

渗硼工艺对汽车用45CrNiMoV热锻模具钢性能的影响

李小明

(四川职业技术学院机械工程系, 遂宁 629000)

摘要 研究了850~950℃ 3~6 h渗硼处理的汽车发动机曲轴锻造用模具钢的显微硬度、冲击韧性、耐磨性能以及物相组成和微观结构。研究表明,925℃渗硼4 h后的样品性能较优,模具钢渗硼层最大HV显微硬度值1712,渗层厚度58.6 μm,400℃和24℃冲击韧性值分别为39 J·cm⁻²和27 J·cm⁻²,90 min摩擦试验后的磨损量6.7 mg。物相组成显示渗硼层主相为Fe₂B,显微结构中明显可见渗硼后的渗硼层、过渡层以及基体。

关键词 渗硼工艺 汽车模具钢 性能 微观结构

Influence of Boronizing Process on Properties of Hot Forging Die Steel 45CrNiMoV for Automobile

Li Xiaoming

(The Department of Mechanical Engineering, Sichuan Vocational and Technical College, Suining 629000)

Abstract The microhardness, impact toughness, wear resistance, phases composition and microstructure of die steel for auto engine crankshaft forging of boronizing process at 850~950℃ 3~6 h are studied. The research results show that the steel boronized at 925℃ for 4 h has better performance, that is the maximum HV microhardness value of the boronizing layer 1712, the thickness of the boronizing layer 58.6 μm, and the impact toughness value at 400℃ and 24℃ respectively 39 J·cm⁻² and 27 J·cm⁻², and the wear amount after 90 min friction test 6.7 mg of die steel. The phase composition shows that the main phase of the boronizing layer is Fe₂B, while the boriding layer, transition layer and matrix microstructure are obviously observed in microstructure.

Material Index Boronizing Process, Die Steel for Automobile, Properties, Microstructure

发动机是汽车的“心脏”,发动机的质量优劣直接影响汽车的性能。在发动机中,曲轴是核心部件之一,在工作过程中,它承受着高温交变应力的作用,其质量的好坏直接关系着汽车的安全^[1-4]。曲轴通常都是由锻造成形而来,某些部位锻造后不再进行加工处理,因而需要精密热锻造模具。目前,国际上常用的模具钢材料主要有ASSABVIDAR和ASSAB8407,国内应用较多的模具钢材料为HM1、HM3以及RD等^[4-8]。在实际的使用中发现,这些热作模具钢尤其是HM1模具钢,虽然具有较长的使用寿命,但耐受温度偏低,在使用温度超过600℃的高温工作环境中容易发生磨损和坍塌缺陷^[6-10]。由于热锻模具服役时型腔表面承受着高强度冷热疲劳和冲击磨损,因而需要采用高温强度高、韧性好和抗冲击磨损性能优越的强化表面才能满足性能要求^[4-7]。

国外对渗硼工艺及应用的研究较为广泛,在曲轴表面热处理工艺方面主要有渗氮、渗硼以及物理气相沉积等^[5-10]。其中文献[8]采用渗硼工艺对AISI1050钢的硬度及耐磨性进行了研究,对本研究具有一定的参考意义。本文以汽车曲轴用热锻模具

钢为研究对象,在兼顾基体强化的基础上,通过表面强化措施来整体提升热锻模具钢的性能,为开发新型汽车用热锻模具钢材料提供了参考。

1 试验

试验模具钢采用市场可购买的45CrNiMoV钢,其化学成分如表1所示。试验用45CrNiMoV钢在生产中进行860℃油淬,460℃回火,然后在油中冷却。

在渗硼剂的选择过程中,试验采用B₄C为供硼剂、氟硅酸钠为活化剂、碳化硅为填充剂以及活性炭,其中,B₄C:氟硅酸钠:碳化硅:活性炭的质量比例为1:5:92:2。渗硼温度分别为850、875、900、925以及950℃,渗硼保温时间为3、4、5以及6 h,渗硼处理后随炉冷却得到渗硼试样,试样尺寸分别为15 mm×15 mm×10 mm的方块和Φ35 mm×4 mm的圆盘(摩擦试验用),如图1所示。随后对样品组织结构及性能进行分析,采用401MVD维氏显微硬度计测量各试样从表面到芯部的硬度变化趋势。采用JKB-200型冲击试验机进行冲击试验,试样制成梅氏试样。采用HT-1000型摩擦磨损试验机进行

表 1 试验钢的化学成分/%

Table1 Chemical composition of experiment steel/%						
C	Cr	Si	Mn	Ni	Mo	V
0.45	0.93	0.23	0.66	1.60	0.23	0.16

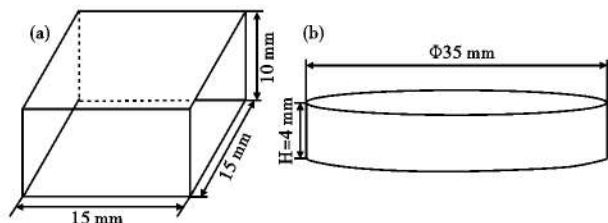


图 1 试样 1(a) 和试样 2(b) 尺寸示意图

Fig.1 Schematics of size of specimen 1(a) and specimen 2 (b)

摩擦磨损试验。采用 D/Max-RB 型转靶 X 射线衍射仪对试验试样的物相组成进行分析,采用 AM-RAY-1830I 型扫描电镜对渗硼处理后试样的显微结构进行观察。

2 结果分析与讨论

2.1 渗硼温度对渗硼后模具钢硬度值影响

热锻模具钢由于在工作过程中不仅要承受高温的环境,同时也要承受机械冲击,因而,热锻模具钢的表面硬度极为重要。图 2 为本试验钢种在不同温度进行渗硼处理 4 h 后表面以下不同距离样品显微硬度值。由图 2 可知,不同温度进行渗硼处理的试样随渗层深度增加,硬度先增加后减小。同时,随渗硼温度升高,试样的硬度先增加后减小,图中显示 925℃ 渗硼处理的试样具有较佳的硬度值。从图 2 中可以发现,925℃ 渗硼处理后,试样表面 HV 硬度值为 1130,随渗层深度增加,试样 HV 硬度值开始增加至 1712,随后开始急剧降低,至渗层深度为 80 μm 时,基本趋于稳定,此时 HV 硬度值为 687。

在渗硼处理过程中,模具钢试样从表面到芯部存在渗硼层、过渡层以及基体三部分[见图 5(b) 中 SEM]。而在最表面位置,由于在渗硼过程中渗硼反应和扩散造成了表面部分区域出现疏松,从而导致最表面的硬度值下降。随渗层深入,进入渗硼良好的渗硼层,此区域由于渗硼后与模具钢基体发生反应生成 Fe₂B 或 FeB[见图 5(a) 中 XRD 曲线],这两相的硬度值远高于基体,从而显著提高渗层的硬度。随渗层的进一步深入,由于 B 的扩散距离和反应距离不够,试样中逐渐以基体的硬度值为主。

2.2 渗硼时间对渗层厚度的影响

图 3 所示为不同渗硼温度下,保温不同时间后

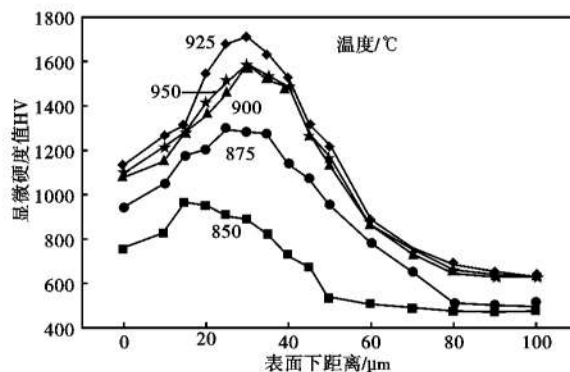


图 2 试验模具钢渗层硬度值变化曲线

Fig.2 Microhardness value variation curves of test die steel boronizing layer

渗层厚度曲线。由图 3 可知,随保温时间延长,渗层厚度逐渐增大。随渗硼温度升高,渗层厚度增大。如当保温时间为 3 h 时,850℃ 渗层厚度为 23.3 μm,875℃ 渗层厚度为 28.6 μm,900℃ 渗层厚度为 30.3 μm,925℃ 渗层厚度为 41.2 μm,950℃ 渗层厚度为 56.7 μm。950℃ 渗硼保温不同时间的渗层厚度均最大,其次为 925℃ 时渗硼,再依次为 900℃ 时渗硼、875℃ 时渗硼以及 850℃ 时渗硼。

图 3 显示渗硼时间和温度对试样的渗层影响均非常显著,对于汽车用热锻模具钢的使用来说,渗层的厚度对热锻模具钢具有明显的影响,渗层太薄会使得渗硼后使用效果不佳,渗层如果太厚,则要求在渗硼处理过程中尽量延长保温时间和处理温度,这将会使得表面 B 与模具钢表面生成过多的 FeB 相,而 FeB 相由于脆性较大,对模具的使用有负面作用。因而,在渗层组织中要尽量多的获得以 Fe₂B 为主的组织,要结合试验数据合理控制渗硼温度和渗硼保温时间。

2.3 渗硼后模具钢样品冲击韧性值分析

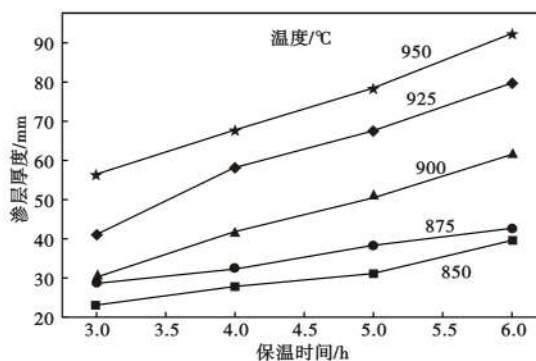


图 3 渗硼时间对模具钢渗层深度的影响

Fig.3 Effects of boronizing time on depth of boronizing layer of die steel

表 2 45CrNiMoV 模具钢冲击韧性测试结果
Table 2 Impact toughness test results of die steel 45CrNiMoV

渗硼温度/℃	冲击韧性/(J·cm ⁻²)	
	24 ℃	400 ℃
850	32	45
875	31	43
900	29	40
925	27	39
950	28	38

综合试验结果,选取了保温时间在 4 h 时不同渗硼温度冲击韧性的测试结果。从表 2 中可知,随渗硼温度升高,试样冲击韧性值基本与对应的硬度值呈反向趋势。从冲击韧性结果看,渗硼后硬度值越高,冲击韧性值越小,但是在实验范围内所有冲击韧性值能够满足热锻模具冲击韧性的服役条件。

2.4 渗硼后模具钢样品耐磨性分析

汽车用热锻模具在高温使用过程中,常会受到各种复杂热工况,在热锻模具中,尤其是凹模的圆弧部位承受着高温磨损,在恶劣工况下会导致塌陷破坏。图 4(a)所示为在不同渗硼温度下保温 4 h 后的试样在不同摩擦磨损时间后样品质量损失曲线。由图 4(a)可知,随摩擦时间延长,试样的磨损量增加;随渗硼温度升高,试样的磨损量先减小后增加。

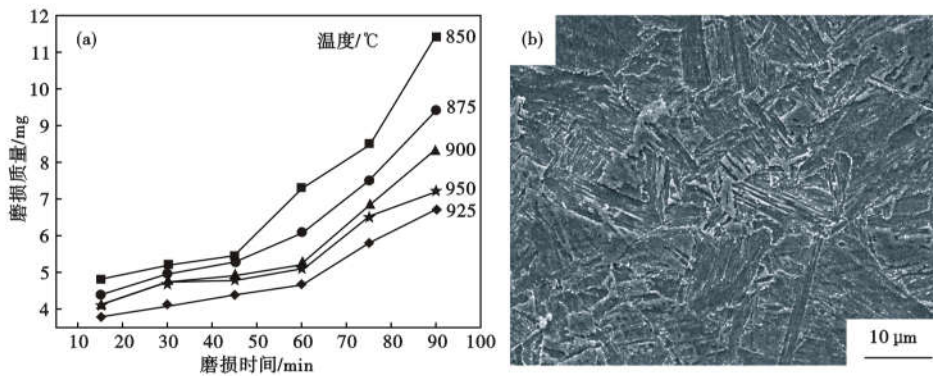


图 4 45CrNiMoV 模具钢磨损量与磨损时间关系曲线(a)及 925 ℃ 渗硼试样摩擦磨损后表面形貌(b)

Fig. 4 Relationship curve between wearing capacity and wearing time (a) and microstructure of surface morphology of sample boronizing at 925 ℃ after wearing test (b) of steel 45CrNiMoV

数据表明,虽然随渗硼温度升高,渗层厚度线性增加,但渗层的硬度值却不是一直增加,最优试样渗硼温度为 925 ℃。同时,图 4(a)显示渗硼处理后试样的磨损曲线呈抛物线趋势。这是因为,在磨损初期,磨损主要发生在试样表面,随着磨损的深入开始进入渗氮层,由于渗氮层硬度较高,因而磨损较小。随着磨损的进一步深入,渗氮层被消耗殆尽,磨损主要发生在过渡层和基体,此时试样的硬度值急剧下降,从而造成磨损量急剧增大。图 4(b)是 925 ℃ 渗硼试样摩擦磨损后表面形貌,从中可以发现明显沟壑和表面渗硼层部分剥落现象。

2.5 渗硼后模具钢物相组成和显微结构分析

结合数据分析得出,不同渗硼温度试样处理 4 h 后主要性能结果,如表 3 所示。综合分析,选取了 925 ℃ 渗硼处理 4 h 后的渗硼模具钢试样进行相组成和显微结构分析。从相组成结果中可以发现,渗硼层只有单一的 Fe₂B 相,无 FeB 相。由于 FeB 相的脆性较 Fe₂B 大,对试样的抗冲击韧性起到降低作用,因而,会出现 950 ℃ 渗硼后的试样硬度、韧性以及耐磨性能低于 925 ℃ 渗硼。从显微结构中可以明显看见渗硼后的渗硼层、过渡层以及基体,同时,在表面附近可以发现少许分散的孔洞,这是由于在渗硼过程中硼化物定向生长过程中“空位”被迫移动聚集形成小孔。因而,后期还需进一步研究渗硼后辅助热处理工艺等措施,对其进行消除或减轻影响,以达到现场使用要求。

3 结论

(1) 渗硼温度和保温时间对热作模具钢性能有显著影响,随保温时间的延长,试样的渗层厚度逐渐变厚,随渗硼温度的升

表 3 试样 850 ~ 950 ℃ 4 h 渗硼后结果对比
Table 3 Comparison of results of sample boriding at 850 ~ 950 ℃ for 4 h

温度/℃	处理时间/h	表面下 30 μm HV 显微硬度值	400℃ 冲击韧性值/(J·cm ⁻²)	渗层厚度/μm	90 min 磨损量/mg	渗层相组成
850	4	890	45	27.5	11.4	少量 Fe ₂ B、较多 Fe ₃ (C、B)
875	4	1286	43	32.3	9.4	少量 Fe ₂ B、较多 Fe ₃ (C、B)
900	4	1578	40	41.5	8.3	较多 Fe ₂ B、少量 Fe ₃ (C、B)
925	4	1712	39	58.6	6.7	Fe ₂ B
950	4	1590	38	67.8	7.2	Fe ₂ B、少量 FeB

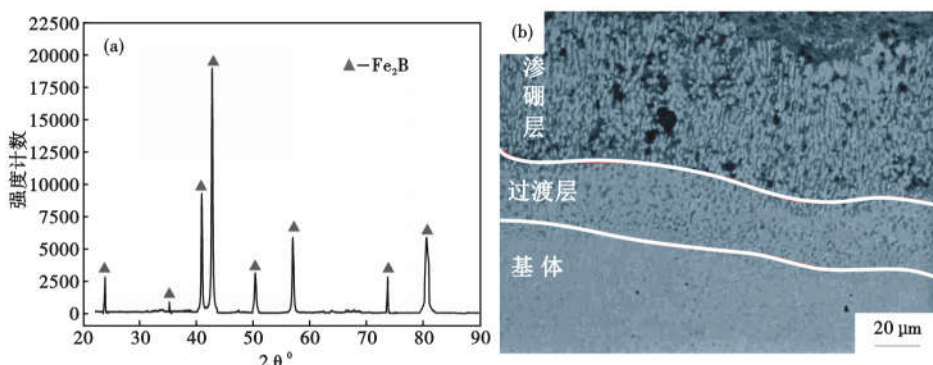


图 5 925 °C 渗硼处理 4 h 后模具钢试样渗硼层相组成(a)及断面形貌图(b)
 Fig. 5 Phase composition (a) and section morphology picture of boronizing layer (b) of die steel sample boronized at 925 °C for 4 h

高,渗层厚度也逐渐变厚。当渗硼温度超过 925 °C 时,热锻模具钢样品的性能出现较大变化。

(2) 试验模具钢的合适渗硼温度为 925 °C,保

温 4 h。此时,模具钢渗硼层最大显微 HV 硬度值 1712,渗层厚度为 58.6 μm,室温 24 °C 时的冲击韧性值为 27 J·cm²,高温 400 °C 时冲击韧性值分别为 39 J·cm⁻²,90 min 摩擦试验后的磨损量为 6.7 mg。

(3) 925 °C 渗硼处理

4 h 后的渗硼模具钢试样渗硼层主要相为 Fe₂B,显微结构中发现在表面附近存在

有少许分散的孔洞,这是由于在渗硼过程中硼化物定向生长过程中“空位”被迫移动聚集形成小孔。

参考文献

[1] 梅 凯, 储晓明. 40CrNiMo 曲轴断裂原因浅析[J]. 现代冶金, 2019, 47(5): 31-34.
 [2] 杨 勇, 周乐育, 蒋 鹏, 等. 模锻变形对曲轴用非调制钢 1538MV 显微组织的影响[J]. 工程科学学报, 2018, 40(5): 579-586.
 [3] 宋守许, 邱 权, 卜 建, 等. 基于疲劳与磨损的曲轴主动再制造时机选择[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(2): 279-287.
 [4] 杨浩鹏, 吴晓春. H13 钢低温固体渗硼及其热熔损性能的研究[J]. 上海金属, 2019, 41(4): 23-28.
 [5] 徐 宏. Cr12 钢表面渗硼层的摩擦磨损性能研究[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2019, 17(4): 62-65.
 [6] 孙嵩松, 万茂松, 徐晓美, 等. 不同强度理论在曲轴疲劳研究中的对比应用[J]. 中国机械工程, 2019, 30(23): 2784-2789.
 [7] Peter Jurci, Maria Hudakova. Diffusion Boronizing of H11 Hot Work Tool Steel[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2011, 20(7): 1180-1187.
 [8] Adnan Calik, Mithat Simsek, Mustafa Serdar Karakas, et al. Effect of Boronizing on Microhardness and Wear Resistance of Steel AISI 1050 and Chilled Cast Iron[J]. Metal Science and Heat Treatment, 2014, 56(1): 89-92.
 [9] Craig Zimmerman, Nick Bugliarello-Wondrich. Deep Case Boriding for Extreme Wear Resistance[J]. Advanced Materials and Processes, 2014, 12: 41-44.
 [10] Bozidar Matijevic. Evaluation of Boride Layer Growth on Carbon Steel Surfaces[J]. Metal Science and Heat Treatment, 2014, 56(5): 269-273.

李小明(1985-),男,讲师,2007年四川轻化工大学(本科)毕业:模具 CAD/CAE/CAM、数控技术、3D 打印与逆向工程研究。E-mail: zhiyuan127@sina.cn

收稿日期:2020-07-03

欢迎订阅 2021 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183 定价:16.00 元/期 96.00 元/年 邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号、大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社

电话:0714-6297386 6297313 0714-6297888-8010