

强流脉冲离子束辐照改善 W9Cr4V 轴承钢的表面性能^{*}

薛彦庆, 汪 诚, 王学德, 赖志林

(空军工程大学 工程学院, 西安 710038)

摘 要: 为改善 W9Cr4V 轴承钢表面性能, 提高轴承使用寿命, 研究强流脉冲离子束(HIPIB 主要由 C^+ (70%)、 H^+ (30% 组成)) 技术辐照处理效果。用 1、10、20、30 不同脉冲次数分别对 W9Cr4V 试片进行处理。采用倒置金相显微镜、X 射线衍射仪、显微硬度仪、pin-on-disc(POD) 方法、电化学工作站分别测量辐照前后试样的表面形貌和性能。结果表明, HIPIB 辐照处理使 W9Cr4V 轴承钢试片近表层晶粒细化, 产生了奥氏体相和碳化物, 并且马氏体择优面发生改变, 衍射峰向高角方向偏移并宽化。同时, 由于 HIPIB 辐照处理快速升降温和冲击波的影响, 处理后试片表面显微硬度最高提高了 19.63%, 表面耐磨性提高近 2 倍, 耐腐蚀性显著改善。

关键词: 强流脉冲; 表面改性; 硬度; 耐磨性

中图分类号: TG178; TG142.45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2012)03-0076-05

Surface Modification of W9Cr4V Air-bearing Steel Through High Intense Pulsed Ion Beams Irradiation

XUE Yan-qing, WANG Cheng, WANG Xue-de, LAI Zhi-lin

(Engineering Institute of Air Force Engineering University, Xi'an 710038)

Abstract: To improve surface properties of W9Cr4V and increase the bearing life, W9Cr4V sample was treated by high intensity pulsed ion beam (HIPIB), which consists mainly of C^+ (70%) and H^+ (30%). The processing was conducted with the parameters of 150 A/cm² high beam current density, 250 kV acceleration voltage, 80 ns pulse duration, and the irradiation times were 1, 10, 20 and 30, respectively. The changes of performance and morphology can be found on the surface after the process. The sample was analyzed with MAT, XRD, pin-on-disc(POD) methods, and microhardness tester. The results show that the grains are refined on the near-surface, resulting in the austenite phase, carbides and martensite, which proves that the surface changes, the direction of the diffraction peaks shifts to the higher angle and broadens. At the same time, influenced by the sharp increasing temperature and shock wave from HIPIB irradiation, the microhardness increases by 19.63%, which is the highest, the wear resistance of surface layer increases nearly two times, and a remarkable improvement of corrosion resistance can be found on the surface.

Key words: high intensity pulse; surface modification; microhardness; wear resistance

0 引 言

W9Cr4V 是含多种元素的高合金钢, 具有较高的热硬性, 能在 600 ℃ 下保持高的硬度和耐磨性, 以及良好的接触疲劳强度和淬透性, 广泛应用于航空发动机轴承。航空发动机轴承是转动

部件中的重要零件, 高速运转的同时还承受高而集中的周期性交变载荷, 工作过程中易产生微裂纹或微小磨损, 在振动和腐蚀环境下会迅速扩展, 形成剥落、掉块, 导致航空轴承耐磨、耐蚀、抗疲劳能力的下降, 并最终造成轴承终止转动失效

收稿日期: 2012-02-28; **修回日期:** 2012-05-08; **基金项目:** * 装备预先研究项目(代号略)

作者简介: 薛彦庆(1987—), 男(汉), 陕西韩城人, 硕士生; **研究方向:** 等离子体制造工艺技术

网络出版日期: 2012-05-23 11:17; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20120523.1117.005.html>

引文格式: 薛彦庆, 汪诚, 王学德, 等. 强流脉冲离子束辐照改善 W9Cr4V 轴承钢的表面性能 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(3): 76-80.

或丧失精度失效。

强流脉冲离子束(High Intensity Pulsed Ion Beam, HIPIB)技术起源于 20 世纪 70 年代末的惯性约束核聚变和高能密度物理研究^[1-2]。该技术主要利用高强度脉冲离子束辐照金属材料,依靠强大的离子动能轰击靶材,极短时间(50~70 ns)内,在注入粒子射程(μm 级)内产生高密度能量沉积,使表面升温速率高达 $10^8\sim 10^{11}\text{ K/s}$,冷却速度达到 $10^8\sim 10^9\text{ K/s}$,形成表面的超快熔化、凝固和外部离子注入^[3]。通过能量沉积,表面点阵原子激活脱位,形成点阵缺陷,使得扩散机制由纯热扩散变为点阵缺陷扩散,显著增高了材料表层位错密度,形成非晶和非平衡亚稳相,导致材料近表层显微结构变化。此外,由于材料表层温度在时空上的高应变率,产生了高强度反冲动量,形成由表及里传输的冲击波,在远大于注入粒子射程深度内产生结构、性能的显著变化^[4-5]。其工作原理及作用区域如图 1 所示。

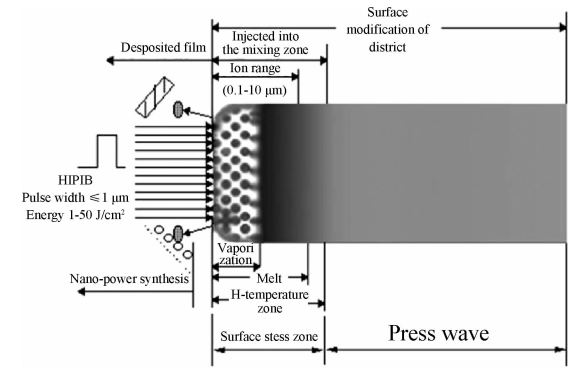


图 1 强流脉冲离子束辐照影响区域^[6]
Fig. 1 Influence zone irradiated by HIPIB^[6]

1 试 验

W9Cr4V 轴承钢材料化学成分如表 1 所示^[7]。试片线切割成 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 的样品,进行手工磨砂、电解抛光、超声清洗后分为两批。第一批 W9Cr4V 试片在井式气体渗碳炉进

表 1 W9Cr4V 轴承钢化学成分(质量分数/%)
Table 1 Composition of W9Cr4V ($\omega/\%$)

Element	C	Cr	W
Mass fraction	0.85-0.95	3.80-4.40	8.50-10.00

Element	V	Mo	Zr
Mass fraction	2.00-2.60	≤ 0.30	0.03-0.08

行高温渗碳,温度 $(750\pm 10)^{\circ}\text{C}$,保温 3 h 空冷,作为对比试片;第二批试片经过高温渗碳后,进行强流脉冲离子束辐照,称为处理试片。

采用 TIA-450 型强流脉冲加速器(沈阳理工大学)对试片进行处理^[8],试验加速电压 250 kV、脉冲宽度 80 ns、束流密度 150 A/cm^2 ,用 1、10、20、30 不同辐照次数分别对 W9Cr4V 试片进行处理。

采用 AXioert200MAT 倒置金相显微镜和 UltimaIV X 射线衍射仪观察强流脉冲离子束辐照前后试片表面形貌和相结构变化;采用 FM-300 显微硬度仪测量显微硬度,载荷为 10 g,加载时间 15 s,每个试片随机选取七点测试,取平均值作为最终结果。采用 pin-on-disc(POD)方法测定摩擦性能,测试参数为:直径 5 mm 的氧化铝球对磨,载荷 300 g,滑动线速度 100 mm/s,无润滑,旋转周次 15 000。采用 CHI650 电化学工作站测量辐照前后试片表面的塔菲尔曲线,研究腐蚀性能的变化,系统为三电极系统,饱和甘汞电极与 Pt 电极分别作为参比电极和辅助电极,电解液选择质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液。测量时试片先在溶液中稳定 3 min,测定稳定的开路电位,扫描范围为开路电位的 $\pm 300\text{ mV}$,扫描速度为 1 mV/s ,温度为 $(25\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 。

2 结果与讨论

2.1 表面形貌与相结构

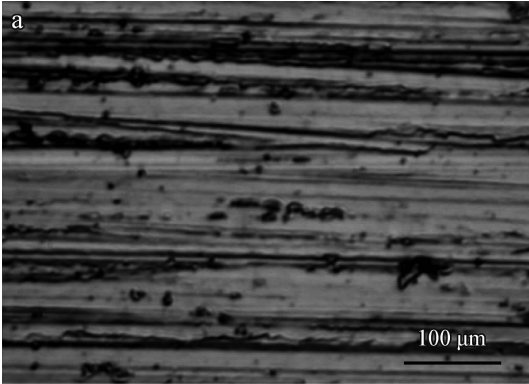
图 2 为 W9Cr4V 试片经强流脉冲离子束辐照前后表面形貌变化情况。由图 2 可以看出,1 次辐照后 W9Cr4V 试片表面未见砂纸打磨的痕迹,并形成了许多微小熔坑,且熔坑边界互连接,形成不规则的絮状形貌(见图 2(b));10、20 次辐照后,熔坑数量大幅减少,大部分熔坑互相独立,成胶着烧蚀形貌(图 2(c));30 次脉冲辐照处理后,熔坑数量继续减少,近乎于消失,经测量,熔坑的直径仅为几十微米,坑的深度也为微米量级,材料表面变得光滑、平整(图 2(d))。

关于熔坑的成因和消失,目前还没有令人信服的解释^[9],分析认为熔坑可分为两类。大部分较小熔坑是高能离子束辐照到试片表面,试片材料表层的气孔、杂质、微量元素等在高温烧蚀、急剧冷却的过程中熔融、凝结的速率、程度不一致而伴随产生的,称之为第一类熔坑,占熔坑的大

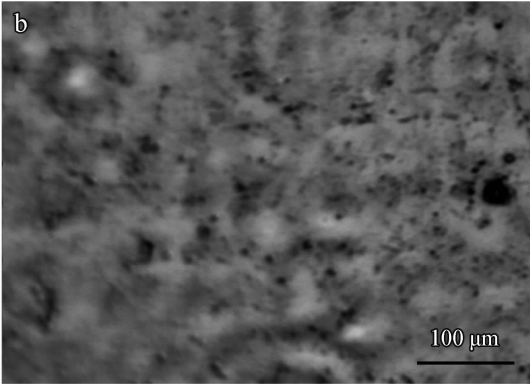
多数;而少部分较大熔坑则是由于急剧的加热使试片表面原子形成烧蚀等离子体向外喷发,由此导致的动量反冲作用使表层未喷发原子在汽化熔融状态下,受到高能冲击波压缩,向材料内部反射,在离子反射点的位置上形成。

在低次数辐照下,注入能量相对较小,产生了大量微小连接状的第一类熔坑。随着辐照次

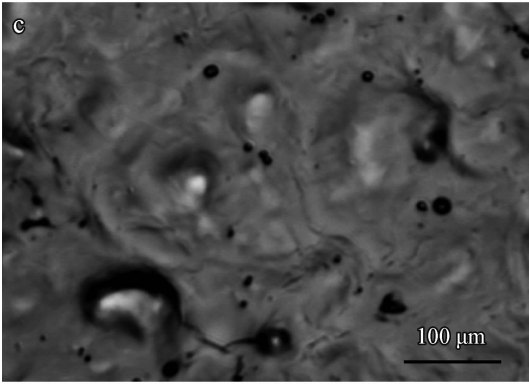
数的进一步增加,表层沉积能量增多,大部分第一类熔坑被烧蚀破坏,整体形貌变得平整,而第二类熔坑则因等离子体喷发加大导致熔坑变大、深度增加。随着辐照次数加大,能量沉积进一步增多,试片表面喷发等离子体形成较难,且晶粒不断细化变小,从而导致熔坑变小,试片表面趋于光滑平整。



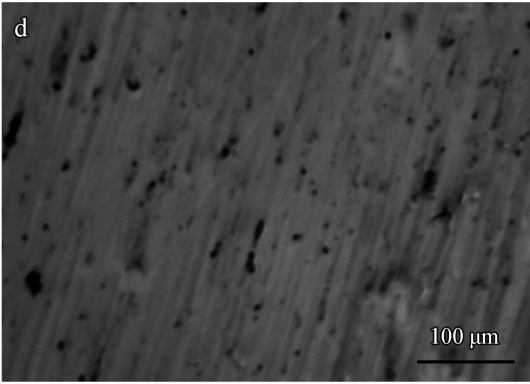
(a) Before irradiation



(b) After one pulse irradiation



(c) After 10 pulse irradiation



(d) After 30 pulse irradiation

图 2 辐照前后 W9Cr4V 试片表面形貌

Fig. 2 Surface morphologies of W9Cr4V specimens before and after HIPB irradiation

图 3 给出了原始样品和分别经过 1、30 次辐照后样品的 XRD 图谱。根据衍射图的变化可以得出,W9Cr4V 轴承钢材料在强流脉冲离子束辐照前原始试片主要是由体心立方的马氏体 α' -Fe 和碳化物 M_7C_3 组成。经过多次辐照处理后,奥氏体的衍射峰(442)、(822)、(933)出现,而马氏体的衍射峰强度在(200)、(211)晶面明显减弱,在(110)晶面增强,碳化物衍射峰强度在(400)、(331)、(422)晶面有所减弱,在(511)、(822)、(933)晶面增强,说明近表层产生了没有择优取向的奥氏体相 γ -Fe、马氏体 α' -Fe 和生长择优面发生改变的碳化物 M_7C_3 。奥氏体 γ -Fe 的出现

是由于强流脉冲离子束快速加热及随后的快速冷却过程使 α' -Fe 向奥氏体 γ -Fe 转变,形成淬火奥氏体相。图中奥氏体 γ -Fe 衍射峰宽化说明 HIPB 处理使 W9Cr4V 试片表面晶粒细化, α' -Fe 衍射峰峰移说明 HIPB 辐照使 W9Cr4V 表层中产生了宏观残余应力。奥氏体 γ -Fe 相、晶粒细化和宏观残余应力的产生,能够改善金属材料的耐磨性和耐腐蚀性^[10]。

2.2 显微硬度

图 4 所为 W9Cr4V 原始试片和分别经过 1、10、20 次和 30 次辐照后样品表面显微硬度变化曲线。

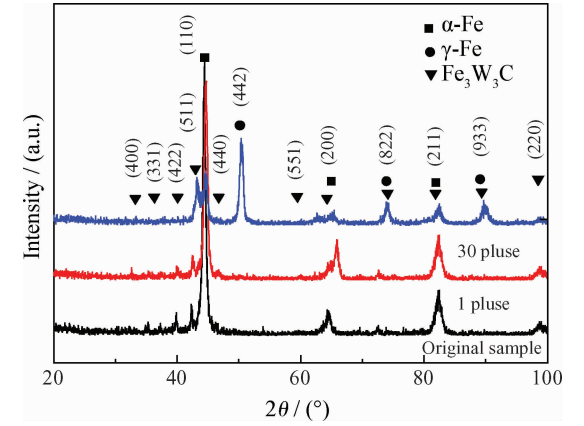


图 3 W9Cr4V 原始试片与辐照 1 和 30 次 XRD 图谱
Fig. 3 XRD patterns of surface layer before and after HIPB irradiation

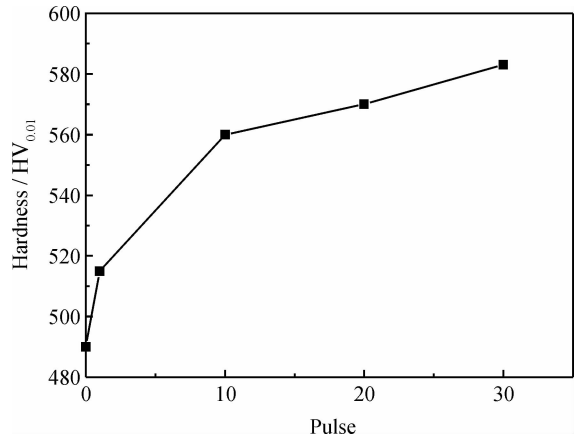


图 4 W9Cr4V 原始试片与辐照后显微硬度变化曲线
Fig. 4 Hardness curve of original and irradiated W9Cr4V specimens

从图中可以看出随着辐照次数的增加,材料显微硬度提高,经计算,最高硬度比基体提高 19.63%。W9Cr4V 试片硬度提高的主要原因是:

① HIPB 辐照注入的原子进入位错附近或固溶体,产生固溶强化。同时,注入的 C、H 元素与金属元素形成化合物或其弥散相,产生弥散强化。

② HIPB 辐照产生了 GPa 级的冲击波,在冲击波作用的近表层区域,材料发生明显的塑性变形,引起大量的位错等缺陷,缺陷在表面应力和应力波的驱动下发生移动而重新分布,最终形成稳定的网络分布,强化了 W9Cr4V 近表层。

③ W9Cr4V 的主要合金元素钨和钒可形成高熔点的特殊碳化物,可以以极小的特殊碳化物形式弥散析出,很难聚集长大,也保证了较好的高热硬性。此外,离子轰击造成的表面压应力导致的

冷作硬化作用、衍射峰宽化、晶粒度大幅减小等效应对表面显微硬度的提高也起到了积极作用^[11]。

2.3 耐磨性

对 POD 磨痕用轮廓仪测定各个试片磨痕轮廓(见图 5),并计算截面积,换算出磨损体积,然后除以载荷和磨损滑动距离得到比磨损率。

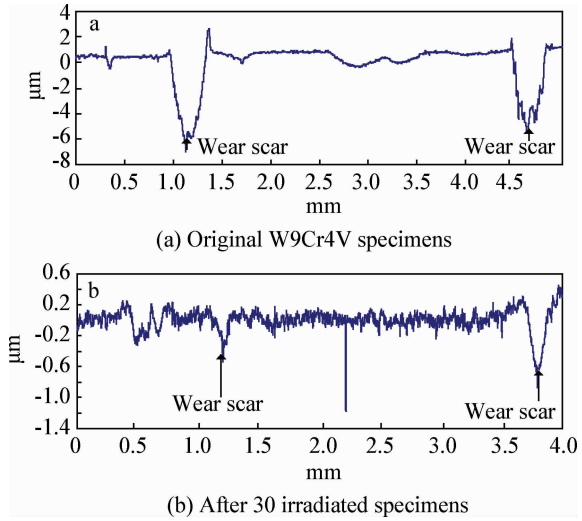


图 5 试片磨痕轮廓
Fig. 5 Wear scar profile

由图可知,试片经强流脉冲离子束辐照处理后,耐磨性有较大改善,辐照 30 次后 W9Cr4V 试片提高近 2 倍。HIPB 辐照前后试片的比磨损率分别为 $3.72 \times 10^{-15} \text{ m}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 、 $3.3 \times 10^{-16} \text{ m}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。

耐磨性提高有以下原因:① HIPB 辐照引起近表层成分与结构的改变;注入元素聚集在因离子轰击产生的刃型位错线周围,形成柯氏气团^[12],阻碍了位错在外力作用下的移动,加上高硬度弥散析出物引起的强化,从而提高了耐磨性;② HIPB 辐照使 W9Cr4V 表面层产生了大量位错等缺陷提高了显微硬度,产生了宏观残余应力^[13];③ HIPB 辐照使 W9Cr4V 表面层中出现奥氏体 $\gamma - \text{Fe}$ 成分,有利于耐磨性能的提高^[14];④ 晶粒细化使 W9Cr4V 表面层硬度提高的同时也增加了韧性,从而避免或减少了因崩刃而导致的磨损,从而提高了 W9Cr4V 的耐磨性能。

2.4 耐腐蚀性

图 6 是原始试片和经过 30 次辐照后的试片表面极化曲线对比图。经 Origin 软件拟合计算

得塔菲尔区自腐蚀电位和电流分别为 -0.472V 、 $3.913 \times 10^{-3}\text{ mA}$ 和 -0.416V 、 $8.947 \times 10^{-6}\text{ mA}$, 30 次辐照后自腐蚀电位提高, 电流降低, 说明耐蚀性得到提高。

耐蚀性的提高主要有 3 个方面的原因, 首先随着辐照次数的增加, 奥氏体含量增多, 奥氏体为面心立方结构, 耐蚀性较好; 其次随着表面碳化物的减少, 碳化物中的 Cr 析出, 使其形成固溶体, 提高了耐蚀性; 最后由于表面晶粒细化, 也能提高合金的耐蚀性。

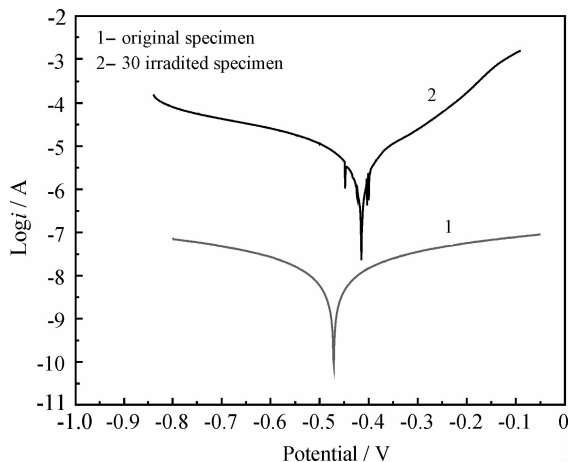


图 6 W9Cr4V 原始试片和经过 30 次辐照后的试片表面极化曲线对比图

Fig. 6 Polarization curves of original and irradiated W9Cr4V specimens with 30 times

3 结 论

(1)HIPIB 辐照显著改善了航空轴承钢材料 W9Cr4V 的表面性能, 对试片的相结构产生了影响, 有奥氏体相出现, 碳化物及马氏体择优面发生改变, 三种合金衍射峰都向高角方向偏移并有宽化现象。

(2)HIPIB 辐照轴承钢 W9Cr4V 后, 试片硬度有大幅提高, 最高硬度比基体提高 19.63%; 耐磨性能显著提升, 辐照 30 次后 W9Cr4V 试片提高近 2 倍。

(3)经辐照后, 其自腐蚀电位显著提高, 电流密度从 $3.913 \times 10^{-3}\text{ mA}$ 降低为 $8.947 \times 10^{-6}\text{ mA}$, 使材料表面耐蚀性得到了明显改善。

参考文献

- [1] Remnev G E, Isakov I F, Tarbokov V A, et al. High intensity pulsed ion beam sources and their industrial applications [J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 114(2/3): 206-212.
- [2] Davis H A, Stinnett R W, Yatsui K. Intense ion-beam treatment of materials [J]. MRS Bulletin, 1996, 21(8): 121.
- [3] Remnev G E, Shulov V A. Application of high-power ion beams for technology [J]. Laser and Particle Beams, 1993, 11(4): 707-731.
- [4] Piekoszewski J, Werner Z, Szymczyk W. Application of high intensity pulsed ion and plasma beams in modification of materials [J]. Vacuum, 2001, 63: 475-481.
- [5] 朱小鹏, 董志宏, 刘臣, 等. 强流脉冲离子束表面再制造技术原理与应用 [J]. 中国表面工程, 2006, 19(5): 143-145.
- [6] 乐小云. 强脉冲离子束最新研究进展 [C]. 首届等离子体在航空航天中的应用专题研讨会. 西安: 2011.
- [7] 李炯辉, 林德成. 金属材料金相图谱上册 [M]. 北京: 机械工业出版社.
- [8] 张罡, 毕鉴智, 李玉海, 等. 流脉冲离子束金属材料表面强化技术在中国的研究进展 [J]. 沈阳理工大学学报, 2005, 24(1): 1-5.
- [9] Yan S, Le X Y, Zhao W J, et al. A possible thermodynamic mechanism of craters formation on metal surfaces caused by intense pulsed ion beams [J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 193(1/2/3): 69-74.
- [10] 王仁智. 工程金属材料/零件的表面完整性及其断裂抗力 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(5): 55-57.
- [11] 韩春艳, 李明娟. 强脉冲离子束辐照金属材料表面改性机理研究 [J]. 中国水运, 2007, 5(8): 112-113.
- [12] Korenev A S, Perry A J. Pulsed high current ion beam processing equipment [J]. Surface and Coatings Technology, 1997, 90(1): 21-28.
- [13] 梅显秀, 马腾才, 王秀敏, 等. 强流脉冲离子束辐照 W6Mo5Cr4V2 高速钢表面改性研究 [J]. 金属学报, 2003, 39(9): 926-931.
- [14] 李征, 王文健, 刘启跃. 纳米添加剂对 GCr15/1045 钢摩擦磨损性能的影响 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(4): 68-72.

作者地址: 陕西省西安市灞桥区

710038

空军工程大学工程学院 12 队

Tel: (029) 8478 7527

E-mail: yq6962@163.com