

45 钢表面激光熔覆 Fe901 合金的摩擦磨损性能

陈菊芳^{1,2*}, 李小平^{1,2}, 薛亚平¹

¹江苏理工学院材料工程学院, 江苏 常州 213001;

²江苏省高校先进材料设计与增材制造重点实验室, 江苏 常州 213001

摘要 在 45 钢表面制备了 Fe901 激光熔覆层,检测了熔覆层的组织、物相与硬度,采用干摩擦方式对激光熔覆层与 45 钢试样进行了摩擦磨损实验。结果表明:熔覆层组织均匀致密,组成相主要为马氏体和少量 CrFeB、Cr₇C₃ 金属间化合物;熔覆层的平均硬度为 718 HV,显著高于基体的硬度(269 HV);45 钢的磨损机制主要为磨粒磨损、疲劳剥落和氧化磨损,熔覆层的磨损机制主要为磨粒磨损;当加载载荷为 10,20,30 N 时,在干摩擦条件下,激光熔覆层的摩擦因数比 45 钢低,相对耐磨性分别为 45 钢的 4、18、20 倍,表明激光熔覆 Fe901 合金显著提高了 45 钢的耐磨性能。

关键词 激光技术;激光熔覆;Fe901 合金;摩擦磨损性能

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0502001

Friction and Wear Properties of Laser Cladding Fe901 Alloy Coating on 45 Steel Surface

Chen Jufang^{1,2*}, Li Xiaoping^{1,2}, Xue Yaping¹

¹Department of Materials Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou, Jiangsu 213001, China;

²Key Laboratory of Jiangsu University on Advanced Materials Design and Additive Manufacturing, Changzhou, Jiangsu 213001, China

Abstract The Fe901 alloy is coated on a 45 steel surface by laser cladding. The microstructure, phase compositions, and micro-hardness of the laser cladding coating are tested. The wear experiment of the laser cladding coating and the 45 steel samples are conducted using the dry sliding method. The results show that the laser cladding coating has a uniform and compact microstructure, and the phase compositions are primarily composed of martensitic phase and several inter-metallic compounds such as CrFeB and Cr₇C₃. The laser cladding coating shows an average micro-hardness of 718 HV, which is considerably higher than that of the substrate (269 HV). Abrasive wear, fatigue spalling, and oxidative wear are the main wear mechanisms of 45 steel. The wear mechanism of the laser cladding coating is mainly abrasive wear. Under the dry sliding condition and with the loads of 10, 20, and 30 N, the friction coefficient of the laser cladding coating is smaller than that of the 45 steel, and the relative wear resistance is 4, 18, and 20 times that of the 45 steel, respectively. Laser cladding of Fe901 alloys can considerably improve the wear resistance of 45 steel.

Key words laser technique; laser cladding; Fe901 alloy; friction and wear behavior

OCIS codes 140.3510; 160.3900

1 引 言

45 钢是工程中广泛应用的中碳优质结构钢,经调质处理后常用于制造连杆、齿轮、轴等强度要求较

高的传动零件。这些零件常工作于恶劣的环境下,表面磨损严重,为延长其使用寿命,通常需要对其表面进行强化处理^[1-2]。激光熔覆技术利用高能激光束使工件表面薄层与覆盖在工件表面的高性能熔覆

收稿日期: 2018-12-04; 修回日期: 2018-12-06; 录用日期: 2019-01-23

基金项目: 江苏省高校自然科学研究重大项目(16KJA460002)、江苏省 3D 打印装备及应用技术重点实验室开放基金(2018KFKT12)、常州市装备再制造工程重点实验室开放基金(CRM2018A01)

* E-mail: jfchen@jsut.edu.cn

材料快速熔化,激光束移开后,激光熔池迅速凝固,从而形成性能优异的熔覆层。近年来,随着高功率激光器的研发与推广,激光熔覆因具有工件变形小,涂层与基体结合强度高等优势而逐渐成为材料表面强化与废旧零件再制造的应用热点之一^[3-7]。

目前,激光熔覆应用最多的材料有镍基、钴基和铁基三种合金^[3-5]。与另外两种合金相比,铁基合金与钢材基体成分更相近,涂层与基体的结合强度更高。此外,铁基合金的价格较低,因此,开展激光熔覆铁基合金的研究更具有实际意义^[5]。丰慧等^[6]在受损 45 钢曲轴颈表面激光熔覆了铁基自熔性粉末,实现了曲轴的修复再制造;韩玉勇等^[7]采用 YAG 激光在受损的 45 钢主轴上熔覆了 FeCr 合金粉末,将熔覆层磨削加工至设计尺寸后装机服役,与受损 45 钢主轴服役相同时间后发现,激光熔覆主轴的磨损量小于原主轴。

Fe901 合金是在 1Cr13 不锈钢中添加适量 B、Si 和 Mo 元素而形成的。1Cr13 属于半马氏体型不锈钢,其主要组成物相是马氏体,同时含有少量铁素体^[8]。合金元素 B 和 Si 具有很强的脱氧和造渣能力,添加适量 B 和 Si 可降低熔覆合金的熔点,改善合金熔体的流动性,使熔覆涂层具有良好的成形质量^[9]。将合金元素 Mo 加入不锈钢中,可增强钢的钝化作用,从而提高钢的耐蚀性能^[10]。因此,在基体表面激光熔覆 Fe901 合金后可以获得耐磨、耐蚀性能良好的熔覆涂层。闫晓玲等^[11]采用 YAG 激光在 45 钢表面熔覆了 Fe901 合金,开展了熔覆缺陷机理的研究,通过优化工艺参数获得了组织致密的熔覆层;董世运等^[12]采用 YAG 激光在 18Cr2Ni4WA 渗碳钢表面熔覆 Fe90 合金后发现,熔覆层组织致密,主要物相为马氏体,并存在少量金属间化合物,熔覆层的硬度远高于基体。虽然,关于激光熔覆 Fe901 合金的研究已有一些报道,但激光熔覆 Fe901 涂层的摩擦磨损性能还有待进一步开展深入研究。因此,本课题组采用 IPG YLS-4000 光纤激光器在调质 45 钢表面熔覆 Fe901 合金,研究了熔覆层的组织、物相、硬度与摩擦磨损性能,并对材料强化及磨损机制进行了探讨,为激光熔覆铁基耐磨涂层的推广应用提供理论与数据基础。

2 实验材料与方法

激光熔覆实验的基体材料为调质 45 钢,其显微组织是回火索氏体,扫描电镜(SEM)形貌如图 1 所示,细小的渗碳体颗粒分布在铁素体基体上。激光

熔覆采用的 Fe901 合金粉末形貌见图 2,粉末颗粒大多呈球形,颗粒直径为 40~110 μm,粉末具有良好的流动性,粉末的化学成分见表 1。

激光熔覆 45 钢试样采用线切割加工成 60 mm×60 mm×5 mm 的试块,试样表面经磨平、丙酮除油、乙醇清洗、暖风吹干后备用。熔覆粉末在 110 °C 烘干 2 h,去除粉末中的水分后备用。激光熔覆采用 IPG YLS-4000 光纤激光器,激光波长为 1070 nm,光斑直径为 4 mm。激光熔覆采用实验室优化后的工艺参数,激光功率为 2000 W,扫描速率为 600 mm/min,扫描道间的搭接率为 30%。熔覆粉末采用 TWIN PF 2/2-MF 型送粉器以同轴送粉的方式同步送入激光熔池,送粉速率为 42 g/min,采用氩气送粉,送粉气流量为 3 L/min。熔覆时采用氩气对激光熔池进行保护,以减小材料在熔覆过程中的氧化,保护气流量为 16 L/min。

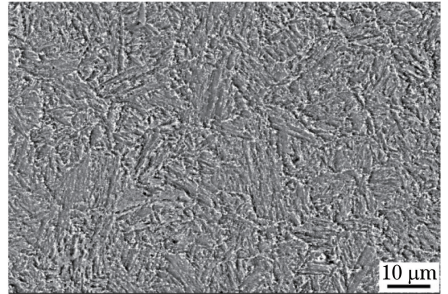


图 1 调质 45 钢的 SEM 形貌

Fig. 1 SEM image of quenched and tempered 45 steel

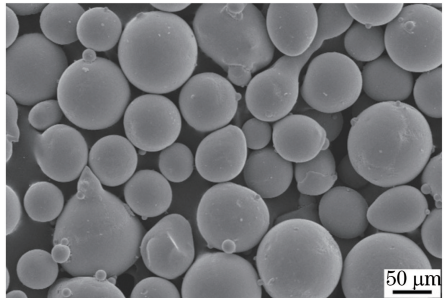


图 2 Fe901 粉末的 SEM 图

Fig. 2 SEM image of Fe901 powder

表 1 熔覆粉末 Fe901 的化学成分

Element	Cr	B	Si	Mo	C	Fe
Mass fraction / %	13.0	1.6	1.2	0.8	0.15	Bal.

单道激光熔覆实验后,沿横截面将试样切开,将截面磨平、抛光、腐蚀后,采用 SIGMA 500 型扫描电镜对熔覆层组织进行观察与分析。采用 HVS-1000A 型显微硬度计由表及里测试熔覆层的硬度,

每隔 50 μm 打一个压痕,加载载荷为 1.96 N,保载时间为 10 s。为减小测量误差,每个压痕测试 3 次,取其算术平均值作为最终的硬度值。

激光熔覆实验后,沿横截面将试样切成 15 mm \times 15 mm \times 5 mm 的样块,将样块表面磨平、清洗后,采用 XPERT POWDER 型 X 射线衍射仪分析熔覆层的物相。采用 MDW-02 型磨损试验机测试熔覆层的摩擦磨损性能。磨损实验采用球-平面往复干摩擦方式,在室温(13 $^{\circ}\text{C}$)和大气环境下进行,环境的相对湿度为 76%。对磨偶件采用直径为 6 mm 的 Si_3N_4 陶瓷球,法向加载载荷分别为 10, 20, 30 N,往复行程为 6 mm,往复频率 500 r/min,磨损时间为 30 min。为保证实验具有可重复性,每种条件下重复进行磨损实验 3 次。磨损实验过程中,采用计算机实时监测摩擦因数随时间的变化。磨损实验时收集磨屑,然后采用扫描电镜观察磨屑及样块磨损表面的形貌。磨损实验前后,将每个样块在乙醇中超声清洗 10 min,再用暖风吹干,然后用精度为 0.01 mg 的电子天平称量样块的质量,从而计算磨损失重。

3 激光熔覆层的组织、成分与硬度

3.1 激光熔覆层的组织特征

激光熔覆层的组织形貌见图 3,可见:熔覆层成形良好,没有裂纹、气孔等缺陷。由图 3(a)的横截面宏观形貌可知,熔覆层由表及里分为熔覆区(CZ)、基体熔化区(MZ)、基体热影响区(HAZ)和基体区(SZ)。

由图 3(b)~(d)可见,激光熔池内由表及里依次为等轴晶、树枝晶、胞状晶和平面晶组织。由凝固理论知,结晶参数 G/R (温度梯度/凝固速率)决定着凝固组织的形貌^[13]。在激光熔覆过程中,处于高温的激光熔池与大块温度较低的基体金属接触,熔池底部冷却速度很快,液相一侧形成了极大的正温度梯度,固/液界面向前推进的速度很慢, G/R 值很大,晶体的生长以平面状向前推移,由图 3(d)可见,熔池底部形成约 7 μm 厚的平面晶组织。平面晶的形成也是熔覆粉末与基体材料在激光束作用下相互扩散的结果,说明熔覆层与基体间形成了良好的冶金结合^[14]。随着结晶的进行,熔池温度降低,结晶速度增加,而固/液界面与刚凝固的金属接触,温度梯度下降, G/R 值有所减小,导致平面晶向胞状晶转变。由图 3(d)可见,平面晶上面是胞状晶,且胞状晶基本垂直于激光熔池的界面生长,这是因为在

熔池底部,金属基体是散热的主要通道,晶体在垂直于界面方向的生长速度最快,因此靠近界面的晶体具有明显的方向性。随着结晶的继续, G/R 值进一步减小,晶体向树枝晶转变,且晶体组织进一步细化,由图 3(c)可见,熔覆层中部是树枝晶组织,由细密的树枝晶和枝晶间的共晶组成。熔覆层的顶部具有多通道散热方式,既可以通过基体一侧散热,又可以通过表面散热, G/R 达到最小值,同时成分过冷较大,金属熔体内形成了大量的晶核,促使形成等轴晶^[15]。由图 3(b)可见,表层组织主要由致密细小的等轴晶组成。

激光熔池下方是基体热影响区,由图 3(d)可见,热影响区主要由板条状马氏体组成。熔覆过程中,基体热影响区与激光熔池相邻,该区域的材料虽然没有熔化,但已达到奥氏体转变温度,材料吸收激光能量后转化为奥氏体,激光束移开后,在大块基体金属的急冷作用下转化为硬度较高的马氏体组织。由图 3(d)还可以看出,基体热影响区的马氏体组织明显比激光熔池内的组织粗大,激光熔覆过程中的快速加热与急速凝固使熔覆层组织较基体显著细化。

3.2 激光熔覆层的物相分析

图 4 为激光熔覆层的 X 射线衍射(XRD)图谱,可见,激光熔覆层主要由 $\alpha\text{-Fe}$ 马氏体相、少量 CrFeB 和 Cr_7C_3 硬质相组成。由于熔覆粉末中的 Cr 含量较高,熔覆层的淬透性很好,再加上激光熔覆过程中,激光熔池的冷却速度很快,促使熔覆层在凝固过程中向马氏体转变,因此熔覆层内主要为 $\alpha\text{-Fe}$ 马氏体^[8,12]。

3.3 硬度分析

激光熔覆层由表及里的显微硬度分布曲线见图 5,结合图 3 的组织形貌可知,上部熔覆区(CZ 区)的硬度值最高,且波动较小,平均显微硬度值高达 718 HV,远高于基体的硬度(269 HV)。由图 3(b)与图 3(c)的微观组织形貌可知,该区域的组织均匀致密,晶粒细小,根据图 4 所示的熔覆层的物相分析可知,该区域生成了高硬度的 $\alpha\text{-Fe}$ 马氏体和 CrFeB 、 Cr_7C_3 等硬质相。由于激光熔池的冷却速度很大,激光熔覆层内固溶了较多的合金元素。在细晶强化、固溶强化、马氏体强化、 CrFeB 与 Cr_7C_3 硬质相弥散强化等强化机制的综合作用下,熔覆区的强度与硬度显著提高。由图 5 还可以看出,基体熔化区(MZ 区)的硬度比熔覆区有所降低,激光熔池底部的硬度则降低得更多。这一方面是因为熔化的基体对熔覆层的局部具有稀释作用,从而导致该区

域硬度降低^[4],另一方面是因为激光熔池底部晶粒的生长速度较慢,组织相对较粗,如图 3(d)所示,硬度值相应较低。进一步观察图 5 可知,基体热影响

区(HAZ 区)的显微硬度值明显高于基体区(SZ 区),这是因为在该区域生成了硬度较高的板条状马氏体组织,如图 3(d)所示。

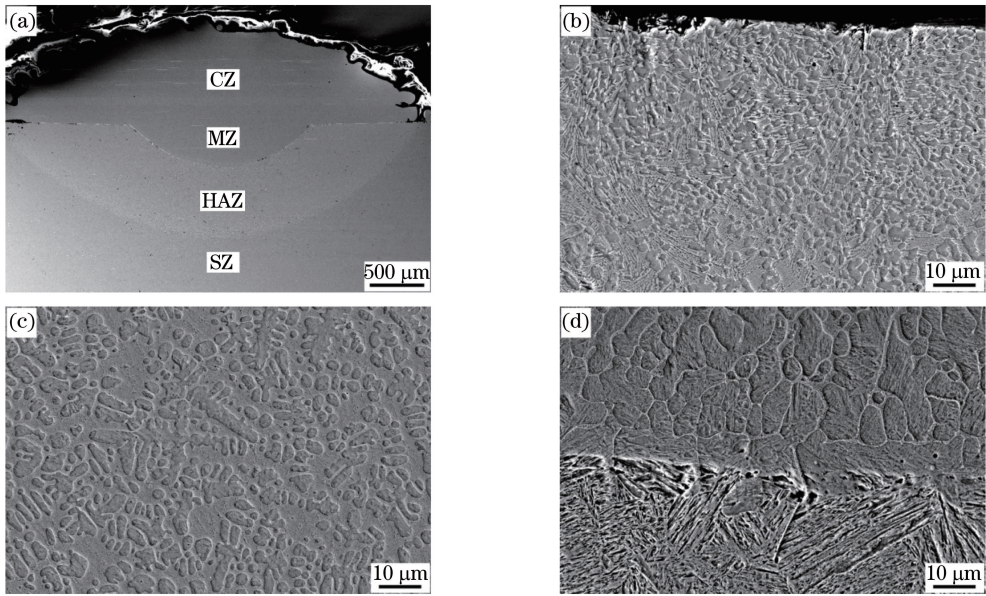


图 3 激光熔覆层的微观组织。(a)全貌;(b)表层;(c)中部;(d)熔池底部

Fig. 3 Microstructures of laser cladding coating. (a) Full view; (b) top region; (c) middle region; (d) bottom region of molten pool

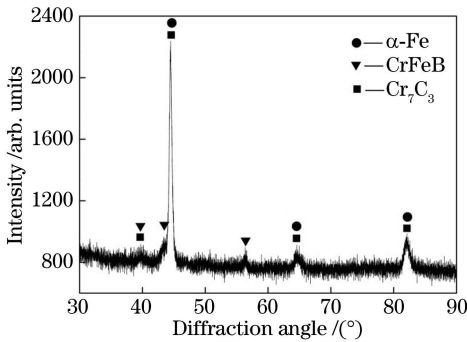


图 4 激光熔覆层 XRD 图谱

Fig. 4 XRD pattern of laser cladding coating

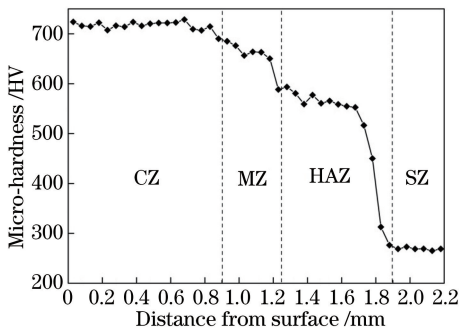


图 5 激光熔覆层沿深度方向的硬度分布曲线

Fig. 5 Micro-hardness distribution of laser cladding coating in depth direction

4 激光熔覆层的摩擦磨损特性

4.1 磨损表面与磨屑形貌

为测试激光熔覆层的摩擦磨损特性,将激光熔覆试样与调质 45 钢基体试样进行磨损实验,加载载荷为 10, 20, 30 N。图 6 为不同加载下,调质 45 钢基体试样磨损表面与磨屑的 SEM 形貌,可见:在不同的载荷作用下,磨损表面均出现了平行于磨削方向的犁沟,并且磨损表面均出现了裂纹;随载荷增加,裂纹的尺寸与密度均有所增加。由图 6 中的磨屑形貌可见,不同载荷作用下的磨屑均呈块状或絮状,且块状磨屑的尺寸随着载荷的增加而有所增大。

图 7 为不同载荷作用下,激光熔覆层磨损表面与磨屑的 SEM 形貌,可见,不同载荷作用下的磨损表面、磨屑形貌没有明显差异,磨损表面主要是平行于磨削方向的犁沟。对比图 6 与图 7 可见,与调质 45 钢相比,激光熔覆层磨损表面的犁沟明显较细且较浅,说明激光熔覆表面的耐磨性较好。进一步观察图 7 可见,在不同载荷作用下,磨损表面均未出现裂纹。观察图 7 中的磨屑形貌后发现,磨屑由细小的絮状与薄片状磨屑组成。

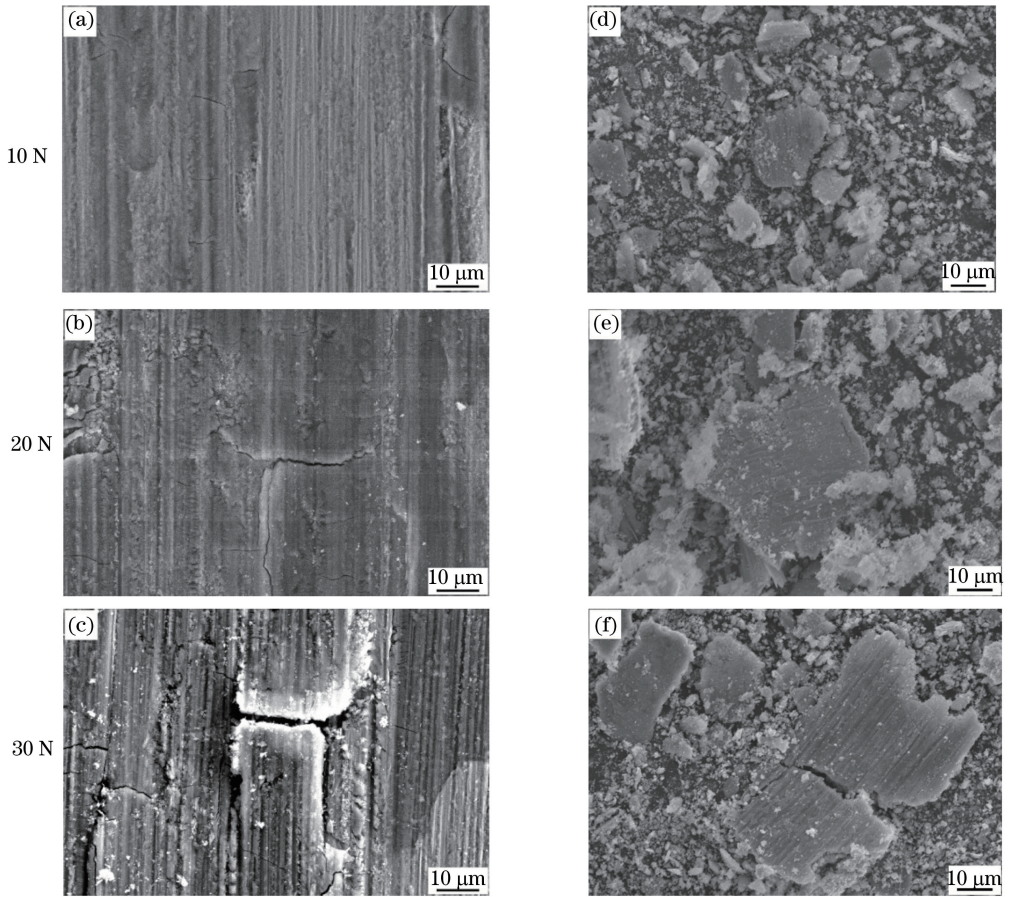


图 6 45 钢磨损表面与磨屑的 SEM 图。(a)(b)(c) 磨损表面；(d)(e)(f) 磨屑

Fig. 6 SEM images of worn surface of 45 steel and wear debris. (a)(b)(c) Worn surface; (d)(e)(f) wear debris

4.2 磨损表面氧元素的含量

在磨损过程中,肉眼可见磨屑呈棕红或黑色,说明磨损过程存在氧化磨损机制。采用扫描电镜附带的 OXFORD 型能谱仪(EDS)对磨损表面的氧元素含量进行检测,结果见表 2。由表 2 可知,磨损表面发生了不同程度的氧化,加载 10,20,30 N 载荷时,调质 45 钢磨损表面氧元素的质量分数分别为 13.4%、18.2%、21.8%,激光熔覆表面氧元素的质量分数分别为 3.1%、3.3%、6.0%。可见,随着载荷增加,磨损表面的氧元素含量均有所增加,并且调质 45 钢磨损表面的氧化程度明显高于激光熔覆表面。

表 2 磨损表面的氧含量(质量分数,%)

Table 2 Oxygen content of worn surface (mass fraction, %)

Load /N	10	20	30
45 steel	13.4	18.2	21.8
Coating	3.1	3.3	6.0

4.3 摩擦因数

在磨损过程中,采用计算机实时监测摩擦因数随时间的变化,图 8、9 分别为 45 钢与激光熔覆试样摩擦因数随时间的变化曲线。可见,摩擦因数曲线

均可分为两个阶段:初始磨合阶段和稳定磨损阶段。在初始磨合阶段,摩擦副表面的微凸体之间接触,实际接触面积小,接触应力大,表面微凸体被剧烈磨损,摩擦因数迅速升高。经过一段时间的磨合,表面的微凸体被逐渐磨平,摩擦副间的接触状态得以改善而进入稳定磨损阶段,摩擦因数趋于稳定^[16],300 s 后各摩擦因数曲线均进入了稳定磨损阶段。计算 300 s 后摩擦因数的平均值,结果在图 8~9 中给出。载荷为 10,20,30 N 时,稳定磨损阶段调质 45 钢的平均摩擦因数分别为 0.694、0.596 和 0.547,而激光熔覆层的平均摩擦因数分别为 0.562、0.528 和 0.520。可见:随着载荷增加,摩擦因数均有所降低;载荷为 10,20,30 N 时,激光熔覆层的平均摩擦因数比 45 钢分别降低 19.0%、11.4% 和 4.9%,说明激光熔覆层具有较好的减摩效果。

4.4 磨损失重

将磨损实验前后的样品清洗吹干,然后采用精度为 0.01 mg 的电子天平称其质量。为保证精度,取 3 次称量的平均值作为磨损失重,结果如图 10 所示。加载载荷分别 10,20,30 N 时,45 钢基体的磨

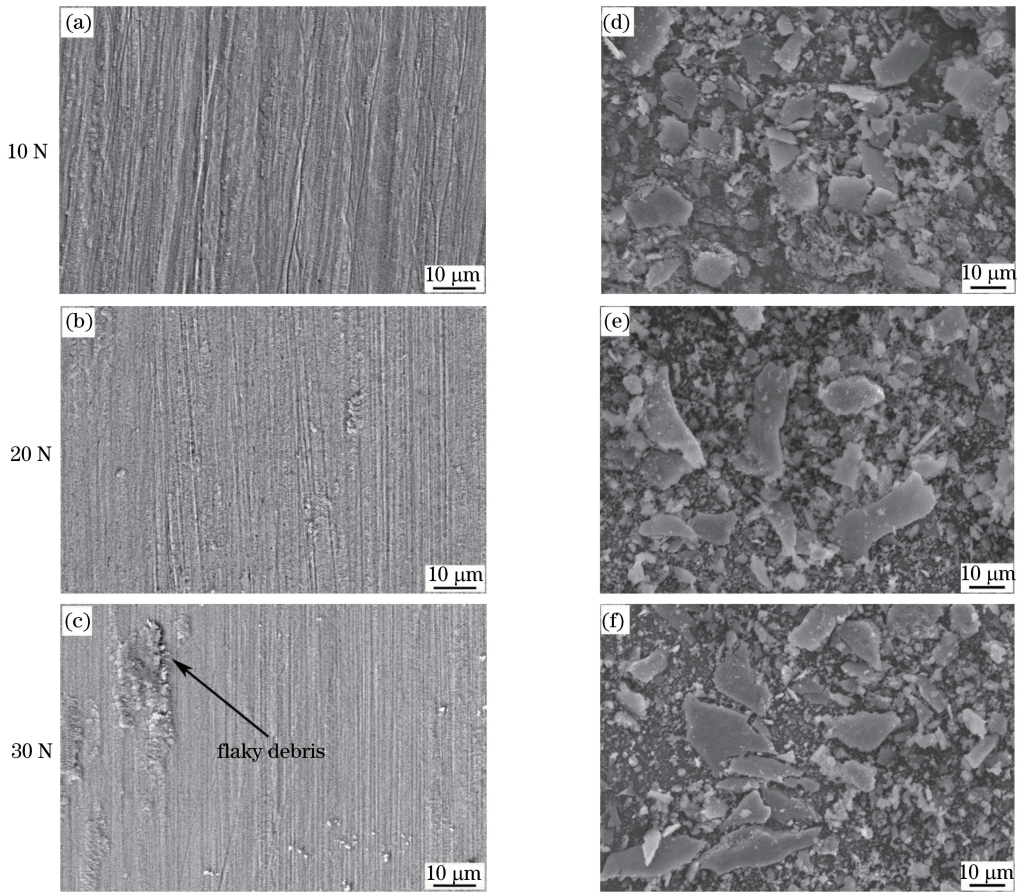


图 7 激光熔覆层磨损表面与磨屑的 SEM 图。(a)(b)(c)磨损表面;(d)(e)(f)磨屑

Fig. 7 SEM images of worn surface of laser cladding coating and wear debris.

(a)(b)(c) Worn surface; (d)(e)(f) wear debris

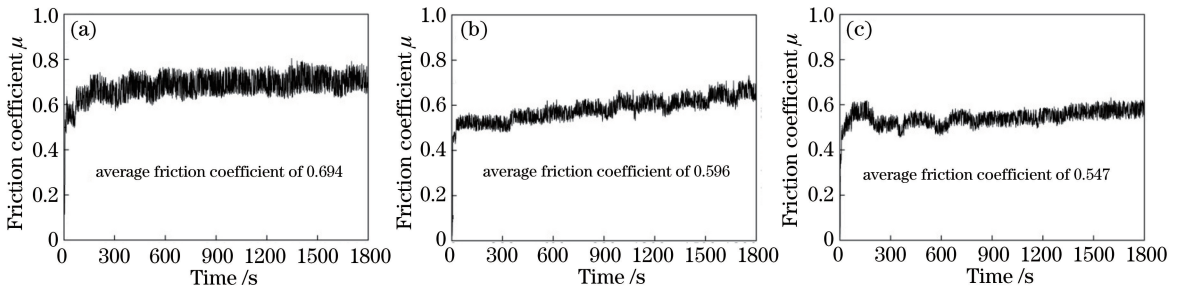


图 8 不同载荷下 45 钢的摩擦因数。(a) 10 N; (b) 20 N; (c) 30 N

Fig. 8 Friction coefficient of 45 steel under different loads. (a) 10 N; (b) 20 N; (c) 30 N

损失重分别为 0.273, 1.603, 2.865 mg, 而激光熔覆涂层的磨损失重分别为 0.068, 0.088, 0.145 mg。可见, 45 钢表面熔覆 Fe901 涂层后可使材料的耐磨性能得到大幅提升。

4.5 磨损机制分析

45 钢表面的熔覆组织均匀致密, 组成相主要为高硬度的马氏体和少量 CrFeB、Cr₇C₃ 金属间化合物硬质相, 熔覆层的平均硬度为 718 HV, 显著高于基体的硬度(269 HV)。对调质 45 钢与激光熔覆层分别

进行干摩擦磨损实验, 加载载荷分别 10, 20, 30 N, 45 钢与激光熔覆层表面均出现了平行于磨削方向的犁沟(见图 6~7), 说明均存在磨粒磨损机制。犁沟的形成是由于磨料(包括高硬度磨球上的凸峰与残留在接触面上的磨屑)在法向载荷的作用下被压入摩擦表面, 在往复滑动过程中, 对试样表面进行剪切、犁皱和切削, 从而在摩擦表面产生槽状磨痕^[17]。与调质 45 钢相比, 激光熔覆表面的犁沟明显较细且较浅, 说明激光熔覆表面的耐磨性较好, 这主要是由

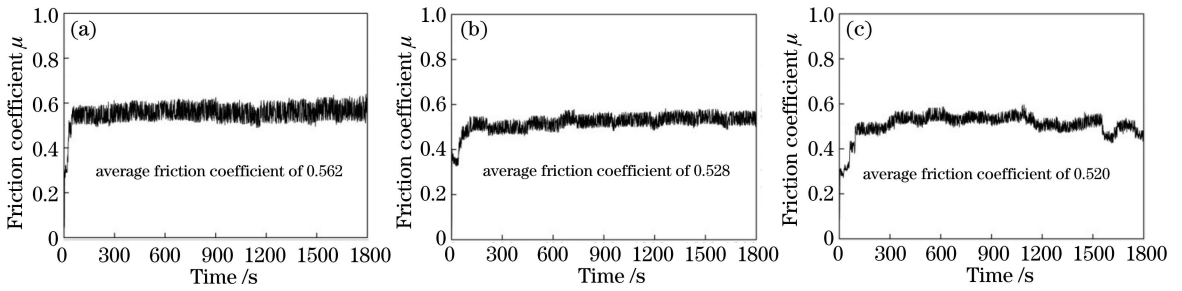


图 9 不同载荷下激光熔覆层的摩擦因数。(a) 10 N; (b) 20 N; (c) 30 N

Fig. 9 Friction coefficient of laser cladding coating under different loads. (a) 10 N; (b) 20 N; (c) 30 N

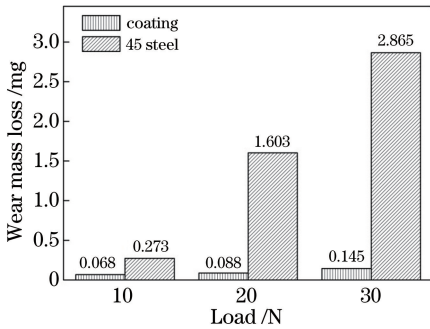


图 10 不同载荷下激光熔覆层与 45 钢表面的磨损失重
Fig. 10 Wear mass losses of laser cladding coating and 45 steel under different loads

于激光熔覆层的强度、硬度较高,磨球上的凸峰与残留在接触面上的磨屑在法向载荷作用下被压入摩擦表面的深度较浅。由图 6 可见,在不同的载荷下,45 钢磨损表面均出现了裂纹,裂纹的尺寸与密度均随着载荷的增加而增加。这主要是因为是在摩擦过程中,对磨球的循环接触应力引起了摩擦表面微裂纹的萌生与扩展,最终裂纹连在一起,表层材料因疲劳而剥落,因此 45 钢表面存在疲劳剥落磨损机制^[18]。由图 6 中的 45 钢磨屑形貌可见,磨屑呈块状或絮状。犁削作用下材料产生了尺寸很小的絮状磨屑^[19],疲劳剥落形成的磨屑主要呈块状,且块状磨屑的尺寸随着法向载荷的增加而有所增大。由图 7 可见,在不同的载荷下,激光熔覆层的磨损表面均未出现疲劳裂纹,这主要是由于激光熔覆层的强度、硬度较高,有效抵抗了疲劳裂纹的萌生与扩展。观察图 7 中的磨屑形貌可知,磨屑由细小的絮状与薄片状磨屑组成。已有的研究表明,犁削作用下材料产生了尺寸很小的絮状磨屑,薄片状磨屑主要是絮状磨屑在摩擦过程中被碾压于摩擦材料表面后剥落形成的^[19],在图 7(c)中可见残留在磨损表面的薄片状磨屑。

磨损表面含氧量的检测结果表明,磨损表面发生了不同程度的氧化,随着载荷增大,磨损表面的氧

元素含量均有所增加,且调质 45 钢磨损表面的氧化程度明显高于激光熔覆表面。在磨损过程中,摩擦热的积累促使暴露在空气中的新鲜摩擦表面与空气中的氧结合,使得摩擦表面出现氧化磨损。随着载荷增加,摩擦热与新鲜表面接触的面积增加,增大了摩擦表面与氧结合的概率,导致磨损表面的氧含量有所增加。激光熔覆合金中 Cr 元素的含量较高(质量分数为 13%),根据已有的研究可知,当钢中 Cr 元素的质量分数大于 12% 时,在钢表面形成的 Cr₂O₃ 薄膜致密稳定,可以抑制表面与氧元素的结合,因此激光熔覆层磨损表面的氧含量较低^[10]。

在磨损过程中,采用计算机实时监测摩擦因数随时间的变化,结果表明,在稳定磨损阶段,随着载荷增大,45 钢与激光熔覆层的摩擦因数均有所下降。摩擦因数的降低一方面是由于随着载荷增大,磨损面间的微凸体发生弹塑性变形程度增加,使得实际的接触面积增大,接触应力减小,从而导致摩擦因数略有下降;另一方面是由于在磨损过程中,表层与亚表层材料不断地受到往复挤压而发生加工硬化,随着载荷增大,材料发生加工硬化的程度升高,对磨偶件间的黏合作用减弱,导致摩擦因数降低^[20]。对摩擦因数平均值进行分析后可知,在稳定磨损阶段,当载荷分别为 10, 20, 30 N 时,激光熔覆层的平均摩擦因数分别比 45 钢降低了 19.0%、11.4% 和 4.9%,可见,激光熔覆层具有较好的减摩效果。分析认为,这主要是由于激光熔覆层的强度、硬度较高,减小了磨球上的凸峰与残留在接触面上的磨屑嵌入摩擦表面的深度,从而降低了犁削时的摩擦阻力,导致激光熔覆层的摩擦因数低于 45 钢基体^[17]。

加载载荷分别为 10, 20, 30 N 时,激光熔覆层的相对耐磨性分别是 45 钢的 4、18、20 倍,可见,45 钢表面熔覆 Fe901 涂层后耐磨性能得到了大幅提升。分析认为,这一方面是由于激光熔覆层的硬度远高

于 45 钢基体,根据已有的研究可知,材料的硬度越高,抵抗磨粒磨损的能力就越强^[17];另一方面是由于激光熔覆层的强度、硬度较高,有效抵抗了疲劳裂纹的萌生与扩展,未发生严重的疲劳磨损。

5 结 论

采用 IPG YLS-4000 光纤激光器,利用同步送粉激光熔覆技术在调质 45 钢表面制备了 Fe901 激光熔覆层,熔覆层内没有裂纹、气孔等缺陷,熔覆层与基体形成了良好的冶金结合。熔覆组织均匀致密,主要由细小的枝晶与枝晶间的共晶组成。熔覆层的平均硬度为 718 HV,显著高于基体的硬度(269 HV)。熔覆层的主要强化机制有细晶强化、固溶强化、马氏体强化和 CrFeB、Cr₇C₃ 等硬质相的弥散强化。磨损实验结果表明:熔覆层的磨损机制主要为磨粒磨损;激光熔覆层内 Cr 元素含量的增加提高了熔覆层的抗氧化能力;激光熔覆层强度、硬度的提高,有效抵抗了疲劳裂纹的萌生与扩展,减小了磨球上的凸峰与残留在接触面上的磨屑嵌入摩擦表面的深度,降低了犁削时的摩擦阻力,从而使得耐磨性显著提高。

参 考 文 献

- [1] Wei D Q, Liu K, Wang R. Research on the microstructure and hardness of transformation hardening of 45 steel during electron beam scanning [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(2): 127-132.
魏德强,刘科,王荣. 45 钢电子束扫描相变硬化组织和硬度的研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(2): 127-132.
- [2] Cai W, Meng F N, Gao X Y, *et al.* Effect of QPQ nitriding time on wear and corrosion behavior of 45 carbon steel[J]. Applied Surface Science, 2012, 261: 411-414.
- [3] Wu G L, Ren F C, Yao J H, *et al.* Abrasion resistance mechanism of new Co-based alloy by diode laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0602006.
吴国龙,任方成,姚建华,等. 半导体激光熔覆新型 Co 基合金耐擦伤性机制[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0602006.
- [4] Hemmati I, Ocelik V, deHosson J T M. Dilution effects in laser cladding of Ni-Cr-B-Si-C hardfacing alloys[J]. Materials Letters, 2012, 84: 69-72.
- [5] Lu Y Z, Huang G K, Wang Y Z, *et al.* Crack-free Fe-based amorphous coating synthesized by laser

cladding[J]. Materials Letters, 2018, 210: 46-50.

- [6] Feng H, Li J F, Sun J. Study on remanufacturing repair of damaged crank shaft journal surface by laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(8): 0803003.
封慧,李剑峰,孙杰. 曲轴轴颈损伤表面的激光熔覆再制造修复[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0803003.
- [7] Han Y Y, Lu J J, Li J F, *et al.* Lathe spindle remanufacturing based on laser cladding technology [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(6): 147-153.
韩玉勇,鲁俊杰,李剑峰,等. 基于激光熔覆的车床主轴再制造[J]. 中国表面工程, 2015, 28(6): 147-153.
- [8] Liu H L, Dang S E, Liu J S. Effect of quenching temperature on ferrite content of 1Cr13 martensitic stainless steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(8): 33-36.
刘海龙,党淑娥,刘建生. 淬火温度对 1Cr13 马氏体不锈钢中铁素体含量的影响[J]. 金属热处理, 2016, 41(8): 33-36.
- [9] Xu H F, Xiao J K, Zhang G, *et al.* Progress of thermal sprayed NiCrBSi based wear-resistant coatings[J]. Surface Technology, 2016, 45(2): 109-117, 174.
徐海峰,肖金坤,张嘎,等. 热喷涂 NiCrBSi 基耐磨涂层的研究进展[J]. 表面技术, 2016, 45(2): 109-117, 174.
- [10] Zhang W H. Stainless steel and its heat treatment [M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2010.
张文华. 不锈钢及其热处理[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2010.
- [11] Yan X L, Dong S Y, Xu B S, *et al.* Analysis of microstructure distribution and defect generation mechanism of the laser cladding layer with Fe901 alloy powder [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2013(12): 115-118.
闫晓玲,董世运,徐滨士,等. Fe901 合金粉末激光熔覆层组织分布与缺陷产生机理分析[J]. 制造技术与机床, 2013(12): 115-118.
- [12] Dong S Y, Yan S X, Xu B S, *et al.* Processing optimization and properties of laser cladding Fe90 coating[J]. Functional Material, 2011, 42(S1): 15-18.
董世运,闫世兴,徐滨士,等. Fe90 合金激光熔覆工艺优化及性能研究[J]. 功能材料, 2011, 42(S1): 15-18.
- [13] Hemmati I, Ocelik V, de Hosson J T M. Microstructural characterization of AISI 431 martensitic stainless steel laser-deposited coatings

- [J]. Journal of Materials Science, 2011, 46(10): 3405-3414.
- [14] Wang H Y, Cui C Y, Zhou J. Microstructure and properties of cobalt-based alloy coating on tool steel surface prepared by laser cladding[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2010, 40(4): 1000-1004.
王红颖, 崔承云, 周杰. 工具钢表面激光熔覆 Co 基合金涂层的组织及性能[J]. 吉林大学学报(工学版), 2010, 40(4): 1000-1004.
- [15] Ren C, Li Z G, Shu D, *et al.* Microstructure and water erosion resistance property of stellite6 coating by laser cladding on 17-4PH stainless steel surface [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0402010.
任超, 李铸国, 疏达, 等. 17-4PH 不锈钢表面激光熔覆 Stellite6 涂层组织及耐水蚀性能[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0402010.
- [16] Leiro A, Kankanala A, Vuorinen E, *et al.* Tribological behaviour of carbide-free bainitic steel under dry rolling/sliding conditions[J]. Wear, 2011, 273(1): 2-8.
- [17] Wen S Z, Huang P. Principles of tribology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 10.
- 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 10.
- [18] Ma H S, Liang G X, Lü M, *et al.* Investigation on friction and wear behavior of AISI 4340 steel in dry sliding condition [J]. Tribology, 2018, 38(1): 59-66.
马红帅, 梁国星, 吕明, 等. AISI 4340 钢干滑动摩擦磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(1): 59-66.
- [19] Zhong A W, Yao P P, Xiao Y L, *et al.* Tribological behaviors and reliability life of Cu-based sintered materials for space applications in air [J]. Tribology, 2017, 37(5): 686-694.
钟爱文, 姚萍屏, 肖叶龙, 等. 大气环境空间用铜基摩擦材料摩擦学行为及可靠性寿命研究[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(5): 686-694.
- [20] Wang W, Cui H Z, Wang Z N, *et al.* Microstructure and wear mechanism of induction quenching 50CrMo4 steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(7): 62-68.
王伟, 崔洪芝, 王泽宁, 等. 50CrMo4 钢感应淬火微观组织和磨损机制[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(7): 62-68.