

激光工艺对45钢表面梯度熔覆层组织性能的影响

许妮君^{1,2}, 刘常升^{1,3}, 冯欣保^{1,3}, 孙挺⁴
(1. 东北大学 材料各向异性与织构教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 西安建筑科技大学 化学与化工学院, 陕西 西安 710005; 3. 东北大学 激光应用技术与装备辽宁省重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 4. 东北大学 理学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 研究了激光熔覆功率、扫描速度和熔覆材料对熔覆层组织结构与耐磨性等的影响。结果表明: 梯度熔覆层连续完整, 无裂纹、气孔等缺陷, 与45钢基体呈冶金结合状态。熔覆层显微组织特征为枝晶、等轴晶等多种形貌的快速凝固组织, 由 α -Fe, CrNiFe-C和 Cr_7C_3 等组成。熔覆层显微硬度呈梯度分布, 表层硬度达7.48 GPa, 过渡层硬度达5.52 GPa, 分别是基体硬度的3.74和2.76倍。激光熔覆技术可显著提高45钢的耐磨性能。

关 键 词: 激光熔覆; 梯度涂层; 层流冷却辊; 45钢; 组织性能

中图分类号: TN 249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)04-0495-05

Effects of Laser Cladding Parameters on Microstructure and Properties of Gradient Cladded Coating on 45[#] Steel

XU Ni-jun^{1,2}, LIU Chang-sheng^{1,3}, FENG Xin-yu^{1,3}, SUN Ting⁴
(1. Key Laboratory for Anisotropy and Texture of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710005, China; 3. Key Laboratory for Laser Application Technology and Equipment of Liaoning Province, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 4. School of Sciences, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LIU Chang-sheng, E-mail: csliu@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The effects of laser cladding power, scanning speed and cladding materials on the microstructure and wear resistance of the cladded coating on 45[#] steel were investigated. The results show that the gradient cladded layer is continuous without the defects of crack pores and is metallurgically bonded to the 45[#] steel matrix. The microstructure of the cladded layer are characterized by dendritic crystals, equiaxed crystals and other rapid solidification structures, which is composed of α -Fe, CrNiFe-C and Cr_7C_3 . The microhardness of the cladded layer is gradient, and the surface hardness of the cladded layer and the transition layer are 7.48 GPa and 5.52 GPa, respectively, which is 3.74 and 2.76 times of the hardness of the substrate. Therefore, the laser cladding technology can significantly improve the wear resistance of 45[#] steel.

Key words: laser cladding; gradient coating; laminar flow cooling roll; 45[#] steel; microstructure and properties

层流冷却辊是钢铁生产过程中重要的易损备件, 需要经常更换, 其表面强化延寿与再制造具有重要的实际意义^[1-3]。激光熔覆技术是高能密度表面处理的革新技术, 具有绿色、节能节材、可强化可再制造等先进性, 区别于表面镀、热喷涂等传

统处理工艺, 能够制备连续、大面积的厚熔覆层, 满足工程实际零部件的延寿和修复再制造需要^[4-6]。近年来, 激光熔覆技术得到快速发展, 在冶金矿业、能源交通、航空航天和机械制造等领域得到了大量应用^[7-11]。以上研究工作多涉及激光

类型、熔覆材料、基体材料、工艺优化和组织性能,极大丰富了激光熔覆技术研究与应用深度和广度.但是,由于应用领域和使用条件的变化,在特定实验条件下获得的优化工艺和熔覆层组织特征就不再具有唯一的普适性.另外,铁基合金具有优异的表面使用性能,截至目前仅有限的铁基合金与激光熔覆技术结合实现了工程应用^[12].本文设计了激光熔覆梯度熔覆层技术方法和新型熔覆材料,通过多道搭接和双层重叠处理,制备连续、大面积的厚表面强化层,并研究其显微结构特征与耐磨性等,为提高层流冷却辊的耐磨性与使用寿命提供指导.

1 实验材料与方法

实验选用新型铁基耐磨合金 DL2501 和 DL155 作为熔覆材料,由大陆激光技术公司提供. DL155 的主要化学成分(质量分数,%)为 C 0.4, Mo 1.8, Si 1.45, Ni 3.1, Cr 15.8, 余量 Fe 77.45. DL2501 的主要化学成分(质量分数,%)为 C 0.4, Mo 1.58, Si 1.4, Ni 3.3, Cr 17.5, 余量 Fe 75.82. 采用 5 kW 连续 CO₂ 激光器在层流冷却辊常用 45 钢表面制备梯度熔覆层. 采用侧向同步送粉激光熔覆技术,首先确定和优化单道工艺参数,根据熔覆层的几何尺寸、微观形貌和显微硬

度等,确定合适的工艺参数. 优化参数,通过搭接方式制备过渡熔覆层,再在过渡层上制备多道的熔覆表面层. 激光工艺参数为激光功率 3 000 ~ 4 500 W,扫描速度 400 ~ 800 mm/min,光斑直径 4 mm,搭接比 50%.

2 微结构与性能

2.1 单道激光熔覆层

图 1 为优化工艺下 DL155 单道激光熔覆层形貌. 可见熔覆层组织连续均匀、无裂纹与孔洞等宏观缺陷,可分为熔覆区、界面区和基体热影响区,如图 1a 所示. 在熔覆区顶部,表层向外界散热,在熔池上方存在较大过冷度,熔池内部可发生非均质形核,在对流搅拌作用下,晶体生长取向多样,最终形成了取向各异的等轴晶和细枝晶,如图 1b 所示. 在熔覆区中部,在凝固进程逐渐向熔覆层表面推进过程中,固-液界面前沿温度梯度逐渐减小,冷却速率继续增大,前沿成分过冷区不断扩大,形成细枝晶区,如图 1c 所示. 在熔池底部,存在极大的温度梯度,在熔池与基体结合的界面处形成细小的等轴晶. 随着远离界面,凝固条件发生改变,凝固过程以细小枝晶向熔池内部生长,取向与固-液界面近似相互垂直. 同时,也显示出熔覆区和基体间形成了冶金结合,如图 1d 所示.

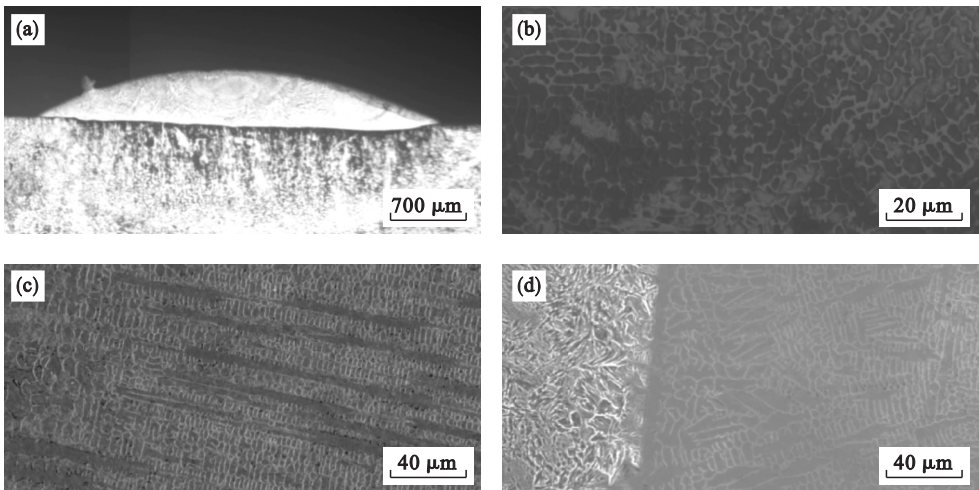


图 1 单道激光熔覆 DL155 涂层的 OM 和 SEM 金相形貌

Fig. 1 OM and SEM morphologies of laser cladded DL155 coating

(a)—OM 宏观形貌; (b)—熔覆层接近表面顶部区;
(c)—熔覆层中部区; (d)—熔覆层底部接近基体交界区.

2.2 多道搭接激光熔覆过渡层

图 2 为 DL155 多道搭接激光熔覆过渡层的显微组织形貌. 当搭接率为 50% 时,搭接熔覆层

的表面连续平整,无裂纹和气孔等宏观缺陷,界面呈冶金结合,在 45 钢基体表面成功得到了大面积熔覆过渡层.

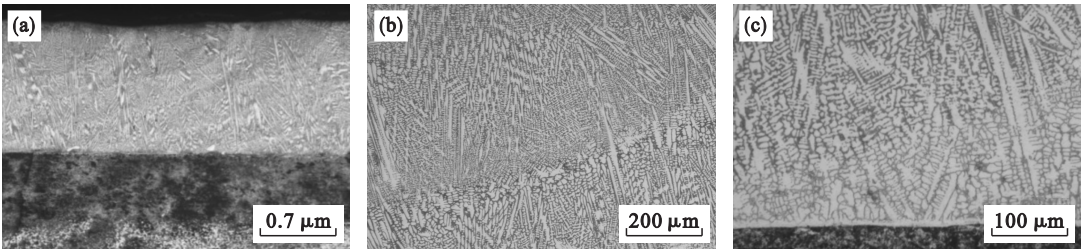


图 2 多道搭接 DL155 激光熔覆层金相组织形貌
Fig. 2 Micrographs of multi-track laser cladded DL155 coating
(a)—熔覆层全貌；(b)—搭接区形貌；(c)—熔覆层底部形貌.

2.3 多道搭接激光熔覆表面层

图 3 为 DL2501 多道搭接激光熔覆表面层的显微组织形貌,可见表面层连续平整,无裂纹等表面宏观缺陷,与过渡层呈冶金结合. 图 3a 为激光熔覆过渡层和表面层的宏观整体界面形貌,可见两层厚度之和达到了 2 mm 以上,能够满足层流冷却辊工作层的厚度要求. 图 3b 为熔覆表面层搭

接区的显微组织形貌,图中明显可见搭接界面处的等轴晶、中间部位的细小枝晶和顶部的粗大枝晶形貌与单道熔覆层和熔覆过渡层的形貌特征具有相似性. 图 3c 为熔覆表面层的底部组织形貌,与熔覆表面层其他部位相比,枝晶同样细小,可见在过渡层之上的外延生长特征. 与图 2 中的形貌相比,表面层的枝晶较过渡层的更细小.

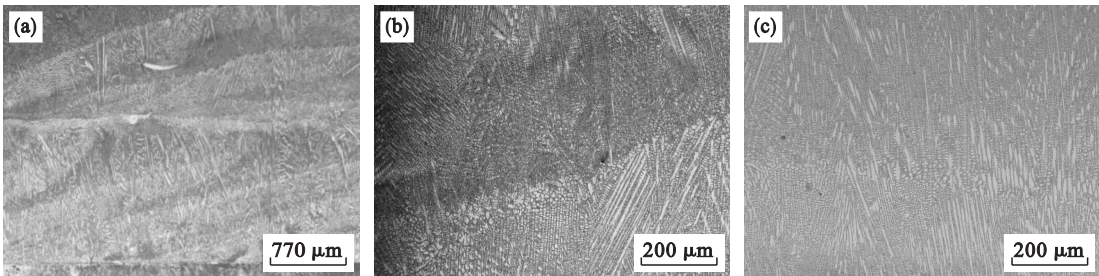


图 3 多道搭接激光熔覆 DL2501 涂层横截面的金相组织形貌
Fig. 3 Micrographs of multi-track laser cladded DL2501 coating
(a)—熔覆层全貌；(b)—搭接区形貌；(c)—熔覆层底部形貌.

2.4 多道搭接激光熔覆过渡层与表面层的物相

由图 4 可知,过渡层和熔覆表面层均由 α -

Fe, Cr-Ni-Fe-C 和 Cr_7C_3 等物相组成.

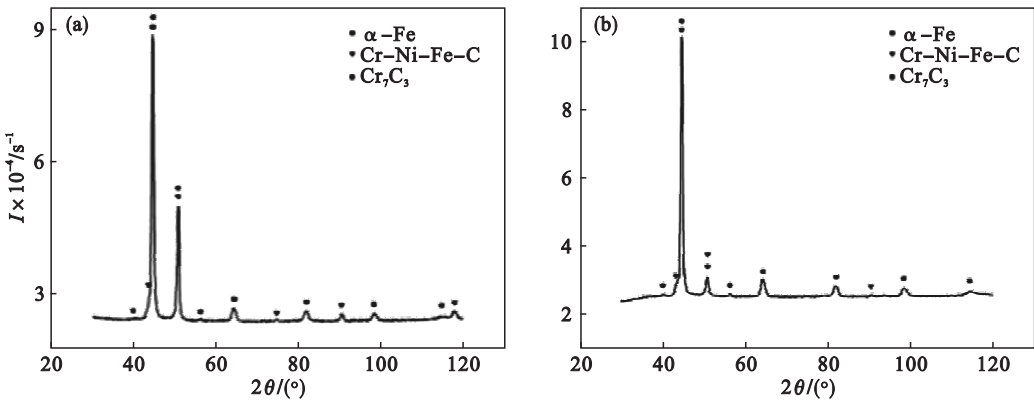


图 4 激光熔覆层的 XRD 图
Fig. 4 XRD spectra of laser cladded coating
(a)—DL155 过渡层；(b)—DL2501 表面层.

2.5 多道搭接激光熔覆过渡层和表面层的显微硬度

图 5a 为多道搭接激光熔覆过渡层的显微硬

度曲线. 在横截面上,按照垂直熔覆层中心区和搭接区由表及里进行维氏显微硬度的测量,两个区的显微硬度分布规律大致相同,从表面至基体方

向均呈梯度起伏变化,中心区硬度曲线起伏较小,分布较为均匀,搭接区的显微硬度起伏明显较中心区大,机理在于搭接区复杂组织结构的影响.熔覆层平均显微硬度可达 4.5 GPa,最大值为 5.52 GPa,约是基体显微硬度(2 GPa)的 2.76 倍.

图 5b 为激光多道搭接梯度熔覆层的显微硬度随激光扫描速度变化的曲线.在横截面上,按照垂直梯度熔覆层由表及里进行维氏显微硬度的测

量,熔覆层的显微硬度依次降低,呈两个明显的梯度变化.随激光熔覆扫描速率的增加,显微硬度呈现下降的趋势.在 400 mm/min 条件下,表面层的平均显微硬度可达 7.30 GPa,最大值为 7.48 GPa,约是基体显微硬度(2 GPa)的 3.74 倍.表面层的显微硬度高于过渡层,其机理在于熔覆材料中 Cr 含量的增加、Cr 的固溶强化、Cr₇C₃ 析出强化、基体的马氏体强化及细晶强化的共同作用.

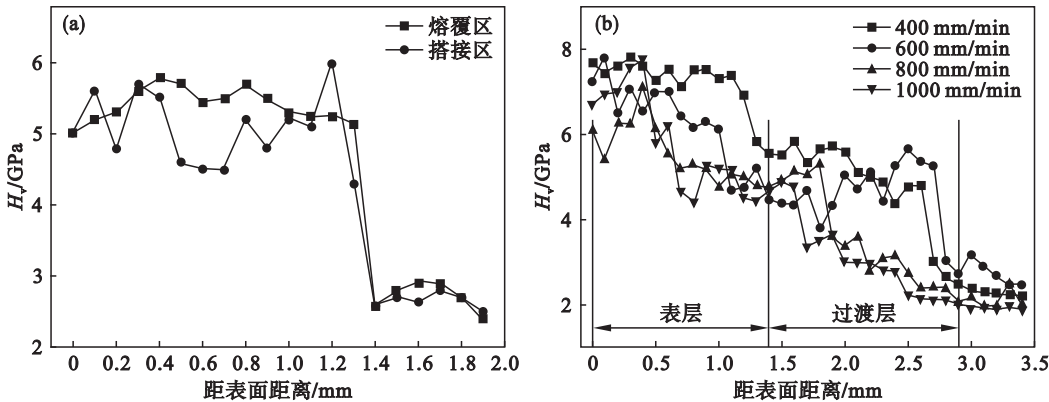


图 5 激光熔覆层的显微硬度曲线
Fig. 5 Micro-hardness of laser cladded coating
(a)—过渡层的搭接区与熔覆区; (b)—梯度熔覆层.

2.6 多道搭接激光熔覆表面层的高温摩擦磨损行为

采用 MG-2000 型高温高速摩擦磨损试验机对多道搭接激光熔覆表面层和 45 钢基体的磨损失重进行测量,同时记录摩擦系数.在试验温度 500 ℃,载荷 100 N,转速 300 r/min,磨损时间 10, 20, 30 min 条件下,二者的磨损失重如图 6 所示.随着磨损时间从 10 min 延长至 30 min 时,45 钢基体的磨损失重量变化规律和工作层的失重变化规律基本一致,均呈不断增加趋势,但随着时间的延长激光熔覆表面层的磨损失重量仅是 45 钢失重量的 1/2~1/4,呈现出优良的耐磨性.在磨损 10 min 时,磨损处于孕育期,试样表面仅出现少量的塑性变形,基体和工作层的质量损失均较小,基体失重量为 0.017 6 g,是表面层失重量的 2.07 倍.随高温磨损时间的增加,试样表面的变形加剧,基体和表面层试样的磨损失重量均有所增加,其高温耐磨性均有所降低,且基体耐磨性降低程度更大.随后,随磨损时间的延长,基体失重量为 0.092 7 g,是表面层失重量的 3.88 倍,表明 45 钢基材的高温耐磨性较差,但激光熔覆工作层却表现出优良的耐磨性.

综上所述,激光熔覆表面层的磨损失重随时间延长而平稳增加,表面磨损进程稳定,磨损机制

为磨粒磨损,且贯穿磨损初期至加速期的整个过程,在加速期伴有黏着磨损.45 钢基体的磨损进程较不稳定,表面磨损失重会随时间增加而快速增大,磨损机制由发生初期的磨粒磨损向黏着磨损转变.可见,激光熔覆表面层的耐磨性能优于 45 钢基体的耐磨性能.因此,激光熔覆技术可显著提高 45 钢的耐磨性能,预期在层流冷却辊的强化和再制造工程具有应用价值.

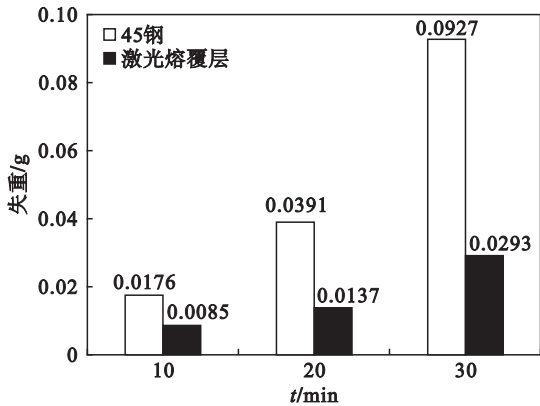


图 6 不同磨损时间的 45 钢基体和激光熔覆表面层的磨损失重
Fig. 6 Weight loss of 45# steel matrix and laser cladded coating under different wearing time

3 结 论

- 1) 采用激光熔覆技术所制备的梯度熔覆层具有连续和完整性,无裂纹、气孔等宏观缺陷,与 45 钢基体呈冶金结合状态,厚度可达 2 mm 以上.熔覆层显微组织特征为枝晶、等轴晶等多种形貌的快速凝固组织,由 $\alpha - \text{Fe}$, $\text{CrNiFe} - \text{C}$ 和 Cr_7C_3 等组成.熔覆层内合金元素的成分宏观分布均匀,局部微区有 Mo,Cr 在枝晶间富集.
- 2) 所制备的梯度熔覆层的显微硬度呈梯度分布,表层达 7.48 GPa,过渡层达 5.52 GPa,分别是基体硬度的 3.74 和 2.76 倍.激光熔覆技术可显著提高 45 钢的耐磨性能,预期在层流冷却辊的强化和再制造工程具有应用价值.

参考文献:

[1] Xu B S, Wang H D, Piao Z Y, et al. Investigation of structural integrity and life time prediction of the thermal sprayed alloy coating for remanufacturing [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, 47(11) : 1355 – 1361.

[2] 国俊丰,刘东华,侯伟骛,等.层流冷却辊感应熔覆制造技术[J].热喷涂技术,2012(4) : 11 – 14.
(Guo Jun-feng, Liu Dong-hua, Hou Wei-ao, et al. Manufacturing techniques for induction cladding on laminar flow cooling roll[J]. *Thermal Spray Technology*, 2012(4) : 11 – 14.)

[3] 汪鞍亚,王铁刚.一种新型内冷层流冷却辊: CN205551092U [P]. 2016 – 09 – 07.
(Wang An-ya, Wang Tie-gang. A new type of inner cooling laminar cooling roller: CN205551092U [P]. 2016 – 09 – 07.)

[4] Gorsse S, Hutchinson C, Mohamed G, et al. Additive manufacturing of metals: a brief review of the characteristic microstructures and properties of steels, Ti-6Al-4V and high-entropy alloys [J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2017, 18(1) : 584 – 610.

[5] 任鑫明,马北越,张博文,等.钛合金及钢表面激光熔覆涂层的研究进展[J]. *材料研究与应用*, 2017, 11(3) : 141 – 145, 152.
(Ren Xin-ming, Ma Bei-yue, Zhang Bo-wen, et al. Research progress of laser cladding coating on titanium alloy and steel surface [J]. *Materials Research and Application*, 2017, 11(3) : 141 – 145, 152.)

[6] Zhong M, Liu W. Laser surface cladding: the state of the art and challenges [J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2010, 224(5) : 1041 – 1060.

[7] 齐林森,邱长军,陈伟,等.激光熔覆铁基合金涂层拉伸强度和低周疲劳行为研究[J]. *机械研究与应用*, 2016, 29(5) : 101 – 103.
(Qi Lin-sen, Qiu Chang-jun, Chen Wei, et al. Behavioral study on the tensile strength and low cycle fatigue of laser cladding iron-based coating [J]. *Machine Research and Application*, 2016, 29(5) : 101 – 103.)

[8] 张德强,考锡俊,李金华. H13 钢表面激光熔覆铁基合金粉末的工艺研究[J]. *机械设计与制造*, 2016(10) : 41 – 43, 48.
(Zhang De-qiang, Kao Xi-jun, Li Jin-hua. Research on the process of laser cladding iron-based alloy powder on H13 steel surface [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2016(10) : 41 – 43, 48.)

[9] 何力佳,高睿,赵晓杰,等.光纤激光熔覆铁基合金粉末对 45 钢表面组织和性能的影响[J]. *铸造技术*, 2016, 37(1) : 44 – 47.
(He Li-jia, Gao Rui, Zhao Xiao-jie, et al. Effects of fiber laser cladding Fe-based alloy powder on microstructure and properties of 45 steel surface [J]. *Foundry Technology*, 2016, 37(1) : 44 – 47.)

[10] 丁阳喜,殷小耀,廖芳蓉.激光熔覆铁基合金粉末修复高速列车车轮磨损研究[J]. *粉末冶金技术*, 2014, 32(3) : 174 – 177.
(Ding Yang-xi, Yin Xiao-yao, Liao Fang-rong. Research on repairing the high-speed train wheel steel by laser cladding iron-based alloy powder [J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2014, 32(3) : 174 – 177.)

[11] 李宝灵,刘旭红,温宗胤.灰铸铁激光熔覆铁基和镍基粉末的比较[J]. *中国表面工程*, 2012, 25(4) : 89 – 93.
(Li bao-ling, Liu Xu-hong, Wen Zong-yin. Comparisons between Ni-based and Fe-based alloy powder on gray cast iron by laser cladding [J]. *China Surface Engineering*, 2012, 25(4) : 89 – 93.)

[12] Fayazfar H, Salarian M, Rogalsky A, et al. A critical review of powder-based additive manufacturing of ferrous alloys: process parameters, microstructure and mechanical properties [J]. *Materials and Design*, 2018, 144: 98 – 128.