

D577 铁基合金激光熔覆层组织及性能研究

张晓东^{1,2} 董世运² 徐滨士² 王志坚² 闫世兴² 李庆芬¹

(¹ 哈尔滨工程大学材料科学与化学工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)
(² 装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

摘要 为了在碳钢表面获得具有耐磨和耐蚀性能的铁基涂层,采用 CO₂ 气体激光在 45[#] 钢表面制备了 D577 合金激光熔覆涂层。采用扫描电镜(SEM)、能谱仪(EDS)、X 射线衍射仪(XRD)、显微硬度计和往复摩擦磨损试验机分析了熔覆层的显微组织,测试了涂层的硬度和摩擦磨损性能。试验结果表明,涂层由单相奥氏体组成,涂层与基体形成了良好的冶金结合,无裂纹、气孔等缺陷;涂层显微硬度达 630~650 HV,纳米压痕硬度为 8.58 GPa,弹性模量为 235.82 GPa;D577 合金激光熔覆层可以明显改善基体 45[#] 钢的耐磨性和电化学腐蚀性能。

关键词 激光技术;激光熔覆;摩擦磨损;显微组织;腐蚀

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.s100122

Microstructure and Performance of D577 Fe-Based Alloy Laser Cladding Coating

Zhang Xiaodong^{1,2} Dong Shiyun² Xu Binshi² Wang Zhijian² Yan Shixing² Li Qingfen¹

¹ School of Material Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University,
Harbin, Heilongjiang 150001, China

² National Defense Key Laboratory for Remanufacturing Technology, Academy of Armored Force Engineering,
Beijing 100072, China

Abstract In order to obtain wear and corrosion resistant Fe-based alloy coating, laser cladding of D577 alloy powder on 45[#] steel is conducted using CO₂ laser. The microstructure, hardness, friction and wear performance are investigated by scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS), X-ray diffractometer (XRD), micro-hardness meter, and reciprocating wear test machine. The experimental results show that the coating consists of γ -Fe single phase, there is a good metallurgical bond between coating and substrate, and the coating is free of crack and pore defect. The micro-hardness of the coating is 630~650 HV. The nano-hardness and elastic modulus of the coating are 8.58 GPa and 235.82 GPa, respectively. D577 alloy laser cladding coating can effectively improve the wear resistance and electrochemical corrosion performance of 45[#] steel substrate.

Key words laser technique; laser cladding; wear behavior; microstructure; corrosion

OCIS codes 240.6700; 350.3390; 240.0310; 220.4000; 180.7460; 180.5810

1 引 言

零件的失效大都是从表面开始的,表面工程技术是提高零件表面性能的重要手段,可以在廉价的基体材料上制备出性能优异的涂层,满足零件的使用性能要求^[1,2]。激光熔覆技术是先进的表面

工程技术之一^[3~6],该技术可以完全改变材料的表面性能,使之达到耐磨、耐蚀、耐疲劳和抗高温氧化等多种性能,可以保证涂层与基体之间形成冶金结合,具有稀释率小、热输入少、对基体的热损害和热变形小和易实现选区熔覆等特点,因此,自从其诞生

收稿日期: 2011-03-18; 收到修改稿日期: 2011-04-18

基金项目: 国家自然科学基金(50975284)和国家科技支撑项目(2006BAF02A19)资助课题。

作者简介: 张晓东(1980—),男,博士研究生,主要从事表面工程方面的研究。E-mail: zhangxiaodong523@yahoo.com.cn

导师简介: 徐滨士(1931—),男,中国工程院院士,主要从事表面工程和再制造工程等方面的研究。

E-mail: xubinshi@vip.sina.com

以来该技术就在航空、航天、化工、机械和钢铁等行业中得到广泛的应用^[7~10],显著改善材料的表面性能。D577 合金具有优异的冷作硬化效果、抗擦伤性能和工艺性,适合于高压阀门和发动机凸轮轴等零件的再制造。然而有关 D577 合金激光熔覆层组织和性能的研究在国内外还少见报道。为此,本文采用 CO₂ 气体激光在 45# 钢表面制备了 D577 合金激光熔覆层,并对熔覆层的组织结构、硬度、电化学腐蚀行为及摩擦磨损性能进行了研究,为其在激光再制造实际应用选材中提供理论参考。

2 试验材料及方法

基体材料为 45# 钢,化学成分为 C, Si, Mn, S, P, Fe, 其质量分数为 0.43%, 0.22%, 0.52%, 0.02%, 0.01%, 余量为铁。熔覆试样尺寸为 40 mm × 40 mm × 10 mm。熔覆材料选用的合金粉末为 D577 铁基合金,其粒度为 -140~325 目(45~109 μm),其化学成分如表 1 所示。

表 1 D577 铁基合金的粉末化学成分

Table 1 Chemical composition of D577 iron-based alloy powder

Chemical composition	Mass fraction / %
C	≤1.1
Cr	12~18
Si	≤2
Mn	12~18
Ni	≤6
Mo	≤4
Fe	Bal.

采用 DL-HL-T5000 型 CO₂ 气体激光器进行激光熔覆处理,激光束波长 10.6 μm,焦距为 200 mm。采用的激光熔覆工艺参数为功率 4000 W,光斑直径 5 mm,扫描速度 8 mm/s,送粉速率 6 g/min,搭接率 50%,无保护气氛。

采用扫描电镜(SEM)和 X 射线衍射仪(XRD)分析熔覆层的显微组织与相结构;采用 HVS-1000 型显微硬度计测定熔覆层横截面的显微硬度,载荷为 200 g,加载时间为 15 s;采用英国 Micro Materials 公司生产的 Nano-test 600 型纳米多功能测试仪测试熔覆层的纳米硬度和弹性模量。

磨损试验在 UMT-2 型多功能磨损试验机上进行,摩擦对偶球为 Φ4 mm 的 SiC 陶瓷球,其硬度为 HRC90。磨损试验条件为:在干摩擦条件下往复滑动,行程为 5 mm,频率为 5 Hz,载荷为 10, 20, 30 和 40 N,摩擦时间为 20 min。通过测量磨痕宽度,取 5

次测量的平均值,利用下式计算磨损体积,评价材料的耐磨性:

$$\Delta V = L \left[R^2 \arcsin\left(\frac{d}{D}\right) - \frac{1}{2} d \sqrt{R^2 - \frac{1}{4} d^2} \right],$$

式中 R 为钢球半径, d 为磨痕宽度, L 为往复滑动行程, ΔV 为磨损体积。

利用上海华辰 CH1660B 型电化学工作站进行 45# 钢和激光熔覆层电化学极化曲线的测量,试样尺寸为 10 mm × 10 mm × 10 mm,熔覆层厚度为 0.5 mm,并用环氧树脂将试样非测量面封闭。电化学测量采用三电极体系,电解质溶液为质量分数 3.5% 的 NaCl 溶液,将试样浸入 NaCl 溶液 10 min 后测量。

3 试验结果及分析

3.1 激光熔覆层的显微组织

图 1 为 D577 合金激光熔覆层的 XRD 图谱,对衍射峰的标定表明, D577 合金熔覆层组织主要由奥氏体组成。

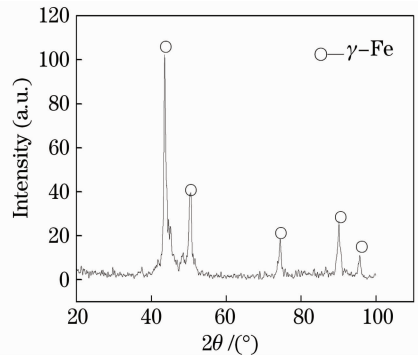


图 1 激光熔覆层的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of laser cladding layer

激光熔覆层组织主要由熔覆区、结合区和基体热影响区 3 个部分组成,结合区为熔覆区和基体热影响区的过渡区。图 2(a)为激光熔覆层与基体结合界面处的 SEM 照片,从中可以看出熔覆层与基体之间形成了良好的冶金结合,无裂纹等缺陷。图 2(b)为激光熔覆层层内组织 SEM 照片,从中可以看出激光熔覆层组织细小、致密、无气孔和裂纹等缺陷。

在激光熔覆过程中,基体靠近熔池的区域虽然未熔化,但是金相组织却发生了变化,形成了一定范围的热影响区。由于激光熔池的快速冷却特性,使得基体热影响区呈淬火组织特征,即细小的针状马氏体组织,如图 3 所示。

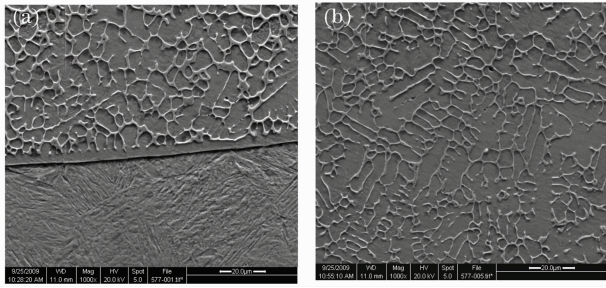


图 2 激光熔覆层组织形貌。(a)界面区,(b)熔覆区

Fig. 2 Microstructure of the laser cladding layer.

(a) interface zone, (b) cladding zone

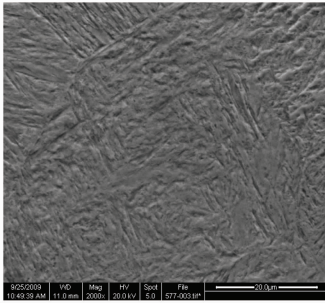


图 3 激光熔覆层的热影响区组织

Fig. 3 Microstructure of heat affected zone of the laser cladding layer

3.2 激光熔覆层硬度和弹性模量

图 4 是 D577 激光熔覆层沿深度方向的显微硬度分布曲线。由图可知,激光熔覆层的显微硬度在 630~650 HV;45# 钢基体热影响区硬度在 330~350 HV。激光熔覆层显著提高了基体 45# 钢的硬度(210~230 HV),激光熔覆层的硬度是 45# 钢基体硬度的 3 倍。D577 合金熔覆层之所以具有较高的硬度,一方面是由于熔覆合金粉末中含有大量的合金元素,激光熔覆是一种快速凝固过程,D577 合金激光熔覆后形成了单相奥氏体,熔覆层中固溶了大量的合金元素起到了固溶强化作用;另一方面是

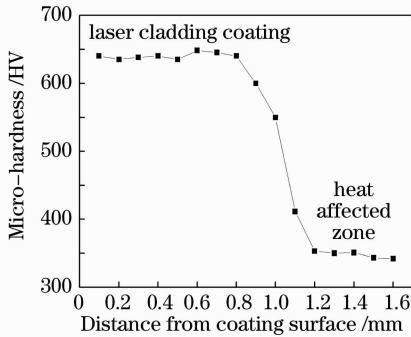


图 4 激光熔覆层截面硬度分布

Fig. 4 Hardness profile along the cross section of the laser cladding coating

由于熔池的冷却速度极快,熔覆层组织十分细小,从而产生细晶强化作用。高的硬度为激光熔覆层具有较好的耐磨性提供了保证。

图 5 为激光熔覆层和 45# 钢纳米压痕加载、卸载曲线。通过载荷-位移曲线可以计算出弹性模量和硬度。通过计算可得,D577 激光熔覆层的弹性模量为 235.82 GPa,硬度为 8.58 GPa;45# 钢基体的弹性模量为 251.57 GPa,硬度为 4.65 GPa。一般认为高的硬度模量比(H/E)有利于提高材料的耐磨性,激光熔覆层的硬度模量比要高于 45# 钢基体(前者为 0.0364,后者为 0.0185),这也表明激光熔覆层具有较高的耐磨性。

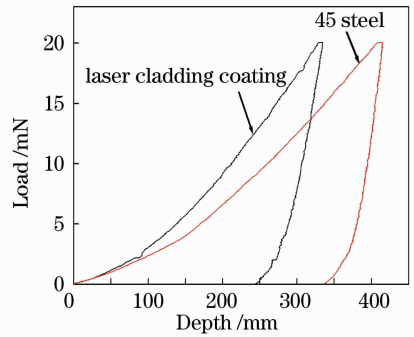


图 5 45# 钢与激光熔覆层加载-卸载曲线

Fig. 5 Curves of loading and unloading for 45# steel and laser cladding coating

3.3 激光熔覆层的耐磨性能

表 2 为 45# 钢和 D577 激光熔覆层在干摩擦条件下的磨损试验结果,图 6 为 45# 钢和 D577 激光熔覆层磨损体积和载荷的关系曲线。从图 6 可以看出,随着载荷的增加,激光熔覆层和 45# 钢基体的磨损体积均增加,但激光熔覆层磨损体积增加幅度较小,而 45# 钢磨损体积增加幅度较大。

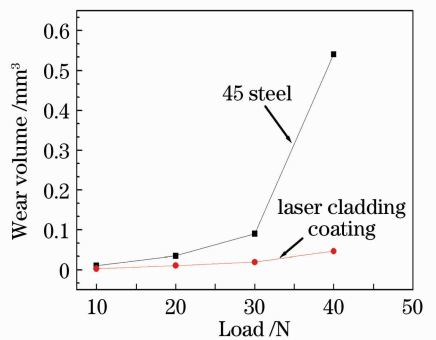


图 6 45# 钢和 D577 激光熔覆层磨损体积与载荷的关系曲线

Fig. 6 Relation between volume loss and load for 45# steel and D577 laser cladding layer

图 7 为载荷为 40 N 条件下 45# 钢和 D577 合金激光熔覆层磨痕形貌照片。从图 7 可以看出, D577 合金激光熔覆层的失效形式主要是由塑性变形导致的犁沟和变形层的剥落; 45# 钢表面失效形式主要是犁沟和粘着磨损。随着载荷的增加, 激光熔覆层的磨损量变化不大, 这主要是由于 D577 激光熔覆层具有良好的加工硬化性能, 随着磨损的进行, 在对磨球反复的挤压作用下, 磨损面发生了塑性变形, 变形的结果导致磨损表面发生了强化, 随着载荷的增加, 表面强化越发明显, 耐磨性也就相应得到了提高。由表 2 可知, 45# 钢基体的摩擦系数随着载荷

的增加而增大, 而激光熔覆层的摩擦系数呈先减小再增大的趋势。这是由于 45# 钢随着载荷的增加, 粘着磨损越发严重; 而 D577 激光熔覆层具有优异的加工硬化性能, 在磨损过程中不仅可以吸收一部分能量、避免应力集中, 而且可以显著提高熔覆层的表面硬度, 改善熔覆层的耐磨性能, 所以在载荷 (10~30 N) 逐渐增加的情况下, 熔覆层摩擦系数呈现逐渐降低的趋势。但当摩擦产生的应力超过了熔覆层强度极限时, 熔覆层表面破坏加剧、导致摩擦表面粗糙度显著增大, 摩擦阻力增大, 所以在 40 N 时发生了摩擦系数增大的现象。

表 2 45# 钢和 D577 激光熔覆层干摩擦条件下的磨损实验结果

Table 2 Result of 45# steel and D577 laser cladding coating wear under dry friction

Material	Load /N	Friction coefficient		Wear width /mm	Wear volume /mm ³
		Variation range	Mean value		
45# steel	10	0.347~0.379	0.363	0.382	0.0107
	20	0.378~0.404	0.391	0.556	0.0346
	30	0.385~0.408	0.397	0.759	0.0903
	40	0.388~0.417	0.403	1.323	0.5403
Laser cladding D577 alloy	10	0.441~0.484	0.463	0.255	0.0028
	20	0.329~0.376	0.353	0.386	0.0110
	30	0.287~0.338	0.313	0.461	0.0193
	40	0.353~0.358	0.356	0.667	0.0463

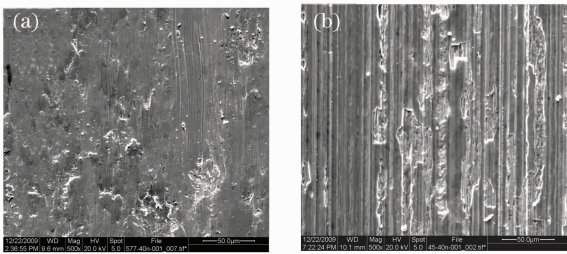


图 7 45# 钢和 D577 激光熔覆层磨损试样表面 SEM 照片 (40 N)。 (a) 激光熔覆层, (b) 45# 钢

Fig. 7 Wear surface morphology of the 45# steel and D577 laser cladding layer under 40 N load. (a) laser cladding layer, (b) 45# steel

3.4 激光熔覆层的腐蚀性能

图 8 为 D577 激光熔覆层与基体 45# 钢在 3.5% 腐蚀介质中的电化学极化曲线, 利用测试仪器自带的软件经过计算得出 45# 钢基体的腐蚀电流为 1.701×10^{-5} A, 腐蚀电位为 -0.6888 V; D577 激光熔覆层的腐蚀电流为 1.109×10^{-5} A, 腐蚀电位为 -0.463 V。通过腐蚀电流和腐蚀电位对比可以看出, 激光熔覆层的腐蚀电流低于 45# 钢、腐蚀电位高于基体 45# 钢, 这说明激光熔覆层与基体 45# 钢相比有较好的抗腐蚀性能。腐蚀电位的改善主要是由

于激光熔覆层中含有的 Cr, Ni, Mo 等提高金属电极电位的元素; 另外, 由于熔覆层是由单相固溶体组成, 减小了微电池数目, 从而也增加了涂层的耐腐蚀性。

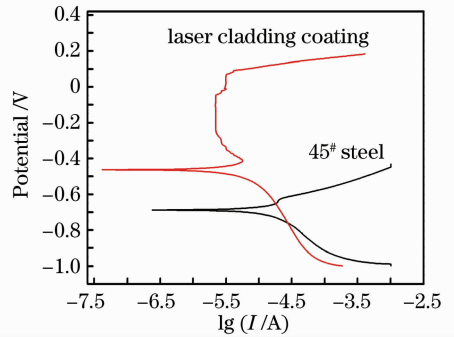


图 8 45# 钢和激光熔覆层在 3.5% NaCl 溶液中电化学极化曲线

Fig. 8 Anodic polarization curves of 45# steel and the laser cladding coating in 3.5% NaCl solution

4 结 论

D577 激光熔覆层组织由单相的奥氏体组成, 熔覆层组织致密, 无裂纹、气孔等缺陷, 熔覆层与基体之间形成了冶金结合; 熔覆层显微硬度达 630~

650 HV, 纳米压痕硬度为 8.58 GPa, 弹性模量为 235.82 GPa。D577 激光熔覆层显著改善了 45# 钢基体的耐磨性能。激光熔覆层的失效形式主要是由塑性变形导致的犁沟和变形层的剥落; 45# 钢基体表面失效形式主要是犁沟和粘着磨损。45# 钢表面激光熔覆 D577 合金后腐蚀电位明显正移, 从而提高了基材在 3.5%NaCl 水溶液中的电化学腐蚀性能。

参 考 文 献

- 1 Xu Binshi. Technical foundation and new research development of remanufacturing engineering[J]. *Digital Manufacture Science*, 2008, **6**(2): 1~18
徐滨士. 再制造工程技术及其研究新进展[J]. *数字制造科学*, 2008, **6**(2): 1~18
- 2 M. Riabkina-Fishman, J. Zahavi. Laser alloying and cladding for improving surface properties[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 1996, **106**: 263~267
- 3 Meng Qingwu, Geng Lin, Ni Dingrui. Laser cladding NiCoCrAlY coating on Ti-6Al-4V [J]. *Mater. Lett.*, 2005, **59**(22): 2774~2777
- 4 Li Yaozhong, Wang Cunshan, Li Ting *et al.*. Influence of nano-SiC particle on microstructure and properties of laser clad NiFeBSi alloy coating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1356~1360

- 李耀忠, 王存山, 李 婷 等. 纳米 SiC 颗粒对激光熔覆 NiFeBSi 合金涂层组织和性能的影响[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1356~1360
- 5 Dong Shiyun, Xu Binshi, Wang Zhijian *et al.*. Vital problems on laser remanufacturing gears[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 134~138
董世运, 徐滨士, 王志坚 等. 激光再制造齿类零件的关键问题研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 134~138
- 6 Zhai Yufeng, Wang Xinhong, Huang Jian. Microstructure and properties of TiC-Mo₂C particles reinforced Fe-based composite coatings produced by laser cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3287~3292
翟玉峰, 王新洪, 黄 坚. 激光熔覆 TiC-Mo₂C 颗粒增强 Fe 基涂层的组织与性能[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3287~3292
- 7 C. Navas, A. Conde, B. J. Fernandez *et al.*. Laser coatings to improve wear resistance of mould steel [J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2005, **194**(1): 136~142
- 8 S. Y. Dong, B. S. Xu, Z. J. Wang *et al.*. Laser remanufacturing technology and its applications [C]. *SPIE*, 2007, **6825**: 68251N
- 9 M. L. Zhong, W. J. Liu, G. Q. Ning *et al.*. Laser direct manufacturing of tungsten nickel collimation component [J]. *Mater. Process. Technol.*, 2001, **147**(2): 167~173
- 10 L. Shepeleva, B. Medres, W. D. Kaplan *et al.*. Laser cladding of turbine blades[J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2000, **125**(1-3): 45~48