

文章编号: 2095—0411 (2012) 02—0001—04

# 工模具钢的一种节能高效表面渗硼技术<sup>\*</sup>

谢 飞, 叶雪梅, 程 健, 孙 力

(常州大学 常州市金属材料重点实验室, 江苏 常州 213164)

**摘要:** 以柱状电极为一极并置于渗罐的中央, 以渗罐壁作为另一电极, 渗剂与试样置于两极之间, 对 T7、T12 及 W18Cr4V 3 种工模具钢进行中、低温下的交流电场增强粉末法渗硼。结果表明: 施加 4A、30—50V 的交流电场可以显著促进工模具钢在中低温外热下的渗硼过程, 渗层厚度较相应常规渗硼的提高 70% 以上, 渗硼层组织同时也有所改善; 所研究的渗硼新技术可显著降低渗硼处理加热温度, 减少渗硼时间, 节约能源, 降低渗硼成本。对交流电场在粉末法渗硼中的作用机制进行了初步分析。

**关键词:** 粉末法渗硼; 工模具钢; 交流电场

**中图分类号:** TG 156.8; TG 162

**文献标识码:** A

## Energy—Saving and Highly—Efficient Pack Boriding Technology for Tool and Mould Steels

XIE Fei, YE Xue—mei, CHENG Jian, SUN Li

(Key Laboratory of Advanced Metallic Materials of Changzhou City, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** Alternating current field (ACF) enhanced pack boriding was carried out on three kinds of tool and mould steels of T7, T12 and W18Cr4V at low and moderate temperatures. A column—shaped electrode was positioned in the center of a pack container, the wall of which was taken as another electrode. Samples and the boriding agent were set between the electrodes. The test results revealed that the ACF with a current of 4A and a voltage of 30—50V enhanced the boriding of those tool steels. Compared with the conventional pack boriding, the case thickness of the sample was increased by more than 70% by ACF enhanced pack boriding. The case microstructure was improved to some extent. With the new boriding technology, the treating temperature can be lowered, the soaking time can be shortened, and the utilization ratio of agents can be increased. Preliminary analysis has been made on mechanisms of ACF's effects on the pack boriding.

**Key words:** pack boriding; tool and mould steels; alternating current field

在现代机械制造业中, 工模具的性能直接影响产品的生产效率、质量和成本。研究表明: 工模具

钢可以经过适当的渗硼处理在其表层形成高硬度、高耐磨的渗硼层, 从而显著提高工模具的使用寿命

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2012—04—11

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (51171032)

作者简介: 谢飞 (1964—), 男, 上海人, 博士, 教授。

命<sup>[1-3]</sup>。粉末法渗硼可以在较为普通的设备条件下，将硼渗入包括工模具钢在内的多种金属中。但为获得足够厚度的渗层，粉末法渗硼存在渗速较慢，处理温度高、处理时间长，能耗较高等缺点<sup>[4]</sup>。为解决这些不足之处，研究人员开展了很多研究<sup>[5-7]</sup>。本课题组提出了一种直流电场加速固体粉末法渗硼的方法，具有很好的节能高效之效果<sup>[8-10]</sup>。

为简化直流电场加速固体粉末法渗硼设备所用的直流电场电源，降低设备成本及简化处理工艺，本研究以工模具钢为强化对象，介绍一种新的采用交流电场强化渗硼过程的节能高效粉末法渗硼技术，探究在中、低温下该渗硼技术的特性。

## 1 试验方法

试样材料为工业生产中常用的经正常淬火、低温回火的 T7、T12、W18Cr4V 3 种工模具钢。粉末渗硼剂由硼铁（10%，供硼剂）、氟硼酸钾（5%，活化剂）、木炭（1%，疏松剂）和碳化硅（余量，填充剂）组成。

交流电场增强粉末法渗硼装置的基本结构如图 1 所示。交流电场通过渗罐壁和位于渗罐中央的柱形电极来施加。试样位于罐壁与柱形电极之间，与

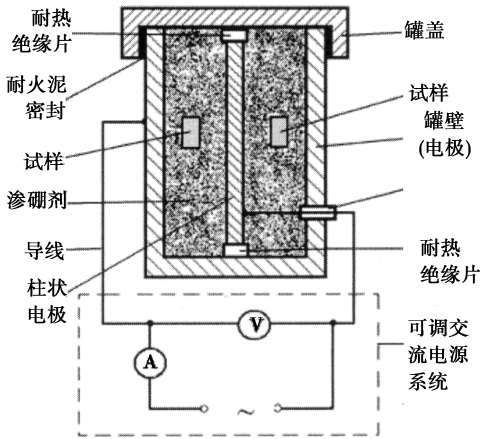


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematics of the experimental apparatus

两者等距。装置中除第 6 项及部分导线外，其余在渗硼处理时均置于箱式炉内加热。加热到规定温度后，在两电极间施加交流电场，保持电流为 4A。详细试验工艺参数见表 1。作为对比，以相同渗剂配比在单独的渗罐中进行常规渗硼。所有渗硼的保温时间均为 4h。保温结束后，渗罐随炉冷却至室温，取出试样进行分析。采用金相显微镜观察分析渗层组织与渗层厚度，渗层厚度以试样面向柱形电

极一侧表面距硼化物齿尖高度的平均值来衡量；以 X 射线衍射仪分析渗层相结构（Cu 靶，K $\alpha$ ，100mA 靶电流）；以显微硬度计测量渗层硬度，载荷为 100g，加载时间 15s。

表 1 试验工艺参数

Table 1 Experimental process parameters

工艺类型	外热温度/℃	保温时间/h	交流电场参数	
			电压/V	电流/A
ACB1	800	4	—30	4
ACB2	750	4	—35	4
ACB3	550	4	—45	4
NMB1	800	4		
NMB2	750	4		

说明：ACB 表示交流电场增强渗硼，NMB 表示常规渗硼。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 渗层厚度与硬度

表 2 给出了不同工艺处理试样渗硼层的厚度。在 800℃、750℃ 渗硼温度下，交流电场增强渗硼试样渗硼层的厚度比相应的常规工艺粉末渗硼试样的提高至少 70%；在 550℃ 渗硼，传统工艺粉末渗硼试样上基本无渗硼层形成，但交流电场增强渗硼试样依然形成了 8 $\mu$ m 至 30 $\mu$ m 厚度的渗硼层。这表明所施加的交流电场对渗硼过程具有显著的促渗作用。

表 2 不同试验工艺参数下的渗硼层厚度

Table 2 Thickness of the borided cases treated with different process

工艺类型	渗硼层厚度/ $\mu$ m		
	T7	T12	W18Cr4V
ACB1	—110	—92	
ACB2		—82	—20
ACB3	—30	—25	—8
NMB1	—61	—51	—9
NMB2	—30	—28	—6

表 3 给出了不同工艺处理 T7、T12 试样渗硼层截面距表面 10 $\mu$ m 处的显微硬度值。由表 3 可见：经过 4A、30—50V 的交流电场增强渗硼处理得到的试样表层的硬度值与常规渗硼处理得到的硬度值基本一样，说明交流电场在促进高碳钢 T7、T12 粉末法渗硼时，对渗硼层的硬度并没有负面影响。

### 2.2 渗层组织与相结构

对不同工艺处理试样渗硼层显微组织的观察与分析表明：800℃、750℃ 下常规渗硼处理得到的渗硼层均由外层颜色略深的 FeB 和内层浅色 Fe<sub>2</sub>B

两相组成，且外层的 FeB 厚度约为渗硼层总厚度的一半；交流电场增强渗硼处理渗硼层的组织与相结构则与材料及处理温度有关：800℃ 处理的 T7 和 T12 钢的渗硼层基本全由 Fe<sub>2</sub>B 构成；随处理温度降低（750℃，550℃），T7 和 T12 钢渗硼层中的外层 FeB 逐渐增多；分别在 3 种温度处理的

W18Cr4V 的渗硼层均由外层 FeB 和内层 Fe<sub>2</sub>B 构成；无论是常规渗硼还是交流电场增强渗硼，随钢的碳含量及合金元素含量的增加，渗硼层的前沿变得愈加平坦，指状特征变得不明显。图 2 给出了 T7、T12 和 W18Cr4V 渗硼层的典型形貌。

表 3 不同工艺处理 T7、T12 试样渗层硬度值  
Table 3 Micro-hardness of the borided cases treated with different process

工艺	ACB1		ACB2	NMB1		NMB2	
	T7	T12	T12	T7	T12	T7	T12
硬度（HV）	1 642.3	1 654.0	1 692.9	1 652.3	1 672.3	1 585.8	1 679.1

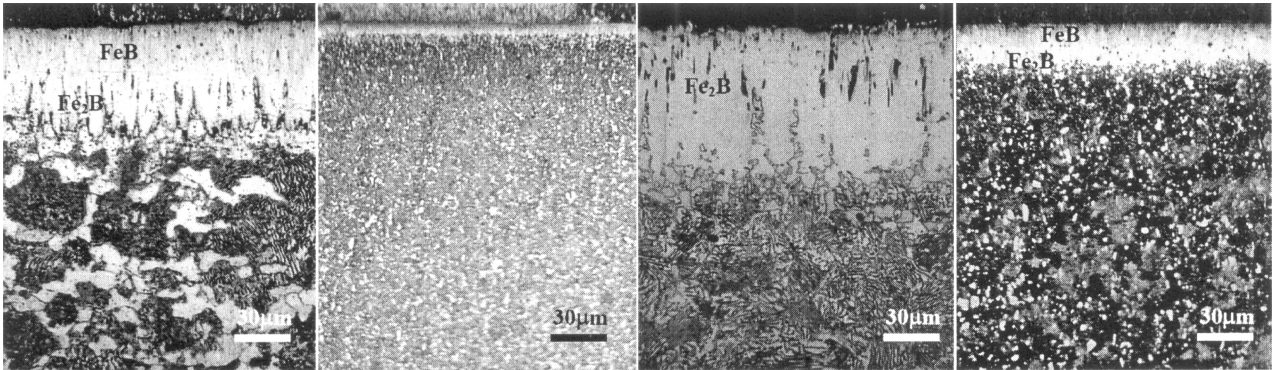


图 2 渗硼层典型显微组织形貌  
Fig. 2 Typical microstructures in cross-sections of boriding cases

X 射线衍射（XRD）分析结果，进一步证实了金相观察对渗硼层相结构的分析。图 3 为不同渗硼温度下 T12 钢的交流电场增强渗硼处理渗硼层表层的 XRD 结果。由于实验所用靶电流较大（100mA），X 射线在试样表层的穿透深度较深，衍射不仅给出了渗层表面信息，还反映了内部更深处信息。根据 FeB、Fe<sub>2</sub>B 衍射峰强度的相对高低可知，800℃ 处理的 T12 钢的渗硼层中仅含有非常少的 FeB，渗硼层主要由 Fe<sub>2</sub>B 构成，且主要沿（002）方向生长排列；随渗硼温度降低，渗硼层中的 FeB 相增多，550℃ 渗硼所得 FeB 相不仅很厚（因为这时 Fe<sub>2</sub>B 相峰的强度很低），且表现出强烈的（002）方向择优取向。图 4 为 T12 的常规渗硼处理渗硼层表层的 XRD 结果，与交流电场增强渗硼不同，无论是 750℃ 处理的还是 800℃ 处理的，其 X 射线衍射（XRD）衍射图中 FeB 相都呈现强烈的（002）取向，且均只有 FeB 相衍射峰，未发现明显的 Fe<sub>2</sub>B 峰，这说明常规渗硼处理渗硼层中外侧 FeB 相很厚。

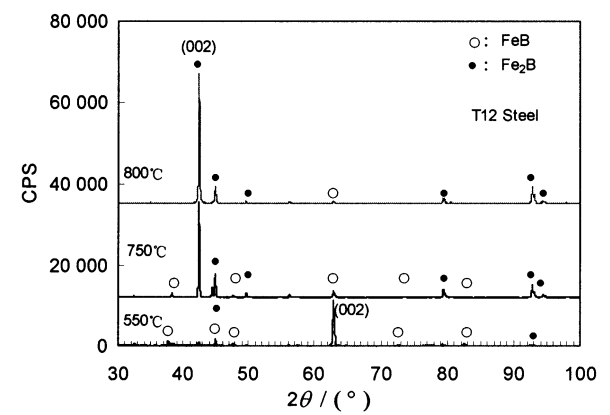


图 3 T12 钢交流电场增强渗硼处理渗硼层层层的 XRD 结果  
Fig. 3 XRD results on surfaces of ACF enhanced pack borided T12 steel samples

2.3 分析讨论

上述试验结果表明：在相同外热条件下，在粉末渗硼剂与试样上施加适当的交流电场，不仅显著促进渗硼过程，得到较相应常规渗硼更厚的渗层，还对渗硼层组织有一定的影响，更易于获得单相 Fe<sub>2</sub>B 渗硼层或减少渗硼层中脆性 FeB 相的量（参见图 2（c）、图 3），从而改善渗硼层性能。这应是由交流电场对渗硼过程中渗剂间的化学反应、含硼

活性基团在渗灌内的扩散及硼在试样内扩散的影响决定的。

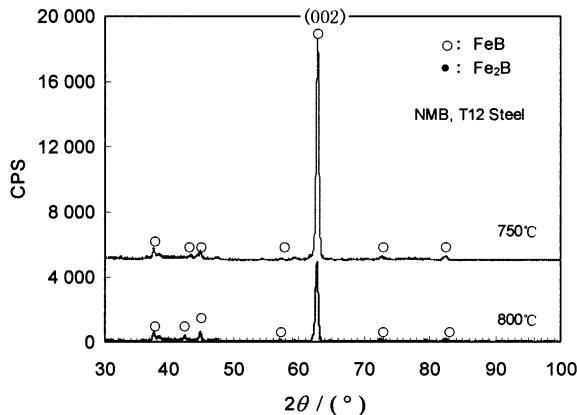


图4 T12钢常规渗硼处理渗硼层表层的XRD结果

Fig. 4 XRD results on surfaces of conventional pack borided T12 steel samples

在常规粉末法渗硼中,通过外热使渗剂间发生化学反应产生活性硼原子及含硼活性基团<sup>[4]</sup>。交流电场直接施加在渗剂上,具有一定的电阻加热作用,促进渗剂间的化学反应;交变电场的电磁作用会使渗剂分子的振动加剧,促进渗剂的电离分解,强化渗剂间的化学反应,从而增加活性硼原子或含硼活性基团的产率与活性,克服了常规固体渗硼单纯依赖渗剂受热分解产生活性硼原子之不足。

在常规粉末法渗硼中,活性硼原子及含硼活性基团是以热扩散的方式扩散到试样表面,其扩散速度主要取决于温度及渗剂的疏松状况。交变电场的直接加热作用与电磁搅拌作用结合,将显著增强活性硼原子及含硼活性基团在渗箱内的扩散。

另外,交变电场在被渗试样中的电磁作用也使得试样表层原子的热振动加剧,应有利于在试样表层形成诸如空位之类的点缺陷,从而促进硼在试样内的扩散,这不仅增加渗层厚度,还降低表层硼含量,易于获得单相 $\text{Fe}_2\text{B}$ 渗硼层或减少渗硼层中脆性 $\text{FeB}$ 相的相对量。

渗硼过程中施加的交变电场所消耗的能量(参见表1的电场参数)远低于由于渗硼外热温度降低而节约的能量,因此交变电场增强粉末法渗硼还具

有节约能源作用。

### 3 结 论

①在粉末法渗硼过程中施加4A、30—50V的交流电场可以显著促进工模具钢在中低温加热下的渗硼过程,渗层厚度较相应常规渗硼的提高70%以上,同时还改善渗硼层组织。②所研究的交流电场增强渗硼新技术可显著降低工模具钢渗硼处理加热温度,减少渗硼时间,节约能源,降低渗硼成本。

### 参考文献:

- [1] Oliveira C K N, Casteletti L C, Lombardi Neto A, et al. Production and characterization of boride layers on AISI D2 tool steel [J]. Vacuum, 2010, 84: 792—796.
- [2] Uslu I, Comert H, Ipek M, et al. Evaluation of borides formed on AISI P20 steel [J]. Materials and Design, 2007, 28: 55—61.
- [3] 谢飞,黄志荣,陈士恬.硼氮碳复合渗提高精密模具寿命的研究[J].模具技术,1996(4):14—18.
- [4] 王国佐,王万智.钢的化学热处理[M].北京:中国铁道出版社,1980:299—302.
- [5] Nam K-S, Lee K-H, Lee D Y, et al. Metal surface modification by plasma boronizing in a two-temperature-stage process [J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 197: 51—55.
- [6] Xu C H, Xi J K, Gao W. Improving the mechanical properties of boronized layers by superplastic boronizing [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 65: 94—98.
- [7] Béjar M A, Henriquez R. Surface hardening of steel by plasma-electrolysis boronizing [J]. Materials and Design, 2009, 30: 1726—1728.
- [8] XIE Fei, ZHU Qihua, LU Jinjun. Influence of direct current field on powder-pack boriding [J]. Solid State Phenomena, 2006, 118: 167—172.
- [9] Xie Fei, Sun Li, Pan Jianwei. Characteristics and mechanisms of accelerating pack boriding by direct current field at low and moderate temperatures [J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 206: 2839—2844.
- [10] 谢飞.直流电场加速固体粉末法渗硼的方法与装置:中国,200410065545.7[P].2005-04-27.