

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20170358

Q620D 钢板连续冷却相变行为和回火工艺

李成良, 黄远坚, 温志红

(宝钢集团广东韶关钢铁有限公司, 广东 韶关 512123)

摘要:以 Q620D 高强度钢板为研究对象,利用热模拟试验机研究了 Q620D 钢板连续冷却相变规律,同时对对比分析了不同回火工艺对钢板组织和性能的影响,确定了 Q620D 钢板最佳的轧制和热处理工艺。结果表明,采用控制轧制+超快冷快速冷却+回火工艺生产 Q620D 钢板时,钢板轧制后冷却速率不低于 20 °C/s,回火温度控制在 550~600 °C,钢板的强度和韧性匹配最佳。回火过程中位错的回复和消失、M/A 岛状组织的分解、马氏体组织的转变和铌、钒等微合金元素的析出强化等共同影响 Q620D 钢板回火后的强度和低温冲击韧性。

关键词:连续冷却相变;回火工艺;组织;力学性能

文献标志码:A **文章编号:**0449-749X(2018)04-0078-05

Continuous cooling transformation behavior and tempering process of Q620D steel plate

LI Cheng-liang, HUANG Yuan-jian, WEN Zhi-hong

(Baosteel Group Guangdong Shaoguan Iron and Steel Co., Ltd., Shaoguan 512123, Guangdong, China)

Abstract: In order to determine the best rolling and heat treatment processes, its phase transition laws in continuous cooling is studied by adopting a thermal simulation test machine, and the effect of different tempering processes on the organization and properties is also compared and analyzed. The results show that when the steel Q620D is made by adopting the process of controlled rolling + ultra fast cooling + tempering, the cooling speed is equal or greanter than 20 °C/s after rolling, the tempering temperature is controlled within 550-600 °C, then the mating of the strength and ductility is the best. The recovery and disappearance of dislocations, decomposition of M/A island structure, transition of Martensite structure, and separation of microalloying elements such as Nb and V commonly effect the strength after tempering and impact ductility at low temperature.

Key words: continuous cooling transformation; tempering process; microstructure; mechanical property

随着中国机械制造业的迅速发展和行业技术的推动,工程机械逐步向大型化、轻量化方向发展。从工程机械设计安全性方面考虑,要求使用钢板具有高强度、高韧性、优异的低温冲击性能和焊接性能^[1-5]。高强度钢板传统的生产工艺均采用调质处理,通过离线淬火+回火热处理工艺改善钢板强度和低温冲击韧性^[6-8]。近年来,国内高强度钢板在生产技术、工艺装备、质量、品种等方面迅速发展,采用低合金成分设计和控制轧制+超快冷快速冷却+回火工艺生产高强度钢板已成为主要手段。主要通过回火工艺的调整,使钢板性能达到最佳强韧性匹配。本文以 Q620D 高强度钢板为研究对象,通过研究 Q620D 钢板连续冷却相变规律、不同回火工艺对 Q620D 钢板组织和性能的影响,从而确定最

佳的生产工艺和热处理工艺。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验用材料为工业生产的 Q620D 低合金高强度结构钢板,生产工艺流程为:铁水脱硫预处理→转炉冶炼→LF 炉精炼→RH 炉精炼→板坯连铸→坯料加热→高压水除鳞→轧制→超快冷冷却→矫直→回火→精整→入库。

化学成分采用低碳成分设计,添加铌、钒、钛等微合金元素。钢板碳当量不大于 0.48%,焊接热裂纹敏感系数不大于 0.25%,冶炼过程严格控制钢中磷、硫质量分数和非金属夹杂物,试验钢化学成分见表 1。

表 1 试验钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of the experimental steel							%
C	Si	Mn	P	S	Cr	Nb+V+Ti	B
0.06~0.09	0.20~0.35	1.45~1.60	≤0.015	≤0.005	≤0.30	≤0.12	≤0.002

钢板采用两阶段控制轧制,轧制后利用超快冷快速冷却,控制钢板终冷温度不大于 450 °C。试验钢厚度为 30 mm,热轧态性能见表 2。

表 2 钢板热轧态性能

Table 2 Mechanical properties of hot rolled plate						
$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A/\%$	$R_{p0.2}/R_m$	$KV_2(-20\text{ °C})/\text{J}$		
668	904	15.5	0.74	45	50	47

1. 2 试验方法

从热轧态钢板中部取样,加工成 $\phi 6\text{ mm} \times 81\text{ mm}$ 静态 CCT 用试样,利用 Gleeble3800 试验机研究试验钢过冷奥氏体连续冷却转变行为。试验工艺如图 1 所示,将试样以 10 °C/s 的速度加热至 1 200 °C,保温 5 min,使其充分奥氏体化;再以 5 °C/s 速度冷却至 900 °C,保温 1 min,保证试样温度均匀性,然后分别以 1、2、5、10、15、20、30、40 °C/s 的冷速冷却至室温。从热模拟试样中部切取金相试样,经研磨抛光后,采用 4% 硝酸酒精溶液浸蚀,在 Axiovert 40 MAT 光学显微镜下观察不同冷却速率下显微组织的变化。

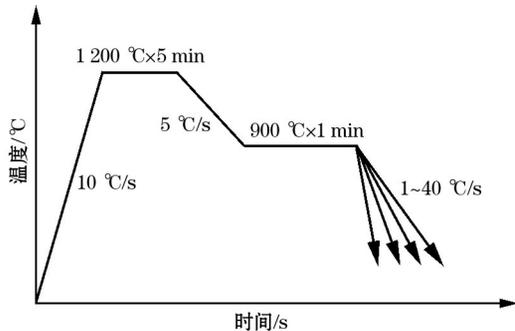


图 1 试验钢热模拟试验工艺

Fig. 1 Thermal simulating process of experimental steel

从热轧态钢板中部切取回火试样,进行系列回火试验。回火温度分别为 400、450、500、550、600 °C,回火时间为 $t \times 3\text{ min/mm} + 30\text{ min}$,其中 t 为钢板厚度,mm。回火后的试样按 GB/T 2975—1998 截取拉伸试样和冲击试样,使用液压式万能试验机(WE-2000)按 GB/T 228.1—2010 标准测试室温

拉伸性能,使用摆锤冲击试验机(RKP450)按照 GB/T 229—2007 标准测量不同温度下冲击吸收能量(KV_2);在回火后的钢板上沿轧制方向(RD)截面金相试样,试样经研磨抛光后,用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀,在 Axiovert 40 MAT 光学显微镜下观察其显微组织变化。

2 试验结果及分析

2. 1 连续冷却相变曲线

试验钢静态 CCT 曲线如图 2 所示,图中 F 代表铁素体,P 代表珠光体,B 代表贝氏体,M 代表马氏体,A 代表残余奥氏体。

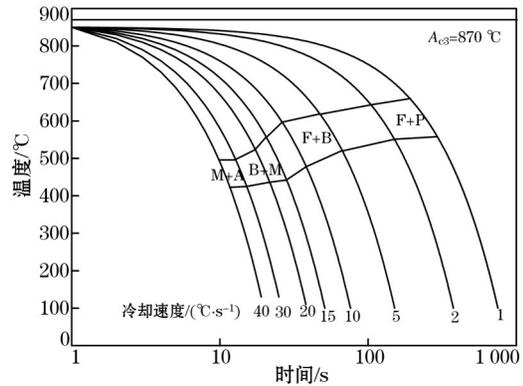


图 2 试验钢静态 CCT 曲线

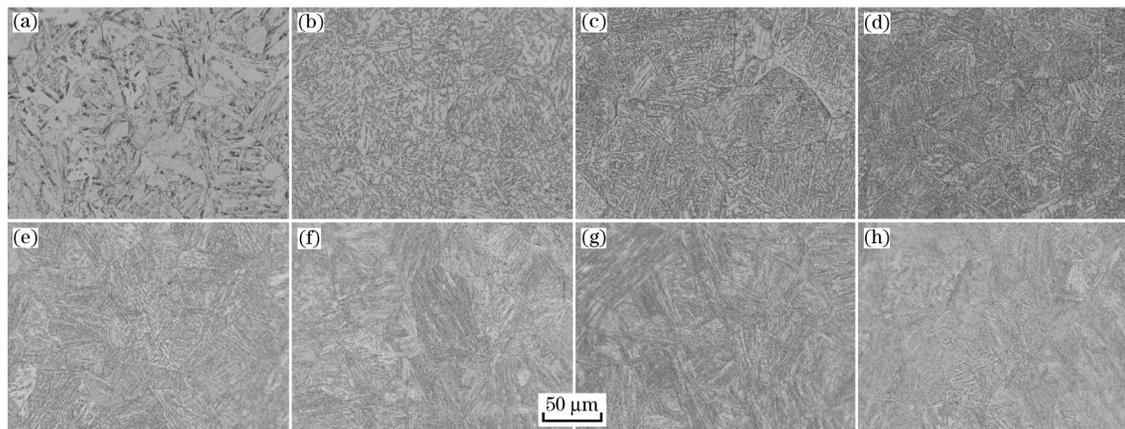
Fig. 2 Static CCT curve of experimental steel

从图中可以看出,试验钢完全奥氏体化温度为 870 °C;当冷却速率为 1~30 °C/s 时,奥氏体开始相变温度随着冷却速率的增大逐渐降低,冷却速率为 1 °C/s 时奥氏体开始相变温度为 660 °C;冷却速率为 10 °C/s 时奥氏体开始相变温度为 597 °C;冷却速率为 30 °C/s 时奥氏体开始相变温度为 496 °C;当冷却速率不小于 30 °C/s 时,奥氏体开始相变温度基本保持不变,相变开始温度为 496 °C。

试验钢不同冷却速率下奥氏体相变组织照片如图 3 所示。从图中可以看出,随着冷却速率的增加,相变组织由铁素体+珠光体向贝氏体、马氏体转变。当冷却速率为 1~2 °C/s 时,相变组织为多边形铁素体+少量珠光体;当冷却速率为 2~15 °C/s 时,相变组织为铁素体+贝氏体,随着冷却速率的增

大,铁素体由多边形铁素体向针状铁素体转变,且铁素体体积分数越来越少,贝氏体量逐渐增加;当冷却速率为 $20\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时,相变组织为贝氏体+马

氏体,且存在少量的岛状组织,其体积分数随冷却速率的增加而增加;当冷却速率大于 $30\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时,相变组织为马氏体+少量残余奥氏体。



(a) $1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$; (b) $2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$; (c) $5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$; (d) $10\text{ }^{\circ}\text{C/s}$; (e) $15\text{ }^{\circ}\text{C/s}$; (f) $20\text{ }^{\circ}\text{C/s}$; (g) $30\text{ }^{\circ}\text{C/s}$; (h) $40\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 。

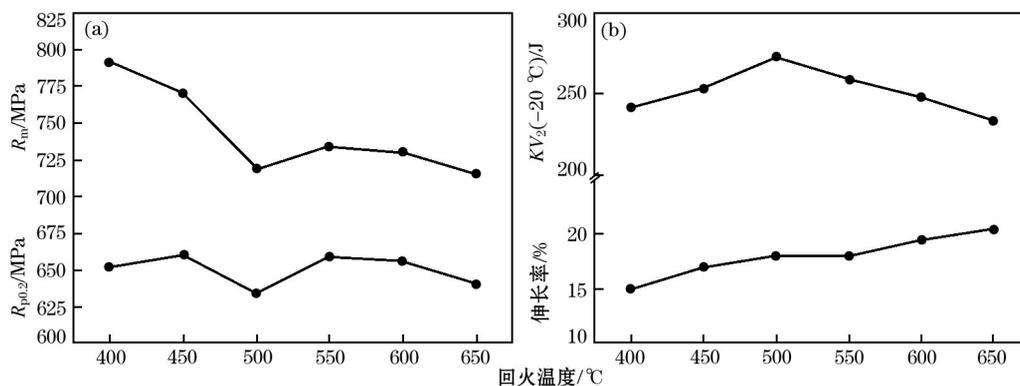
图3 未形变奥氏体在不同冷却速率下的显微组织

Fig. 3 Microstructures of unstrained austenite at different cooling rates

2.2 回火态钢板组织和性能

不同回火温度下钢板的力学性能如图4所示。从图中可以看出,在 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下回火时,试验钢抗拉强度急剧下降,比热轧态钢板降低了 134 MPa ,屈服强度基本保持不变,伸长率逐渐增加,低温冲击性能得到明显的改善, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击吸收功均大于 200 J ;在 $450\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回火时,抗拉强度和屈服强度均随回火温度的升高而降低,低温冲击吸收功和伸长率单

调上升;当回火温度大于 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,钢板的抗拉强度和屈服强度变化趋势基本一致,随着回火温度的升高呈先上升后缓慢下降的趋势,伸长率逐渐增加,冲击吸收功则随着回火温度的升高逐渐下降。同时从图中可以看出,当回火温度为 $550\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,钢板的强度和韧性匹配最佳,屈服强度为 $655\sim 659\text{ MPa}$,抗拉强度为 $730\sim 734\text{ MPa}$,伸长率为 $18\%\sim 19.5\%$, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击吸收功为 $247\sim 258\text{ J}$ 。



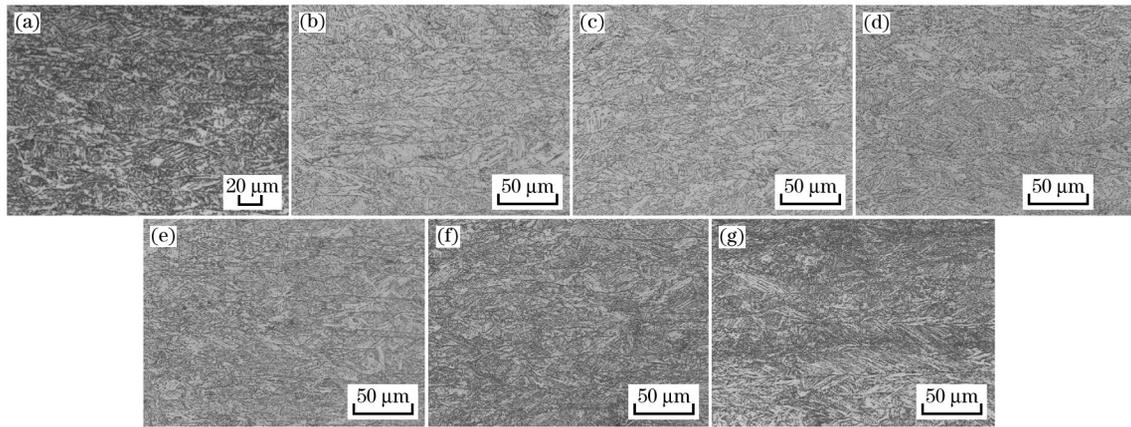
(a) 抗拉强度和屈服强度; (b) 伸长率和冲击功。

图4 回火温度对试验钢性能的影响

Fig. 4 Effect of tempering temperature on mechanical properties of experimental steel

试验钢热轧态显微组织和不同回火温度回火后的显微组织照片如图5所示。试验钢热轧态组织由贝氏体、马氏体和少量的岛状组织组成,且岛状组织体积分数较高,贝氏体和马氏体具有明显的方向性,如图5(a)所示。根据相关文献介绍,该岛状组织由M/A两相组成。在贝氏体相变过程中,碳原子不断地向奥氏体中扩散,使得剩余奥氏体内逐渐

富碳,但富集程度尚不能达到能析出碳化物的水平,因此形成富碳的奥氏体岛,在快速冷却过程中一部分将转变成马氏体,形成M/A岛状组织^[9]。试验钢轧制后利用超快冷快速冷却,终冷温度低于马氏体相变开始温度,其次试验钢中含有一定的硼,增加了钢的淬透性,以上两种因素共同促进了M/A岛状组织的形成。



(a) 热轧态组织; (b) 400 °C; (c) 450 °C; (d) 500 °C; (e) 550 °C; (f) 600 °C; (g) 650 °C。

图 5 不同回火温度下钢板的显微组织

Fig. 5 Microstructure of experimental steel at different tempering temperatures

随着回火温度的升高, M/A 岛状组织开始逐渐分解, 形成粒状贝氏体。如图 5(b) 和 (c) 所示。当回火温度为 450 °C 时, M/A 岛状组织分解基本完成, 马氏体板条束开始转变为板条状铁素体和颗粒状渗碳体。回火温度升高至 500 °C 时, 大部分马氏体分解完成, 形成准多边形铁素体 + 粒状贝氏体组织, 细小的碳化物颗粒均匀弥散分布, 如图 5(d) 所示。随着回火温度的进一步升高时, 马氏体继续分解, 粒状碳化物开始聚集长大, 板条状铁素体发生回复再结晶, 板条束逐渐合并, 准多边形铁素体体积分数逐渐增加, 如图 5(e)~(g) 所示。

2.3 分析讨论

试验钢回火过程中拉伸性能的变化是位错的回复和消失^[10]、钢中碳氮化物的析出、显微组织转变等共同作用的结果。通常认为含有铌、钒、钛等微合金元素的钢板控制轧制后组织中存在两类位错。第一类是在奥氏体区轧制变形过程中形成的大量形变位错, 在高温轧制阶段, 由于形变诱导作用促进铌、钛等强碳化物形成元素析出, 位错被析出的细小析出物钉扎, 在相变过程中被继承下来; 另一种位错是相变时由于体积效应产生的相变位错, 此类位错比较平直, 没有析出物钉扎, 在回火过程中容易消失^[11-12]。试验钢在 450 °C 以下回火时, 由于位错的回复和消失, 导致强度降低, 同时 M/A 岛状组织的分解也使抗拉强度不断降低^[13]。其屈服强度变化不大与 M/A 岛状组织的分解析出细小弥散的碳化物起到了析出强化作用有关。当回火温度为 500 °C 时, 屈服强度和抗拉强度同时下降与组织中马氏体组织的转变有关, 马氏体在高温下转变为铁素体和粒状碳化物。随着回火温度的升高, 微合

金元素的沉淀强化作用和再结晶软化作用共同使钢的强度发生变化。铌、钒等强碳氮化物形成元素在回火过程中与碳、氮形成纳米级析出物, 起到析出强化作用^[14-16], 使钢板回火后的强度增加。而当回火温度较高时, 析出物不断聚集长大, 析出强化作用减弱, 不足以弥补组织软化造成的强度损失, 钢板的强度逐渐降低, 因此试验钢屈服强度和抗拉强度呈先增加后降低的趋势。M/A 岛状组织的分解和马氏体本身的分解均使显微组织中铁素体的体积分数增加, 因此试验钢的伸长率逐渐升高。

试验钢回火过程中低温冲击性能的变化主要与组织转变和析出物长大有关。在 500 °C 以下回火时, 虽然 M/A 岛状组织的分解降低试验钢的韧性, 但马氏体逐渐分解为铁素体和粒状碳化物, 形成的铁素体板条组织分割原奥氏体晶粒, 有效阻止裂纹扩展, 在很大程度上改善了试验钢的低温冲击韧性。当回火温度大于 500 °C 时, 粒状碳化物聚集长大, 铌、钒的碳氮化物析出, 这些颗粒状析出物作为塑性断裂微孔形核位置, 导致试验钢的低温冲击韧性下降。

3 结论

(1) 采用控制轧制 + 超快冷快速冷却 + 回火工艺生产 Q620D 钢板, 当轧后冷却速率不小于 20 °C/s, 回火温度在 550~600 °C 时, 钢板的强度和韧性匹配最佳。

(2) 在过冷奥氏体连续冷却相变过程中, 随着冷速的增加, 相变开始温度逐渐降低, 组织由铁素体 + 珠光体向贝氏体、马氏体转变; 当冷却速率大于 20 °C/s 时, 组织中存在岛状组织, 其体积分数随

着冷速的增加而增加。

(3) 随着回火温度的升高, 钢板抗拉强度、屈服强度和低温冲击韧性均呈非单调性变化, 伸长率呈单调上升。性能的变化与位错的回复和消失、M/A 岛状组织的分解、马氏体组织的转变和铌、钒等合金元素的析出等综合作用有关。

参考文献:

- [1] 唐郑磊, 张红伟, 杨东, 等. Q500D 低碳高强度钢板的研究开发[J]. 金属材料与冶金工程, 2011, 39(4): 3. (TANG Zheng-lei, ZHANG Hong-wei, YANG Dong, et al. The research and development of low-carbon high-strength steel plant Q550D [J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2011, 39(4): 3.)
- [2] 段东明, 詹胜利, 任池锦, 等. 590 MPa 级高强度中厚钢板的控轧控冷工艺研究[C]//全国轧钢生产技术会议. 赤峰: 中国金属学会, 2010: 115. (DUAN Dong-ming, ZHAN Sheng-li, REN Chi-jin, et al. Study on TMCP for the high strength medium and heavy plate with yield strength 590 MPa[C]//National Conference on Rolling Production Technology. Chifeng: The Chinese Society for Metals, 2010: 115.)
- [3] 王世森, 余宏伟, 熊玉彰, 等. 高强度工程机械用钢 Q550 的回火工艺[J]. 金属热处理, 2013, 38(4): 53. (WANG Shi-sen, YU Hong-wei, XIONG Yu-zhang, et al. Tempering process of high strength steel Q550 used for engineering machinery[J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38(4): 53.)
- [4] 宋小芳, 何安瑞, 邱增帅. 基于初始温差的高强钢板层冷过程前屈曲分析[J]. 钢铁, 2016, 51(5): 52. (SONG Xiao-fang, HE An-rui, QIU Zeng-shuai. Influence of initial temperature difference on high strength strip buckling in laminar cooling[J]. Iron and Steel, 2016, 51(5): 52.)
- [5] 丁丽娟, 史春丽, 尹红霞, 等. 退火工艺对低碳含镍 DP 钢组织及性能的影响[J]. 钢铁, 2017, 52(12): 75. (DING Li-juan, SHI Chun-li, YIN Hong-xia, et al. Influence of annealing treatment on microstructure and mechanical properties of low-carbon Ni-containing DP steel[J]. 钢铁, 2017, 52(12): 75.)
- [6] 孟德亮, 朱帅, 仲海峰, 等. 基于镀锌的 Q/P 工艺对钢组织与性能的影响[J]. 中国冶金, 2016, 26(2): 35. (MENG De-liang, ZHU Shuai, ZHONG Hai-feng, et al. Effect of galvanizing-based quenching and partitioning process on microstructure and properties of steel[J]. China Metallurgy, 2016, 26(2): 35.)
- [7] 阳开生. 热处理及 NbV N 微合金化对船板钢组织性能的影响[J]. 中国冶金, 2017, 27(10): 34. (YANG Kai-sheng. Effect of heat treatment process and NbV N microalloying on mechanical property and microstructure of grade ship plate steel[J]. China Metallurgy, 2017, 27(10): 34.)
- [8] 黄乐庆, 王彦锋, 狄国标, 等. 回火温度对 F/B 结构钢组织及性能的影响[J]. 钢铁, 2017, 52(9): 79. (HUANG Le-qing, WANG Yan-feng, DI Guo-biao, et al. Influence of tempering temperature on microstructure and mechanical properties of F/B structural steel[J]. Iron and Steel, 2017, 52(9): 79.)
- [9] 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[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001. (LI He-lin, GUO Sheng-wu, FENG Yao-rong, et al. Microstructure Analysis and Identification of High Strength Microalloy Pipeline Steel[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.)
- [10] 宋欣, 王根矾, 王志勇, 等. 不同工艺对低碳钢钢板力学性能及屈强比的影响[J]. 轧钢, 2016, 31(3): 9. (SONG Xin, WANG Gen-ji, WANG Zhi-yong, et al. Effect of different process on mechanical properties and yield ratio of low carbon steel plate[J]. Steel Rolling, 2016, 31(3): 9.)
- [11] 陆春洁, 赵文贵, 陈猛, 等. 回火对含钒高强度管线钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2014, 39(2): 34. (LU Chun-jie, ZHAO Wen-gui, CHEN Meng, et al. Effect of tempering microstructure and mechanical properties of a vanadium-bearing ultra-high strength steel for pipeline[J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39(2): 34.)
- [12] 鲍海燕, 余宏伟, 王成. 不同热处理工艺对在线淬火 Q690D 钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2014, 39(7): 96. (BAO Hai-yan, YU Hong-wei, WANG Cheng. Effect of different heat treatment process on microstructure and properties of on-line quenching Q690 steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39(7): 96.)
- [13] 陈林恒, 康永林, 黎先浩, 等. 回火温度对 600 MPa 级低碳贝氏体钢组织和力学性能的影响[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(8): 984. (CHEN Lin-heng, KANG Yong-lin, LI Xian-hao, et al. Effect of tempering temperature on the microstructure and mechanical properties of 600 MPa grade low carbon bainitic steel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(8): 984.)
- [14] 潘小强. 合金元素 Mo、V 对耐火钢组织及性能的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2007. (PAN Xiao-qiang. Effect of Mo and V on the Microstructure and Properties of Fire-resistant Steel[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.)
- [15] 王克鲁, 鲁世强, 陈庆军, 等. 回火温度对热轧低碳贝氏体钢显微组织和力学性能的影响[J]. 机械工程材料, 2009, 33(5): 9. (WANG Ke-lu, LU Shi-qiang, CHEN Qing-jun, et al. Effect of tempering temperature on microstructure and mechanical properties of as-rolled low carbon bainitic steel[J]. Material for Mechanical Engineering, 2009, 33(5): 9.)
- [16] 王世森, 余宏伟, 张云燕, 等. 直接淬火 800 MPa 低合金高强度钢板的开发[J]. 特殊钢, 2013, 34(4): 53. (WANG Shi-sen, YU Hong-wei, ZHANG Yun-yan, et al. Development of direct quenching 800 MPa high strength low alloy steel plate[J]. Special Steel, 2013, 34(4): 53.)