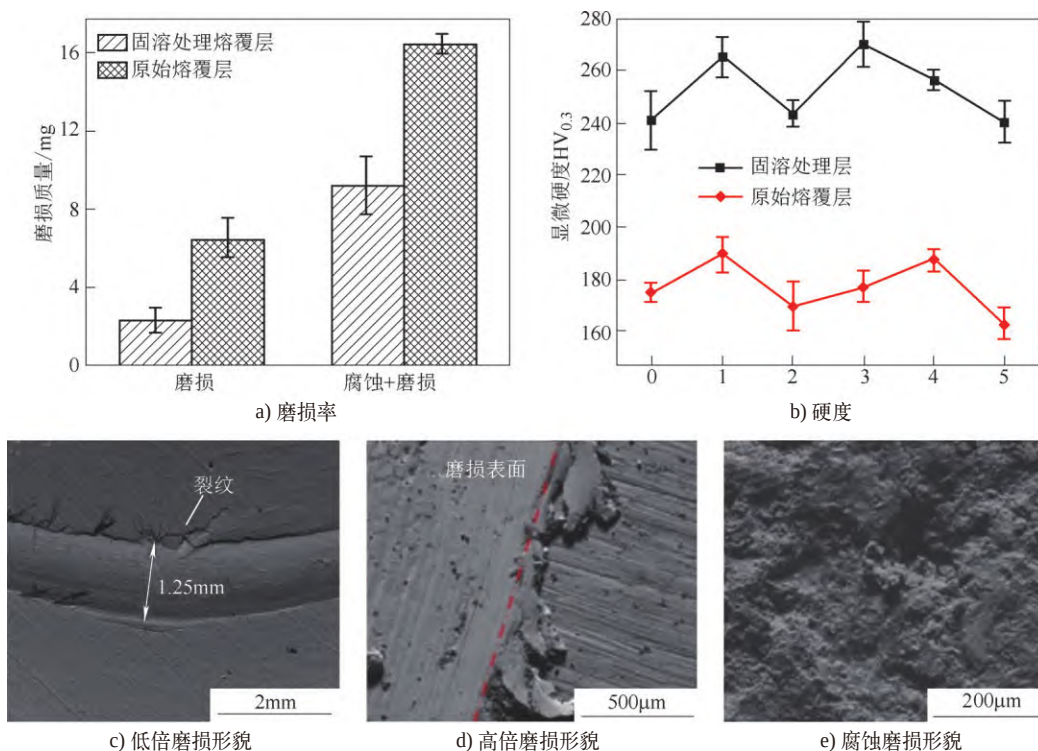


图5 样品的耐磨损性能和腐蚀磨损形貌^[40]

4 结束语

激光熔覆技术以其适用范围广、修复周期短、再制造涂层性能优异等特点在磨损失效部件再制造领域应用广泛。现阶段为提高激光熔覆铁基合金的耐磨性能,国内外研究学者围绕合金成分优化设计、强化相颗粒增强、激光熔覆工艺参数优化等方面开展了广泛研究,并取得了丰富的研究成果。未来可以考虑围绕以下关键问题开展相关研究工作。

1) 随着计算机技术的快速发展,铁基合金成分优化应结合国内外研究成果,建立激光熔覆耐磨铁基合金组分、激光熔覆工艺与耐磨性能数据库,借助先进的计算机技术,建立合金成分、熔覆工艺、铁基合金耐磨性能优化模型,加快高耐磨铁基合金优化制备进程。

2) 激光熔覆成形制备样品的耐磨性能往往是在实验室单一条件下进行的测试与评估,而磨损部件实际服役工况导致的失效与修复需求比较复杂。因此,在后续研究中可以根据实际服役条件叠加相应测试条件,以保证满足不同磨损服役环境下不同关键零件对不同性能的需求。

参考文献:

- [1] 陈江, 刘玉兰. 激光再制造技术工程化应用[J]. 中国表面工程, 2006, 19 (7) : 50-55.
- [2] 杨超锋, 吴世品, 王权, 等. 低温相变合金涂层激光熔覆工艺研究[J]. 金属加工 (热加工), 2023 (3) : 12-17.
- [3] 王先龙, 张维林, 侯军, 等. 超高速激光熔覆在采煤机齿轮上应用研究[J]. 金属加工 (热加工), 2020 (7) : 22-23.
- [4] 董景隆, 高红东, 沈俊萍. 激光再制造技术的发展及应用[J]. 矿山机械, 2019, 47 (1) : 1-6.
- [5] 王浩, 简思捷, 李洁, 等. 激光熔覆技术在船舶修造中的应用研究进展[J]. 金属加工 (热加工), 2023 (12) : 11-19.
- [6] 邵珠强, 李娜, 王晓成, 等. 绿色激光再制造技术及其应用[J]. 装备制造技术, 2017 (6) : 75-77.
- [7] SHAN B, CHEN J, CHEN S, et al. Laser cladding of Fe-based corrosion and wear-resistant alloy: Genetic design, microstructure, and properties[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 433: 128117.
- [8] 王雪娇, 吴世品, 丁伟, 等. 激光熔覆层裂纹的控制方法及研究进展[J]. 金属加工 (热加工), 2022 (10) : 13-19.
- [9] 李胜, 曾晓雁, 胡乾午. 激光熔覆专用铁基合金特点分析及设计思路评述[J]. 中国表面工程, 2007, 20 (4) : 11-15.
- [10] HE H, ZHANG T, MA M, et al. Microstructure and wear resistance of laser cladding particulate reinforced Fe-based composite coating on railway steel[J]. Journal of Laser Applications, 2017, 29 (2) : 022503.
- [11] 刘政军, 张桂清, 尹奕君, 等. 合金元素对铁基耐磨堆焊合金性能的影响[J]. 焊接学报, 2007, 28 (3) : 69-72.
- [12] WANG W, FU Z, CAO X, et al. The role of lanthanum oxide on wear and contact fatigue damage resistance of laser cladding Fe-based alloy coating under oil lubrication condition[J]. Tribology International, 2016, 94: 470-478.
- [13] 叶界梁, 冯悦娇, 李铸国, 等. 激光熔覆耐磨耐蚀铁基涂层的设计与组织性能研究[J]. 中国激光, 2023, 50 (12) : 186-195.
- [14] LI Q, ZHANG Y, ZHANG L, et al. Effect of boron on the microstructural evolution and wear resistance of high-hardness Fe-based alloy coatings prepared by laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 458: 129342.
- [15] SHANG F, CHEN S, ZHANG C, et al. The effect of Si and B on formability and wear resistance of preset-powder laser cladding W10V5Co4 alloy steel coating[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 134: 106590.
- [16] DENG D, LI T, HUANG Z, et al. Multi-response optimization of laser cladding for TiC particle reinforced Fe matrix composite based on Taguchi method and grey relational analysis[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 153: 108259.
- [17] WANG X, LIU S, ZHAO G, et al. In-situ formation ceramic particles reinforced Fe-based composite coatings produced by ultrasonic assisted laser melting deposition processing[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 136: 106746.
- [18] LI J, ZHU Z, PENG Y, et al. Phase evolution and wear resistance of in-situ synthesized (Cr, W)₂₃C₆-WC composite ceramics reinforced Fe-based

- composite coatings produced by laser cladding[J]. Vacuum, 2021, 190: 110242.
- [19] MA H, WANG P, GUO Q, et al. Effect of MoS₂ addition on the wear mechanism of laser cladding AISI M2 coatings[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 5565-5575.
- [20] WANG J, CUI X, ZHAO Y, et al. Effect of nano-ZrO₂ protective layer on the microstructure and surface property strengthening mechanism of underwater wet laser Fe-based cladding layer[J]. Materials Characterization, 2023, 206: 113392.
- [21] 何松亚, 刘晓东, 赵淑珍, 等. 激光熔覆碳纤维增强316L不锈钢的显微组织和耐磨性[J]. 中国激光, 2020, 47 (5) : 404-414.
- [22] 王植, 雷剑波, 姜伟, 等. 激光熔覆Fe基TiC涂层的组织与性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2016, 21 (1) : 43-49.
- [23] FORDYCE I, ANNASAMY M, SUN S, et al. The effect of heat treatment on the abrasive and erosive wear behaviour of laser metal deposited Fe-28Cr-2.7C alloy[J]. Wear, 2020, 458-459: 203410.
- [24] 杨新意, 程延海. 激光能量密度对激光熔覆组织性能的影响[J]. 矿山机械, 2022, 50 (4) : 45-48.
- [25] FENG L, JIN G, CUI X, et al. Optimizing laser cladding process parameters for transformation-induced plasticity FeMnCoCr high entropy alloy: A multi-objective approach[J]. Surface and Coatings Technology, 2025, 495: 131536.
- [26] ZHOU Y, CHEN S, CHEN X, et al. The evolution of bainite and mechanical properties of direct laser deposition 12CrNi2 alloy steel at different laser power[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 742: 150-161.
- [27] ZHOU Y, CHEN S, CHEN X, et al. The effect of laser scanning speed on microstructural evolution during direct laser deposition 12CrNi2 alloy steel[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 125: 106041.
- [28] 张坚, 王震, 赵龙志. 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.
- [29] 罗子祺, 王长雨, 王钊, 等. 基于激光复合再制造技术的H13钢粉末修复45钢的组织演变及耐磨性增强[J]. 中国激光, 2024, 51 (16) : 59-74.
- [30] SHANG F, CHEN S, ZHOU L, et al. Effect of laser energy volume density on wear resistance and corrosion resistance of 30Cr15MoY alloy steel coating prepared by laser direct metal deposition[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 421: 127382.
- [31] 赵一俏, 赵骧. 扫描速率对激光直接金属沉积M2高速钢微观组织和硬度的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48 (20) : 73-76.
- [32] LI R, YUAN W, YUE H, et al. Study on microstructure and properties of Fe-based amorphous composite coating by high-speed laser cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 146: 107574.
- [33] XU T, ZHANG S, WANG L, et al. Influence of scanning speed on the microstructure, nanoindentation characteristics and tribological behavior of novel maraging steel coatings by laser cladding[J]. Materials Characterization, 2023, 205: 113335.
- [34] 刘喜明, 连建设, 张庆茂. 送粉激光熔覆界面特性及熔覆层稀释率[J]. 机械工程学报, 2001, 37 (4) : 38-43.
- [35] 范伟光, 阮野, 贾坤宁. 粉末送粉率对激光熔覆层组织及性能的影响[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2004, 25 (2) : 32-34.
- [36] 王永霞, 丁国华, 梁莉蒙. 送粉速率对铁基合金激光熔覆层组织形貌的影响[J]. 应用激光, 2022, 42 (12) : 38-44.
- [37] HUANG Y, LI J, LIANG G, et al. Effects of powder feeding rate on interaction between laser beam and powder stream in laser cladding process[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 2004, 19 (4) : 69-72.
- [38] 钱绍祥. Q345D钢表面Fe-Cr-Mo激光熔覆层的组织及摩擦磨损性能[J]. 金属热处理, 2019, 44 (10) : 182-186.
- [39] 曹俊, 卢海飞, 鲁金忠. WC对激光熔覆热作模具的组织及磨损性能的影响[J]. 中国激光, 2019, 46 (7) : 68-74.
- [40] HE B, ZHANG L, ZHU Q, et al. Effect of solution treated 316L layer fabricated by laser cladding on wear and corrosive wear resistance[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 121: 105788.