

激光熔覆-活化屏等离子体复合处理层耐磨性能研究

Study on Wear Resistance of Duplex Surface Treatment with Laser Cladding and Active Screen Plasma

徐滨士¹, 张晓东^{1,2}, 董世运¹, 董汉山³, 王志坚¹, 闫世兴¹

(1 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;

2 哈尔滨工程大学 材料科学与化学工程学院, 哈尔滨 150001;

3 英国伯明翰大学 冶金与材料系, 伯明翰 B152TT)

XU Bin-shi¹, ZHANG Xiao-dong^{1,2}, DONG Shi-yun¹,

DONG Han-shan³, WANG Zhi-jian¹, YAN Shi-xing¹

(1 National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of

Armored Force Engineering, Beijing 100072, China; 2 School of Materials

Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001,

China; 3 Department of Metallurgy and Materials School of Engineering,

University of Birmingham, Birmingham B152TT, U K)

摘要: 为了研究激光熔覆层性能对活化屏等离子体氮化处理层耐磨性能的影响, 采用两种铁基合金粉末 (Fe90 和 Fe314) 在 45 钢基体表面进行激光熔覆, 然后进行等离子体氮化复合处理, 测试涂层干摩擦条件下的磨损性能。研究结果表明: 复合处理后, Fe90 激光熔覆层的硬度由 750HV 提高到 1350HV, Fe314 激光熔覆层的硬度由 540HV 提高到 927HV; 在相同载荷 (30N) 下, Fe90 复合处理层的耐磨性提高到 1.2 倍, 而 Fe314 复合处理的耐磨性降低为原来的 42%; 复合处理耐磨性能提高的关键在于激光熔覆层与氮化层的合理搭配, 熔覆层能够提供足够的支撑。

关键词: 激光熔覆; 活化屏等离子体处理; 耐磨性

中图分类号: TG156.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2010)02-0037-05

Abstract: In order to study effects of laser cladding layer performance on wear resistance of active screen plasma treating nitride coating, two kinds of Fe-based alloy powders, Fe314 and Fe90, were adopted to laser clad on steel 45 substrate surface. And then the laser clads were duplex-treated by active screen plasma nitriding. Wear tests were carried out for the laser clads and duplex coatings with wear tester under dry sliding condition. Experimental results show that hardness of the Fe90 duplex coating was increased from 750HV of the Fe90 laser clad to 1350HV, and hardness of the Fe314 duplex coating was increased from 540HV of the Fe314 laser clad to 927HV. Under the same load (30N), wear resistance of the Fe90 duplex coating was 1.2 times of that of the Fe90 laser cladding layer. However, wear resistance of the Fe314 duplex coating was only 0.42 times of that of the Fe314 laser cladding layer. It can be found that the key problem for improving wear resistance of the duplex coating lies on reasonable combination of the laser cladding layer and active screen plasma treating nitride coating, the former should provide enough support for the latter.

Key words: laser cladding; active screen plasma treating; wear resistance

表面工程技术种类繁多、特点各异, 但为了满足特殊的服役条件, 往往把多种表面技术结合在一起, 目前复合表面改性技术已成为表面工程中最活跃最引人注目的领域之一^[1-3]。活化屏等离子体处理技术是新兴

的离子氮化技术^[4-6], 由于离子活化屏离子氮化处理过程中, 气体离子是直接轰击铁制网状圆筒, 而不是直接轰击工件的表面, 解决了直流离子氮化技术中存在的诸多问题, 如工件打弧、空心阴极效应、电场效应、温

度测量等,因此,在活化屏离子氮化处理过程中不再发生打弧现象,对离子氮化电源的要求也大大降低。该技术制备的涂层极大提高了材料的耐磨性能。激光熔覆技术具有与基体形成冶金结合,稀释率低、基体变形小等特点,可实现零件表面改性、破损零件修复和三维立体零件快速制造等^[7-9],既可以制备硬涂层,也可以制备软涂层。在表面要求高耐磨性时,软涂层的应用受到限制,因此需要通过复合处理来提高软涂层的耐磨性能。活化屏等离子体复合处理可以提供硬涂层,因此,理论上讲,两者的复合处理可以提高复合涂层的耐磨性能。本研究选择两种铁基合金粉末材料(Fe314 和 F90 合金粉末),制备不同硬度的激光熔覆涂层,然后对熔覆层进行活化屏等离子体复合处理,探讨熔覆层性能对活化屏等离子复合处理层耐磨性能的影响,为激光熔覆活化屏等离子复合处理技术实际应用提供参考。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

实验用基体材料 45 钢,试样尺寸为 100mm × 10mm × 80mm。激光熔覆材料选用 Fe90 和 Fe314 两种铁基合金粉末,粉末粒度为- 140~ + 325 目,其化学成分如表 1 所示。

表 1 Fe90 和 Fe314 粉末材料化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of Fe90 and Fe314 powder(mass fraction/ %)

Material	C	Cr	Ni	B	Si	Fe
Fe90	0.15	13.5	-	1.62	1.15	Bal
Fe314	-	17.5	10.5	0.65	0.12	Bal

1.2 实验方法

采用 1kW 连续波 Nd:YAG 固体激光器进行激光熔覆,激光束波长为 1.06μm,光斑直径为 2mm,采用氩气保护激光熔池。Fe314 优化的激光熔覆处理工艺参数为:功率 1kW,扫描速度 5mm/s,送粉量 3.4g/s,搭接率 40%;Fe90 优化的激光熔覆处理工艺参数为:功率 1kW,扫描速度 6mm/s,送粉量 5.2g/s,搭接率 40%。45 钢表面用砂纸打磨平整,并用乙醇、丙酮清洗。采用同步送粉激光熔覆法,通过多道搭接的方法获得大面积激光熔覆层,对激光熔覆层表面进行精磨、抛光、处理,然后进行活化屏等离子氮化处理,氮化工艺为:处理温度 500℃;处理时间 10h;反应室压强为 500Pa;气体的体积比为 N₂:H₂=20:80。

采用 Quant 200 型扫描电子显微镜(SEM)观察复合处理层表面和磨痕形貌。利用 HVS-1000 型显微硬度计测量涂层的表面硬度,硬度计载荷 1.96N,持载时间 15s。磨损实验在 UMT-2 型多功能摩擦磨损实验机上进行,摩擦对偶球为 φ4mm GCr15 钢球,其硬度为 HRC 65。摩擦试验条件为:在干摩擦条件下往复滑动,行程为 4.7mm,频率为 5Hz,载荷为 30N,摩擦时间为 20min。通过测量磨痕宽度,最终结果取 5 次试验的平均值,利用公式(1)计算磨损体积,评价材料的耐磨性。

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

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。

2 实验结果及分析

2.1 复合处理涂层的制备

复合处理涂层的制备分为两部分,即激光熔覆层的制备和等离子体氮化处理。激光熔覆层表面形貌如图 1 所示。将制备好的激光熔覆试样进行精磨、抛光处理后进行等离子体氮化复合处理,等离子体氮化后的试样表面形貌的 SEM 照片如图 2 所示。

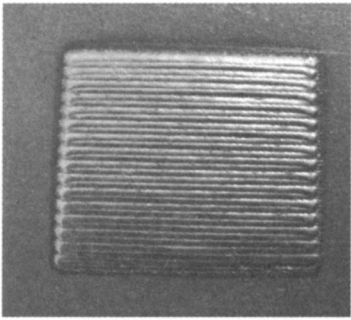


图 1 良好激光熔覆层形貌

Fig. 1 Morphology of the perfect laser clad

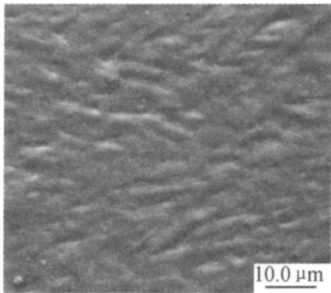


图 2 复合处理后的表面形貌

Fig. 2 Surface morphology of the LC-ASP duplex coating

2.2 涂层的表面硬度

图 3 为 45 钢、激光熔覆和复合处理层表面的显微硬度。从图 3 可以看出, 经过复合处理后 Fe90 激光熔覆层的硬度由 750HV 提高到 1350HV; Fe314 激光熔覆层的硬度由 540HV 提高到 927HV。涂层的硬度得到了极大的提高。这是因为激光熔覆具有快速加热、快速凝固的特点, 其成形的组织较为细小, 固溶度大、固溶强化效应显著, 有利于氮原子的注入, 表面形成了致密的氮化层, 因此氮化处理后熔覆层的显微硬度提高显著。高的硬度也为熔覆层具有较好的耐磨性提供了保证。

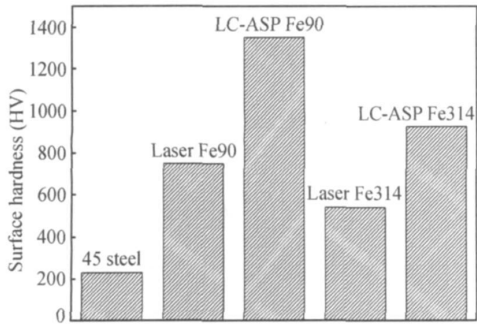


图 3 激光熔覆层和复合处理层表面显微硬度
Fig. 3 Surface micro-hardness of laser clad and duplex coatings

2.3 涂层的耐磨性

在干摩擦条件下复合处理前后的摩擦磨损的试验结果如表 2 所示。由表 2 可以看出, 复合处理 Fe90 的耐磨性提高到 1.2 倍。这是因为复合处理后使表面得到了强化, 提高了材料的耐磨性能。降低金属表面摩擦系数和提高表面抗变形能力都是减小磨损的重要途径。N 注入钢中, 摩擦系数降低有限, 其耐磨性的提高主要靠表面强化, 提高表面强度是减小磨损的主要方式。复合处理提高了表面强度, 增强了表面变形抗力, 从而提高了耐磨性。由此可见, 激光熔覆、活化屏等离子体复合处理为零件性能的提升提供了一个新的途径。

图 4 为 45 钢和 Fe90 磨损后的表面形貌 SEM 照片。图 4(a) 为 45 钢的磨损痕迹的表面形貌, 由于 45 钢的硬度较低, 表面容易发生塑性变形, 随着滑动距离的增加, 摩擦产生的热量使接触面处发生物理、化学反应, 并在摩擦副的界面处发生胶合, 因此, 试样表面发生剪切。被剪切的材料随着滑动而转移, 形成金属磨屑, 成为磨损颗粒, 在滑动干摩擦中受挤压和反复地转移、摩擦形成如图 4(a) 中的黏着磨损和磨料磨损形貌。图 4(b) 为激光熔覆 Fe90 的磨损表面形貌, 由于涂层硬度较高, 涂层只发生轻微的黏着磨损和磨粒磨

表 2 干摩擦条件下的磨损实验结果

Table 2 Result of wear under dry friction

Material	Loading	Friction coefficient	Wear width/mm	Wear volume/mm ³
45 steel	30N	0.50.6	1.10	0.2557
Laser cladding Fe90 alloy		0.375-0.4	0.428	0.0118
Laser cladding and ASP Fe90 alloy		0.350.4	0.408	0.0099
Laser cladding Fe314 alloy		0.40.45	0.456	0.0141
Laser cladding and ASP Fe314 alloy		0.40.425	0.546	0.0334

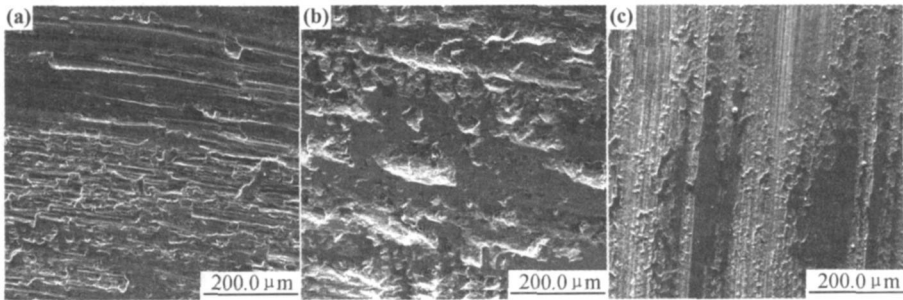


图 4 45 钢和 Fe90 涂层磨损形貌 SEM 照片 (a) 45 钢; (b) Fe90 激光熔覆层; (c) Fe90 复合处理层

Fig. 4 Worn surface morphologies of 45 steel and Fe90 coatings (a) 45 steel; (b) Fe90 laser clad; (c) Fe90 duplex coating

损。经过 LC-ASP 复合处理后的试样表面磨损轻微, 如图 4(c) 所示。这是由于在高硬度氮化层的支撑下, 接触处不易发生塑性变形, 有效的保护了基体, 提高了

耐磨性。

但 LC-ASP 复合处理 Fe314 的耐磨性能并不理想, Fe314 复合处理后耐磨性降低为原来的 42%。

Fe314 磨损形貌如图 5 所示, 复合处理后的磨损较未处理的磨损严重。这是因为磨球和试样平面为点接触, 具有高的压应力。在高应力反复作用下, 高硬度的氮化层会出现显微裂纹, 裂纹扩展使得涂层逐渐剥落, 形成磨粒, 加剧了磨损。另一方面, 对于承受高载荷及剧烈磨损的条件下, 由于产生强烈的摩擦热, 导致激光熔覆层软化并在工作时变形, 不能够给硬质膜以强有

力的支撑, 在摩擦力作用下, 激光熔覆层和氮化层都会发生变形, 但 Fe314 激光熔覆层较软, 变形程度较大, 导致激光熔覆层与氮化层易于发生分离, 分离的氮化层在高应力作用下, 容易被压裂, 从而使涂层破坏, 破坏的涂层充当了磨粒加剧了磨损, 其失效过程如图 6 所示, 故该复合涂层在重载上的应用受到限制。

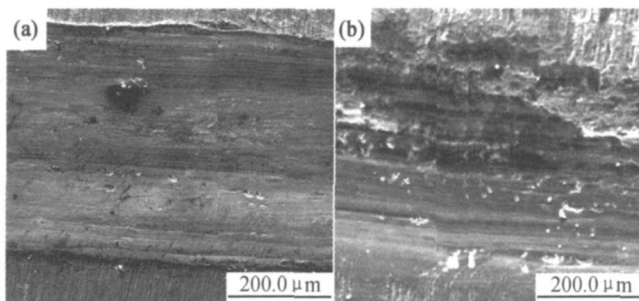


图 5 Fe314 涂层磨损痕迹的 SEM 照片 (a) Fe314 激光熔覆层; (b) Fe314 复合处理层

Fig. 5 Worn surface morphologies of Fe314 coatings (a) Fe314 laser clad; (b) Fe314 duplex coating

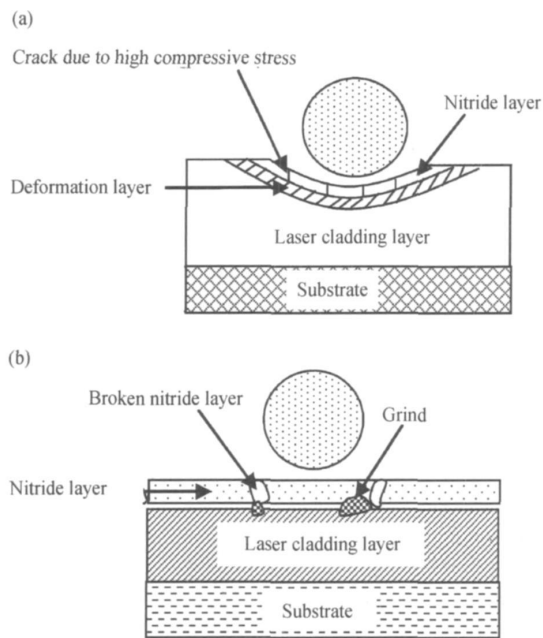


图 6 复合涂层失效过程示意图

(a) 裂纹形成过程; (b) 加速磨损过程

Fig. 6 Schematic of wear mechanisms of duplex coating

(a) crack formation process; (b) accelerate wear process

3 讨论

根据实验结果可以可出: 只有当激光熔覆层能够提供较好的支撑的情况下, 复合处理才能够显著提高涂层的耐磨性。否则, 复合处理涂层不能够发挥协同

效应, 提高材料的耐磨性能。激光熔覆层本身具有快速凝固的组织特点, 组织细小, 晶界较多, 有利于氮离子的注入, 可以加速氮化过程, 得到较深的氮化层, 由于沉积过程中氮离子向激光熔覆层基体内部的进一步扩散, 导致激光熔覆层的硬度明显增高, 从而提高了复合涂层的承载能力和抗磨能力。这是复合处理提高耐磨性的主要原因。因此, 复合处理从理论上讲是可以提高材料的耐磨性的, 但前提是基体能够提供足够的支撑作用, 保证在高应力作用下氮化层不被破坏。因此在复合涂层的设计上应保证激光熔覆层应能够提供足够的支撑, 才能够发挥复合效应, 提高耐磨性。氮化层不仅可以提高硬度, 还可以形成残余压应力, 这对于提高抗接触疲劳性能有益, 因此复合处理应该在提高抗接触疲劳性能方面也具有较大优势。

4 结论

(1) 激光熔覆层经活化屏等离子体复合处理后, 复合涂层硬度显著提高。Fe90 激光熔覆层的硬度由 750HV 提高到 1350HV; Fe314 激光熔覆层的硬度由 540HV 提高到 927HV。

(2) 在 30N 载荷作用下, Fe90 复合处理层耐磨性提高到 1.2 倍, 而 Fe314 复合处理层耐磨性降低为 0.42 倍。这是因为 Fe314 的激光熔覆层不能够提供足够的支撑, 复合涂层在高载荷作用下, 引起了氮化层的破坏, 复合效应没有得到发挥的缘故。复合处理耐磨性提高的关键在于激光熔覆层与氮化层的合理搭配。

参考文献

[1] 徐滨士, 朱绍华. 表面工程的理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991. 540- 565.

[2] KWIE T N I E W S K I C, D O N G H, S T R O H A C K E R T, et al. Duplex surface treatment of high strength T imetal 550 alloy towards high load bearing capacity[J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 139: 284- 292.

[3] W E I C Y, C H E N F S. Characterization on multi-layer fabricated by TRD and plasma nitriding[J]. Materials Chemistry and Physics, 2005, 90: 178- 184.

[4] Z H A O C, L I C X, D O N G H, et al. Study on the active screen plasma nitriding and its nitriding mechanism[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201: 2320- 2325.

[5] M E N T H E E, B U L A K A, O L F E J, et al. Improvement of mechanical properties of austenitic stainless steel after plasma nitriding[J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 133- 1134: 259- 263.

[6] H E D A Y A T I M K, M A B H O U B I F, N I C K C H I T. Comparison of

conventional and active screen plasma nitriding of hard chromium electroplated steel[J]. Vacuum, 2009, 83(8): 1123- 1128.

[7] 郭绍义, 李兴俊, 杨秋合, 等. 激光熔覆 W G N i / T i C 涂层的组织和摩擦磨损性能研究[J]. 材料工程, 2008, (6): 72- 75.

[8] 耿林, 孟庆武, 郭立新. 钛合金表面上两种镍基合金粉的激光熔覆研究[J]. 材料工程, 2005, (12): 45- 52.

[9] D O N G S Y, X U B S, W A N G Z J, et al. Laser remanufacturing technology and its applications[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 68251N: 1- 5.

基金项目: 国家自然科学基金中英合作项目(50711130231); 国家自然科学基金重点项目(50735006); 国家 973 计划资助项目(513270102)

收稿日期: 2009-04-24; 修订日期: 2009-11-20

作者简介: 徐滨士(1931—), 男, 教授, 中国工程院院士, 主要从事表面工程、再制造工程方面的研究, 联系地址: 北京丰台杜家坎 21 号再制造重点实验室(100072), E-mail: xubinshi@vip.sina.com

通讯作者: 董世运, E-mail: syd422@vip.sohu.com

(上接第 36 页)

质中的断裂强度; δ 为在环境介质中的断裂伸长率; δ_A 为在惰性介质中的断裂伸长率; I_{SSRT} 从 0- 1 表示

应力腐蚀断裂敏感性渐增^[2]。各实验的数据处理结果如表 5 所示。

根据 ϕ_C / ϕ_1 的结果表明, 实验中所涉及的环境下

表 5 应力腐蚀敏感性判定
Table 5 To determine the sensitivity of stress corrosion

Experimental environment	3. 5% NaCl				3. 5% NaCl, 35℃			3. 5% NaCl, 35℃			
	25℃	35℃	45℃	55℃	+ 0. 1% H ₂ O ₂	+ 0. 5% H ₂ O ₂	+ 1% H ₂ O ₂	- 500mV	- 600mV	- 1200mV	- 1500mV
(ϕ_C / ϕ_1) / %	88	84	60	55	51	45	34	28	18	23	31
I_{SSRT}	0. 08	0. 1	0. 18	0. 25	0. 17	0. 25	0. 38	0. 78	0. 65	0. 3	0. 52

Note: inert environment is silicone oil

7B04 铝合金都具有应力腐蚀敏感性。温度的升高, 溶液的腐蚀性加强都会使 ϕ_C / ϕ_1 的值变小; 而阳(阴)极极化加强, ϕ_C / ϕ_1 的值变大, 出现该结果有可能在极化实验中的试样腐蚀过于严重, 断面测量的误差产生较大。

根据 I_{SSRT} 计算结果, 表明温度的升高, 溶液的腐蚀性加强都会使 I_{SSRT} 的值变大; 且阳(阴)极极化加强, 也会使 I_{SSRT} 的值变大, 应力腐蚀断裂敏感性增强。

4 结论

(1) 7B04T 651 状态下的铝合金具有一定的应力腐蚀敏感性; 溶液温度的升高、腐蚀性的增强都会加大 7B04 铝合金的应力腐蚀敏感性。

(2) 电化学极化对 7B04 铝合金的 SCC 敏感性有显著的影响, 并且阳极极化的作用要比阴极极化要强。

参考文献

[1] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 第三卷, 第 2 版. 北京: 中国标准出版社, 2002.

[2] H B 7235- 95, 慢应变速率应力腐蚀实验方法[S].

收稿日期: 2008-12-25; 修订日期: 2009-08-20

作者简介: 刘远勇(1982—), 男, 硕士研究生, 主要从事高强铝合金的腐蚀特性研究, 联系地址: 昆明理工大学莲华校区学生宿舍 6 栋 621 室(650093), E-mail: lyongp@qq.com