

铁基合金激光熔覆层裂纹控制的组织设计*

姚成武^{1,2}, 徐滨士², 黄 坚¹, 张培磊¹, 李铸国¹, 吴毅雄¹

(1. 上海交通大学 上海激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240; 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: 通过对激光熔覆铁基合金进行组织设计和试验, 获得了无裂纹、平均硬度为 850.3 HV (65HRC) 的熔覆涂层。利用光学显微镜 (OM)、扫描电镜 (SEM)、透射电镜 (TEM)、X-射线衍射 (XRD) 对熔覆层进行显微组织、相结构分析, 结果表明: 熔覆层为枝/胞晶凝固组织形态, 熔覆层内弥散分布大量的颗粒相; 残余奥氏体沿着枝/胞晶间分布, 晶间的碳化物呈颗粒状弥散分布在晶间残余奥氏体上。摩擦测试结果表明, 熔覆层的磨损形式主要为磨粒磨损, 对比材料冷轧辊用钢 9Cr2Mo 磨损形式为磨粒磨损、粘着磨损和疲劳剥落。熔覆层的拉伸断口形貌为准解理和韧窝, 并有沿晶粒边界形成的韧带, 表明晶界残余奥氏体提高了熔覆层的韧性。

关键词: 激光熔覆; 铁基合金; 组织设计; 晶界; 残余奥氏体

中图分类号: TB324

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2010)03-0074-06

Microstructure Design of Controlling Crack of Fe-based Laser Cladding Layer

YAO Cheng-wu^{1,2}, XU Bin-shi², HUANG Jian¹, ZHANG Pei-lei¹, Li Zhu-guo¹, WU Yi-xiong¹

(1. Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240; 2. National Key Lab for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100071)

Abstract: A Fe-based cladding layer which is free of crack and has average hardness 850.3 HV (65HRC) was obtained by microstructure design and laser cladding. The examinations of optic microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), transmission electron microscope (TEM) and X-ray diffraction (XRD) showed that the microstructure of cellular and dendrite grains was observed in cladding layer, and a large number of granular particle reinforced phases dispersively distributed in the cellular and dendrite grain. Moreover, the bulk retained austenite and carbides distributed along the grain boundary were observed. The actual friction measurements also indicate that abrasive wear is the main mechanism for cladding layer, and the surface of cold roll steel 9Cr2Mo are abrasive wear, adhesive wear and fatigue breaking-off. The analysis of the tensile fracture surfaces reveal that laser cladding layers exhibit a mixture fracture mode of quasi-cleavage and dimple, and ductile belt along the grain boundary were observed, which is the evidence that toughness is improved by grain refinement.

Key words: laser cladding; Fe-based alloy; microstructure design; grain boundary; retained austenite

0 引 言

目前, 激光熔覆材料广泛使用的仍然是传统的热喷涂铁基、钴基、镍基合金粉末及向其中加入各种陶瓷硬质相所形成的复合粉末^[1-7]。由于热喷涂材料的液固区间都较宽、脆性相较多, 激光熔覆时往往容易在熔覆层产生裂纹。

激光熔覆的裂纹研究文献中, 解决和消除熔覆层裂纹主要通过减小温度梯度、提高熔覆金属的韧性和塑性、超声波震动破碎枝晶 3 种思路^[8-12]: ① 预热基体; ② 在自熔合金粉末中加入稀土元素和稀土氧化物, 如 La₂O₃、CeO₂、Hf、Y₂O₃、TiC、MgO、CaO 等, 以此细化组织提高基体韧性来降低开裂敏感性; 从熔覆材料与基体的化学、组织相容性, 对熔覆材料进行设计; 引入中间层或使激光熔覆层中的成分梯度变化; ③ 采用超声波震动破碎枝晶, 细

收稿日期: 2010-04-27; 修回日期: 2010-05-18

基金项目: *上海市激光制造与材料改性重点实验室基金项目 06DZ22102

作者简介: 姚成武(1973-), 男(汉), 安徽庐江人, 博士生

化熔覆组织来提高韧性。以上这些思路虽然取得一定的效果,但只能在特定的场合或材料有效,还不能形成普遍的规律,而且存在缺陷,如:减小温度梯度就必然牺牲激光熔覆快速凝固的特点,超声波震动有设备上的繁琐,添加合金增韧元素并不能完全消除凝固裂纹。

文中设计的铁基激光熔覆涂层的应用对象为冷轧辊的表面强化和修复。针对冷轧辊的性能要求和失效形式,本文从激光熔覆的快速凝固特点和铸态组织特征寻求抑制激光熔覆裂纹的方法,设计无裂纹、高强韧性的激光熔覆合金涂层,为类似于冷轧辊表面强化和修复的大面积激光熔覆应用提供理论和试验依据。

1 激光熔覆的裂纹与组织设计

熔覆层的裂纹有冷裂纹和热裂纹,其中主要的裂纹方式是热裂纹,也称凝固裂纹。

在凝固冷却过程中,凝固金属的体积收缩量来自于液态金属的收缩、金属凝固的收缩和固态金属的收缩。对于激光熔覆合金来说,合金粉末熔化初期为液态金属,具有可流动性,体积的收缩可以由流动的液态金属来补充,因此熔覆熔池处于液态时不会产生裂纹。

随着温度的下降,熔覆金属将部分凝固,初生的枝晶相互连接成网络,造成枝晶间的液体和残存的液体不易流动,枝晶间将没有足够的液态金属补充。此时,在凝固区间内,熔覆金属分为有强度的准固相区,即准固相线 OB 与固相线 OD 之间的温度范围(图1中的BD区间),以及无强度的准液相区,即液相线 OA 与准固相线 OB 之间的温度范围(图1中的AB区间)。准固相线温度是指固液共存区内合金开始具有强度时的温度,即图1中的C点

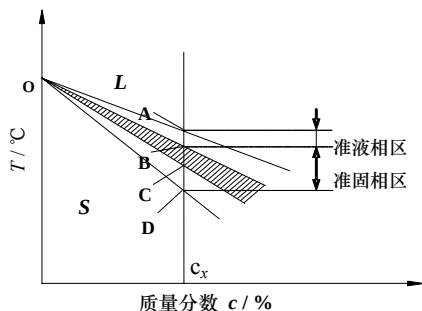


图1 凝固过程中准固相区示意图

Fig.1 Schematic representation of semi-solid range during solidification

所示。当温度降至平衡固相线(图1中的C点)后,由于凝固过程中不可避免的偏析现象,将仍有部分残留液相存在,使凝固过程要到D点才完全结束。

金属凝固过程中各部分不均匀收缩而产生收缩应力,在平衡固相线附近的准固相区BC温度范围内,合金的强度和延伸率都很低,当冷却和收缩造成的残余应力大于其抗拉强度时,在枝晶间的残留液膜产生分离,凝固裂纹就会产生^[13]。

从防止凝固裂纹的角度,如果液固区间AD温度范围越窄,那么准固相区BC也相应越窄,同时金属凝固的不均匀收缩现象越小,则就越可能避免凝固裂纹的产生。

对于铁基合金来说,共晶点和过包晶点附近都有较窄的液固相区间。现有的熔覆合金设计大多采用共晶点相区设计,然而共晶材料毕竟是一种脆性较大的组织,尽管凝固裂纹的产生可能性降低,然而却难以避免冷裂纹的产生。相比较而言,处于过包晶相区的熔覆组织将会是马氏体、残余奥氏体,其韧性优于共晶组织。

激光熔覆是一个急热、急冷的过程,熔覆材料和基体表面由固态金属经激光加热至液态金属,再由液态金属结晶至固态金属,期间经历基体和熔覆金属的体积变化、组织变化,从而产生了内应力。激光熔覆金属冷却收缩过程受到周围较冷的基体束缚而产生拉应力,熔覆金属完全凝固后,当熔覆金属存在小于拉应力强度的薄弱部位时,在该部位也会发生开裂。

对于常规铸态金属来说^[14],铸态晶界存在微裂纹或非金属夹杂物的富集,造成了晶界比晶内薄弱,断裂大部分表现为晶界断裂,有时也沿铸造树枝晶的边界发生断裂。从组织形态上来说,激光熔覆组织是一种快速凝固的铸态组织。相比较激光重熔,激光熔覆的凝固速度一般难以达到溶质完全捕获的程度,激光熔覆同样存在着晶界偏析现象。当熔覆金属完全凝固后,晶内的强韧性一般高于胞枝晶间,薄弱部位往往就是最后凝固的枝/胞晶间。

由于胞/枝晶间富集溶质,常形成Si、B以及碳化物脆性相,这些相为块状或网状,成为裂纹源。如果晶间富集有改变脆性相形状的合金元素,使块状或网状碳化物转变成球形的颗粒状,将使熔覆层的韧性和塑性得到改善,既让一部分应力得到缓解和释放,也可生成硬质相阻止应力集中,从而减小

熔覆层开裂的倾向。如果枝/胞晶间为韧性相组织,那么晶间脆化现象将极大改善。由于激光熔覆为快速凝固,通过成分的调整,在枝/胞晶间富集奥氏体稳定化元素,如Mn、Ni、Cu等,那么熔覆金属完全凝固后,获得塑韧性高的残余奥氏体是有可能的。

通过上述分析,采用过包晶的合金设计,熔覆层组织结构为:马氏体+残余奥氏体+原位生成颗粒增强相,沿晶间分布的相结构为韧性的残余奥氏体和颗粒增强相,合金系为Fe-C-Cr-Ni-Mo-W-V-Ti-Ce。

2 激光熔覆试验

试验设备为德国 TRUMPF 公司的 TCF15000 型 CO₂ 激光器,激光熔覆时采用旁轴同步送粉方式。熔覆材料为选择的纯金属粉末,经自配成分球磨混合的铁基合金粉末。试板材料选用 45 钢,其组成的质量分数为(%): 0.42~0.50C; 0.17~0.37Si; 0.50~0.80Mn; ≤0.035P; ≤0.035S; ≤0.25Cr; ≤0.25Ni, 余为 Fe。试样尺寸为 200 mm×120 mm×10 mm,经刨削加工、砂纸打磨、丙酮清洗吹干,然后进行熔覆试验。激光熔覆工艺参数为:激光功率 6 000 W,扫描速度 600 mm/min,离焦量为 65 mm,离焦后光斑直径为 5.0 mm,多道熔覆的搭接率为 40%。

由垂直激光扫描方向线切割熔覆层,制取的横截面作为金相试样,金相腐蚀剂为王水溶液(HNO₃:HCl=1:3)和 4%的硝酸酒精。金相试样的组织观察在 Neophyt21 光学显微镜和 S300 扫描电镜上进行,并用 S300 扫描电镜附带的能谱仪(EDS)进行不同区域和各相的成分分析。沿激光扫描方向,从熔覆层线切割 0.3 mm 的薄片,机械减薄至 0.08 mm 后,由电解双喷法制取透射电镜(TEM)试样,在 JEM-200CX 透射电子显微镜上进行相结构分析。物相分析在 MDI/JADE5 型 X 射线衍射仪(XRD)上进行,采用 CuK_α 靶(波长 λ=0.254 nm)。用 HXD-1000 型硬度计测出各点的显微硬度,测量的试验载荷为 1.0 kg,加载时间 50 s。

3 试验结果与分析

3.1 显微组织

图 2 为熔覆层的多道搭接宏观组织,可分为 3 个区域:合金熔覆区、合金与基体熔合区、基体的热影响区。熔覆层表面成形良好,熔覆层高度 1.0~1.5 mm,宽度 5.0~6.0 mm。

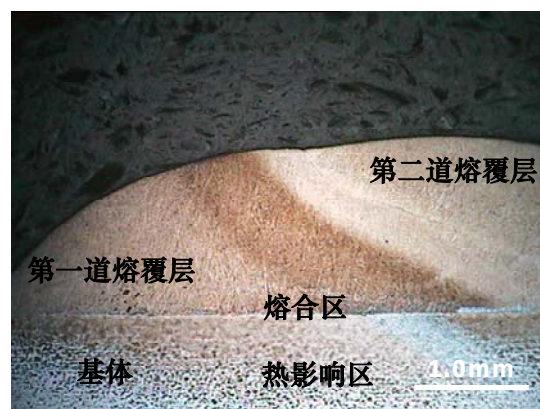


图 2 多道搭接熔覆层横截面

Fig.2 Cross-section image of multi-pass cladding layer

图 3 为合金粉末的熔覆层金相组织。图 3(a)为熔覆层接近表面的金相组织,图 3(b)为熔覆层中间的金相组织,可以看出熔覆层的显微组织为均匀细小的等轴枝晶组织,在晶内大量弥散分布着粒状颗粒相。图 3(c)为熔覆层和基体的结合区,可以看出熔覆层与基体已经形成了良好的冶金结合,其上部为合金冶金区,下部为基体热影响区。图 3(d)为图 3(a)的放大像 SEM 照片,可见在等轴树枝晶间有网状、大块的耐腐蚀光滑区。

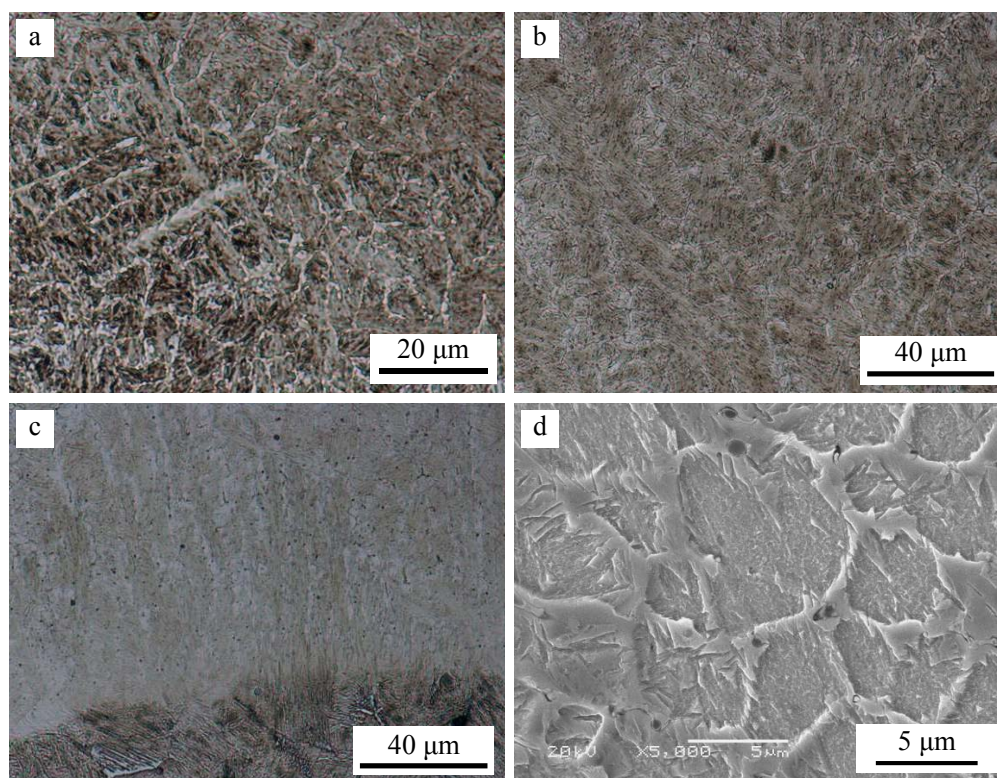
3.2 熔覆层的相结构

熔覆层的物相利用 X 射线衍射仪(XRD)进行分析,图 4 为试验的熔覆层 X 射线衍射结果。从图中可以看出熔覆层的相构成主要为马氏体、奥氏体、(Fe,Cr)₇C₃ 碳化物以及 FeCr、FeV 固溶体,其中马氏体的衍射峰强最高,即马氏体为含量最高相。从晶格常数偏差量来看,马氏体、γ-奥氏体具有高的合金元素固溶含量, M₇C₃ 碳化物以六方结构标定最为吻合。

相分析得知,熔覆合金中形成的碳化物主要是在凝固过程中直接从液相析出的初生碳化物(Fe,M)₇C₃。

3.3 枝晶间的残余奥氏体

为进一步鉴定熔覆层枝晶间的组成相,进行了 TEM 分析。图 5 为熔覆层枝晶间组织的透射电镜照片和对应的电子衍射花样照片。图 5(a)可看出,熔覆层为等轴枝晶组织,在晶内弥散分布大量的圆形颗粒相。图 5(b)为图 5(a)白色网状枝晶间组织的放大相。据图 5(b)内嵌的电子衍射花样标定结果,确认枝晶间未被腐蚀的组织主要为奥氏体,奥氏体有高密度位错和位错缠结,这是设计的合金粉末经激光熔化后快速凝固所得组织的典型特征。



(a) 熔覆层表层 (b) 熔覆层中部 (c) 熔覆层与基体熔合区 (d) 熔覆层表层 SEM 放大照片

图3 熔覆合金层的显微组织

Fig.3 Microstructure of laser cladding layer (a) in the surface of the cladding layer (b) in the center of the cladding layer (c) in the fusion zone between cladding layer and substrate (d) SEM magnification image of the surface cladding layer

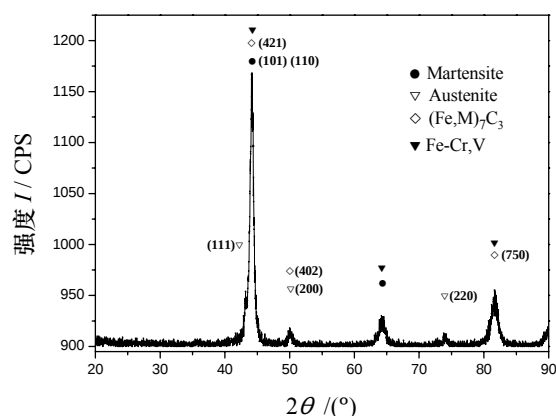


图4 激光熔覆涂层 X-衍射图谱

Fig.4 X-ray diffraction pattern of cladding layer

3.4 熔覆合金层的力学性能

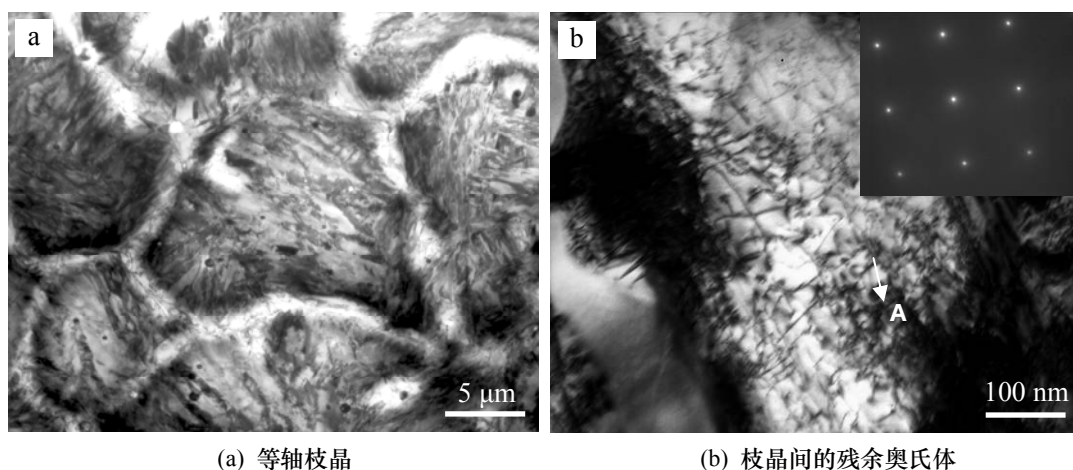
图6是激光熔覆涂层横剖面的显微硬度分布。显微硬度的测定规范为:从熔覆层边沿到基体沿熔覆层深度方向每隔0.25 mm取测量点。可以看出,所有熔覆层的硬度分布比较均匀。

图7是在100 N载荷、威海云清2#切削液浸泡湿摩擦条件下,熔覆合金层、9Cr2Mo钢淬硬层(62HRC)

的摩擦特性曲线。熔覆合金层、9Cr2Mo钢磨损损失重分别为0.0082 mg和0.091 mg,摩擦因数的平均值分别为0.066和0.080,从试验结果来看,熔覆合金层的耐磨性明显优于9Cr2Mo钢。

图8为激光熔覆层和9Cr2Mo钢湿摩擦(威海云清2#切削液)磨面的SEM照片。激光熔覆层的磨损形貌为浅犁沟划痕且犁沟较密,在磨痕表面镶嵌大量的颗粒增强相,如图8(a)所示。9Cr2Mo钢磨面表现为大块剥落层、犁沟形貌和部分粘着,剥落为表面材料成碎片脱落或者受反复应力作用而产生疲劳所致,在宏观上表现出磨损区粗糙,如图8(b)所示。上述磨损表面差别说明,激光熔覆层磨面损伤主要为磨粒磨损,9Cr2Mo的损伤主要为疲劳断裂、磨粒磨损和粘着撕裂。

在试验的条件下,磨损测试的结果表明:①激光熔覆层耐磨性能约是9Cr2Mo冷轧辊用钢的11倍;② 9Cr2Mo钢存在块状剥落的疲劳磨损,为疲劳条件下的脆性断裂,而熔覆层不存在疲劳剥落现象,仅为磨粒磨损。



(a) 等轴枝晶

(b) 枝晶间的残余奥氏体

图5 熔覆层的 TEM 照片

Fig.5 TEM micrographs of cladding layer (a) equiaxed dendritic (b) residual austenite in interdendritic

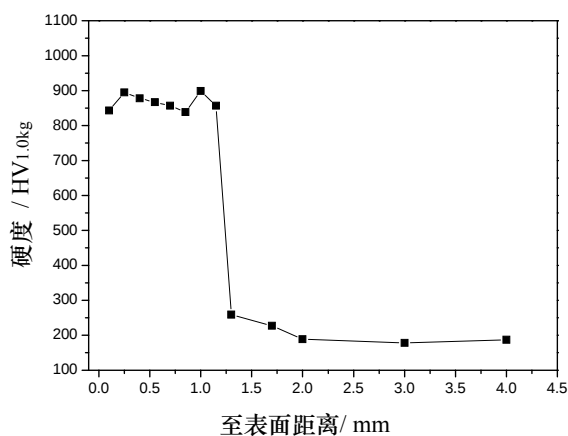


图6 熔覆层的硬度分布图

Fig.6 Hardness distribution of the cladding layer

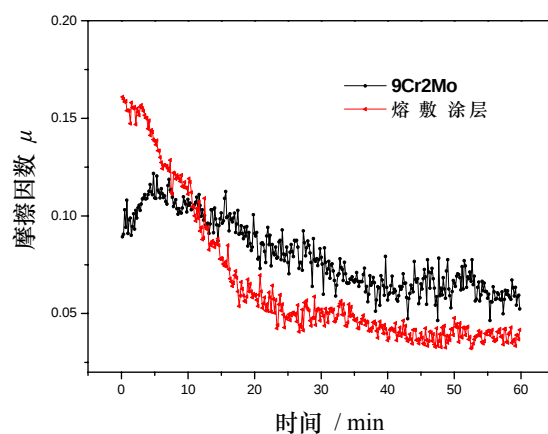
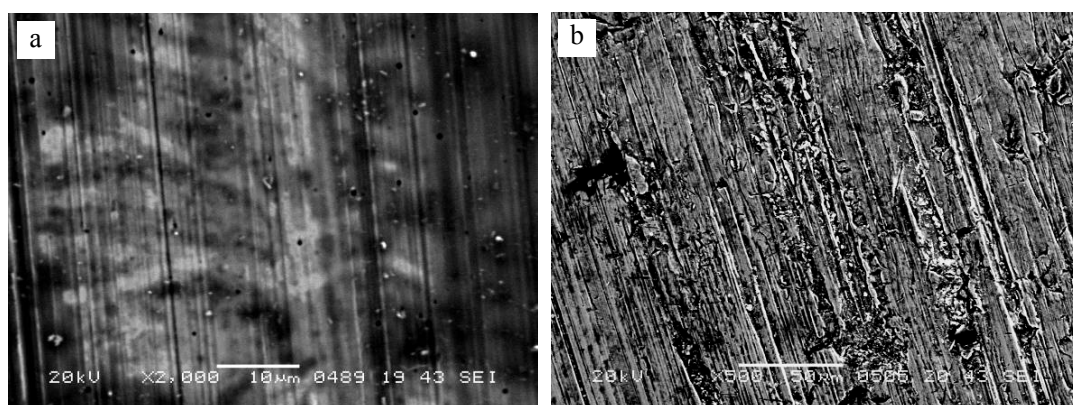


图7 熔覆合金层和9Cr2Mo 钢的摩擦因数曲线

Fig.7 Friction coefficient of cladding layer and steel 9Cr2Mo



(a) 熔覆层磨损表面

(b) 9Cr2Mo 冷轧辊钢磨损表面

图8 熔覆层和9Cr2Mo 冷轧辊钢的磨损形貌

Fig.8 SEM morphologies of the worn surfaces of (a) laser cladding layer and (b) steel 9Cr2Mo

图9为切割熔覆层的拉伸断口SEM照片。从图9(a)的断口宏观图片来看,熔覆层拉伸断口存在剪切唇,并且扩展区粗糙,表现为韧性断口。图9(b)

为图9(a)中扩展区(A)的放大像,可见撕裂韧窝、细小的韧窝被拉长。在晶粒边界形成长长的韧带,见图9(b)中的箭头所示。这种在晶粒边界形成的韧

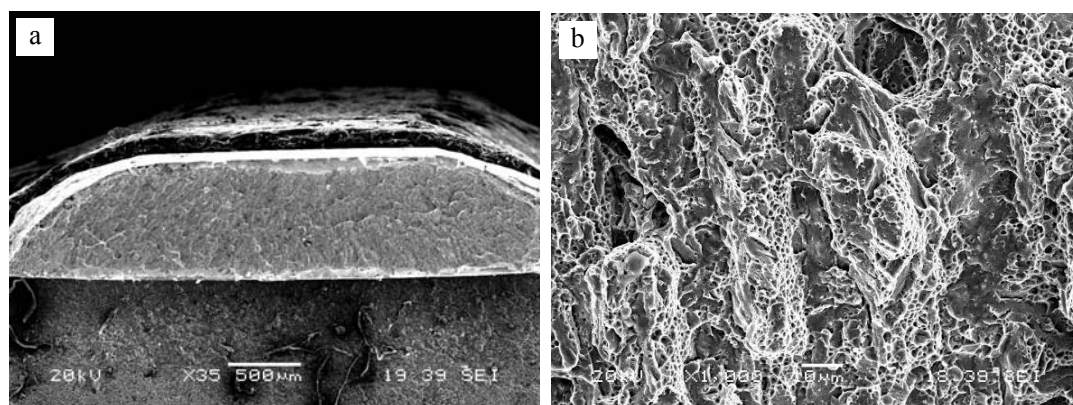


图9 熔覆层拉伸断口形貌 (a) 宏观形貌 (b) 扩展区

Fig.9 Fracture surface appearance of the tension specimen of cladding layer (a) macroscopic feature (b) radical zone

带,也说明由于晶界存在大片残余奥氏体,从而提高了熔覆层的韧性。

4 结 论

铁基激光熔覆涂层裂纹控制的组织设计思路是:设计激光熔覆涂层的相区间在过包晶相区,以防止凝固裂纹的产生;由马氏体、残余奥氏体和原位生成增强颗粒相构成,并在枝/胞晶间为网状残余奥氏体相,以避免熔覆后冷裂纹的出现。熔覆试验获得了多道搭接无裂纹的激光熔覆层,结果表明裂纹控制的组织设计思路是合理的。

通过对比试验,熔覆合金的硬度(65HRC)高于9Cr2Mo冷轧辊用钢(62HRC),磨损测试的结果表明:激光熔覆层耐磨性能明显优于9Cr2Mo冷轧辊用钢;9Cr2Mo钢存在块状剥落的疲劳磨损,为疲劳条件下的脆性断裂,而熔覆层不存在疲劳剥落现象,仅为磨粒磨损的犁沟。熔覆合金层的拉伸断口中,在枝/胞晶粒边界形成长长的韧带,进一步说明由于晶界存在大片残余奥氏体,从而提高了熔覆层的韧性。

参考文献:

- [1] Xu Peiquan, Tang Xinhua, Yao Shun, et al. Effect of Y_2O_3 addition on microstructure of Ni-based alloy Y_2O_3 /substrate laser clad [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 208(1-2): 549-555.
- [2] Dutta Majumdar J, Ramesh Chandra B, Nath A K, et al. Studies on compositionally graded silicon carbide dispersed composite surface on mild steel developed by laser surface cladding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 203(1-3): 505-512.
- [3] Li Mingxi, Zhang Shihong, Li Huisheng, et al. Effect of nano- CeO_2 on cobalt-based alloy laser coatings [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 202(1-3): 107-111.
- [4] Zhou Shengfeng, Huang Yongjun, Zeng Xiaoyan, et al. Microstructure characteristics of Ni-based WC composite coatings by laser induction hybrid rapid cladding [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 480(1-2): 564-572.
- [5] Wang X H, Zhang M, Liu X M, et al. Microstructure and wear properties of TiC/FeCrBSi surface composite coating prepared by laser cladding [J]. 2008, 202(15): 3600-3606.
- [6] Lusquiños F, Pou J, Quintero F, et al. Laser cladding of SiC/Si composite coating on Si-SiC ceramic substrates [J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(9): 1588-1593.
- [7] Zhu Weidong, Liu Qibin, Li Haitao, et al. A simulation model for the temperature field in bioceramic coating cladded by wide-band laser [J]. Materials & Design, 2007, 28(10): 2673-2677.
- [8] 余菊美, 卢 洵, 晁明举, 等. 铁基合金激光熔覆层组织分布及开裂敏感性研究 [J]. 应用激光, 2006, 26(3): 175-177.
- [9] 陈志坤, 刘 敏, 曾德长. 激光熔覆裂纹的产生原因及消除方法探究 [J]. 激光杂志, 2009, 30(1): 55-57.
- [10] 王慧萍. 关于激光熔覆层开裂问题的探讨 [J]. 热处理, 2008, 23(8): 24-27.

(下转第83页)