

激光熔覆和活化屏等离子体氮化复合涂层 组织与接触疲劳性能

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 激光熔覆技术可以对失效的齿类件进行再制造,但是随着机械动力装置性能的大幅度提高,对激光再制造后齿类件的性能要求也越来越高。为了进一步提高激光再制造后齿类件的性能,采用活化屏等离子体氮化处理技术对 Fe314 激光熔覆层进行了复合处理,重点研究了活化屏等离子体氮化复合处理对激光熔覆层的表面硬度和抗接触疲劳性能的影响。试验结果表明,复合处理后 Fe314 激光熔覆层的表面硬度由 540 HV 提高到 927 HV, Fe314 激光熔覆层的接触疲劳寿命由 2.42×10^5 提高到 4.94×10^5 ,复合处理后显著提高了 Fe314 激光层的表面硬度和接触疲劳性能。

关键词 激光技术;激光熔覆;复合处理;活化屏等离子体;接触疲劳

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0603018

Microstructure and Contact Fatigue Property of Laser Cladding and Active Screen Plasma Duplex Treated Coating

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

¹ College of Material Sciences and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China

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

Abstract Failure of gear parts can be remanufactured by laser cladding technique, but with the performance of mechanical powder device greatly improved, higher performance of laser remanufacturing gear parts are required. To further improve the performance of laser remanufacturing parts, Fe314 laser cladding coating is duplex treated by the active screen plasma nitriding technique. We focus on the influence of active screen plasma nitriding technique on the laser cladding coating hardness and contact fatigue performance. The results show that Fe314 laser cladding hardness increases from 540 HV to 927 HV and the contact fatigue life increases from 2.42×10^5 to 4.94×10^5 after duplex treatment. Obviously, duplex treatment can improve the surface hardness and contact fatigue performance of Fe314 laser cladding coating greatly.

Key words laser technique; laser cladding; duplex treatment; active screen plasma; contact fatigue

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

1 引言

齿类件是机械系统中传递载荷和运动的重要零件。在承受循环载荷和长期磨损条件下,齿类件常因齿面损伤或齿体损伤而失效,齿的失效直接影响

到机械系统的正常运行。由于齿类件数量多、作用大、成本较高,所以对齿类件进行再制造具有显著的经济效益。激光熔覆技术是先进的再制造技术之一,既可以进行零件表面损伤的修复,又可以进行零

收稿日期: 2011-03-10; **收到修改稿日期**: 2011-04-11

基金项目: 国家自然科学基金中英合作项目(50711130231)和国家自然科学基金(50975284)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,教授,中国工程院院士,主要从事表面工程、再制造工程等方面的研究。

E-mail: xubinshi@vip.sina.com

件体积损伤的修复^[1~3],具有涂层与基体结合强度高、性能优异、对基体损伤小、加工精度高等优点,已经在齿类件的再制造中得到了应用^[4~6]。但是,随着各种机械动力装置性能的大幅度提高,对于高速、重载、高可靠性齿轮的性能要求也越来越苛刻。如何进一步提高激光再制造齿类件的性能,对于提高激光再制造零件的可靠性和寿命具有重要的意义。实践证明,复合处理技术能够发挥不同技术的各自优势,取长补短,有机配合,有效提高零件的使用性能^[7~9]。活化屏等离子体氮化处理技术是先进的表面处理技术之一^[10~12],它克服了传统氮化技术的不足(如工件打弧、空心阴极效应等),形成的氮化层不仅提高了材料的表面硬度,而且在材料表面形成残余压应力,这有利于提高材料的耐磨和抗接触疲劳性能,延长齿类件的使用寿命。因此,本文将活化屏等离子体氮化处理与激光熔覆技术复合来进一步提高激光再制造齿类零件的性能,重点研究了活化屏等离子体氮化对激光熔覆层硬度和接触疲劳性能的影响。

2 试验材料与方法

试验用基体材料为 45# 钢,尺寸为 $\phi 11 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的圆饼和 $\phi 58 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的圆柱棒。激光熔覆材料选用 Fe314 铁基合金粉末,粉末粒度为 $-140 \sim 325 \text{ 目}$ ($45 \sim 109 \text{ }\mu\text{m}$),其化学成分如表 1 所示。

表 1 Fe314 粉末材料化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of Fe314 powder (mass fraction, %)

Material	Cr	Ni	B	Si	Fe
Fe314	17.5	10.5	0.65	0.12	Bal.

采用 1 kW 连续波 Nd:YAG 固体激光器进行激光熔覆,激光束波长为 $1.06 \text{ }\mu\text{m}$,光斑直径为 2 mm ,采用氩气保护激光熔池。Fe314 激光熔覆处理工艺参数为:功率 1 kW,扫描速度 5 mm/s ,送粉量 3.4 g/s ,搭接率 40%。45# 钢试样表面先用砂纸打磨平整,再用乙醇和丙酮清洗。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,然后对激光熔覆层表面进行精磨、抛光处理,再进行活化屏等离子体氮化处理。氮化工艺为:处理温度 $500 \text{ }^\circ\text{C}$;处理时间 10 h;反应室压强为 500 MPa ;气体的体积比为 $V(\text{N}_2):V(\text{H}_2)=20:80$ 。

利用 HVS-1000 型显微硬度计测量涂层的表面硬度,硬度计载荷 1.96 N ,持载时间 15 s。采用

Quant 200 型扫描电子显微镜(SEM)观察复合处理层表面形貌和截面组织。接触疲劳试验根据 GB/T10622-1989《金属材料滚动接触疲劳试验方法》进行,试验设备为 JPM-1 型接触疲劳试验机,接触疲劳主试样和对比试样外形尺寸如图 1 所示。主试样与对比试样间的滑差根据标准选用 12.5%,采用 20 号机油进行喷射润滑冷却。试验机主轴转速为 2000 r/min ,实际最大接触应力为 760 MPa 。试验机具有自动显示主轴转数的功能,试验时以主试样产生麻点或出现剥落时的转数作为衡量试样接触疲劳寿命的依据。当试样出现麻点或出现剥落时,引起振动增大,试验机转动的噪声立即增大,此时停机,记录转数。对比试验采用 18CrNi4WA 钢渗碳件(渗层深度 $1.0 \sim 1.2 \text{ mm}$),表层硬度为 57HRC (HRC 为洛氏硬度),心部硬度为 40HRC。由于疲劳数据具有一定的分散性,通过测定 4 个试样最后取其平均值作为这一载荷下的疲劳寿命,并采用扫描电镜分析接触疲劳试样的疲劳断口形貌。

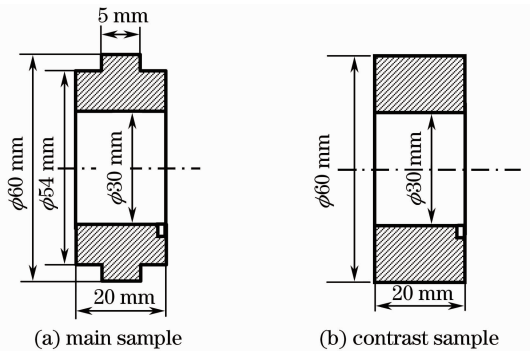


图 1 接触疲劳试样结构和尺寸示意图

Fig. 1 Schematic diagram of contact fatigue test sample structure and size

3 试验结果与分析

3.1 复合处理涂层显微组织

图 2 为 Fe314 多道搭接激光熔覆层截面显微组织照片,从图中可以看出所制备熔覆层厚度约为 $226 \text{ }\mu\text{m}$,熔覆层组织致密,无裂纹、气孔等缺陷,熔覆层与基体形成了冶金结合。图 3 为 Fe314 激光熔覆层经活化屏等离子体氮化复合处理后复合涂层截面组织照片,可以看出复合涂层表面形成了“白亮层”,内部形成了“扩散层”,这是由于表面处氮浓度高,氮与铁等形成了氮化物,内部则发生了氮原子的渗入造成的。图 4 为 Fe314 复合处理涂层的 X 射线衍射(XRD)图谱。从中可以看出,复合处理涂层由 $\gamma\text{-Fe}$, CrN , Fe_4N 和 Fe_3N 等相组成。

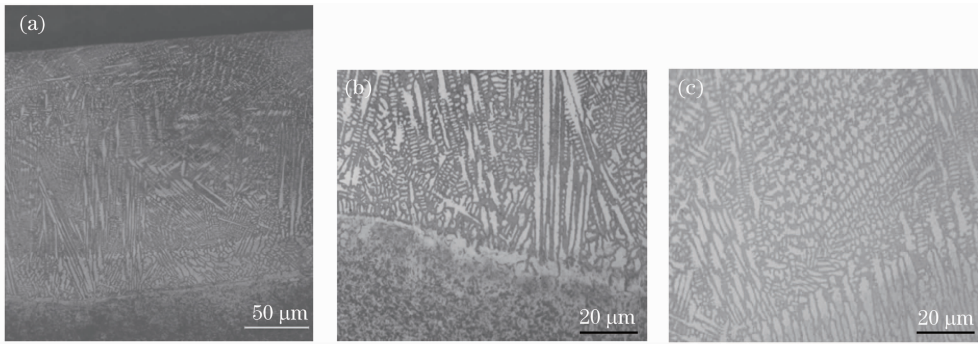


图2 激光熔覆层显微组织。(a)截面,(b)界面,(c)熔覆层

Fig. 2 Microstructures of laser cladding coating. (a) cross section, (b) interface, (c) cladding layer

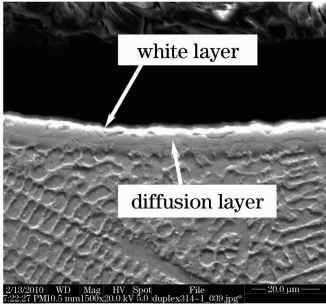


图3 复合处理涂层截面组织

Fig. 3 Cross sectional microstructure of duplex treated specimen

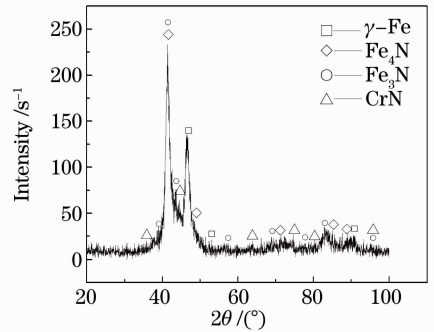


图4 复合处理涂层 XRD 图谱

Fig. 4 XRD spectrum of the duplex treated specimen

3.2 复合处理层表面硬度

经过复合处理后 Fe314 激光熔覆层的硬度由 540 HV 提高到 927 HV。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,其形成的组织较为细小,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。

3.3 复合处理层接触疲劳性能

为了研究复合处理对于 Fe314 激光熔覆层抗接触疲劳性能的影响,采用 JPM-1 型接触疲劳试验机对 Fe314 复合处理前后试样的疲劳性能进行了测试,测试结果如表 2 所示。可以看出,Fe314 激光熔覆层的疲劳寿命为 2.42×10^5 ,而 Fe314 复合处理层的疲劳寿命为 4.94×10^5 ,Fe314 复合涂层的接触疲劳寿命是激光熔覆层的 2 倍,复合处理后显著改善了 Fe314 激光熔覆层的抗接触疲劳性能。

表 2 Fe314 复合处理层在 760 N 载荷下的接触疲劳数据

Table 2 Contact fatigue lives of Fe314 duplex treated coating under load of 760 N

Materials	Sample No.				Average fatigue life
	1	2	3	4	
Fe314 laser cladding coating / 10^5	2.65	2.21	2.42	2.38	2.42
Fe314 duplex treated coating / 10^5	4.69	4.99	4.82	5.26	4.94

图 5 为 Fe314 激光熔覆层复合处理前后接触疲劳形貌照片。从图 5(a)可以看出,Fe314 激光熔覆层以点蚀和剥落坑破坏为主。这是由于试样表面硬度低,沿着滑动方向易发生塑性变形,越靠近表面,塑性变形越严重,随着循环的进行,累积损伤逐渐增加,在表面容易形成裂纹。在接触应力的反复作用下,裂纹尺寸逐渐增大,当裂纹扩展到足够长度时,润滑油可以进入。在压力的作用下,裂纹形成一

个微小的封闭区域,且该区域内的油压急剧增高,使裂纹不断向纵深扩展,造成裂纹与表面间的小块金属如同受到弯曲的悬臂梁,最后在根部折断,在表面形成剥落坑。图 5(b)是 Fe314 复合处理后接触疲劳形貌照片。从图中可以看出,复合处理后表面只发生轻微的点蚀破坏,说明复合处理后 Fe314 激光熔覆层的接触疲劳性能得到了显著提高。复合处理后熔覆层疲劳寿命提高的主要原因一方面可能是离

子注入所产生的高损伤缺陷,阻止了位错的移动,提高了材料的承载能力。同时表面硬度的提高,可减少金属表面在受力作用下的塑性变形,因而降低裂

纹的成核几率;另一方面,氮化处理后表面形成残余压应力,残余压应力可以大大抵消外界切应力的有害作用,有利于抑制表面裂纹的萌生和扩展。

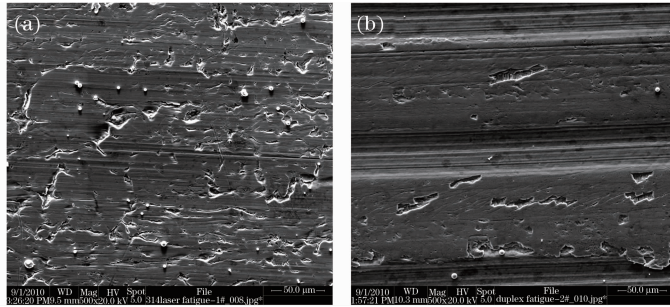


图5 复合处理试样接触疲劳表面形貌照片。(a)激光熔覆层,(b)复合处理层

Fig. 5 Fatigue surface morphologies of duplex treated coating. (a) laser cladding coating, (b) duplex treated coating

接触疲劳是齿轮表面在接触压应力周期循环作用下产生的一种表面剥落损坏现象,有产生裂纹并扩展的过程。一般来讲,硬度高则接触疲劳抗力亦高,硬度低则接触疲劳抗力亦低。硬度高,有很高的切变抗力和切断抗力,能阻止表面层各种原因增大的表面切应力而产生的开裂,从而提高表面层的疲劳强度。如果表面较软,裂纹容易形核使表面发生点蚀破坏几率增大。因此必须提高表面硬度才能够提高表面的切断抗力,减少金属表面在受力作用下的变形,降低裂纹形成的几率,防止点蚀破坏。由于活化屏等离子体氮化处理技术可以有效提高材料的表面硬度和降低表面拉应力,因此,可以有效提高激光熔覆层的抗接触疲劳性能,从而进一步提高激光再制造后零件的性能。但是当熔覆层不能够为氮化层提供足够的支撑时,熔覆层上的氮化层硬壳在大载荷作用下容易破碎。因此,在高载荷作用下,激光熔覆、活化屏等离子体氮化复合涂层的设计必须保证熔覆层具有较高的硬度,才能够为氮化层提供有效的支撑,才能够发挥复合效应提高激光再制造后零件的性能。

4 结 论

1) Fe314 激光熔覆层经活化屏等离子体复合后,复合涂层表面形成了“白亮层”,内部形成了“扩散层”,复合处理涂层由 γ -Fe, CrN, Fe₄N 和 Fe₃N 等相组成。经活化屏等离子体复合处理后,Fe314 激光熔覆层的硬度由 540 HV 提高到 927 HV。

2) 在接触应力 760 MPa 下,Fe314 激光熔覆层的疲劳寿命为 2.42×10^5 ,而 Fe314 复合处理层的疲劳寿命为 4.94×10^5 ,Fe314 复合涂层的接触疲劳寿命是激光熔覆层的 2 倍,复合处理后显著改善了

Fe314 激光熔覆层的抗接触疲劳性能。

参 考 文 献

- 1 Yan Shixing, Dong Shiyun, Xu Binshi *et al.*. Analysis of mechanical properties and microstructures of laser rapid forming components with Fe314 alloy powders[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3074~3078
闫世兴,董世运,徐滨士等. Fe314 合金粉末激光快速成形组织与力学性能分析[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 3074~3078
- 2 Shen Bin, Yan Guangchao, Wu Gang. Laser cladding on complex disc cam[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 244~248
沈斌,闫广超,吴钢. 复杂盘形凸轮表面激光熔覆工艺[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 244~248
- 3 Zhu Gangxian, Zhang Anfeng, Li Dichen. Effect of process parameters on surface smoothness in laser cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 296~301
朱刚贤,张安峰,李涤尘. 激光熔覆工艺参数对熔覆层表面平整度的影响[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 296~301
- 4 Dong Shiyun, Xu Bingshi, Wang Zhijian *et al.*. Laser remanufacturing technology and its applications [C]. *SPIE*, 2007, **6825**: 68251N
- 5 Wu Xinyue, Xie Peilin, Yang Shenguo. Research on laser cladding technology for contact surface of gears [J]. *China Mechanical Engineering*, 1998, **9**(7): 77~79
吴新跃,谢沛霖,杨胜国. 齿面激光熔覆技术研究[J]. *中国机械工程*, 1998, **9**(7): 77~79
- 6 Dong Shiyun, Xu Binshi, Wang Zhijian *et al.*. Vital problems on laser remanufacturing gears [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 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**(s1): 134~138
- 7 C. Kwietniewski, H. Dong, T. Strohaecker *et al.*. Duplex surface treatment of high strength Timetal 550 alloy towards high load-bearing capacity [J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2001, **139**(2-3): 284~292
- 8 K. Nagatsukua, A. Nishimoto, K. Akamatsu. Surface hardening of duplex stainless steel by low temperature active screen plasma nitriding [J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2010, **205**(s1): s295~s299
- 9 F. Mahboubi, M. Fattah. Duplex treatment of plasma nitriding and plasma oxidation of plain carbon steel[J]. *Vacuum*, 2005, **79**(1-2): 1~6
- 10 C. Zhao, C. X. Li, H. Dong *et al.*. Study on the active screen plasma nitriding and its nitriding mechanism[J]. *Surf. Coat. Tech.*, 2006, **201**(6): 2320~2325

11 Akio Nishimoto, Kimiaki Nagatsuka, Ryota Narita *et al.*. Effect of the distance between screen and sample on active screen plasma nitriding properties [J]. *Surf. Coat. Tech.*, 2010, **205** (s1): s365~s368

12 M. Keshavarz Hedavati, F. Mahboubi, T. Nickchi. Comparison of conventional and active screen plasma nitriding of hard chromium electroplated steel [J]. *Vacuum*, 2009, **83** (8): 1123~1128

《光电产品与资讯》第 11 期“中国的大光学产业”专刊征稿启事

《光电产品与资讯》杂志是中国激光杂志社 2010 年隆重推出的一本以产品和市场资讯为主的信息类期刊。该刊立足光电领域,全年 12 期分别以不同的主题全面介绍技术与市场的最新进展。凭借中国激光杂志社的深厚学术底蕴及强大的采编力量,深入浅出地剖析光电行业事件,详细介绍光电产品的实际应用,在科研与产业之间架起一座互通的桥梁。并致力于成为读者了解市场、选购产品的重要参考,企业推广产品的首选平台。

我们 2011 年第 11 期策划“中国的大光学产业”专刊(英文版)。内容涵盖国内各地区的光学产业发展规划,全面展示最新光电技术的发展趋势、优秀产品的应用案例及实用指南等,特向广大读者征稿。该期杂志将于 2012 年 1 月份参展美国西部光电展。

征稿范围: 光学、光电子学领域

稿件类型: 1) 国内外知名专家、企业高管撰写的最新光电技术或市场发展趋势;
2) 光电产品及技术的行业应用案例分析;
3) 产品使用心得、经验技巧、故障排除等实用指南类型的文章。

字数: 2500~4000 字

专刊截稿日期: 2011 年 8 月 31 日

稿件格式要求: 投稿文体为英文,请使用 word 格式,文章最后列出所有作者姓名、单位名称、职务或者职称、联系电话及 E-mail、邮寄地址和邮编。

请将稿件发至 oepn@siom.ac.cn, 邮件主题请标明“中国的大光学产业”专刊投稿。有任何问题请咨询李洪丹编辑,电话:021-69918166。

SPECIAL ISSUE CALL FOR PAPER 2011 ISSUE 11 “China’s Big Optical Industry”

OE Product & News is a new magazine of Chinese Laser Press. It’s featured by optoelectronics news, products and market reports, and the circulation covers OE-related companies, universities and institutes. It aims to accelerate China OE research and industrial development. The main columns include news, viewpoint, interview, focus, technology exchange, product information, etc. OEPN provides a channel to know the OE market and buy devices, and it is also a favorable platform of promoting products for companies.

The topic of NO.11 is China’s Big Optical Industry. It will report the development of optical industry in China, application analysis of optical products and so on. The magazine will be distributed in Photonics West 2012. We hope you can write some articles to us.

Topics include: optics, optoelectronics

Type: 1) latest optoelectronics technology or market development trend in China written by experts or enterprise general managers;

2) industry application analysis of optoelectronics products and technology;

3) practical types of articles, e. g. your experience, comments about the product, trouble removal.

Article length: 2500~4000 words

Deadline: 2011.8.31

Form: please write the paper in English and send it to: oepn@siom.ac.cn. The author’s name, company, position or title, telephone, E-mail, delivery address and postcode should be given. If you have any question, please call: 021-69918166.