

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20170824001

电场频率对45钢交流电场增强粉末法渗硼的影响

谢飞^{1,2}, 程健¹, 潘建伟³

(1. 常州大学 材料科学与工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 常州大学 江苏省材料表面科学与技术重点实验室, 江苏 常州 213164; 3. 常州大学 怀德学院, 江苏 常州 213016)

摘要: 在 800 ℃ 粉末法渗硼过程中对中碳 45 钢试样和渗剂施加交流电场, 研究电场频率对粉末法渗硼的影响规律和作用机制。对渗硼保温过程中试样的温度、渗硼层显微组织、相结构、厚度及显微硬度分布等进行观测分析。结果表明: 交流电场使试样温度高于渗硼保温炉温, 电场电流恒定时, 随频率从 20 Hz 增至 400 Hz, 试样温升先降低后升高, 硼化物层及增碳区厚度均先减小后增加; 当电场电流为 3 A 时, 硼化物层为单相 Fe₂B; 当电场电流 ≤ 2 A 时, 随频率增加, 硼化物层由 FeB+Fe₂B 双相变为单相 Fe₂B, 渗层表层硬度降低、硬度分布曲线趋于平缓。分析认为, 电场频率通过综合影响渗剂反应、活性硼原子及含硼活性基团在试样表面的吸附和试样内原子的扩散来影响渗硼。

关键词: 频率; 交流电场; 粉末法渗硼; 渗硼层; 组织

中图分类号: TG156.8

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)01-0039-06

Influences of Current Field Frequency on Alternating Current Field Enhanced Pack Boriding on 45 Steel

XIE Fei^{1,2}, CHENG Jian¹, PAN Jian-wei³

(1. School of Materials Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, Jiangsu; 2. Key Laboratory of Materials Surface Engineering of Jiangsu Province, Changzhou University, Changzhou 213164, Jiangsu; 3. Huaide College, Changzhou University, Changzhou 213016, Jiangsu)

Abstract: An alternating current field (ACF) was applied to samples and media during pack boriding on medium carbon 45 steel at 800 ℃. The effects and working mechanism of the A.C frequency on the boriding were studied. The temperature of the samples during the soaking of the boriding, boriding cases' microstructure, phases, thickness and micro-hardness distribution were investigated. The results show that the ACF makes the temperature of the boriding sample higher than that of the furnace during soaking. With the increase of the frequency from 20 Hz to 400 Hz, the temperature rise first decreases and then increases. The thickness of the boride zone and the carbon-enriched zone first decreases and then increases. When the ACF current is 3 A, the single phase Fe₂B is obtained. When the ACF current is not more than 2 A, with the increase of the ACF frequency, the boride zone changes from the dual phases FeB + Fe₂B to the single phase Fe₂B. The hardness of the surface layer decreases. The slope of the hardness profile along the boriding case becomes flat. It is proposed that the ACF frequency affects the pack boriding through affecting reactions among the boriding agent, adsorptions of active boron atoms and boron-containing species on the samples' surface, and diffusion in the treated samples.

Keywords: frequency; alternating current field; pack boriding; boriding case; microstructure

收稿日期: 2017-08-24; 修回日期: 2017-12-15

网络出版日期: 2018-01-05 14:49; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20180105.1448.032.html>

通讯作者: 谢飞(1964—), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向: 金属材料热处理、表面工程; **E-mail:** xiefei@cczu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(51171032)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51171032)

引文格式: 谢飞, 程健, 潘建伟. 电场频率对 45 钢交流电场增强粉末法渗硼的影响[J]. 中国表面工程, 2018, 31(1): 39-44.

XIE F, CHENG J, PAN J W. Influences of current field frequency on alternating current field enhanced pack boriding on 45 steel[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(1): 39-44.

0 引言

通过表面渗扩实现表面合金化是一种十分有效且较为经济地提高机械零部件表面性能的途径。对钢等多种金属材料渗硼可以显著提高材料表面硬度和耐磨性。粉末法渗硼由于具有对处理设备要求不高、工艺简便易行、零件处理表面质量好等优点，是目前工程实际中最常用的一种渗硼方式。

但是，传统粉末法渗硼存在渗速慢、处理时间长、处理温度高等缺点^[1-2]。为克服传统粉末法渗硼存在的不足之处，研究人员开展了广泛研究。为强化渗剂反应，提高活性硼原子或含硼活性基团的产率，活化渗扩件表面及增加渗扩件表面扩散通道，研究人员在渗硼剂中加入稀土等催化剂^[3-4]，在渗扩中采用流态床^[5]、等离子体^[6]、微波^[7]等技术，以及在渗硼前或渗硼过程中在渗扩件表面引入塑性变形^[8-9]。近年研究开发的电场增强粉末法渗硼技术是通过在粉末渗硼剂中设置的一对电极，对渗扩件和渗硼剂施加直流或交流电场，以达到强化渗剂反应、促进渗剂中及渗扩件内扩散的目的^[10-15]。其中直流电场增强粉末法渗硼(DC field enhanced pack boriding, DCFEPB)一般是以渗硼件为负极，正极面对渗硼件需渗硼面平行放置；而在交流电场增强粉末法渗硼(AC field enhanced pack boriding, ACFEPB)中，渗硼件一般位于两平行电极之间。相较于 DCFEPB，ACFEPB 在提高渗硼速度、优化渗硼层相结构和渗硼层力学性能方面更加具有优越性^[13-15]。

交流电场对渗硼的促进作用明显不同于直流电场，电场方向的交替变化应该是主因，因此需要重视研究电场频率的影响。目前报道的 ACFEPB 研究都是采用 50 Hz 的工频交流电场。

为更全面地探究交流电场对粉末法渗硼的作用，文中通过自行研制的变频交流电场增强粉末法渗硼装置，在粉末法渗硼过程中施加不同频率、不同电场电流的交流电场，研究电场频率对中碳 45 钢在中温 800℃ 粉末法渗硼中试样温度变化、所得硼化物层及其与心部基体间过渡区的组织、相结构、渗层硬度分布等的影响规律，为深入研究 ACFEPB 的特性和交流电场的作用机制，以及指导 ACFEPB 技术在工程实际中的应用提供试验基础。

1 试验方法

交流电场增强粉末法渗硼试验装置的主要部分如图 1 所示，其中可调交流电源不仅电流电压可调，频率亦可调，频率调节范围为 1~400 Hz。为检测渗硼保温阶段不同频率对电场中试样实际温度的影响，在试样旁设置一内插 K 型热电偶的参考样。试样采用热轧态 45 钢加工，尺寸为 5 mm×Φ10 mm，渗硼前试样表面依次经 106、38、18 和 13 μm(150、400、800 和 1 000 目)砂纸打磨。密封完毕的渗箱置于电阻炉中，随炉升温；待炉温至保温温度且试样温度稳定后，开始施加交流电场，进行渗硼计时，测温参考样温度会升高，经 5~10 min 达稳定温度，测温参考样稳定温度与电阻炉保温温度之差定义为交流电场导致的试样温升 Δ*T*。渗硼保温结束后，炉冷至室温，开箱取出试样进行分析。表 1 为渗硼工艺参数。

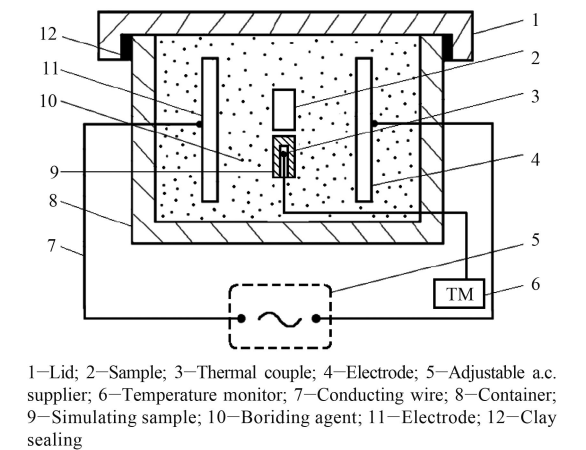


图 1 交流电场增强粉末法渗硼装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of the apparatus for ACF enhanced pack boriding

表 1 渗硼工艺参数			
Table 1 Parameters of boriding process			
Process code	ACB11-17	ACB21-26	ACB31-36
Current / A	1	2	3
Frequency / Hz	20, 28, 35, 50, 200, 300, 400	20, 35, 50, 200, 300, 400	20, 35, 50, 200, 300, 400
Boriding agent, w/%	10% ferroboron + 5% KBF ₄ + 1% charcoal + 84%SiC		
<i>T</i> / °C	800		
Soaking period / min	240		

采用金相显微镜观察分析渗硼试样截面组织并测量渗层厚度，硼化物层厚度定义为试样表面至硼化物齿顶距离的平均值，渗层增碳区厚度定

义为硼化物齿顶至试样正常心部组织边缘距离的平均值。采用维氏硬度计(载荷 50 g, 加载时间 15 s) 测量渗层硬度; 以 X 射线衍射仪(XRD) 分析渗层表层的物相(Cu 靶, $K\alpha$, 100 mA)。

2 试验结果

2.1 试样温升

图 2 给出 800℃ 保温、在不同电场电流时, 不同频率交流电场对试样温升的影响规律。渗硼过程中施加不同频率交流电场均会使试样实际温度升高, 且温升值随电场电流增加而增加, 这与前期实验结果一致^[15]。但电场电流恒定时, 不同

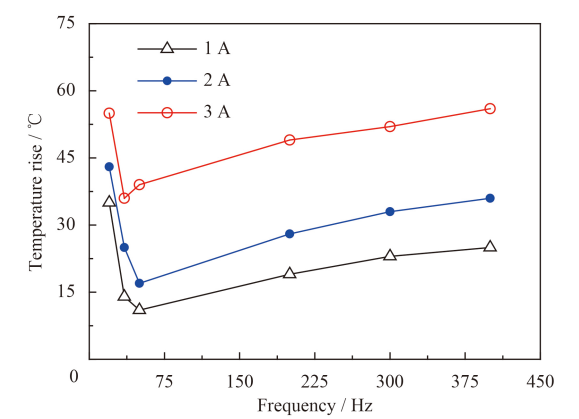


图 2 交流电场频率与试样温升的关系
Fig.2 Relationship between alternating current field frequency and temperature rise of boriding samples

频率电场的温升并不恒定, 而是随电场频率的增加, 先迅速降低, 后逐渐增加; 在电场电流为 1 A 和 2 A 时, 最低温升出现在 50 Hz, 而在 3 A 电场电流时, 最低温升出现在 35 Hz。

2.2 组织、物相

不同工艺渗硼试样的典型渗硼层组织的光学显微观察见图 3。与中碳钢常规粉末法渗硼组织相似, 不同频率交流电场增强 45 钢 800℃ 渗硼所得渗层依然由表层呈锯齿状的硼化物层及其与心部基体间的增碳区组成。齿间析出物为含硼渗碳体^[16]。较之心部组织, 增碳区的珠光体含量明显增加且变得非常粗大。硼化物齿间碳化物和渗硼层前增碳区的形成主要与硼化物层中排出的碳原子在硼化物齿间、层前的富集及硼化物层前端硼原子浓度的增加有关^[2, 16-17], 由于硼有抑制铁素体从奥氏体中析出的倾向, 尽管有的增碳区可能未达共析碳浓度, 但仍出现较均匀的伪共析珠光体(图 3(b)(d))^[16]。因此, 增碳区形貌及深度可在一定程度上反映硼原子在硼化物下基体中的渗入量和扩散深度。由图 3 可见, 在相同电场电流时 ($I=1\text{ A}$), 不同频率交流电场渗硼硼化物层下增碳区厚度存在巨大差异, 但心部组织基本相同。

对不同处理渗层的硼化物组织观察见图 4。由图可见, 在较高电场电流时 ($I=3\text{ A}$), 不同频率电场渗硼的硼化物层虽然均为单相 Fe_2B , 但

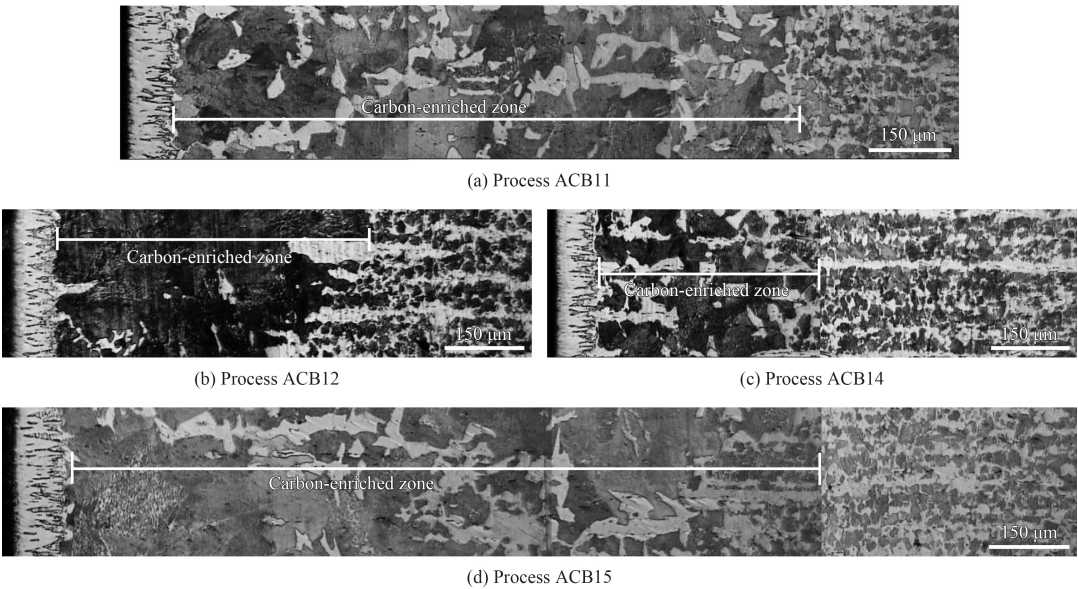


图 3 不同工艺渗硼试样的典型渗硼层组织
Fig.3 Typical microstructure of boriding layer on samples borided with different process

Fe₂B 齿的粗细不同, 可见电场频率不仅对硼化物层厚度有影响, 还影响 Fe₂B 齿的粗细。随着电场频率由 20 Hz 增至 400 Hz, Fe₂B 齿由粗大逐渐变细, 在电场频率为 35 Hz 时, Fe₂B 齿最细小, 然后又逐渐增大 (见图 4(a)~(f)); 在较低电场电流与频率时 ($I=1$ A), 硼化物层由 FeB 和 Fe₂B 双相构成, 随着频率增加, 硼化物层变为 Fe₂B (见图 4(g)~

(i)); 在电场频率相同 (400 Hz) 时, 增加电场电流能够显著粗化 Fe₂B 齿 (见图 4(f)(j))。

对电场电流为 2 A 的不同频率交流电场渗硼渗层表层进行 X 射线衍射分析, 结果如图 5 所示。经 20 Hz 交流电场渗硼的渗层为双相硼化物层, 随电场频率增加, 其余工艺所得硼化物层均为单相 Fe₂B。这进一步证实了金相显微结果。

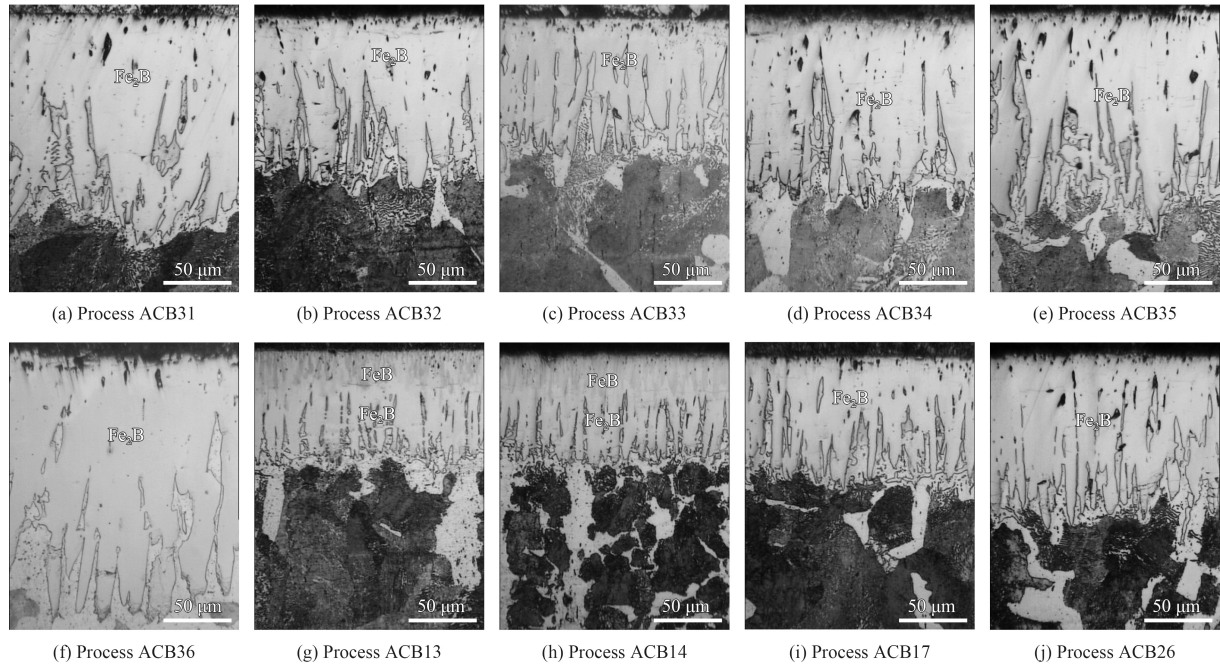


图 4 不同工艺渗硼试样的典型硼化物层组织

Fig.4 Typical microstructure of borides on samples borided with different process

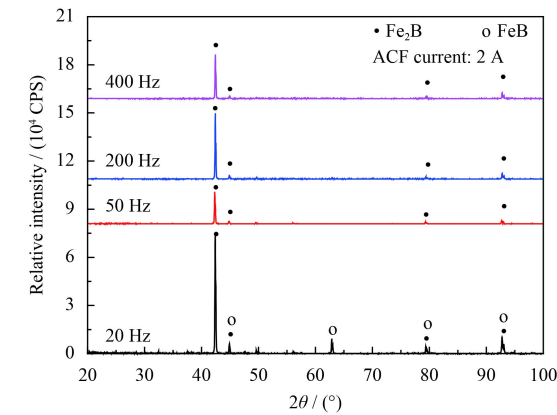


图 5 不同频率交流电场渗硼渗层表面 XRD 图谱

Fig.5 XRD patterns of samples' surface treated by ACFEPB with different frequency

2.3 渗层厚度、硬度

图 6 给出了在不同电场电流条件下所得硼化物层厚度与电场频率的关系曲线。由图可知, 在 3 种电场电流条件下, 随着交流电场频率的增

加, 硼化物层厚度均先减小后又增加, 最小厚度出现在频率为 50 Hz 时。

图 7 给出了电场电流分别为 1 A 和 2 A 时, 增碳区厚度随电场频率的变化曲线。由图可见,

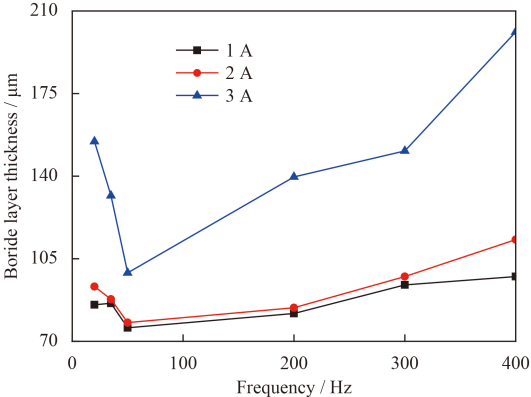


图 6 硼化物层厚度随电场频率的变化曲线

Fig.6 Boride layer thickness varied with alternating current field frequency

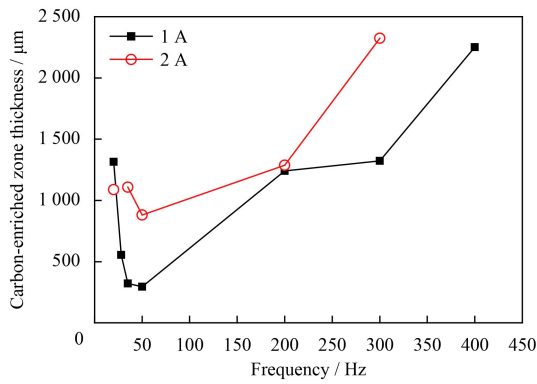


图 7 渗硼增碳区厚度随电场频率的变化曲线

Fig.7 Carbon-enriched zone thickness varied with alternating current field frequency

随着电场频率的增加, 增碳区厚度也是先减小后增加, 频率为 50 Hz 时, 增碳区厚度最小。这与硼化物层厚度随频率的变化规律一致。当电场电流增至 3 A 时, 不同频率交流电场渗硼的增碳区基本都深达心部。

图 8 给出了 20、50 和 400 Hz 交流电场渗硼 ($I = 2\text{ A}$) 的渗层硬度分布曲线。由图可知, 20 Hz 电场渗硼渗层的表层硬度最高, 达 1 900 $\text{HV}_{0.05}$, 这是由于其表层存在 FeB (见图 5); 50 Hz 和 400 Hz 渗硼层的表层硬度略低, 约 1 500~1 600 $\text{HV}_{0.05}$, 这是由于二者均由 Fe_2B 构成(见图 5); 400 Hz 渗硼层的硬度分布最为平缓。由渗层硬度分布还可以看出三者在渗层厚度上的差异。

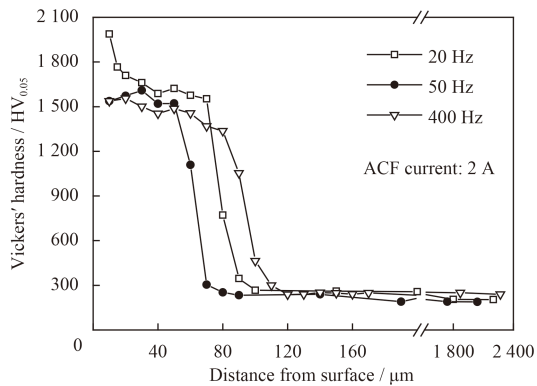


图 8 交流电场频率对渗硼层硬度分布的影响

Fig.8 Effects of alternating current field frequency on boriding layer hardness distribution

3 分析与讨论

上述结果表明, 作为描述交流电场方向变化快慢的物理量, 电场频率的变化对交流电场增强

粉末法渗硼渗层生长、组织、相构成和性能等具有显著影响。虽然目前尚不清楚电场频率差异为什么会使试样温升不同, 但不同频率交流电场使试样渗硼的实际温度高于保温炉温, 应该是造成上述结果的一个因素。但将图 6 和图 7 结果与图 2 的温升结果对比后就可发现, 不同频率交流电场导致的温升显然不是造成上述影响的主要因素, 例如在电场电流为 3 A 时, 20 Hz 电场导致的温升与 400 Hz 电场导致的温升相近, 但后者形成的硼化物层远比前者的厚; 在电场电流为 1 A 时, 20 Hz 电场导致的温升比 400 Hz 电场导致的温升要高, 但后者形成的渗层反而远比前者的厚。因此分析电场频率在渗硼中的作用机制不能局限于其热效应可能造成的影响, 必须从多方面进行综合分析。

研究表明^[13-15], 工频交流电场对粉末法渗硼的促渗作用是电场强化渗剂中活性硼原子的产生和扩散, 以及促进试样内原子扩散的综合结果, 是通过加热渗硼剂和试样、提高试样内空位浓度以及加剧渗硼气氛中活性粒子振动等途径实现的。

不同频率的交流电场影响渗硼的机制应该由 3 个主要方面构成: ①交流电场影响渗剂中带电粒子的振动以及渗剂分子核外电子的运动, 随着电场频率的增加, 渗剂中带电粒子的振动加剧, 渗剂分子能量提高, 渗剂间的相互反应加强, 气氛中活性硼原子及含硼活性基团浓度增加, 这有利于加速渗层生长, 但若试样表层的内扩散速度不足, 造成硼在表层的富集, 渗层表层则易形成富硼相 FeB ^[13-15]; ②随着交流电场频率的增加, 活性硼原子及含硼活性基团在试样表面的脱附增加, 这会降低试样表面的硼势, 不利于渗层生长以及富硼相 FeB 的形成; ③交流电场频率的增加会加速被渗扩试样原子的热振动, 相应会增加渗扩试样中的空位浓度, 这对硼在试样内的扩散具有促进作用, 从而在增加渗层厚度的同时减少硼在表层的富集, 避免富硼相 FeB 在表层的形成, 使表层硬度降低, 沿渗层生长方向硬度分布趋于平缓。前述试验结果实际是电场频率这 3 方面综合作用的结果。例如随着电场频率的增加, 硼化物层和增碳区厚度先减小, 在 50 Hz 附近出现极小值, 这时方面②对渗层生长的不利作用达极值; 之后随着电场频率进一步的增加, 方面①和

方面③对促进活性硼原子的产生与硼在基体内扩散的作用大于方面②的负面作用, 硼化物与增碳区厚度又进一步增加。

4 结 论

(1) 交流电场使渗硼试样温度高于渗硼保温炉温, 电场电流恒定时, 在 20~400 Hz 频率范围内, 随频率增加, 试样温升先降低后升高。

(2) 不同频率的交流电场对 45 钢粉末法渗硼的促渗效果不同。在 20~400 Hz 范围内, 随着交流电场频率增加, 硼化物层及增碳区厚度均先减小后增加, 沿层深生长方向的硬度分布趋于平缓。

(3) 交流电场频率不仅影响渗剂反应, 还影响活性硼原子及含硼活性基团在试样表面的吸附及硼在试样内的扩散。

参考文献

- [1] DAVIS J R. Surface hardening of steels: Understanding the basics[M]. Materials Park, OH: ASM International, 2002: 220.
- [2] HUNGER H J, TRUTE G. Boronizing to produce wear-resistant surface layer[J]. Heat Treat Met, 1994(2): 31-39.
- [3] 彭志辉, 杨志兵, 王少武, 等. 稀土对 45 钢渗硼层组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2004, 29(7): 31-34.
PENG Z H, YANG Z B, WANG S W, et al. Effect of rare earth on structure and properties of boronizing layer[J]. Heat Treatment of Metals, 2004, 29(7): 31-34 (in Chinese).
- [4] HUANG Z R, LI P N, XIE F, et al. Effect of rare elements on powder boro-carbo-nitriding at low temperature[J]. Journal of Rare Earths, 2000, 18(3): 205-209.
- [5] ANTHYMIDIS K G, STERGIOUDIS G, TSIPAS D N. Boride coatings on non-ferrous materials in a fluidized bed reactor and their properties[J]. Science & Technology of Advanced Materials, 2002, 3(4): 303-311.
- [6] BARTSCH K, LEONHARDT A. Formation of iron boride layers on steel by d. c.-plasma boriding and deposition process[J]. Surface & Coatings Technology, 1999, 116(99): 386-390.
- [7] 章桥新, 叶卫平, 张建红, 等. 微波场下渗硼介质的温度特性研究[J]. 热加工工艺, 2007, 36(20): 53-55.
ZHANG Q X, YE W P, ZANG J H, et al. Study temperature property of boriding medium under microwave field[J]. Hot Working Technology, 2007, 36(20): 53-55 (in Chinese).
- [8] YANG H P, WU X C, YANG Z, et al. Enhanced boronizing kinetics of alloy steel assisted by surface mechanical attrition treatment[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2014, 590(5): 388-395.
- [9] 孙希泰, 徐英, 孙毅. 21 世纪化学热处理将由其他能助扩渗代替纯热扩渗[J]. 金属热处理, 2003, 21(8): 27-29.
SUN X T, XU Y, SUN Y. Thermo-chemical treatment with pure heat diffusion penetration will be replaced by other types of energy aided diffusion penetration in the 21st century[J]. Heat Treatment of Metals, 2003, 21(8): 27-29 (in Chinese).
- [10] XIE F, ZHU Q H, LU J J. Influence of direct current field on powder-pack boriding[J]. Solid State Phenom, 2006, 118: 167-172.
- [11] XIE F, SUN L, PAN J W. Characteristics and mechanisms of accelerating pack boriding by direct current field at low and moderate temperatures[J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 206(11-12): 2839-2844.
- [12] ANGKURARACH L, JUIJERM P. Effects of direct current field on powder-packed boriding process on martensitic stainless steel AISI 420[J]. Archives of Metallurgy & Materials, 2012, 57(3): 799-804.
- [13] XIE F, SUN L, CHENG J. Alternating current field assisted pack boriding to Fe₂B coating[J]. Surface Engineering, 2013, 29(3): 240-243.
- [14] XIE F, CHENG J. Study on effects of alternating current field to pack boriding of medium carbon steel[J]. International Heat Treatment & Surface Engineering, 2014, 8(3): 111-116.
- [15] 程健, 谢飞, 孙力, 等. 交流电场增强 45 钢中低温粉末法渗硼特性[J]. 金属学报, 2014, 50(11): 1311-1318.
CHENG J, XIE F, SUN L, et al. Characterization of alternating current field enhanced pack boriding for 45 carbon steel at low and medium temperatures[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(11): 1311-1318 (in Chinese).
- [16] 武汉材料保护研究所, 上海材料研究所. 钢铁化学热处理金相图谱[M]. 北京: 机械工业出版社, 1980: 52-54.
Wuhan Materials' Protection Research Institute, Shanghai Materials Research Institute. Metallograph of thermo-chemical treated iron and steel[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1980: 52-54 (in Chinese).
- [17] DEARNLEY P A, BELL T. Engineering the surface with boron based materials[J]. Surface Engineering, 1985, 1(3): 203-217.

(责任编辑: 王文宇)