

# 激光熔覆和 TIG 堆焊 Fe55 合金涂层组织与性能对比研究

邱云鹏, 尹桂丽\*, 徐瑞强, 王磊, 高涵, 王旭

(辽宁工业大学材料科学与工程学院, 辽宁 锦州 121001)

**摘要** 采用激光熔覆和钨极氩弧堆焊方法在 Q235 钢基体表面分别制备 Fe55 合金涂层。应用金相、X 射线衍射、显微硬度及磨粒磨损等分析手段对涂层的组织和性能进行研究。结果表明,激光熔覆和 TIG 堆焊涂层的稀释率分别为 4.42% 和 7.65%, 并且两个涂层均由  $\alpha$ -Fe 固溶体和原位合成的颗粒增强相 CrFeB、 $\text{Cr}_7\text{C}_3$ 、 $(\text{Cr},\text{Fe})_7\text{C}_3$  及  $\text{Fe}_2\text{B}$  等组成;以树枝晶和胞状晶为主的激光熔覆涂层组织比以等轴晶和胞状晶为主的 TIG 堆焊涂层组织细小致密;激光熔覆涂层的显微硬度和耐磨性均优于 TIG 堆焊涂层,平均显微硬度约为 664 HV,磨损方式主要为显微切削。

**关键词** 激光熔覆; 钨极氩弧堆焊; Fe55 合金; 显微硬度; 耐磨性

中图分类号: TG174.4

文献标志码: A

doi: 10.14128/j.cnki.al.20224204.035

## Comparative Study on Microstructure and Properties of Fe55 Alloy Coating by Laser Cladding and TIG Surfacing

Di Yunpeng, Yin Guili\*, Xu Ruiqiang, Wang Lei, Gao Han, Wang Xu

(College of Materials Science and Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou, Liaoning 121001, China)

**Abstract** Fe55 alloy coatings were prepared on Q235 steel substrate by laser cladding and TIG surfacing, respectively. The microstructure and properties of the coating were studied by means of OM, X-ray diffraction, microhardness and abrasive wear. Results show that the dilution ratios of laser cladding and TIG surfacing coatings are 4.42% and 7.65%, respectively, and they are composed of  $\alpha$ -Fe solid solution and in-situ synthesized particle reinforced phases, such as CrFeB,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $(\text{Cr},\text{Fe})_7\text{C}_3$  and  $\text{Fe}_2\text{B}$ . The microstructure of laser cladding coating is mainly dendrite and cellular crystal, and the microstructure of TIG surfacing coating is mainly equiaxed crystal and cellular crystal. The microstructure of laser cladding coating is finer and denser than that of TIG surfacing coating. The microhardness and wear resistance of laser cladding coating are better than those of TIG surfacing coating, and the average microhardness is about 664 HV, and the main wear mode is micro cutting.

**Key words** laser cladding; tungsten argon arc surfacing; Fe55 alloy; microhardness; wear resistance

## 0 引言

大量工程零部件在生产实际中因被磨损、腐蚀、氧化等而发生失效和表面的破坏,不仅影响整个机器部件的性能,而且严重降低了企业的生产效率,同时更换整个部件也会造成经济上的巨大浪费<sup>[1]</sup>。因此,采用表面熔覆技术在廉价金属基材上制备出高性能的合金表面涂层而不影响基体的性质,降低成本,节约贵重稀有金属材料,并延长零部件的使用寿命,是人们一直关注的课题。激光熔覆和钨极氩弧(TIG)堆焊是表面熔覆技术中能获得特定性能涂层的两种工艺方法。TIG 堆焊技术因其设备轻便、价格低廉、操作简单,易于在施工现场施焊等优点而得到广泛应用<sup>[2-4]</sup>,但 TIG 堆焊也存在电弧功率受限及堆焊速度低等缺点。与 TIG 堆焊相比,激光熔覆技术是一种经济效益很高的新技术,因具有快热快冷、组织细小、熔覆层厚度大、稀释率低及易于实现

命,是人们一直关注的课题。激光熔覆和钨极氩弧(TIG)堆焊是表面熔覆技术中能获得特定性能涂层的两种工艺方法。TIG 堆焊技术因其设备轻便、价格低廉、操作简单,易于在施工现场施焊等优点而得到广泛应用<sup>[2-4]</sup>,但 TIG 堆焊也存在电弧功率受限及堆焊速度低等缺点。与 TIG 堆焊相比,激光熔覆技术是一种经济效益很高的新技术,因具有快热快冷、组织细小、熔覆层厚度大、稀释率低及易于实现

收稿日期:2021-03-31; 修回日期:2021-07-10

基金项目:辽宁省教育厅科学研究项目(JJL202015408);大学生创新创业训练计划项目(202010154004)

作者简介:邱云鹏(1998—),男,本科。研究方向:激光熔覆、焊接。E-mail:1240769667@qq.com

\*通信作者:尹桂丽(1973—),女,硕士,副教授。研究方向:激光熔覆、焊接。E-mail:yinguili@163.com

自动化等优点而得到了迅速发展和广泛应用<sup>[5-7]</sup>。但激光熔覆层较大的开裂敏感性,仍然是困扰国内外研究者的一个难题,也是工程应用及产业化的障碍<sup>[8-9]</sup>。本项目采用激光熔覆和 TIG 堆焊两种方法在 Q235 钢表面熔覆 Fe55 合金粉末,制备原位颗粒增强的高硬度、高耐磨铁基合金涂层,对比不同熔覆方法下获得的 Fe55 合金涂层的组织、硬度和耐磨性,为表面熔覆技术的基础理论研究和工程应用提供有价值的参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用的基板材料为 Q235 钢,其尺寸为 100 mm×100 mm×10 mm,化学成分(质量分数)为:0.14C,Si≤0.30,0.30~0.65Mn,S≤0.05,P≤

0.045,余量为 Fe。熔覆前用角磨机将基板待熔覆的表面锈蚀去除,使其表面露出金属光泽,然后用不同粒度的砂纸将表面打磨光亮并保持平整,最后用丙酮和酒精清洗干净待用。试验所用的熔覆材料为 Fe55 合金粉末,其化学成分(质量分数)为:0.7~1.0C,3.4~4.0Si,3.5~4.0B,16~18Cr,1.0~2.0Ni,余量为 Fe。熔覆前将合金粉末在 100 ℃下保温干燥 2 h 待用。

### 1.2 试验工艺

激光熔覆试验采用 FL-Dlight02-3000W 半导体激光器熔覆制备 Fe55 合金涂层,TIG 堆焊试验采用 ARCZX7-250 氩弧焊机熔覆制备 Fe55 合金涂层。具体的激光熔覆和 TIG 堆焊工艺参数见表 1。

表 1 激光熔覆和 TIG 堆焊工艺参数

Table 1 Process parameters of laser cladding and TIG surfacing

Laser cladding	Power/W	Defocus distance/mm	Speed/(mm·s <sup>-1</sup> )	Powder thickness/mm	Overlapping rate/%
	1 800	304	8	0.8	28
TIG surfacing	Current/A	Speed/(mm·s <sup>-1</sup> )	Powder thickness/mm	Overlapping rate/%	
	140	5	1.5	25	

### 1.3 组织与性能表征方法

将经激光熔覆和 TIG 堆焊的试样垂直于涂层方向分别切割金相、XRD、硬度、磨损等试样(尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm)。采用 Axio-Scope A1 型蔡司金相显微镜观察涂层的组织结构并测量涂层的高度和基材的熔化深度;用 D/MAX-PC-2500 型 X 射线衍射仪对涂层进行物相分析;涂层显微硬度采用 MHVD-1000IS 型数显显微硬度计测量;磨损试验采用自制销盘式磨损试验机进行磨粒磨损,让磨损试样在粘有刚玉半树脂砂布(80 目)的转盘上沿磨损半径为 55 mm 的圆形轨迹行走,转盘以 200 r/min 的速度旋转,载荷为 2 kg(约 20 N),每次磨损时间为 60 s,每个涂层磨三次,磨后用精度为 0.1 mg 的数字天平测量磨损失重,然后由  $w = \frac{\Delta W}{\mu \cdot t}$  ( $w$  为质量磨损率,mg/cm; $\Delta W$  为平均磨损失重,mg; $\mu$  为磨损速度,cm/s; $t$  为磨损时间,s) 计算质量磨损率<sup>[10]</sup>;最后,对磨损表面采用 HYBRID C3 型 3CCD 真实色共聚焦显微镜观察磨损表面的三维形貌。

## 2 结果与分析

### 2.1 涂层横截面形貌及稀释率对比

图 1 是激光熔覆和 TIG 堆焊涂层的横截面形貌。由图可以看出,两种方法制备的涂层表面成形性均较好。其中,激光熔覆涂层的表面存在少量的未熔粉末颗粒[见图 1(a)],TIG 堆焊涂层表面的平整度优于激光熔覆涂层[见图 1(b)]。另外,根据文献[11]可知,涂层的稀释率  $\eta$  计算公式可由面积法简化为  $\eta = [h/(h+H)] \times 100\%$  ( $h$  为基材熔化深度; $H$  为熔覆层高度),具体测试方法和尺寸如图 1 所示。由此对涂层的稀释率进行近似计算,得出激光熔覆的稀释率为 4.42%,TIG 堆焊的稀释率为 7.65%,可以看出,TIG 堆焊涂层的稀释率高于激光熔覆涂层的稀释率,但差距不是很大,均低于 10%,均满足表面改性熔覆涂层的要求。众所周知,在相同预置粉末厚度条件下,TIG 堆焊对基材的熔化程度影响会明显高于激光熔覆,因为与高能激光束相比,TIG 堆焊需要输送较高能量给熔覆粉末和基材才能使其熔化实现冶金结合,这必然会对涂层

的稀释率产生非常大的影响<sup>[12]</sup>。但采用增加预置粉末厚度可以降低对稀释率的影响,因为预置粉末厚度是决定涂层稀释率高低的因素之一,一定厚度的预置粉末会对基材起到“热屏蔽”的作用,预

置粉末厚度越大,其“热屏蔽”作用越大,基材吸收的热量越低,则稀释率越低<sup>[13]</sup>。这也正是本试验在确定预置粉末厚度时,考虑采取 TIG 堆焊的预置粉末厚度比激光熔覆的预置粉末厚度大的主要原因。

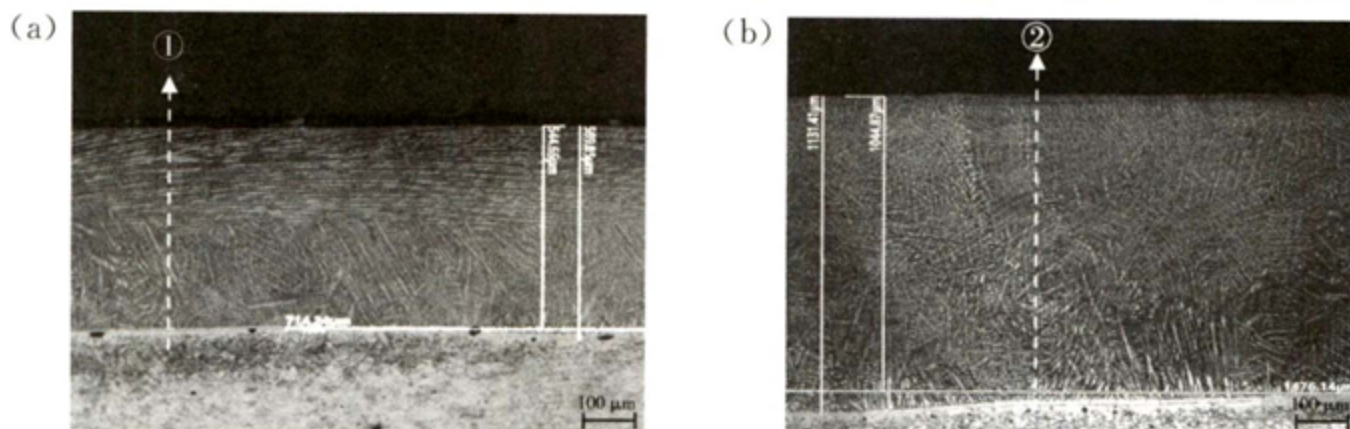
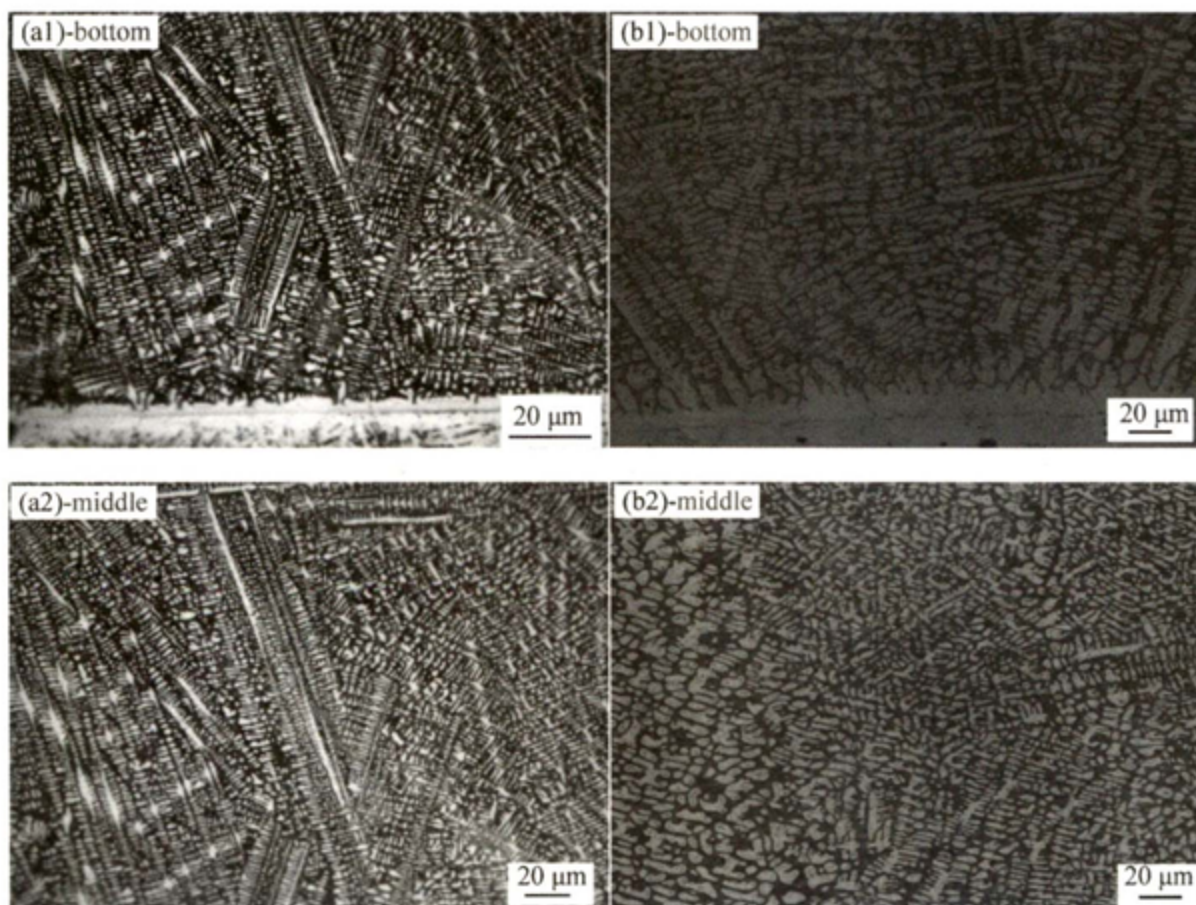


图1 激光熔覆和 TIG 堆焊涂层横截面形貌。(a)1 800 W 激光熔覆;(b)140 A TIG 堆焊  
Fig.1 The cross section morphology of laser cladding and TIG surfacing coatings.  
(a)Laser cladding at 1 800 W;(b)TIG surfacing at 140 A

## 2.2 涂层显微组织与相组成

为了考察两个涂层由近基体处至涂层表层的组织变化规律,按照图 1 中所标示的①、②观察位置进行显微组织拍照,不同区域的显微组织见图 2 所示。由图 2 的(a1)和(b1)可知,两种工艺下的涂层与基体之间均存在一定宽度的白亮带,表明涂层与基体之间达到了良好的冶金结合,涂层中均未发现气孔、裂纹等缺陷。由图 2 还可以看出,激光熔覆涂层组织以树枝晶和胞状晶为主,而且涂层从底部到顶部组织明显细化;而 TIG 堆焊涂层组织以等轴晶和胞状晶为主,涂层从底部到顶部组织也明显细化。此

外,对比激光熔覆和 TIG 堆焊涂层各区域组织可知,激光熔覆涂层的组织明显比 TIG 堆焊涂层的组织细小致密。分析原因认为,涂层从底部到顶部的组织形态变化主要由温度梯度  $G$  与凝固速度  $R$  的比值  $G/R$  决定<sup>[14]</sup>,因为  $G/R$  值随着凝固的进行逐渐变小,由此会形成涂层底部粗大而顶部细小的组织变化。另外,与具有快热快冷特点的激光熔覆相比,TIG 堆焊速度较小,热输入较大,加之预置粉末厚度较激光熔覆的大,涂层散热较慢,高温停留时间较长,涂层中的晶粒有足够的长大时间,所以导致涂层组织比激光熔覆组织粗大得多。



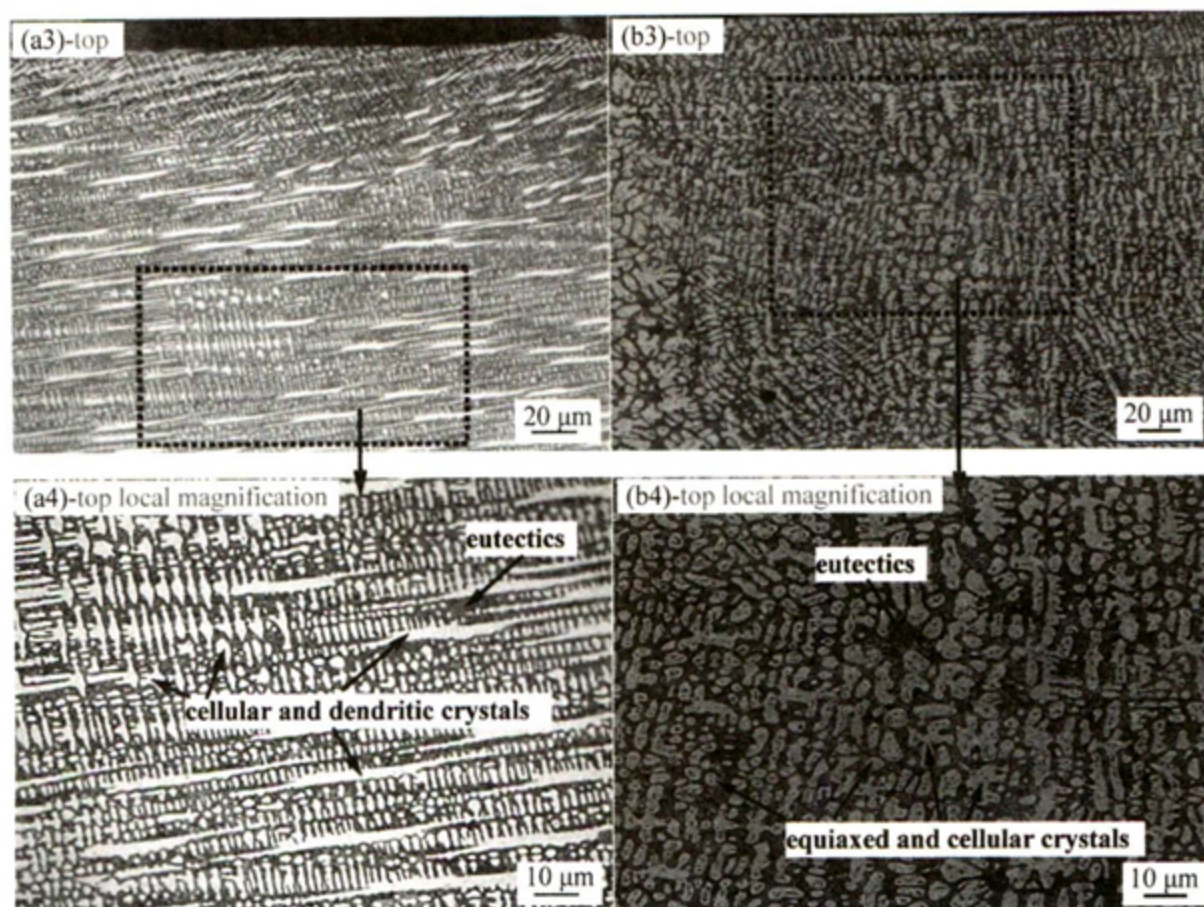


图2 激光熔覆和 TIG 堆焊涂层的显微组织。(a1)~(a4)1 800 W 激光熔覆;(b1)~(b4)140 A TIG 堆焊  
 Fig. 2 Microstructure of laser cladding and TIG surfacing coatings.  
 (a1)~(a4)Laser cladding at 1 800 W;(b1)~(b4)TIG surfacing at 140 A

图3为激光和 TIG 堆焊涂层的 XRD 衍射图谱。由图可知,两种涂层的相组成相同,均由基体  $\alpha$ -Fe 固溶体和原位合成的颗粒增强相 CrFeB、 $\text{Cr}_7\text{C}_3$ 、 $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$  及  $\text{Fe}_2\text{B}$  等组成。这些原位合成的硬质增强相会使涂层硬度得以提高,耐磨性进一步改善。

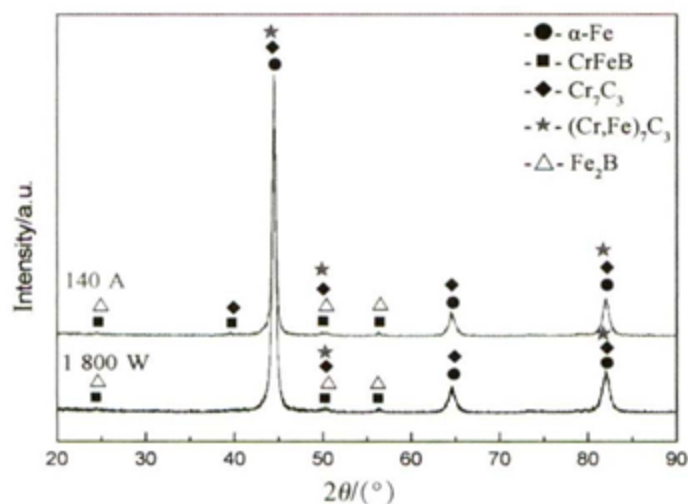


图3 激光和 TIG 堆焊涂层的 XRD 图谱  
 Fig. 3 XRD patterns of laser cladding and TIG surfacing coatings

### 2.3 涂层硬度与耐磨性

图4是激光熔覆和 TIG 堆焊涂层的显微硬度分布曲线。从图中可也看出,激光熔覆和 TIG 堆焊涂层的显微硬度都远高于基体的硬度;激光熔覆涂层的显微硬度(平均值约为 664 HV)高于 TIG 堆焊

涂层的硬度(平均值约为 622 HV)。分析认为,当涂层中存在大量树枝晶时,会显著降低涂层的显微硬度,但本试验的激光熔覆涂层虽然主要以树枝晶为主,但该涂层的树枝晶非常细小,细晶强化作用抵消了树枝晶导致的硬度下降。另外,对比两个涂层的硬度分布均匀性可知,激光熔覆涂层的硬度分布不如 TIG 堆焊涂层的均匀,原因是激光熔覆涂层组织虽然较细小,但却存在较多的枝晶,造成涂层组织不均匀,而 TIG 堆焊涂层组织虽然较粗大,但晶粒大小较均匀。这种均匀的组织必然会使硬度分布较均匀,不存在硬度变化较大的点。

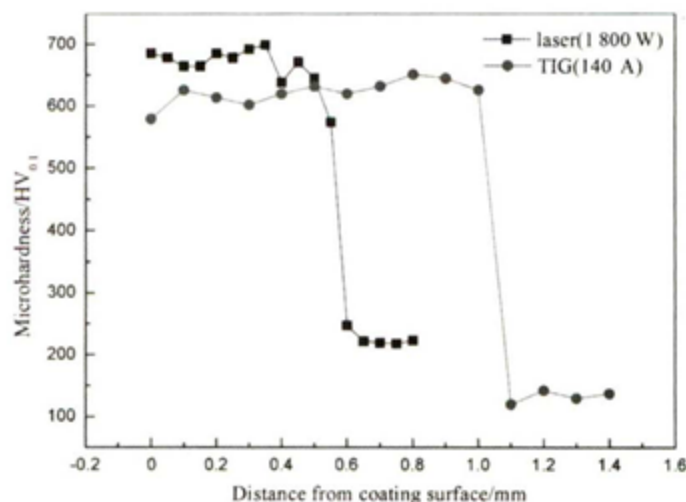


图4 涂层的显微硬度分布  
 Fig. 4 Microhardness distribution of coatings

图 5 和图 6 分别为激光熔覆和 TIG 堆焊涂层的质量磨损率柱状图及磨损表面的三维形貌图。由图 5 可以看出,激光熔覆涂层的三次质量磨损率均小于 TIG 堆焊涂层的质量磨损率。取三次磨损率的平均值可得,激光熔覆涂层的平均质量磨损率( $w$  约为  $3.98 \times 10^{-3}$  mg/cm)远小于 TIG 堆焊涂层的平均质量磨损率( $w$  约为  $7.19 \times 10^{-3}$  mg/cm),且激光熔覆涂层的表面磨损形貌主要是显微切削,磨痕较浅,磨屑较少[见图 6(a)],而 TIG 堆焊涂层的表面磨损形貌存在较深的犁沟变形和显微切削,磨屑较多[见图 6(b)]。因此,激光熔覆获得的涂层的抗磨粒磨损性能优于 TIG 堆焊所获得的涂层,这与激光熔覆涂层具有细小致密的显微组织相对应。

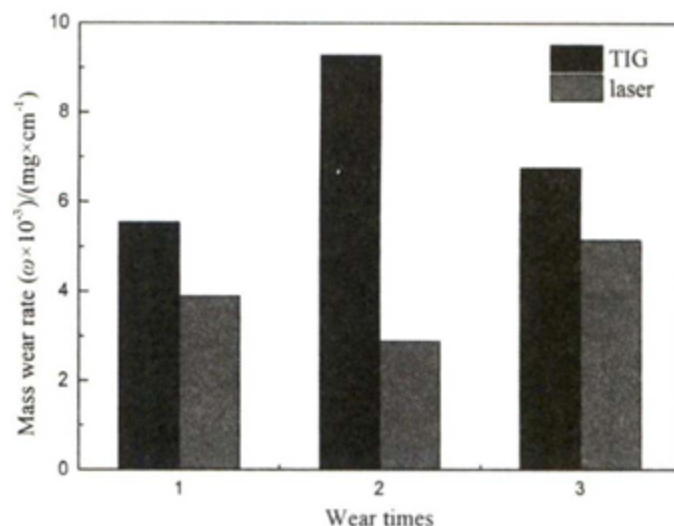


图 5 激光熔覆和 TIG 堆焊涂层质量磨损率  
Fig. 5 Mass wear rate of laser cladding and TIG surfacing coatings

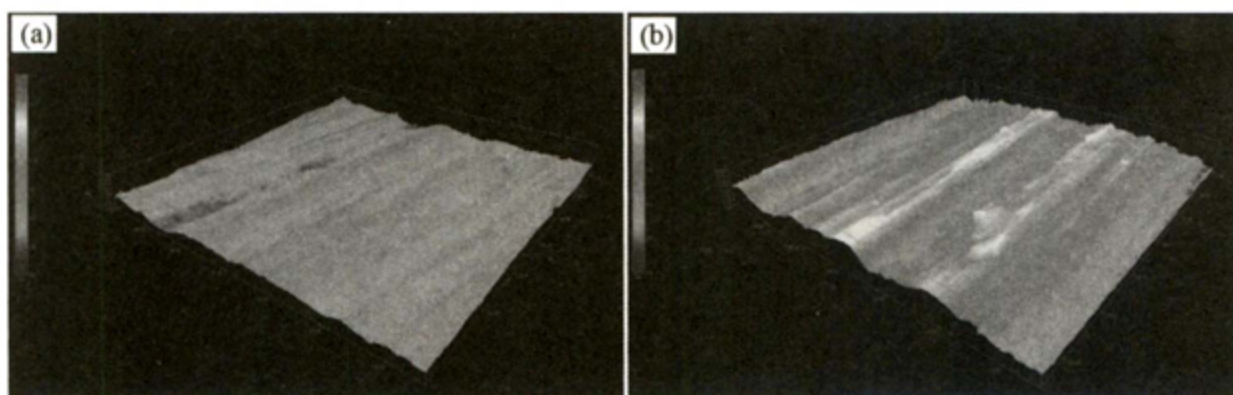


图 6 激光熔覆和 TIG 堆焊涂层的磨损表面三维形貌。(a)激光熔覆涂层;(b)TIG 堆焊涂层  
Fig. 6 Three dimensional wear surface morphology of laser cladding and TIG surfacing coatings.  
(a)Laser cladding coating;(b)TIG surfacing coating

### 3 结论

(1)激光熔覆和 TIG 堆焊涂层与基体之间均达到了良好的冶金结合,稀释率分别为 4.42% 和 7.65%;激光熔覆涂层组织以树枝晶和胞状晶为主,而 TIG 堆焊涂层组织以等轴晶和胞状晶为主;激光熔覆涂层的组织明显比 TIG 堆焊涂层的组织细小致密。

(2)两种涂层的相组成相同,均由  $\alpha$ -Fe 固溶体和原位生成的颗粒增强相 CrFeB、Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>、(Cr,Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 及 Fe<sub>2</sub>B 等组成。

(3)激光熔覆涂层的显微硬度(平均值约为 664 HV)高于 TIG 堆焊涂层的硬度(平均值约为 622 HV),其抗磨粒磨损性能也优于 TIG 堆焊涂层;激光熔覆涂层的磨损方式主要为显微切削,而 TIG 堆焊涂层的磨损方式主要为磨痕较深的显微切削和少量的犁沟变形。

### 参考文献

[1] WENG Z K. Investigation into Ni/Co-based alloys rein-

forced with WC particles produced by diode laser cladding[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2016: 1-5.

翁志坤. 半导体激光熔覆 WC 增强 Ni、Co 基合金的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016: 1-5.

[2] ZHAO D, MA N, ZHANG K K, et al. Microstructure and properties of *in situ* synthesized Fe-based composite coating by tungsten inert gas cladding[J]. Surface Technology, 2017, 46(7): 20-25.

赵迪, 马宁, 张柯柯, 等. 钨极氩弧熔覆原位自生铁基复合涂层组织与性能[J]. 表面技术, 2017, 46(7): 20-25.

[3] TANG L L. Study on the Fe-based hardfacing layer fabricated by TIG cladding[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2010: 1-9.

唐琳琳. 钨极氩弧熔覆铁基耐磨层的研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2010: 1-9.

[4] YANG F Q. Research on microstructures and properties of Fe-base alloy powders cladding layer by tungsten electrode argon arc surfacing[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2013: 1-8.

杨凤琦. 钨极氩弧堆焊 Fe 基合金粉末熔覆层组织和性

- 能研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2013: 1-8.
- [5] ISHKINYAEV E D, PETROVSKIY V N, POLSKIY V I, et al. Study of mechanical characteristics of stainless steel samples obtained by direct laser deposition[J]. *Physics of Atomic Nuclei*, 2019, 82(11): 1441-1444.
- [6] ZHAN J M, LIANG Z G, HUANG J Y, et al. Study on the single laser cladding process on TC4 titanium alloy surface[J]. *Applied Laser*, 2020, 40(6): 955-961.  
战金明, 梁志刚, 黄进钰, 等. TC4 钛合金表面单道激光熔覆工艺研究[J]. *应用激光*, 2020, 40(6): 955-961.
- [7] WU Z P, LI T, LI X B. Effect of hybrid process parameters on crack behavior of laser cladding Ni60A alloy[J]. *Applied Laser*, 2019, 39(5): 765-769.  
吴祖鹏, 李涛, 李向波. 复合工艺参数对激光熔覆 Ni60A 合金裂纹的影响[J]. *应用激光*, 2019, 39(5): 765-769.
- [8] NIE P L, OJO O A, LI Z G. Modeling analysis of laser cladding of a nickel-based superalloy[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 258: 1048-1059.
- [9] YU C X, JING C N, LI H X. Forming mechanism and controlling method of laser cladding crack[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2012, 55(4): 75-79.  
于承雪, 景财年, 李怀学. 激光熔覆裂纹的形成机理及控制方法[J]. *航空制造技术*, 2012, 55(4): 75-79.
- [10] JI S Y, SUN L M. Influence of surface roughness on electric-current friction and wear properties of copper-base PM/QCr<sub>0.5</sub> couples[J]. *Lubrication Engineering*, 2011, 36(3): 69-72.  
冀盛亚, 孙乐民. 表面粗糙度对铜基粉末冶金/铬青铜摩擦副载流摩擦磨损性能影响的研究[J]. *润滑与密封*, 2011, 36(3): 69-72.
- [11] LIN J X, NIU L Y, LI G Y, et al. Effects of laser power on dilution rate and corrosion resistance of laser cladding Co-based alloy coating on surface of ball valve[J]. *Hot Working Technology*, 2014, 43(20): 112-114.  
林继兴, 牛丽媛, 李光玉, 等. 激光功率对球阀表面激光熔覆 Co 基合金涂层稀释率及耐腐蚀性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2014, 43(20): 112-114.
- [12] HAN Y Q, HAO F K, LIU S K, et al. Comparison of microstructure and properties between laser cladding coating and argon arc welding coating[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition) Sci & Eng V*, 2009, 6(3): 261-262.  
韩永强, 郝福坤, 刘绍宽, 等. 激光熔覆涂层与氩弧焊涂层组织性能比较[J]. *长江大学学报(自然科学版)理工卷*, 2009, 6(3): 261-262.
- [13] ZHANG J G, DUAN H L, PENG H F. Influence of laser technological parameters on dilution of Ni/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> composite layer[J]. *China Petroleum Machinery*, 1998, 26(11): 21-23.  
张继革, 段慧玲, 彭惠芬, 等. 激光工艺参数对 Ni/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合涂层稀释率的影响[J]. *石油机械*, 1998, 26(11): 21-23.
- [14] LIU Y Y, CHEN S Y, GUO R, et al. Microstructure and properties of SiC reinforced Fe60 alloy coating with high wear resistant by laser direct deposition[J]. *Applied Laser*, 2017, 37(4): 492-496.  
刘媛媛, 陈岁元, 国瑞, 等. 激光直接沉积 SiC 增强 Fe60 合金高耐磨涂层的组织结构与性能[J]. *应用激光*, 2017, 37(4): 492-496.