

低合金高强度双相耐磨钢热处理工艺研究

刘 凯¹, 邵乙清², 朱灵泉², 张晶晶¹, 卢伟煜¹, 吴开明¹

(1. 武汉科技大学冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室, 湖北 武汉, 430081;
2. 中国浦发机械工业股份有限公司, 上海, 200061)

摘要:采用光学显微镜、电子显微镜和万能力学试验机对热处理后的低合金高强度双相耐磨钢试样进行组织观察和力学性能测试。结果表明,水淬后的试样微观组织为贝氏体-马氏体双相组织;250℃回火后的试样微观组织为回火马氏体和贝氏体;450℃和600℃回火后的试样微观组织分别为回火马氏体和贝氏体。水淬250℃回火后的试样具有最佳强度和塑性配比,其抗拉强度和屈服强度分别为1491.4MPa和1264.6MPa, HRC 硬度为43,延伸率为9.42%。

关键词:热处理; 马氏体; 贝氏体; 回火

中图分类号: TG156.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3644(2010)03-0233-05

关于耐磨钢的研究报道很多^[1-9]。为了获得具有一定塑性的耐磨钢,通常采用的方法是高温回火^[10],但这种方法使材料在获得良好塑性的同时降低了强度和硬度。试验证明,采用低温回火的方法可使合金钢在提高塑性的同时仍保留其较高强度。目前,有关耐磨钢低温回火处理方面的报道较少。

本文以低合金高强度耐磨钢为试验材料,采用水淬后无回火、低温回火、中温回火和高温回火热处理方法,观测其试样热处理后的微观组织和力学性能,分析不同热处理工艺对材料组织性能的影响,以优化低合金高强度马氏体-贝氏体双相耐磨钢热处理工艺。

1 材料与试验方法

材料为低合金高强度双相耐磨钢,其成分如表1所示。将低合金高强度双相耐磨钢板加工成 $\phi 10\text{ mm}\times 130\text{ mm}$ 标准拉伸试样,将试样加热到900℃,保温30 min,淬火至室温(淬火介质为加入冰块的水),淬火后的试样分别在250、450、600℃下回火保温1 h。热处理试验方案如表2所示。

将热处理后的试样在万能力学试验机上进行力学性能测试。将试样切割成小样,经抛光、腐蚀处理后用 OLYMPUS 光学显微镜和电子显微镜

观察其微观组织。运用英国 Sente 公司材料热力学计算软件 JMatpro 4.1 模拟试样 CCT 曲线。

表 1 低合金高强度双相耐磨钢化学成分(wB/%)

Table 1 Chemical compositions of steel sample			
C	Mn	Si	Cr
0.35~0.40	1.10~1.20	0.2~0.25	0.48~0.49
Mo	Ti	Ni	
0.015~0.02	0.035~0.04	0.035~0.04	

表 2 热处理试验方案

Table 2 Heat treatment scheme of tested steel				
试样	加热温度 /℃	保温时间 /min	淬火介质	回火工艺
1 [#]	900	30	水+冰	无回火
2 [#]	900	30	水+冰	250℃, 1 h
3 [#]	900	30	水+冰	450℃, 1 h
4 [#]	900	30	水+冰	600℃, 1 h

2 试验结果

2.1 光学显微组织

正火状态下的低合金高强度耐磨钢微观组织如图1所示。从图1中可以看出,大部分组织为珠光体和晶界铁素体。

水淬无回火处理后试样显微组织如图2所示,从图2中可以看出,其组织较均匀,晶粒细小,

收稿日期: 2009-11-29
基金项目: 湖北省教育厅国际合作项目(200711001); 中国浦发机械工业股份有限公司研究基金; 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-05-0680)。
作者简介: 刘 凯(1983), 男, 武汉科技大学硕士生, E-mail: jky0296@hotmail.com
通讯作者: 吴开明(1966), 男, 武汉科技大学教授, 博士生导师, E-mail: wukaiming2000@yahoo.com.

根据 JmatPro 计算软件模拟结果及文献分析^[11-13],该淬火组织为马氏体和贝氏体。

对水淬+ 250 ℃回火试样用光学显微镜及电子显微镜观察,结果如图 3、图 4 所示。从图 3 中可以看出,水淬+ 250 ℃回火后的材料微观组织较均匀,为贝氏体-马氏体双相组织。从图 4 中可以看出,试样经过 250 ℃回火后,马氏体板条界面变得不甚清晰,部分马氏体板条边界尚可辨认(见图 4 中箭头指处),板条间及板条内析出了少量细小的碳化物。

对水淬+ 450 ℃回火试样用光学显微镜及电子显微镜观察,其结果如图 5~ 图 7 所示。从图 5

中可看出,水淬+ 450 ℃回火后的试样显微组织为回火马氏体。从图 6 中可以看出,经过 450 ℃中温回火后,试样的微观组织为回火马氏体和回火贝氏体,组织较均匀细小。从图 7 中可以看出,试样马氏体板条界面开始模糊,马氏体板条合并较多,碳化物析出量增多,尺寸增大。

对水淬+ 600 ℃回火试样用光学显微镜及电子显微镜观察,结果如图 8~ 图 10 所示。经过上述热处理后,试样微观组织为回火马氏体和回火贝氏体,马氏体板条束界面消失,马氏体板条完全合并,碳化物大量析出并长大。

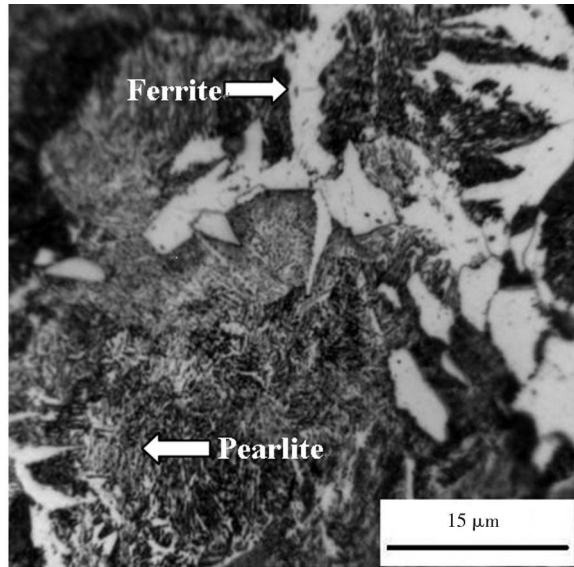


图 1 正火状态下试样光学显微组织
Fig. 1 Microstructure of normalized steel

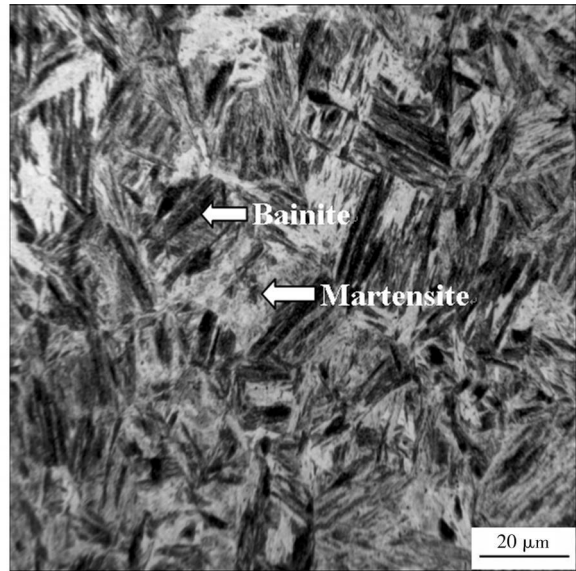


图 2 水淬无回火试样光学显微组织
Fig. 2 Optical microstructure of Sample 1#

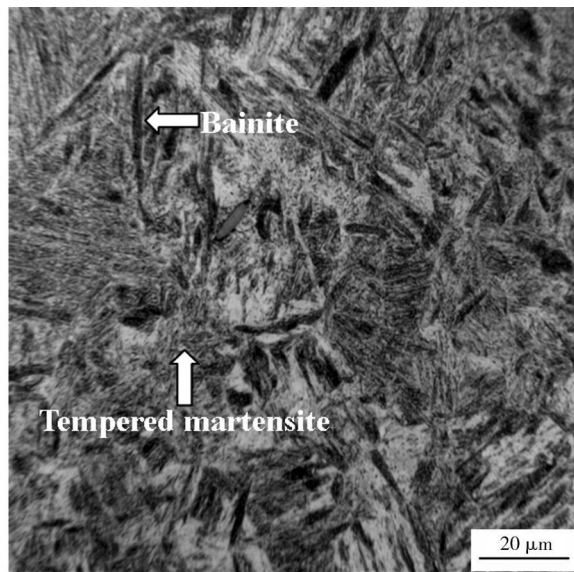


图 3 水淬+ 250 ℃回火试样光学显微组织
Fig. 3 Optical microstructure of Sample 2#

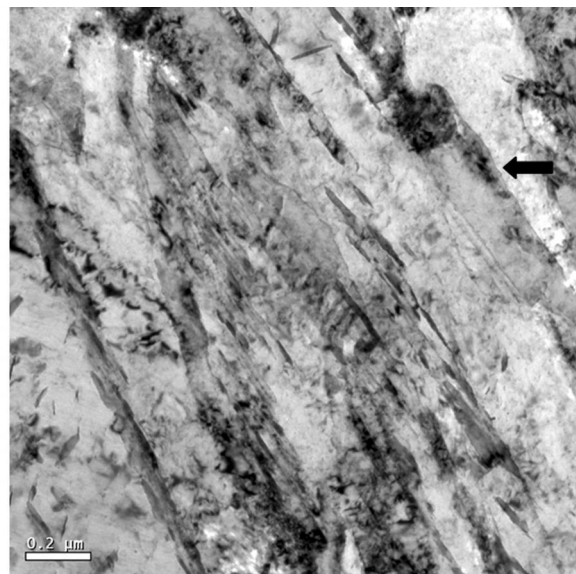


图 4 水淬+ 250 ℃回火试样 TEM 图像
Fig. 4 TEM micrograph of Sample 2#

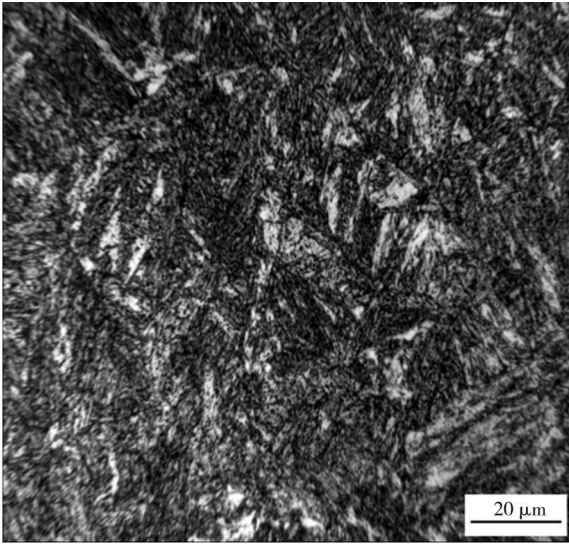


图 5 水淬+ 450 °C回火试样光学显微组织
Fig.5 Optical microstructure of Sample 3[#]

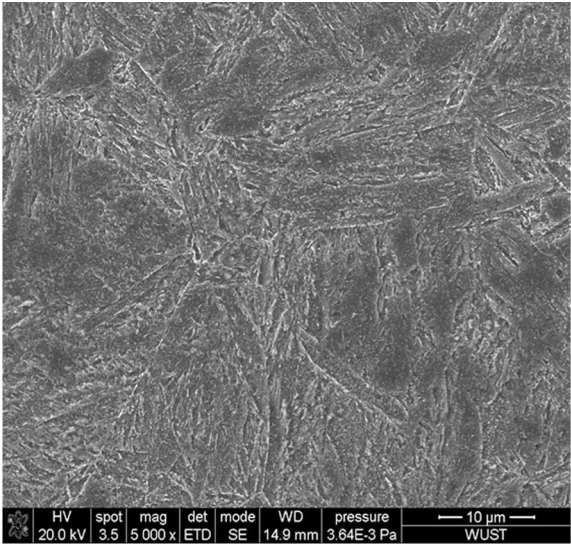


图 6 水淬+ 450 °C回火试样 SEM 图像
Fig.6 SEM micrograph of Sample 3[#]

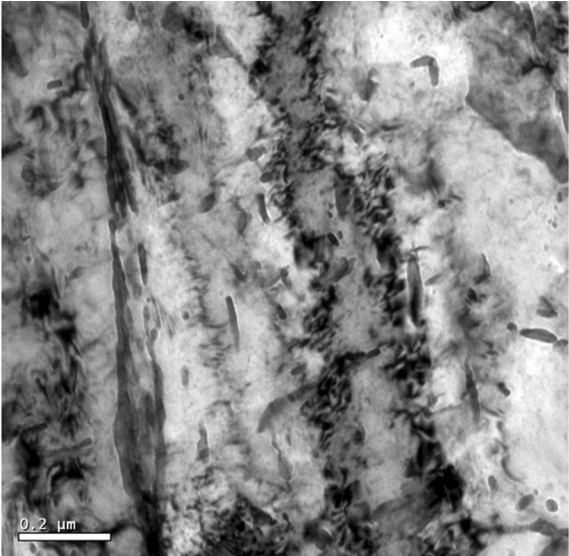


图 7 水淬+ 450 °C回火试样 TEM 图像
Fig.7 TEM micrograph of Sample 3[#]

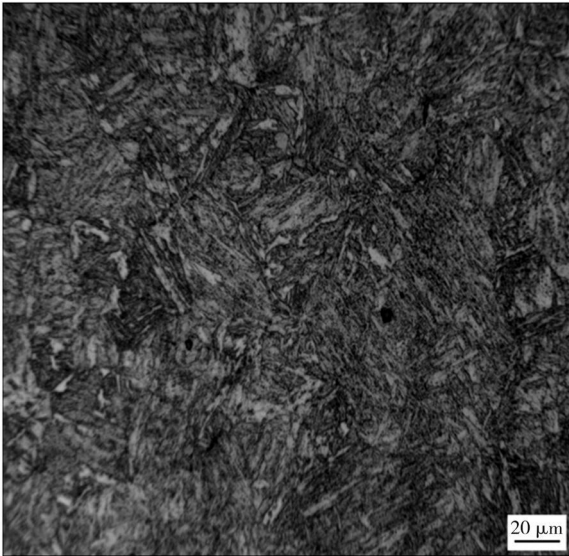


图 8 水淬+ 600 °C回火试样光学显微组织
Fig.8 Optical microstructure of Sample 4[#]

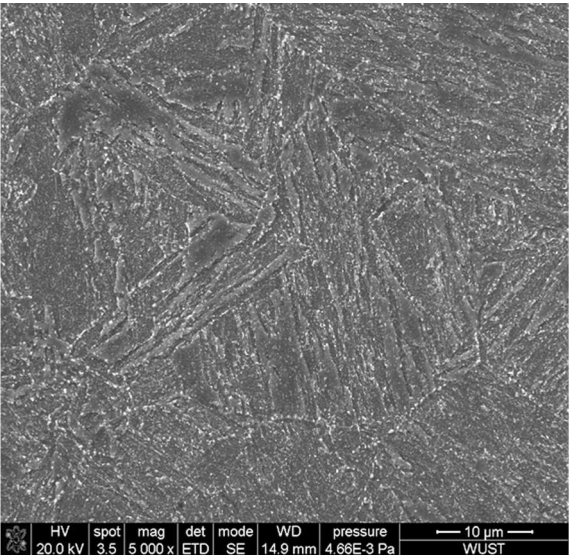


图 9 水淬+ 600 °C回火试样 SEM 图像
Fig.9 SEM micrograph of Sample 4[#]

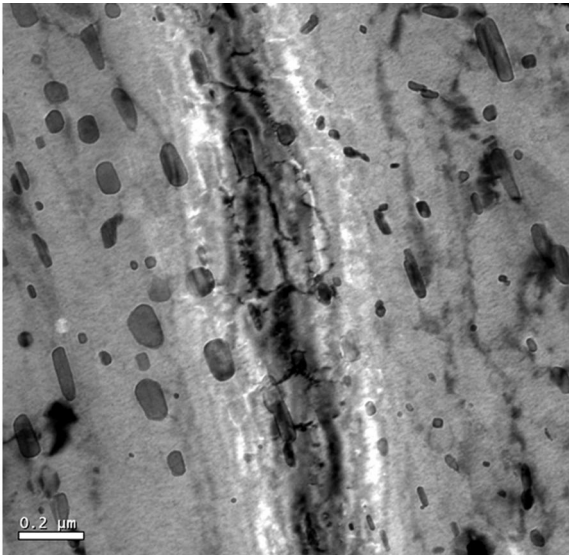


图 10 水淬+ 600 °C回火试样 TEM 图像
Fig.10 TEM micrograph of Sample 4[#]

2.2 力学性能

对热处理后的试样做拉伸试验,其力学性能如表3所示。从表3中可看出,试样抗拉强度随回火温度升高而降低,这是因为随着回火温度的升高,试样中的过饱和碳得以析出并长大,铁素体过饱和度降低。此外,试样的延伸率随回火温度的升高而增高,试样的硬度随回火温度的升高而降低。

分析其原因,试样经过250℃低温回火后,因淬火产生的内应力得以消除,同时析出少量碳化物,降低了铁素体的过饱和度,故而增强了试样塑性,但由于微观组织为马氏体和贝氏体,因而试样具有较高强度和硬度;试样经过450℃中温回火和600℃高温回火后,其内应力虽得以消除,但回火马氏体板条束合并,碳化物完全析出并长大,使得试样塑性大幅度增高的同时强度和硬度大幅度降低。

表3 热处理后的试样力学性能

Table 3 Mechanical properties of tested steel

试样	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	延伸率 δ /%	硬度 (HRC)
1#	1 547.7	1 153.5	3.71	45
2#	1 491.4	1 264.6	9.42	43
3#	1 038.2	971.6	12.09	32
4#	805.7	720.1	15.09	20

3 讨论

3.1 马氏体-贝氏体双相组织的形成

利用软件模拟计算得到低合金高强度马氏体-贝氏体钢 CCT 曲线如图11所示。根据计算结果得知,先共析铁素体相的析出温度为724.7℃,贝氏体相转变温度为569℃,马氏体相转变温度为331.2℃。过冷奥氏体相转变在较大的冷却速率范围内(0.1~100℃/s)都会形成贝氏体组织,当冷却速度很大时,会形成马氏体和贝氏体的双相组织。试样在奥氏体化后在进行水淬的过程中,冷却速度约为100℃/s,过冷奥氏体率先进入贝氏体相转变区,生成贝氏体组织;随后进入马氏体相转变区,当残余过冷奥氏体相变温度降到Ms相变温度时,过冷奥氏体全部转变为贝氏体和马氏体,形成马氏体-贝氏体双相组织。

3.2 马氏体-贝氏体双相钢的强化机制

试样在连续冷却过程中,率先转变生成的贝氏体对原始奥氏体晶粒能起到分割细化的作用,将原始奥氏体晶粒分割成许多的细小区域,随后进行马氏体相转变时,细小的奥氏体区域转变为马氏体,从而对试样的微观组织起到了细化作用。

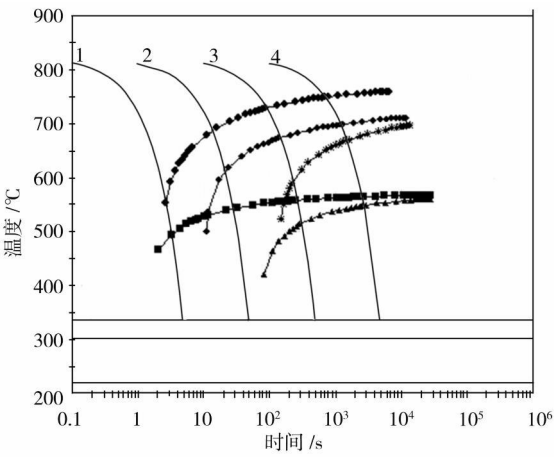


图11 低合金高强度马氏体-贝氏体钢模拟 CCT 曲线
Fig. 11 CCT curves of a low alloy high strength martensite/bainite dual phase steel

●—铁素体(0.1%);◆—珠光体(0.1%);■—贝氏体(0.1%);*—珠光体(99.9%);▲—贝氏体(99.9%);1—100℃/s;2—10℃/s;3—1℃/s;4—0.1℃/s

板条马氏体为高强度相组织,具有很高的抗拉强度和硬度,但韧性较差。贝氏体组织则在具有较高强度的同时具有较好的韧性。因此,试样微观组织为贝氏体和马氏体双相组织时,其强度和韧性都得以保证。

4 结论

- (1) 250℃回火后的试样微观组织为马氏体-贝氏体双相组织,马氏体板条界面变得不很清晰,有少量马氏体板条合并。
- (2) 450℃回火后的试样微观组织中,开始有碳化物析出,有较多的马氏体板条合并,试样抗拉强度和屈服强度降低。
- (3) 600℃回火后的试样微观组织为回火马氏体和回火贝氏体,碳化物大量析出并长大,回火马氏体板条界面消失,马氏体板条完全合并,试样的抗拉强度和屈服强度显著降低。
- (4) 250℃回火后的试样具有最佳的强度和塑性配比。

参 考 文 献

[1] 徐文亮,许云华,武宏.深度轧制高锰钢的组织演变及性能研究[J].金属热处理,2005,30(5):64-66.
[2] 张明,陈晓军,刘凤君.变质中锰耐磨钢的性能与应用[J].机械工程材料,2004,28(1):38-40.
[3] 吕宇鹏.超高锰耐磨钢的组织与性能研究[J].矿山机械,1998(6):69-73.
[4] 王国顺,符蓉.高硅锰中碳低合金耐磨钢的开发及

性能研究[J]. 铸造技术, 2001(2): 48-50.

[5] 蔡擎, 杨贺. 微合金贝氏体抗磨钢及其性能研究[J]. 四川工业学院学报, 2002, 21(3): 76-78.

[6] 蒋业华, 周荣. 控制冷却获得贝氏体/马氏体耐磨钢[J]. 铸造, 1998(1): 22-24.

[7] 章立群, 刘自成, 刘东雨, 等. Mn 系贝氏体/马氏体复相钢的研究及应用进展[J]. 金属热处理, 2006, 31(12): 22-24.

[8] 厚汝军, 吕博, 张福成, 等. 钨对中锰奥氏体钢耐磨性的影响[J]. 物理测试, 2008, 26(4): 6-10.

[9] 曹忠孝, 李文斌, 庞兆夫, 等. 微量硼对低碳贝氏体钢过冷奥氏体转变的影响[J]. 鞍钢技术, 2009(1): 22-24.

[10] Jung Ho LEE. Effects of tempering temperature on wear resistance and surface roughness of a high speed steel roll[J]. ISIJ International, 2001, 8(41): 859-865.

[11] D Y Wei, J L Gu, H S Fang, et al. Fatigue behavior of 1 500 MPa bainite/martensite duplex phase high strength steel[J]. International Journal of Fatigue, 2004(26): 437-442.

[12] Tomita Y, Okabayashi K. Mechanical properties of 0.40 pct C-Ni-Cr-Mo high strength steel having a mixed structure of martensite and bainite[J]. Metall Trans, 1985, 16A(1): 73-82.

[13] Tomita Y, Okabayashi K. Heat treatment for improvement in lower temperature mechanical properties of 0.40 pct C-Cr-Mo ultrahigh strength steel[J]. Metall Trans, 1983, 14A(11): 87-93.

Heat treatment of low-alloy high-strength bainite/ martensite wear-resistant steel

Liu Kai¹, Shao Yiqing², Zhu Lingquan², Zhang Jingjing², Lu Weiyu¹, Wu Kaiming¹

(1. Hubei Province Key Laboratory for Systems Science in Metallurgical Processing,
Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;
2. China Perfect Machinery Industry Corp., Ltd., Shanghai 200061, China)

Abstract: The microstructure of a low-alloy, high-strength, wear-resistant steel which was treated under different heat treatment conditions was observed by using optical microscope and scanning electron microscope (SEM). It is found that the microstructure of the specimen which was quenched into water is a dual phase of martensite and bainite; that quenched and then tempered at 250 °C is predominantly tempered martensite; and that quenched and then tempered at 450 °C and 600 °C is tempered martensite and tempered bainite. The lath of martensite is merged under this heat treatment condition. The specimen which was quenched and then tempered at 250 °C has optimal mechanical properties, whose tensile and yield strength reach 1491.4 MPa and 1264.6 MPa, respectively, whose hardness reach 43 HRC, and whose elongation is 9.42%.

Key words: heat treatment; martensite; bainite; tempering

[责任编辑 彭金旺]