

热处理工艺对 38CrMoAlA 钢组织与性能的影响

张业勤, 王俊丽, 钟平, 刘丽玉

北京航空材料研究院, 北京 100095

摘要 通过热处理工艺试验研究了 38CrMoAlA 钢不同淬火温度、冷却方式和回火温度对 38CrMoAlA 钢微观组织及力学性能的影响。结果表明,在 900—1000℃淬火温度范围内,淬火温度对该钢的力学性能影响不大。不同的冷却方式因淬火介质的冷却强度不同,导致淬火后的组织不同,从而影响该钢的力学性能。回火温度对该钢的力学性能的影响较为显著,100—400℃范围内回火表现出回火脆性,在 620℃回火能得到较好的强韧配合。该钢采用 940℃,1h,油冷 620℃,5h,油冷的热处理工艺时,可获得适宜的力学性能。

关键词 38CrMoAlA 钢;热处理;组织;性能

中图分类号 TQ050.4*25

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.03.005

Effect of Heat Treatment Process on Microstructure and Mechanical Property of 38CrMoAlA Steel

ZHANG Yeqin, WANG Junli, ZHONG Ping, LIU Liyu

Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China

Abstract The effects of quenching temperature, cooling method and tempering temperature on the microstructure and mechanical properties of 38CrMoAlA steel have been studied through a series of heat treatment process tests. The experiment has measured the mechanical properties of the steel in different heat treatment conditions. The mechanical tests include tensile, impact and hardness test. The experiment has also measured the continuous cooling change curve of the steel, and analyzed the microstructure of the steel under different cooling rate and different temper conditions. The results of tests show that the effect of quenching temperature on mechanical properties of the steel the impact is not big when quenching at the temperature between 900℃ and 1000℃. Because of different cooling intensity of quenching medium, different cooling methods lead to different microstructure, and thus affect the mechanical properties of the steel. The effect of tempering temperature on the microstructure and mechanical properties of the steel is the most remarkable. When tempered at the temperature between 100℃ and 400℃, it behaves temper brittlement. While tempered at about 620℃, it can get a good combination of strength and toughness. Therefore, choosing the heat treatment process of quenched by heating to 940℃, holding at temperature for one hour, cooling in oil, and tempered by heating to 620℃, holding at temperature for five hours, cooling in oil, 38CrMoAlA steel can get the best property.

Keywords 38CrMoAlA steel; heat treatment; microstructure; mechanical properties

0 引言

38CrMoAlA 钢是一种常用的渗氮钢,有很好的渗氮性能和力学性能^[1]。渗氮后表面有高的硬度和好的耐磨性能,心部有很好的强度与韧性的配合^[2]。该钢的淬透性较高,切削性能也好,主要用于制造尺寸精确、要求有高的耐磨性和疲劳强

度的渗氮零件,如高压阀门和气缸套等^[3]。

在生产中,38CrMoAlA 钢渗氮前需热处理,若热处理工艺不佳,产生不良组织,会使其性能恶化^[4]。为了制定合理的热处理工艺,对 38CrMoAlA 钢进行热处理工艺研究具有重要的意义。

收稿日期:2011-08-05;修回日期:2012-01-17

作者简介:张业勤,研究方向为高强度钢,电子信箱:zyqdyx520@sohu.com;钟平(通信作者),研究员,研究方向为结构材料,电子信箱:nainiu1989@yahoo.cn

1 试验材料和试验方法

1.1 试验材料

试验材料为真空感应加真空自耗熔炼而成的 $\Phi 150\text{mm}$

棒材,其化学成分^[5]见表1。钢棒开坯锻造后先经 940℃正火, 670℃高温回火,进行试样粗加工,再进行不同工艺的热处理试验,而后进行试样的精加工,最后完成拉伸、冲击和硬度等

表 1 38CrMoAlA 钢的化学成分 (wt%)

Table 1 Chemical composition of 38CrMoAlA steel (wt%)

元素	C	Mn	Si	Cr	Ni	Al	Mo	P	S	Fe
含量/%	0.38	0.42	0.31	1.52	0.28	0.97	0.22	<0.01	0.001	Bal

力学性能测试。

1.2 试验方法

38CrMoAlA 钢试样的淬火温度实验分别选取 900, 925, 940, 955, 975, 1000℃共 6 个淬火温度,保温 1h,油冷,然后在 620℃下保温 5h 回火。为了考察淬火冷却方式对 38CrMoAlA 钢性能的影响,在淬火温度 940℃,保温 1h 后采取 4 种不同冷却方式(空冷、油冷、水冷和温水(40—60℃)冷)分别进行冷却,然后在 620℃下保温 5h 回火。为了分析冷却速度对 38CrMoAlA 钢性能的影响,试验还测定了 38CrMoAlA 钢的连续冷却转变曲线,并对不同冷却速度下的试样作了金相组织分析。在回火温度试验中,选取的淬火温度为 940℃,保温 1h,油冷,随后将试样分别进行不同的回火处理:不回火、回火温度 100—700℃,保温 5h,油冷,并对不同回火状态的试样作金相组织分析。

2 试验结果

2.1 淬火温度、冷却方式对钢力学性能和组织的影响

淬火温度和冷却方式是影响材料组织和性能的重要因素。表 2 为 38CrMoAlA 钢不同淬火温度下的力学性能数据,图 1 为 38CrMoAlA 钢淬火温度与力学性能的关系图,从曲线趋势看,在 900—1000℃温度范围内淬火温度对钢的力学性能影响不大,相比之下在 940℃淬火能得到较好的综合力学性能。图 2 为 38CrMoAlA 钢淬火冷却方式与力学性能的关系图,表 3 为 38CrMoAlA 钢不同淬火冷却方式下的力学性能数据,由图 2 可以看出,空冷对该钢的力学性能不利,而油冷、水冷和温水冷 3 种冷却方式下的力学性能较好,但三者差异不是很大,温水冷和油冷的力学性能稍好于水冷。

在不同冷却方式下冷却,冷却速度会不同,冷却后转变的组织也不同,从而对钢的力学性能产生影响。试验测定了

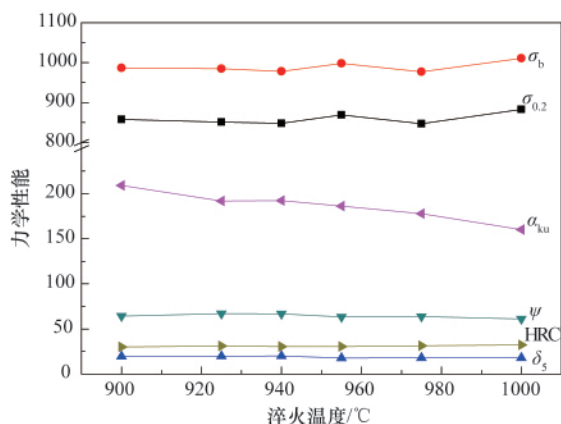


图 1 38CrMoAlA 钢淬火温度与力学性能的关系
Fig. 1 Relation between mechanical properties and quenching temperature of 38CrMoAlA steel

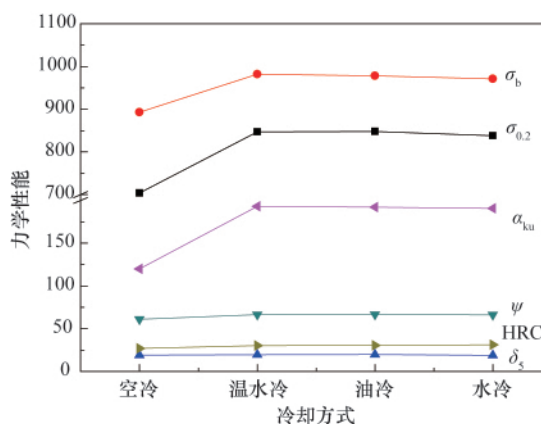


图 2 38CrMoAlA 钢冷却方式与力学性能的关系
Fig. 2 Relation between mechanical properties and cooling method of 38CrMoAlA steel

表 2 淬火温度对 38CrMoAlA 钢力学性能的影响

Table 2 Effect of quenching temperature on mechanical properties of 38CrMoAlA steel

淬火温度/℃	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_1/MPa	延伸率 $\delta_5/\%$	收缩率 $\psi/\%$	冲击韧性值 $\alpha_{ku}/(\text{J}\cdot\text{cm}^{-2})$	硬度 (HRC)
900	858	987	19.4	64.3	209.2	30.0
925	851	985	19.7	66.9	192.0	31.1
940	848	978	19.9	66.8	192.3	30.5
955	869	998	17.6	63.3	186.2	30.5
975	847	977	17.9	63.8	177.9	31.4
1000	883	1011	17.9	61.0	160.1	32.2

表 3 冷却方式对 38CrMoAlA 钢力学性能的影响

Table 3 Effect of cooling method on mechanical properties of 38CrMoAlA steel

冷却方式	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_1/MPa	延伸率 $\delta_5/\%$	收缩率 $\psi/\%$	冲击韧性值 $\alpha_{kv}/(\text{J}\cdot\text{cm}^{-2})$	硬度(HRC)
940℃, 1h, 空冷	704	893	19.2	61.1	119.9	26.9
940℃, 1h, 温水冷	847	982	19.6	66.4	193.2	30.4
940℃, 1h, 油冷	848	978	19.9	66.8	192.3	30.5
940℃, 1h, 水冷	838	971	18.9	66.2	190.7	31.3

38CrMoAlA 钢的连续冷却转变曲线,如图 3 所示,并对不同冷却速度的试验作了金相组织分析,结果如图 4 所示。当从奥氏体到 0℃的冷却时间少于 200s 时,转变的组织主要是马氏体(M)组织;当冷却时间为 500s 时,转变的组织主要是 M 和贝氏体(B)组织;当冷却时间为 1000s 时,转变的组织主要是 B 组织;而当冷却时间为 1h(冷却速度为 1000℃/h)和 2h(冷却速度为 500℃/h)时,转变的组织主要是 B 和铁素体(F)+珠光体(P)组织;当冷却时间大于 5h(冷却速度为 200℃/h)时,转变的组织主要是 F+P 组织。

2.2 回火温度对钢力学性能和组织的影响

回火能消除淬火引起的残余内应力^[6],使钢得到良好的强韧配合。通过试验得到了 38CrMoAlA 钢不同温度下回火后的力学性能数据,如表 4 所示。图 5 为 38CrMoAlA 钢回火温度与力学性能的关系图。由图 5 可以看出,回火温度对力学性能的影响很大,随着回火温度的升高,抗拉强度先略微下降,再略微上升最后不断降低,屈服强度先略微升高,再稍微下降,而后略微上升最后不断下降,延伸率和断面收缩率基本上一直不断升高,冲击韧性先降低后升高,在 100—400℃ 温度范围内呈韧性下降的现象。该钢在 620℃ 回火能得到较好的强韧配合。图 6 为未回火、100—700℃ 条件下回火状态的

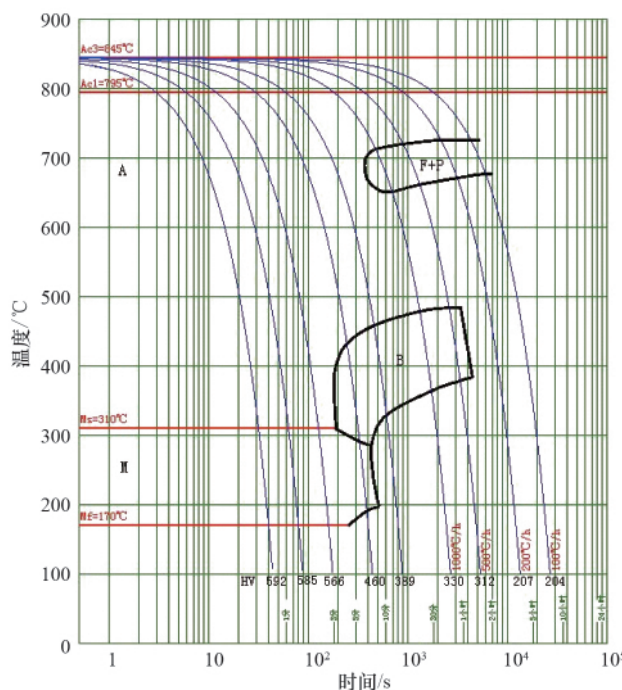


图 3 奥氏体转变冷却曲线

Fig. 3 Continuous cooling curve of austenite

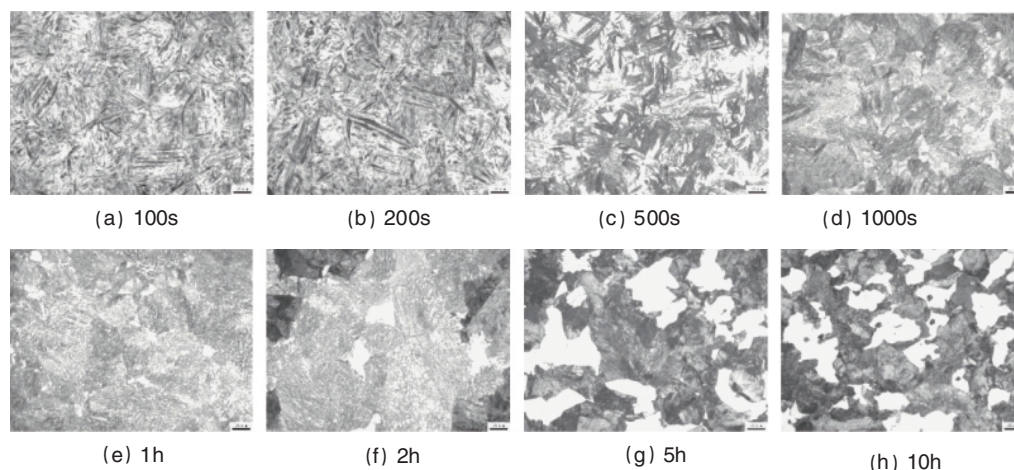


图 4 不同冷却速度冷却后的金相组织

Fig. 4 Microstructure under different cooling rate

金相组织照片。由图 6 看出,不同温度回火下的金相组织差别不明显,主要为回火马氏体^[7]。

3 分析与讨论

淬火温度和冷却方式的选择是影响淬火质量的重要因

素。淬火温度的选取以钢的相变临界点为依据,加热时要形成细小、均匀的奥氏体晶粒,淬火后获得细小马氏体组织。38CrMoAl 钢属亚共析钢,淬火温度过低会导致先共析铁素体未完全转变成奥氏体,不能完全淬火;淬火温度过高会导致奥氏体晶粒长大,从而都会影响力学性能。试验选取 900—

表 4 回火温度对 38CrMoAlA 钢力学性能的影响

Table 4 Effect of tempering temperature on mechanical properties of 38CrMoAlA steel

回火温度/°C	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	延伸率 δ_5 /%	收缩率 ψ /%	冲击韧性值 α_{ku} /(J·cm ⁻²)
不回火	1322	2063	8.9	25.0	51.3
100	1546	1928	9.7	37.1	69.3
200	1388	2038	9.9	26.8	52.1
300	1503	1809	8.3	37.8	47.4
350	1448	1720	8.4	38.7	44.4
400	1358	1599	10.1	40.3	38.6
430	1291	1501	9.4	38.5	40.5
450	1254	1431	9.7	39.5	60.4
475	1225	1373	11.9	44.3	58.7
500	1198	1328	12.3	48.9	70.7
530	1136	1257	14.3	53.4	88.7
560	1074	1187	13.2	54.2	104.9
590	935	1060	17.4	62.0	143.6
600	935	1057	16.8	63.5	162.2
615	895	1023	18.1	64.7	170.6
630	840	975	19.1	65.8	189.5
640	790	933	20.2	67.2	209.7
650	782	919	20.3	67.2	214.5
660	752	893	20.4	68.1	222.7
670	700	845	22.8	69.6	230.9
680	668	816	23.3	69.3	237.3
690	629	786	24.4	71.4	244.7
700	608	763	24.9	70.7	246.6

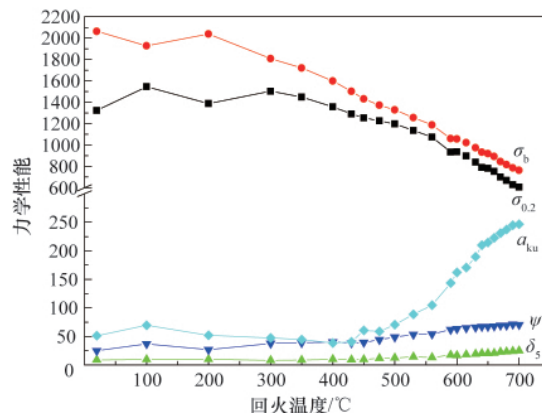


图 5 38CrMoAlA 钢回火温度与力学性能的关系

Fig. 5 Relation between mechanical properties and tempering temperature of 38CrMoAlA steel

1000°C温度范围内考察淬火温度对钢的力学性能。试验结果显示在 900—1000°C温度范围内淬火，该钢的力学性能变化不大，相比较而言，在 940°C淬火力学性能最好。从图 6 也可看出，该钢经 940°C淬火并回火后得到细小的马氏体组织，说明选取的淬火温度适宜。

为了使该钢的组织淬火后完全转变成马氏体，冷却速度必须大于该钢的临界冷却速度。在冷却过程中，钢件表面与芯部的冷却速度有一定差异，如果这种差异足够大，则可能造成大于临界冷却速度的部分转变成马氏体，而小于临界冷却速度的芯部不能转变成马氏体的情况。为了保证整个截面上都转变为马氏体需要选用冷却能力足够强的淬火介质，以保

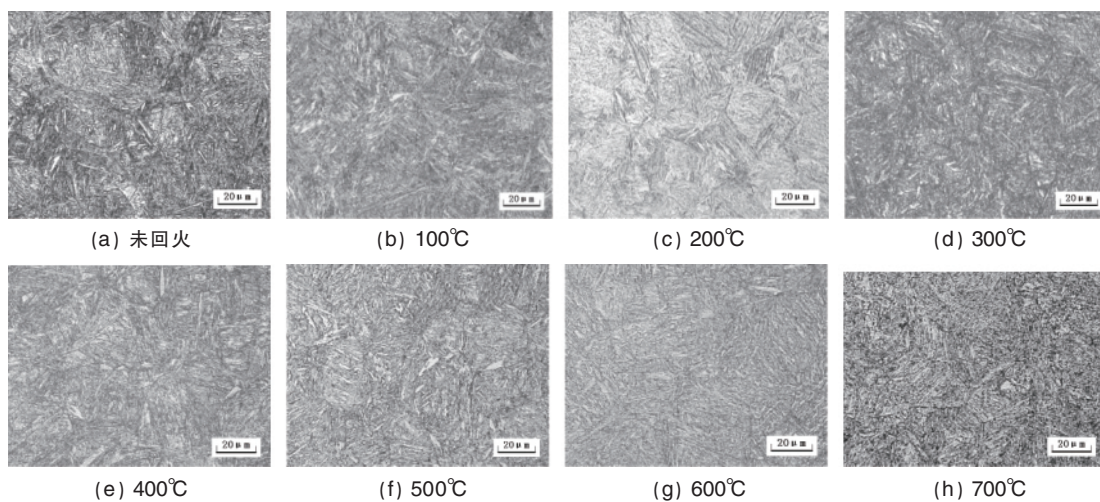


图 6 不同回火状态下的金相组织

Fig. 6 Microstructure tempered at different temperature

证钢件芯部有足够高的冷却速度。但是冷却速度大，钢件内部由于热胀冷缩不均匀造成内应力，又可能使工件变形或开裂。试验中选取的 4 种不同的冷却介质，其冷却强度^⑧不同，其大小顺序为水冷>油冷>温水冷>空冷。冷却强度不同，冷却速度就不同。水冷、油冷、温水冷 3 种冷却方式下虽冷却强度

不同，但这 3 种条件下的冷却速度都大于该钢淬火的临界冷却速度，而空冷的冷却强度小，冷却速度小于该钢淬火的临界冷却速度。试验结果显示水冷、油冷、温水冷 3 种冷却方式下的力学性能很好，而空冷下的力学性能较差。试验测定了 38CrMoAlA 钢的连续冷却转变曲线，通过对不同冷却速度下

的该钢作了金相组织分析,发现当冷却速度较快时发生马氏体转变,而随着冷却速度的变慢将进行贝氏体转变^[9]而非马氏体转变。水冷、油冷、温水冷3种冷却方式下都转变为马氏体,强度、冲击性能和硬度较好;而空冷发生贝氏体转变,强度、冲击性能和硬度较差。冷却速度也并不是越大越好,在大于临界冷却速度范围内,冷却速度越小,淬火引起的组织应力越小,淬火变形和开裂的倾向越小,塑性和韧性越高。因此,在水、油、温水3种介质中的冷却速度都大于临界冷却速度的条件下,温水和油中的冷却速度比水中的低,其塑性和韧性也就较水冷的高。实际操作中,温水冷虽比油冷塑性和韧性好,但相差不大,鉴于操作方便,故选油冷。

回火可以在 A_{c1} 以下很宽的范围内进行,因而对钢的最终性能影响很大,对钢的使用性能和寿命起着决定性的作用。试验通过回火试验得到了回火曲线,可以看出随着回火温度的升高,该钢的力学性能变化很大,强度一直趋向于降低,塑性指标逐渐增加,但冲击韧性并不是单调地降低或升高,而是在 $100\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内呈韧性下降的现象,出现回火脆性^[10]。这可能与杂质的偏聚和残余奥氏体的分解有关^[11],具体原因有待进一步研究。这一脆性温度范围往往被视为回火的禁区,因而在制定回火工艺时,应该尽量避开。虽然 38CrMoAlA 钢从金相组织来看在不同温度下回火没有差别,但力学性能变化却很大,在 $620\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回火能得到较好的强韧配合,为探索其强韧化机理,今后可借助透射电镜作进一步研究分析。

4 结论

(1) 在 $900\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内淬火,随着淬火温度的升高,38CrMoAlA 钢的力学性能变化不大;而随着淬火冷却方式的改变,38CrMoAlA 钢的力学性能发生变化,其中在温水和油中淬火力学性能较好,鉴于操作方便,选用油冷较为合适。

(2) 38CrMoAlA 钢随着回火温度的升高,力学性能变化很大,在 $100\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内出现回火脆性,在 $620\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右回火能得到较好的综合性能。

(3) 38CrMoAlA 钢适宜的热处理工艺为: $940\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1h, 油

冷; $620\text{ }^{\circ}\text{C}$, 5h, 油冷。

参考文献 (References)

- [1] Tong W P, Han Z, Wang L M, *et al.* Low-temperature nitriding of 38CrMoAlA steel with a nanostructured surface layer induced by surface mechanical attrition treatment [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2008, 202(20): 4957-4963.
- [2] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册第1卷[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 103.
Editorial Board of China Aeronautical Materials Handbook. China aeronautical materials handbook volume 1[M]. Beijing: Standards Press of China, 2002: 103.
- [3] 隋凌云, 赵瑞环. 优化冶炼加工工艺提高 38CrMoAlA 钢的质量 [J]. 辽宁冶金, 1995(6): 55-57.
Sui Lingyun, Zhao Ruihuan. *Liaoning Metallurgy*, 1995(6): 55-57.
- [4] 陆金二. 38CrMoAlA 钢的调质处理 [J]. 铸锻热-热处理实践, 1993(4): 31-35.
Lu Jin'er. *Casting Heat-Heat Treatment Practice*, 1993(4): 31-35.
- [5] 王占华, 陆长河. 38CrMoAlA 钢成分及点状偏析控制 [J]. 大型铸锻件, 2007(4): 35-37.
Wang Zhanhua, Lu Changhe. *Heavy Casting and Forging*, 2007(4): 35-37.
- [6] 郭从盛, 龙妹明, 冯小明, 等. 38CrMoAlA 钢回火硬度的变化规律及其函数关系的建立[J]. 铸造技术, 2007, 28(9): 1191-1194.
Guo Congsheng, Long Shuming, Feng Xiaoming, *et al.* *Foundry Technology*, 2007, 28(9): 1191-1194.
- [7] 林莉, 李喜孟, 周祖华, 等. 用超声波速度无损表征 38CrMoAlA 钢热处理转变产物的研究[J]. 无损检测, 2003, 25(1): 36-38.
Lin Li, Li Ximeng, Zhou Zuhua, *et al.* *Nondestructive Testing*, 2003, 25(1): 36-38.
- [8] 胡光立, 谢希文. 钢的热处理 [M]. 第2版. 西安: 西北工业大学社, 2004: 173-177.
Hu Guangli, Xie Xiwen. *Heat treatment of steel* [M]. 2nd ed. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2004: 173-177.
- [9] 陆卫东, 刘雪燕, 李耀华, 等. 38CrMoAlA 钢中粒状贝氏体对渗氮层组织和性能的影响[J]. 热处理, 2006, 21(4): 28-31.
Lu Weidong, Liu Xueyan, Li Yaohua, *et al.* *Heat Treatment*, 2006, 21(4): 28-31.
- [10] 王可勇. 金属热处理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 169-174.
Wang Keyong. *Heat treatment of metals*[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2005: 169-174.
- [11] 周上祺, 侯琼, 任勤. 38CrMoAlA 钢离子渗氮微观结构的研究 [J]. 金属热处理, 2002, 27(10): 10-12.
Zhou Shangqi, Hou Qiong, Ren Qin. *Heat Treatment of Metals*, 2002, 27(10): 10-12.

(责任编辑 张军, 岳臣)

《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述该领域的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。在线投稿: www.kjdb.org。