

回火温度对 600 MPa 级低碳贝氏体钢组织和力学性能的影响

陈林恒¹⁾ 康永林¹⁾ 黎先浩¹⁾ 温德智²⁾ 刘国民²⁾

1) 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083 2) 湖南涟源钢铁集团有限公司, 娄底 417009

摘要 利用扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)等实验方法,研究了不同回火温度对屈服强度 600 MPa 级 Fe-Mn-Nb-B 系低碳贝氏体高强钢组织和性能的影响。结果表明:回火温度对屈服强度和抗拉强度均有较大影响。各回火温度下的低碳贝氏体钢性能与回火前相比,屈服强度均有不同程度的升高,而抗拉强度则均有不同程度的下降;600 °C 回火时屈服强度比回火前高出 105 MPa。随着回火温度的升高,屈服强度先上升后又略有下降并在 600 °C 时达到最大值,抗拉强度下降明显,伸长率略有升高,屈强比升高。分析认为:回火前后力学性能的变化主要与回火后有更多弥散的尺寸在 20 nm 以下的新的细小粒子析出以及马氏体占绝大多数的 M/A 岛的分解和发生位错多边形的回复有关。

关键词 低碳贝氏体钢; 回火温度; 析出; M/A 岛

分类号 TG 142.2; TG 156.5

Effect of tempering temperature on the microstructure and mechanical properties of 600 MPa grade low carbon bainitic steel

CHEN Lin-heng¹⁾, KANG Yong-lin¹⁾, LI Xian-hao¹⁾, WEN De-zhi²⁾, LIU Guo-min²⁾

1) School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Hunan Lianyuan Iron and Steel Co. Ltd., Loudi 417009, China

ABSTRACT The effects of tempering temperature on the microstructure and mechanical properties of 600 MPa grade low carbon bainitic steel belonged to Fe-Mn-Nb-B series were investigated by utilizing scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM). The results show that tempering temperature has considerable influence on both the yield strength and the tensile strength. The yield strength increases with increasing tempering temperature while the tensile strength has an adverse law. In comparison with the as-received steel, the yield strength of the steel tempered at 600 °C increases 105 MPa. With the increase in tempering temperature, the yield strength increase first and has a slight decline after it reaches the highest point at 600 °C, the tensile strength decreases significantly, the elongation increases slightly and the yield ratio increases also. Through analysis it is concluded that the major change of mechanical properties after tempering has a connection with dispersive precipitates with the size of less than 20 nm, the decomposition of large M/A islands in which martensite has a large proportion and the reversion of dislocations and polygon ferrite.

KEY WORDS low carbon bainitic steel; tempering temperature; precipitation; M/A island

高强度低碳贝氏体钢是国际上 20 世纪 80 年代新发展的一类高强度、高韧性的多用型钢种,该新型微合金贝氏体钢种由于具有工艺简单、节省能源、强韧性好、易于成型以及优良的焊接性能等众多优点目前已在工程机械、造船和石油天然气输送管线等

行业得到广泛应用^[1]。低碳贝氏体高强钢组织类型复杂多样,一般为准多边形铁素体、针状铁素体、粒状贝氏体、板条状贝氏体以及 M/A 岛等几种非平衡组织的混合组织^[2]。低碳贝氏体钢在连续冷却下的最终组织受钢种成分、相变前奥氏体晶粒状态、奥

氏体在非再结晶区的变形、冷却条件以及其他生产工艺的影响很大^[3-5]. 通过不同的保温和冷却工艺, 可以改变微合金低碳贝氏体钢中相变产物的类型、各相变组织的比例、组织细化程度等, 从而改善钢的性能^[3]. 本文主要研究 600 MPa 级 Fe-Mn-Nb-B 系低碳贝氏体高强钢在不同温度下回火后的组织和力学性能, 从而确定最佳的生产 and 热处理工艺.

表 1 实验用钢的化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of tested steel

C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	Mo	B
0.044	0.26	1.55	0.02	0.003	<0.1	<0.1	<0.40	微量

1050 °C, 终轧温度为 830~880 °C, 轧后经层流冷却线冷却后在 540~600 °C 内卷取.

为了确定能获得最佳综合性能的回火温度, 对实验钢做了系列温度的回火实验, 并对回火后的性能进行了测定. 文献[3-8]中关于高强度级别低碳贝氏体钢种回火后各项性能的峰值、谷值或最优综合性能等均出现在高温回火阶段, 因此本文主要研究回火温度在 550 °C 及以上回火后的组织性能. 将轧后试样分别加热至所要求的温度(550, 600, 650,

1 实验材料和方法

实验材料来自涟源钢铁集团有限公司大生产试制工程机械用低碳贝氏体高强钢板, 其主要化学成分如表 1 所示. 工艺路线为经高炉冶炼、钢包精炼、薄板坯连铸和均热炉均热, 出炉后通过七机架连轧, 轧成厚度为 5.8 mm 的钢板, 开轧温度为 1030~

700 °C), 保温 1 h 后在空气中冷却至室温. 最后在回火后的试样上取样进行力学性能测试、显微组织和析出粒子观察等.

将回火后各试样加工成标准拉伸试样, 在 MTS 810 拉伸试验机上测试其力学性能, 实验结果如表 2 所示, 不同回火温度对性能的影响如图 1 所示. 用未回火试样和 600 °C 回火试样制取碳萃取复型试样, 在 JEM-2000FX 透射电子显微镜下对析出粒子进行了观察.

表 2 回火前后各试样的力学性能

Table 2 Mechanical properties of as-rolled and heat-treated steels

试样编号	回火温度/°C	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A /%	$R_{p0.2}/R_m$
1	回火前	630	825	16.5	0.76
2	550	685	810	17.5	0.85
3	600	735	795	17	0.92
4	650	725	760	18	0.95
5	700	690	725	20	0.95

注: $R_{p0.2}$ 、 R_m 和 A 分别表示规定非比例延伸率为 0.2% 时的屈服强度、抗拉强度和断后伸长率; $R_{p0.2}/R_m$ 表示屈服比.

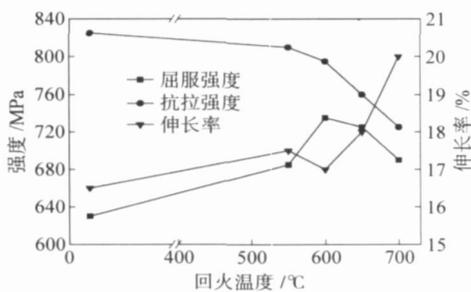


图 1 回火温度对 600 MPa 级低碳贝氏体钢性能的影响

Fig. 1 Effect of tempering temperature on the mechanical properties of 600 MPa grade low carbon bainitic steel

2 实验结果及分析

2.1 钢板回火后的力学性能

从图 1 中可以看出, 高温回火对低碳贝氏体高

强钢性能影响较大, 各不同回火温度下的力学性能与回火前相比均有较大变化. 未回火的轧态试样其屈服强度和抗拉强度分别为 630 MPa 和 825 MPa, 伸长率为 16.5%; 在 550 °C 保温 1 h 回火后屈服强度提高到 685 MPa, 抗拉强度略有降低而伸长率略有提高; 当回火温度为 600 °C, 屈服强度达到最大值, 为 735 MPa, 比未回火时增加了 105 MPa, 抗拉强度降低 30 MPa; 当回火温度提高到 650 °C 时, 屈服强度升高也比较明显, 比回火前升高了 95 MPa, 达到 725 MPa, 抗拉强度下降也很明显, 下降了 65 MPa, 达到 760 MPa, 伸长率增加到 18%; 当回火温度进一步提高到 700 °C 时, 回火后屈服强度为 690 MPa, 虽然比回火前还是增加了 60 MPa, 但相比其他回火温度, 其屈服强度又有一定程度的下降. 在此温度下回火抗拉强度下降最明显, 达到最低值

725 MPa, 伸长率也达到最大值 20%。屈服比随着回火温度的升高而升高, 由轧态的 0.76 升高到 650 °C 和 700 °C 回火时的 0.95。

2.2 回火过程中的组织演变

回火前后各试样在扫描电镜下的显微组织照片如图 2 所示。从图 2 中可以看出回火前后的组织变化情况。回火前试样的显微组织主要是由粒状贝氏体组成, 组织中岛状组织的含量较高且较粗大, 如图 2(a) 所示。对岛状相的进一步研究发现, 该岛状相由 M/A 两相组成。在贝氏体相变过程中, C 原子不断地从贝氏体基体向奥氏体中扩散, 使得剩余奥氏体内逐渐富碳, 但岛内的碳含量富集程度尚不够达到能析出碳化物的水平, 故成为富碳奥氏体岛, 在冷却过程中一部分将转变成马氏体^[2]。由于钢中加入了 B 等能够显著提高淬透性的元素, 又在轧后实行了快速冷却, 而且冷速比较大, 故 M/A 组织中的马

氏体含量很高。图 2(b) 是图 2(a) 中 M/A 组织的放大照片, 图中箭头所示的白色区域即为大块 M/A 岛。试样经 550 °C 和 600 °C 保温 1 h 回火后, 粗大的 M/A 组织开始发生初步分解, 如图 2(c) 和图 2(d) 所示。从图 2(d) 中可以看出, 回火前组织中长条状粗大 M/A 组织已经分解为略微弥散的球形颗粒状; 当回火温度继续提高到 650 °C 和 700 °C 时, M/A 岛分解已经比较完全, 所得组织是粒状贝氏体以及部分多边形铁素体, 如图 2(e)~(h) 所示。图 2(f) 和图 2(h) 分别是图 2(e) 和图 2(g) 放大后的照片。这说明在此温度下回火部分区域已经发生了一定的回复, 尤其是在 700 °C 回火时回复的程度比 650 °C 时要深, 因此多边形铁素体的含量比 650 °C 回火时要多。试样在 650 °C 和 700 °C 回火后多边形铁素体的体积分数分别达到 35% 和 55%。

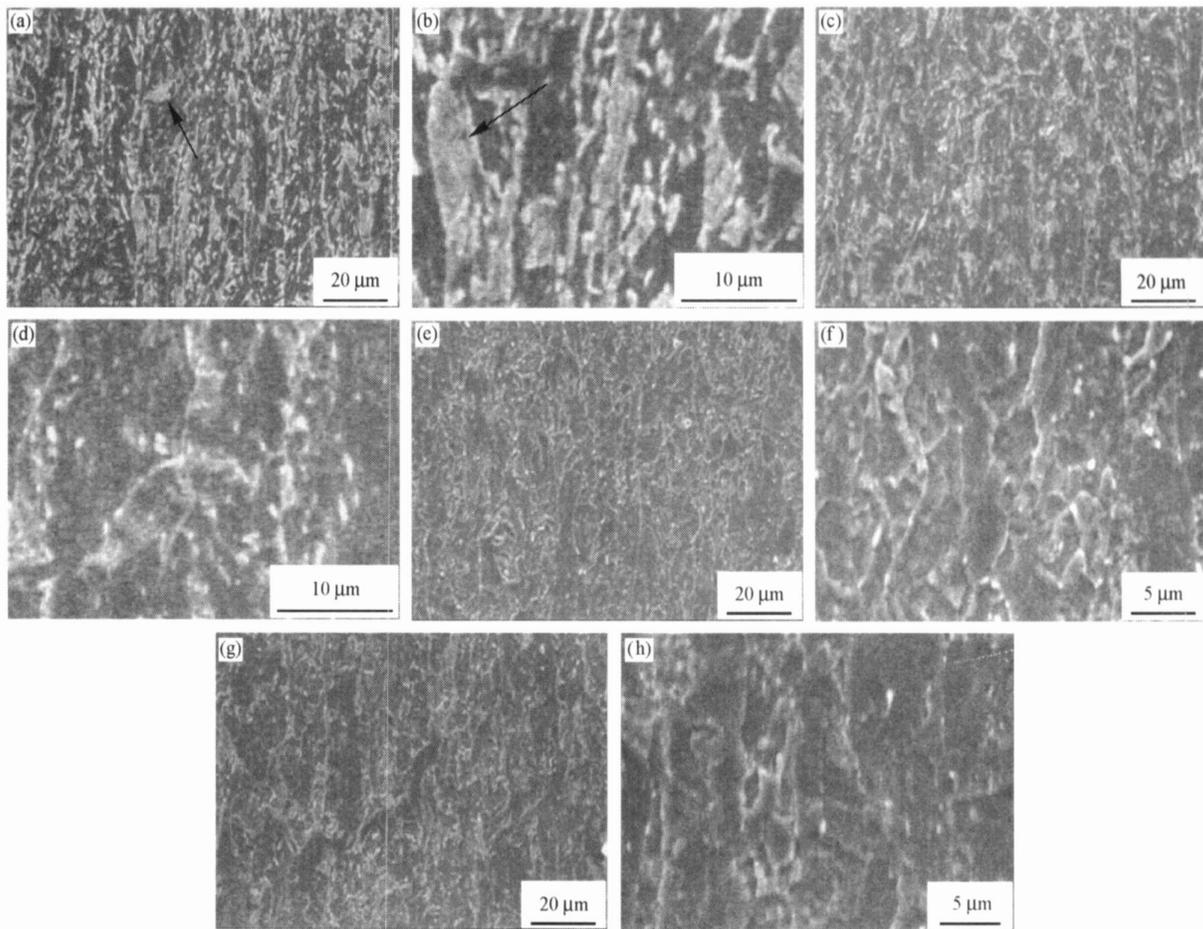


图 2 不同回火温度的钢板显微组织。(a), (b) 未回火; (c) 550 °C; (d) 600 °C; (e), (f) 650 °C; (g), (h) 700 °C

Fig. 2 Microstructures of the tested steel at different tempering temperatures; (a), (b) as-rolled; (c) 550 °C; (d) 600 °C; (e), (f) 650 °C; (g), (h) 700 °C

2.3 回火前后的析出物

微合金元素的析出过程一般包括微合金元素的

偏聚和析出相的形核、长大、粗化四个阶段。制取金属碳萃取复型试样, 在 JEM-2000FX 透射电子显微

镜下对未回火试样和在 600 °C 时的回火试样中的析出物进行了分析,析出粒子的形貌、能谱及衍射斑如图 3 所示. 虽然回火前后试样中析出粒子尺寸都在十几纳米至几十纳米甚至上百纳米不等,但回火前析出粒子的尺寸主要为 20~50 nm,如图 3(a)所示. 图 3(a)中箭头所指粒子的能谱和衍射花样如图 3(b)和(c)所示. 图 3(b)中能谱显示析出粒子主要是 Nb 和 Ti 的碳氮化物析出粒子,且以 Ti 的析出为主,图 3(c)中衍射花样证明该粒子为典型的面心立方结构,因 Nb(C, N)和 Ti(C, N)在室温下的晶格

常数比较接近,且因钢中存在的 Nb(C, N)和 Ti(C, N)粒子在整个固态范围内均可以完全互溶,故图 3(a)中箭头所指粒子可认为是复合析出粒子(Nb, Ti)(N, C).

试样经 600 °C、保温 1 h 热处理后,析出粒子比未回火时更多且更弥散,如图 3(d)所示;除原有尺寸较大的粒子外,还出现了大量的尺寸在 20 nm 以下的粒子,如图 3(e)中箭头所示;图 3(f)能谱显示小尺寸粒子虽也是 Nb、Ti 的复合析出粒子(Nb, Ti)(C, N),但明显是以 Nb 的析出为主.

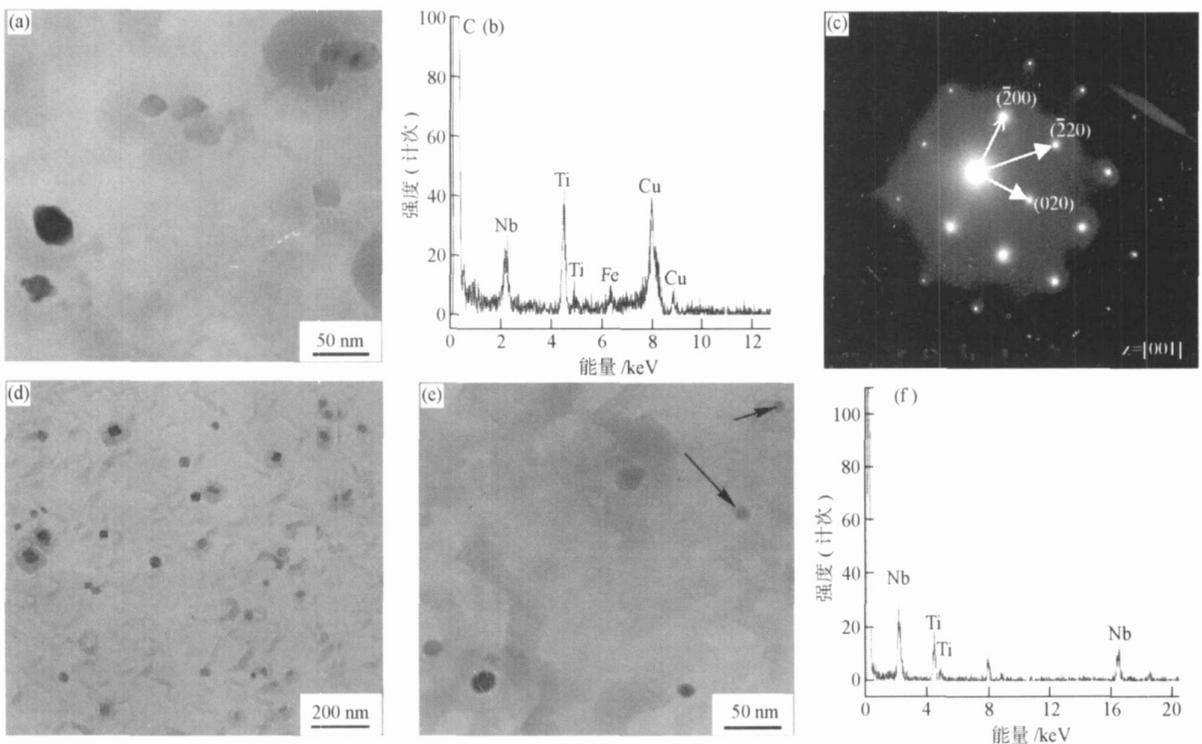


图 3 回火前后试样中的析出物形貌、能谱和衍射斑. (a)回火前形貌;(b)回火前能谱;(c)回火前衍射斑;(d)、(e)600 °C回火后粒子形貌;(f)600 °C回火后粒子能谱

Fig. 3 TEM images, energy spectra and diffraction pattern of the precipitates: (a) particle morphology as-rolled; (b) energy spectrum of particles as-rolled; (c) diffraction pattern of particles as-rolled; (d), (e) particle morphology after tempering at 600 °C; (f) energy spectrum of particles after tempering at 600 °C

3 分析与讨论

在回火过程中最主要的变化就是大块 M/A 岛的分解和大量更加细小弥散的粒子析出,而硼和大量增加淬透性的元素的加入以及轧后的快速冷却使得 M/A 组织中的马氏体含量占绝对优势,因此在回火过程中作为强硬相的 M/A 岛的大量分解必然导致抗拉强度的降低. 回火后,除原有析出粒子外,大量尺寸在 20 nm 以下的(Nb, Ti)(C, N)粒子的弥散析出是导致屈服强度上升的主要原因,而 M/A 岛状组织的分解使得基体和硬质相在外力作用下的

变形行为更加协调,在一定程度上也对屈服强度的升高有所贡献,且这种协调性对伸长率的提高也有一定的积极影响,但这种影响对 M/A 组织的分解程度的依赖性较大,因此在 650 °C 以下温度回火时,伸长率升高不明显. 进一步提高回火温度(如 650 °C 和 700 °C),软化作用则比较明显,这种软化主要是由于一部分位错消失和显微组织的演变造成的. 贝氏体和马氏体的复相组织是一种非平衡组织,在回火过程中必然有着向平衡组织转变的趋势,这种转变是以回复、再结晶方式进行的,即以位错的消失、复合和重组等过程为前提^[4-5]. 消失的部分位错是

在贝氏体相变时由于体积效应产生的相变位错, 该类位错比较平直, 没有被钉扎, 在回火过程中容易消失; 组织演变主要是在高温回火过程中, 贝氏体向更加稳定的多边形铁素体转变, 即发生了一定程度的回复作用。因此, 这种软化作用使得伸长率升高较明显, 由回火前的 16% 增加到 700 °C 回火时的 20%, 同时也使抗拉强度降至最低。另外, 随着回火温度的升高, 部分析出粒子出现一定程度的粗化, 因此屈服强度会有所下降; 但与回火前相比, 屈服强度不降反升的原因主要是这种软化并不能抵消因析出而产生的强化作用。

4 结论

(1) 基于 CSP 流程生产 Fe-Mn-Nb-B 系低碳贝氏体高强度钢, 轧后快冷后, 可得到含有较高含量粗大 M/A 岛的粒状贝氏体组织; 屈服强度和抗拉强度分别达到 630 MPa 和 825 MPa。

(2) 回火对钢的屈服强度和抗拉强度影响均较大。回火后屈服强度有不同程度的提高, 而抗拉强度则有不同程度的下降。回火温度较低时, 伸长率虽有所提高但幅度不大, 随着回火温度的升高, 伸长率增加较为明显。回火温度在 650~700 °C 时可获得较为优良的综合性能。

(3) 回火后组织中 M/A 岛状组织发生了分解, 且随着回火温度的提高, M/A 岛状组织分解更彻底; 回火前, 析出粒子主要是尺寸为 20~50 nm 的复合析出物 (Ti, Nb)(C, N); 回火后, 除原有析出粒子外, 还出现了大量的尺寸在 20 nm 以下的以 Nb 析出为主的复合析出粒子 (Nb, Ti)(C, N)。

(4) 大块 M/A 组织的分解是抗拉强度下降的

主要原因, 而大量 20 nm 以下的 (Nb, Ti)(C, N) 析出粒子是屈服强度上升的主要原因。较高回火温度下伸长率升高明显是由部分位错的消失和部分贝氏体组织的多边形回复所引起的软化造成的。

参 考 文 献

- [1] Rodrigus P C M, Pereloma E V, Santos D B. Mechanical properties of HALA bainitic steel subjected to controlled rolling with accelerated cooling. *Mater Sci Eng A*, 2000, 283: 136
- [2] Li H L, Guo S W, Feng Y R, et al. *Microscopic Structure and Identification Atlas of High Strength Microalloyed Pipeline Steel*. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001: 8
(李鹤林, 郭生武, 冯耀荣, 等. 高强度微合金管线钢显微组织分析与鉴别图谱. 北京: 石油工业出版社, 2001: 8)
- [3] Krauss G, Thomposon T W. Ferritic microstructure in continuously cooled low and ultralow carbon steels. *ISIJ Int*, 1995, 35: 937
- [4] Shibata K, Asakura K. Transformation behavior and microstructure in ultra-low carbon steels. *ISIJ Int*, 1995, 35: 982
- [5] Fujiwara K, Okaguchi S, Ohtani H. Effect of hot deformation on bainite structure in low carbon steels. *ISIJ Int*, 1995, 35: 1006
- [6] Kang Y L, Chen Q J, Wang K L, et al. Study on heat treatment process of the 700 MPa grade low carbon bainitic steel. *Trans Mater Heat Treat*, 2005, 26(3): 96
(康永林, 陈庆军, 王克鲁, 等. 700 MPa 级低碳贝氏体钢的热处理工艺研究. 材料热处理学报, 2005, 26(3): 96)
- [7] Yang S W, Shang C J, He X L. Stability of ultrafine microstructures during tempering. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2001, 8(3): 119
- [8] Wu H B, Yang S W, Tang D, et al. Thermo-stability of ultrafine microstructures in low carbon microalloyed steel. *Heat Treat Met*, 2007, 32(9): 41
(武会宾, 杨善武, 唐荻, 等. 低碳微合金钢中超细组织的热稳定性研究. 金属热处理, 2007, 32(9): 41)