

# 稀土 $\text{La}_2\text{O}_3$ 对 45 钢渗硼层性能的影响

王兰<sup>1</sup>, 吴奕明<sup>2</sup>, 卞国阳<sup>2</sup>, 谢欣宇<sup>2</sup>

(1. 江苏大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏大学京江学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** **目的** 研究渗硼剂中稀土氧化物  $\text{La}_2\text{O}_3$  的添加量对 45# 钢渗硼层厚度及性能的影响。**方法** 通过在渗硼剂中添加质量分数为 0%、5%、10% 的  $\text{La}_2\text{O}_3$ , 对 45# 钢在 850 °C 进行 4 h 渗硼处理, 利用金相显微镜观察渗硼层的形貌并测试其厚度, 利用 XRD 分析渗硼层的物相结构, 利用显微硬度计、磨损试验机、电化学工作站对渗硼层的硬度、耐磨性、耐腐蚀性以及脆性进行测定及衡量。**结果** 45# 钢渗硼后, 硬度显著提高, 且在渗剂中加入 5% 和 10% 的  $\text{La}_2\text{O}_3$  进行渗硼后, 渗硼层厚度及硬度较渗剂中不加  $\text{La}_2\text{O}_3$  均有明显增加。在渗剂中添加不同含量的  $\text{La}_2\text{O}_3$  对渗硼层的耐磨性、耐蚀性以及脆性影响不同。添加 5%  $\text{La}_2\text{O}_3$  进行渗硼后, 渗硼层的耐磨性、耐蚀性最佳, 脆性最小; 添加 10%  $\text{La}_2\text{O}_3$  进行渗硼后, 渗硼层的耐磨性和脆性都比未加  $\text{La}_2\text{O}_3$  的要差, 但耐腐蚀性较未加  $\text{La}_2\text{O}_3$  的要好。**结论** 综合渗硼层的厚度、硬度、耐磨性、耐腐蚀性以及脆性指标, 在渗硼剂中加入 5%  $\text{La}_2\text{O}_3$  时, 45# 钢渗硼层厚度适中, 性能最佳。

**关键词:** 渗硼; 稀土  $\text{La}_2\text{O}_3$ ; 硬度; 耐磨性; 耐蚀性; 脆性

中图分类号: TG156.8 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2019)02-0094-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.02.014

## Effect of Rare Earth $\text{La}_2\text{O}_3$ on Performance of 45 Steel Boronized Layer

WANG Lan<sup>1</sup>, WU Yi-ming<sup>2</sup>, BIAN Guo-yang<sup>2</sup>, XIE Xin-yu<sup>2</sup>

(1. School of Material Science & Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Jiangsu University Jinjiang College, Zhenjiang 212013, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the effect of the content of rare earth oxide  $\text{La}_2\text{O}_3$  in the boronizing agent on the thickness and properties of boronizing layer of 45 steel. 0%  $\text{La}_2\text{O}_3$ , 5%  $\text{La}_2\text{O}_3$  and 10%  $\text{La}_2\text{O}_3$  were added to boronizing agent for boronizing 45 steel at 850 °C for 4 hours. The morphology and thickness of the boronizing layer were observed and measured by metallographic microscope; the phase structure of boronizing layer was analyzed by XRD; and the hardness, wear resistance, corrosion resistance and brittleness of boronizing layer were measured and determined by microhardness tester, wear tester and electrochemical workstation. Boronizing layer of 45 steel could remarkably improve the hardness of base material, and adding 5%  $\text{La}_2\text{O}_3$  and 10%  $\text{La}_2\text{O}_3$  to the infiltration agent could significantly increase the thickness and hardness of boronizing layer compared with that without  $\text{La}_2\text{O}_3$  in the infiltration agent. However, different contents of  $\text{La}_2\text{O}_3$  had different effects on the wear resistance, corrosion resistance and brittleness of boronizing layer. The boronizing layer with 5%  $\text{La}_2\text{O}_3$  in the infiltration agent had the best wear resistance and corrosion resistance and the lowest brittleness. The wear resistance and brittleness of boronizing layer with 10%  $\text{La}_2\text{O}_3$  in the infiltration agent were worse than those without  $\text{La}_2\text{O}_3$ , but the corrosion resistance was

收稿日期: 2018-07-27; 修订日期: 2018-09-30

Received: 2018-07-27; Revised: 2018-09-30

基金项目: 江苏大学高级人才启动基金 (No. 15JDG076)

Fund: Supported by the Initial of Jiangsu University Senior Talent (No. 15JDG076)

作者简介: 王兰 (1974—), 女, 博士, 副研究员, 主要研究领域: 金属材料的表面改性研究、金属材料的摩擦磨损研究、金属材料金相分析。邮箱: cshcwj@mail.ujs.edu.cn

**Biography:** WANG Lan (1974—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: surface modification of metal materials, friction and wear of metal materials and metallographic analysis. E-mail: cshcwj@mail.ujs.edu.cn

better than that without  $\text{La}_2\text{O}_3$ . Combined with the boronizing layer thickness, hardness, wear resistance, corrosion resistance and brittleness indexes, when 5%  $\text{La}_2\text{O}_3$  is added to the boronizing agent, and the thickness of boronizing layer is moderate and the performance is optimal.

**KEY WORDS:** boriding; rare earth  $\text{La}_2\text{O}_3$ ; hardness; wear resistance; corrosion resistance; brittleness

渗硼作为一种典型的化学热处理工艺,因其得到的渗硼层具有硬度高、耐磨性好、耐蚀性好以及抗氧化性能优异等优点而被广泛应用于工业生产中<sup>[1-2]</sup>。传统的渗硼工艺中常常会出现渗硼速度慢、硼化物脆性大等问题,为解决这些问题,一些学者提出了采用稀土元素作为渗剂、共渗剂来改善渗硼工艺和提高渗硼件的性能<sup>[3-5]</sup>。因此近年来,稀土元素对于固体渗硼的影响得到了很多学者的广泛关注。苏振国等<sup>[6]</sup>研究发现,添加适量的稀土元素可以显著提高渗硼层厚度,且可获得高载条件下优异的耐磨性。曹晓明等<sup>[7]</sup>研究发现,固体渗硼时加入稀土可使渗硼层更加均匀致密,并可显著提高渗硼层的耐锌液腐蚀性。高玉芳等<sup>[8]</sup>发现,在工件表面预涂稀土涂层进行固体粉末渗硼,不仅可以获得均匀单一的  $\text{Fe}_2\text{B}$  层,而且可以提高渗硼层的厚度。常延武等<sup>[9]</sup>探讨了稀土对化学热处理的催渗机理,发现稀土可以增加渗硼层的硬度,但不一定能增加渗硼层的厚度。刘湘<sup>[10]</sup>发现,在渗硼剂中加入稀土可以增加渗硼层厚度,并可改善渗硼层质量。综上所述,在渗硼剂中加入稀土元素,可以改善渗硼层的质量,但其对渗硼层厚度及性能的影响还存有不同观点。因此,稀土元素在渗硼中的作用及其对渗硼层厚度及性能的影响尚缺乏系统和深入的研究。本研究以中碳钢 45# 钢为基材,对其进行固体粉末渗硼,研究渗硼剂中稀土  $\text{La}_2\text{O}_3$  的加入量对渗层厚度及性能的影响,以期在渗硼剂中加入稀土元素对渗硼层厚度及性能影响的研究提供一定的理论数据,从而能扩大稀土元素在渗硼中的应用,优化渗硼工艺。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

选用正火态 45# 钢作为渗硼试样,尺寸为  $20\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 。渗硼前,对 45# 钢进行预处理,用 180#、320#、400#、500#、600# 碳化硅金相砂纸对试样进行磨制,然后用丙酮超声波清洗,装入试样袋中备用。渗硼剂为洛阳某渗剂厂生产的 LSB-II 型粒状渗硼剂,粒度为  $0.5 \sim 2\text{ mm}$ 。渗硼容器为刚玉坩埚,渗硼时,先在坩埚底部铺上一层加有不同含量  $\text{La}_2\text{O}_3$  的渗硼剂,然后将预处理好的试样放入坩埚内,试样上方再铺上渗硼剂。为防止 45# 钢在渗硼过程中发生氧化,用水玻璃和耐火材料混合作为粘结剂涂于刚玉坩埚与其盖子之间。渗硼工艺:加热温度为  $850\text{ }^\circ\text{C}$ ,保

温时间为 4 h,冷却方式为炉冷。

### 1.2 试验方法

采用 Zeiss 光学显微镜观察渗硼层及基材组织,并测试渗硼层厚度。采用 D/Max-2500/pc X 射线衍射仪 (XRD) 对渗硼层的结构进行分析。采用 FUTURE-TECH FM800 全自动显微硬度计测试渗硼层及基材的硬度,并根据硬度压痕形貌对渗硼层的脆性进行评级。采用 MM-2000 磨损试验机进行耐磨实验,实验中摩擦副采用环-块式,块状试样为渗硼试样,环状试样为 GCr15 ( $R_a$  为  $0.5\text{ }\mu\text{m}$ ),状态为淬火+低温回火,硬度为 62~65HRC。实验在干摩擦状态下进行,载荷为 10 N,实验时间为 30 min,环状试样转速为 200 r/min,用精度为 0.01 mg 的电子天平称量其磨损质量损失。采用 OLYMPUS-OLS4100 激光共聚焦显微镜测试渗硼试样表面的粗糙度。采用辰华 CHI-750E 型电化学工作站对基材及渗硼层进行耐蚀性测试,Ag/AgCl 为参比电极,铂 (Pt) 丝为辅助电极,试样为工作电极,腐蚀介质为 3.5%NaCl。

## 2 结果与分析

### 2.1 45# 钢渗硼层的厚度及形貌

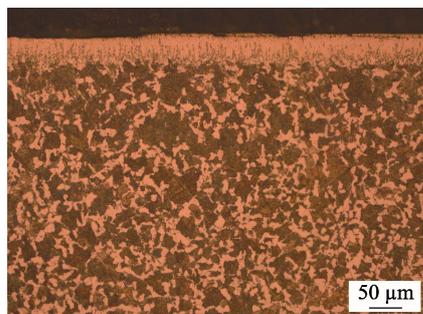
表 1 为不同渗硼工艺参数条件下 45# 钢渗硼层的厚度。由表 1 中数据可知,随着稀土  $\text{La}_2\text{O}_3$  的加入,渗硼层厚度大幅增加,渗硼剂中稀土  $\text{La}_2\text{O}_3$  的加入量越多,渗硼层厚度越大。说明  $\text{La}_2\text{O}_3$  的加入具有明显的催渗作用,且加入量越多,催渗效果越显著。由扩散第一定律可知,影响元素的渗速有两方面的因素:扩散元素的浓度、扩散系数。要提高渗速,必须提高扩散元素的浓度或扩散系数。因此稀土加入到渗硼剂中提高渗速,一方面是稀土的加入能加速渗硼剂的分解,提高渗剂中的硼势,同时由于稀土元素具有特殊的物化性能,可净化活化金属表面,加速活性硼原子的吸附。另一方面,稀土元素的原子半径 ( $\text{La}$  为  $0.1871\text{ nm}$ ) 比铁原子 ( $0.127\text{ nm}$ ) 大 45% 左右,微量稀土渗入后会起其周围铁原子的点阵畸变,增加了扩散通道,降低了扩散激活能,提高了扩散系数,从而起到催渗作用<sup>[11-14]</sup>。

在渗硼剂中加入 0%、5%、10%  $\text{La}_2\text{O}_3$ , 45# 钢在  $850\text{ }^\circ\text{C}$  渗硼 4 h 后的剖面形貌如图 1 所示。由图 1 可知,45# 钢基材组织为珠光体+铁素体,表层白亮层为渗硼层,可以观察到,渗硼层均以针状物契入基体。

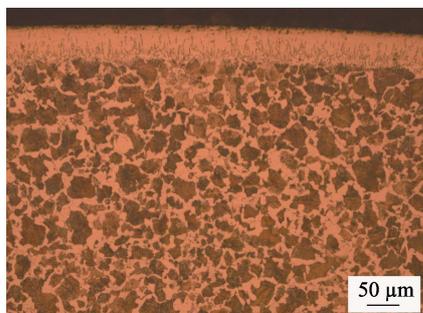
表 1 不同渗硼工艺参数条件下渗硼层的厚度 (850 °C 渗硼 4 h)

Tab.1 Thickness of boronized layer under the different boronizing process parameters (boronized at 850 °C for 4 h)

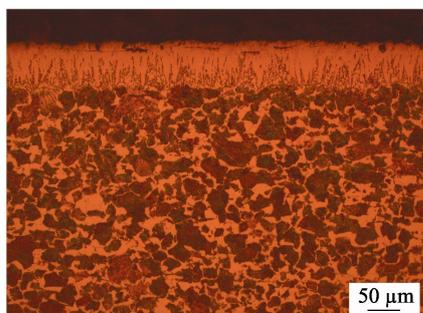
Content of La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%	0	5	10
Thickness of boronized layer/ $\mu\text{m}$	45	62	82



a 无La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



b 5%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



c 10%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

图 1 45#钢渗硼层的剖面形貌

Fig.1 Cross-sectional morphologies of boronizing layer of 45# steel

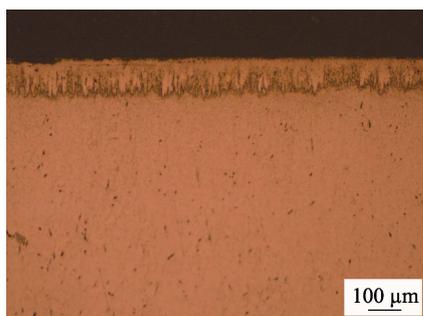


图 2 45#钢渗硼层的剖面形貌 (未腐蚀, 10%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

Fig.2 Cross-sectional morphology of boronizing layer of 45# steel (uncorroded, 10% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

图 2 为在渗剂中加入 10%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 45#钢在 850 °C 渗硼 4 h 后未经腐蚀的剖面形貌, 可更加清晰地观察到渗硼层的针状特征。可以发现, 在渗剂中加入 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 渗硼层的形貌特征并没有明显改变。

## 2.2 45#钢渗硼层的结构分析

在渗硼剂中加入 0%、5%、10% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 45#钢在 850 °C 渗硼 4 h 后渗硼层的 X 衍射分析如图 3 所示。用未加入 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的渗硼剂对 45#钢进行渗硼后, 渗硼层主要为 FeB, 伴有少量的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>。在渗剂中加入不同含量的 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 进行渗硼后, 渗硼层主要为 Fe<sub>2</sub>B, 还有少量的 FeB 和 LaF<sub>3</sub>。LaF<sub>3</sub> 是由于渗剂中的 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在渗剂反应物 BF<sub>3</sub> 的作用下, 发生卤化作用而形成<sup>[15]</sup>。

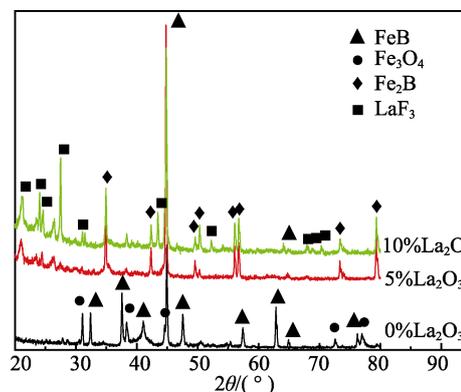


图 3 45#钢在不同工艺条件下渗硼后的 X 衍射分析

Fig.3 X-ray diffraction analysis of boronized layer of 45# steel under different technological conditions

## 2.3 45#钢渗硼层的硬度

在渗硼剂中加入 0%、5%、10% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 850 °C 渗硼 4 h 后渗硼层的硬度如图 4 所示。由图 4 可知, 经过渗硼后, 渗硼层硬度为 1323~1408 HV, 较 45#钢原材料硬度 (197 HV) 均有大幅度提高, 且伴随着 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的加入, 硬度逐渐增加, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 加入量越多, 硬度越高。

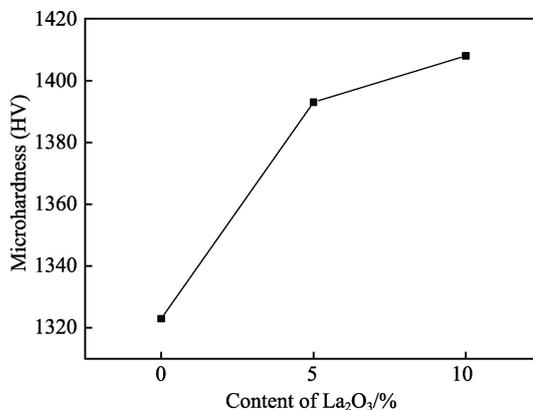


图 4 45#钢不同工艺条件下渗硼后渗硼层的硬度

Fig.4 Microhardness of boronized layer of 45# steel under different technological conditions

## 2.4 45#钢渗硼层的耐腐蚀性能

在渗硼剂中加入 0%、5%、10% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 850 °C

渗硼 4 h 后, 45<sup>#</sup>钢在 3.5%NaCl 介质中的极化曲线如图 5 所示, 自腐蚀电流密度和自腐蚀电位见表 2。结合图 5 和表 2 数据可知, 在渗硼剂中加入 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 进行渗硼后, 自腐蚀电位较 45<sup>#</sup>钢原材料和渗剂中未加 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 进行渗硼时明显增加, 自腐蚀电流密度较 45<sup>#</sup>钢原材料和未加 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 进行渗硼时减小了一个数量级。自腐蚀电位反映发生腐蚀的难易程度, 自腐蚀电流密度反映腐蚀速率。自腐蚀电位越大, 越难腐蚀; 自腐蚀电流密度越小, 腐蚀速率越低。由表 2 中数据可知, 渗硼剂中加入 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 可明显改善渗硼层的耐腐蚀性能。在渗硼剂中加入 5%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 渗硼层自腐蚀电位最大, 自腐蚀电流密度最小, 耐蚀性最好; 在渗硼剂中加入 10% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 渗硼层的耐蚀性较渗硼剂中加入 5%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 要差一些, 但较 45<sup>#</sup>钢原材料和未加 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 进行渗硼时有明显改善。

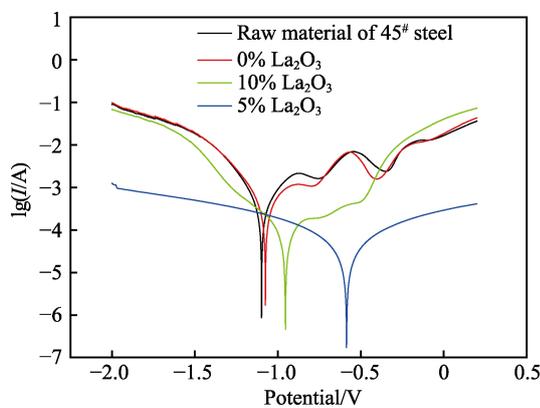


图 5 45<sup>#</sup>钢及 45<sup>#</sup>钢渗硼层的极化曲线  
Fig.5 Polarization curves of 45<sup>#</sup> steel and boronized layer of 45<sup>#</sup> steel

表 2 45<sup>#</sup>钢原材料及经不同工艺渗硼后  
自腐蚀电流密度和自腐蚀电位

Tab.2 Self-corrosion current density and self-corrosion potential of 45<sup>#</sup> steel and boronized layer of 45<sup>#</sup> steel under different technological conditions

Technological conditions	Self-corrosion potential/V	Self-corrosion current density/(A·cm <sup>-2</sup> )
Raw materials of 45 <sup>#</sup> steel	-1.098	3.140×10 <sup>-4</sup>
Add 0%La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-1.071	1.284×10 <sup>-4</sup>
Add 5%La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.576	2.988×10 <sup>-5</sup>
Add 10%La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.954	7.959×10 <sup>-5</sup>

## 2.5 45<sup>#</sup>钢渗硼层的表面粗糙度及耐磨性

表 3 列出了 45<sup>#</sup>钢及不同渗硼工艺参数条件下渗硼层的表面粗糙度数据。由表 3 中数据可知, 45<sup>#</sup>钢经过不同工艺渗硼后, 渗硼层的表面粗糙度较 45<sup>#</sup>钢原材料均有所增加, 其中以渗硼剂中加入 10%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的渗硼层表面粗糙度最大。45<sup>#</sup>钢及不同渗硼工艺参数条件下渗硼层的磨损质量损失也列于表 3, 可以看出, 在渗硼剂中加入 5%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 渗硼层的磨损质量损

表 3 45<sup>#</sup>钢原材料及经不同工艺渗硼后的  
表面粗糙度及质量损失

Tab.3 Surface roughness and wear loss of 45<sup>#</sup> steel and boronized layer of 45<sup>#</sup> steel under different technological conditions

Technological conditions	Surface roughness Ra/μm	Wear loss/(mg·min <sup>-1</sup> )
Raw materials of 45 <sup>#</sup> steel	0.279	7.82
Add 0% La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.262	1.79
Add 5% La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.031	1.12
Add 10% La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.877	2.45

失最小, 其次为渗剂中不加 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的渗硼层。在渗硼剂中加入 10%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的渗硼层磨损质量损失大于未加 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的渗硼层, 而 45<sup>#</sup>钢原材料的磨损损失最大。一般来说, 硬度越高, 耐磨性越好, 即材料的高硬度能有效地提高抗粘着和磨粒磨损的能力<sup>[16]</sup>。45<sup>#</sup>钢原材料硬度最低 (197HV), 磨损质量损失最大, 耐磨性最差, 但经不同工艺渗硼后, 其耐磨性并没有遵循这个规律。加入 10%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的渗硼层硬度最高, 但耐磨性并不是最好。分析认为可能有两方面的原因: 一是在渗硼剂中加入 10%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 进行渗硼后, 渗硼层表面最为粗糙, 在磨损初期与对磨件 GCr15 的有效接触面积最小, 承受的压强最大, 磨损最快, 与此同时产生了较多高硬度的磨粒, 从而使渗硼层发生质量损失; 二是所产生的高硬度磨粒有一部分又进一步参与磨损, 对渗硼层表面起到犁削的作用, 从而使得磨损质量损失增加, 耐磨性略低。

## 2.6 45<sup>#</sup>钢渗硼层的脆性

渗硼层的脆性按照文献[7,17]进行评定。图 6 为渗硼层脆性压痕示意图。图 7 为在渗硼剂中加入 0%、5%、10% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 45<sup>#</sup>钢在 850 °C 渗硼 4 h 后渗硼层的硬度压痕形貌。根据硬度压痕形貌, 对照压痕脆性参照图, 可以发现, 当渗硼剂中无 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 时, 渗硼层脆性级别为 4 级 (图 7a); 当渗硼剂中加入 5%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 后, 渗硼层脆性级别为 1 级 (图 7b); 当渗硼剂中加入 10%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 后, 渗硼层的脆性级别为 5 级 (图 7c)。可以看出, 当渗硼剂中加入 5%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 可显著改善渗硼层的脆性, 但是当渗剂中加入 10%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 后, 渗硼层脆性高于未加渗硼剂的试样。这表明在渗剂中加入适量的 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 可明显改善渗层的韧性, 降低渗层的脆性, 但当超出一定范围后反而会降低渗层的脆性<sup>[18]</sup>。

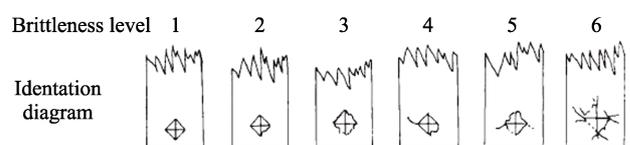


图 6 渗硼层脆性压痕参照图<sup>[7]</sup>  
Fig.6 Reference diagram of brittle indentation of boronizing layer<sup>[7]</sup>

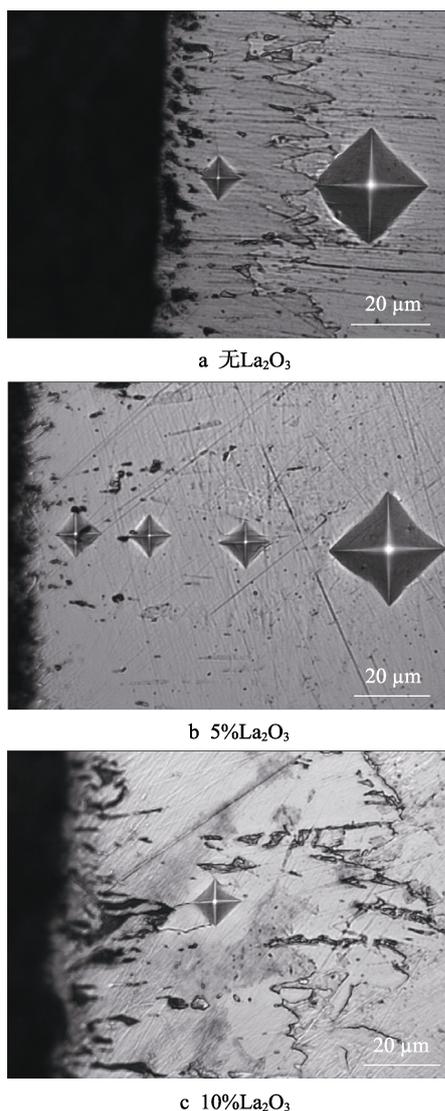


图7 45#钢不同工艺条件下渗硼后的渗硼层的压痕示意图  
Fig.7 Indentation diagram of boronizing layer of 45# steel under different technological conditions

### 3 结论

1) 在渗硼剂中加入  $\text{La}_2\text{O}_3$  进行渗硼后, 45#钢的渗硼层厚度明显增加。当  $\text{La}_2\text{O}_3$  加入量为 10% 时, 渗硼层厚度最大。

2) 单一渗硼后可大幅提高 45#钢表面硬度, 在渗剂中加入  $\text{La}_2\text{O}_3$  进行渗硼后, 渗硼层硬度更高。当  $\text{La}_2\text{O}_3$  加入量为 10% 时, 渗硼层硬度最高。

3) 在渗剂中加入 5%  $\text{La}_2\text{O}_3$  进行渗硼后, 渗硼层磨损质量损失最小, 耐磨性最好。

4) 渗硼剂中加入  $\text{La}_2\text{O}_3$  可明显改善渗硼层的耐腐蚀性能。当渗硼剂中加入 5%  $\text{La}_2\text{O}_3$ , 渗硼层自腐蚀电位最大, 自腐蚀电流密度最小, 耐蚀性最好。

5) 综合渗硼层厚度、硬度、耐磨性、耐腐蚀性以及脆性指标, 本实验中, 在渗剂中加入 5%  $\text{La}_2\text{O}_3$ , 渗硼层厚度适中, 性能最佳。

### 参考文献:

- [1] YAN P X, ZHANG X M, XU J W, et al. High-temperature behavior of the boride layer of 45 carbon steel[J]. Materials chemistry and physics, 2001(71): 107-110.
- [2] SPENCE T W, MAKHLOUF M M. Characterization of the operative mechanism in potassium fluoborate activated pack boriding of steels[J]. Materials processing technology, 2005(168): 127-136.
- [3] 黄小明, 崔霞, 欧阳德来, 等. 稀土催渗下的 45 钢固体渗硼工艺研究[J]. 热加工工艺, 2013, 2(10): 194-197.  
HUANG Xiao-ming, CUI Xia, OU YANG De-lai, et al. Study on solid-boronizing process with rare earth elements catalysis for 45 Steel[J]. Hot working technology, 2013, 42(10): 194-197.
- [4] 王丽凤, 王丽瑛, 魏君波, 等. 40Cr 钢硼稀土共渗的组织与性能研究[J]. 煤炭技术, 1996(3): 24-26.  
WANG Li-feng, WANG Li-ying, WEI Jun-bo, et al. Study on microstructure and properties of rare earth boronizing for 40Cr steel[J]. Coal technology, 1996(3): 24-26.
- [5] 袁庆龙, 曹晶晶. 45 钢渗硼工艺对渗层组织与性能的影响[J]. 热加工工艺, 2010, 39(2): 134-136.  
YUAN Qing-long, CAO Jing-jing. Effect of boronization technology on microstructure and properties of boronizing layer on 45 steel[J]. Hot working technology, 2010, 39(2): 134-136.
- [6] 苏振国, 安健, 田旭, 等. 稀土粉末渗硼 45 钢的磨损与腐蚀性能[J]. 材料热处理学报, 2009(30): 183-190.  
SU Zheng-guo, AN Jian, TIAN Xu, et al. Wear and corrosion of properties of 45 steel boronized as activator[J]. Transactions of material and heat treatment, 2009(30): 183-190.
- [7] 曹晓明, 温鸣, 韩文祥, 等. 稀土元素对固体渗硼层的改性作用[J]. 中国稀土学报, 1997(4): 350-353.  
CAO Xiao-ming, WEN Ming, HANG Wen-Xiang, et al. Effect of rare earth elements on improve boronizing layer [J]. Journal of the chinese rare earth society, 1997(4): 350-353.
- [8] 高玉芳, 吴新宇. 预涂稀土涂层渗硼工艺及性能的研究[J]. 热加工工艺, 2001(2): 41-42.  
GAO Yu-fang, WU Xin-yu. Study on boronizing technology and properties of precoated rare earth coatings[J]. Hot working technology, 2001(2): 41-42.
- [9] 常延武, 徐洲. 稀土对化学热处理催渗作用的机理探讨[J]. 上海金属, 2001(5): 14-16.  
CHANG Yan-wu, XU Zhou. Discussion on the catalytic mechanism of rare earths in chemical heat treatment[J]. Shanghai metals, 2001(5): 14-16.

- [10] 刘湘. 稀土加入量对硼砂型固体渗硼效果的影响[J]. 热加工工艺, 2004(6): 34-36.  
LIU Xiang. Influence of addition of RE element on effect of pack boronizing with borax[J]. Hot working technology, 2004(6): 34-36.
- [11] 濮胜君, 杨浩鹏, 汪宏斌, 等. 稀土对 H13 钢固体渗硼层高温摩擦磨损性能的影响[J]. 材料研究学报, 2015, 29(7): 481-488.  
PU Sheng-jun, YANG Hao-peng, WANG Hong-bin, et al. Effect on rare earth Ce on high temperature friction and wear property of pack boronized H13 Steel[J]. Chinese journal of materials research, 2015, 29(7): 481-488.
- [12] 徐进, 朱坤. 稀土对 40Cr 钢固体渗硼过程的影响[J]. 热处理, 2006, 21(2): 36-38.  
XU Jin, ZHU Kun. Effect of RE on pack boronizing process for 40Cr steel[J]. Heat treatment, 2006, 21(2): 36-38.
- [13] 王洪海, 秦志伟. 含稀土固体渗硼剂渗硼处理实验[J]. 物理测试, 2006, 24(3): 36-37.  
WANG Hong-hai, QIN Zhi-wei. Experimental of the boronizing process of new solid boronizing supply agent containing RE[J]. Physical test, 2006, 24(3): 36-37.
- [14] 刘建建, 陈祝平, 杨光, 等. 稀土对 Q345 钢渗硼层的影响及催渗工艺研究[J]. 表面技术, 2012, 41(1): 86-88.  
LIU Jian-jian, CHEN Zhu-ping, YANG Guang, et al. Effect on rare earth on boronizing layer and catalysis process for Q345 steel[J]. Surface technology, 2012, 41(1): 86-88.
- [15] 黄拿灿. 稀土粉末渗硼剂的试验研究[J]. 广东机械学报, 1993, 11(2): 57-63.  
HUANG Na-can. Experimental study on rare earth powder boronizing agent[J]. Journal of Guangdong mechanical institute, 1993, 11(2): 57-63.
- [16] 邵红红, 纪嘉明. 发动机用铝合金化学复合镀研究[J]. 农业机械学报, 2002(1): 100-102.  
SHAO Hong-hong, JI Jia-ming. Study on electroless Ni-P-SiC composite coatings applied to an engine[J]. Transactions of the chinese society of agricultural machinery, 2002(1): 100-102.
- [17] CEISIK A H, BINDAL C. Fracture toughness of boride formed on low-alloy steels[J]. Surface and coatings technology, 1997(94-95): 561-565.
- [18] 郝少祥, 孙玉福, 杨凯军. Cr12MoV 钢渗硼工艺及渗层的组织与性能[J]. 金属热处理, 2006, 31(7): 67-71.  
HAO Shao-xiang, SUN Yu-fu, YANG Kai-jun. Microstructure and properties of boronizing layer and boronizing process of Cr12MoV steel[J]. Metal heat treatment, 2006, 31(7): 67-71.