# 淬火+回火处理对 Q345B 铸坯组织与性能的影响

王 彪，陈士富，高 涵

（东北大学秦皇岛分校资源与材料学院，河北秦皇岛 066004）

**摘要**：观察并研究了 Q345B 钢在 900~1 060℃淬火+450℃回火的热处理工艺对钢性能的影响。热处理后，对钢样分别进行显微观察、拉伸性能测试、硬度测试和耐蚀性测试，分析钢性能的改变。结果表明，淬火处理显著增强了钢的强度和硬度，经过 450℃回火后，塑韧性也得到了一定的回升；淬火温度在 980~1 020℃时有较好的耐蚀性。综合考虑强度、硬度、塑韧性和加热温度，以及生产实际，对钢样进行 940℃淬火+450℃回火的热处理工艺，能使钢材获得优良的综合性能，具有很大的经济意义和现实意义。

**关键词**：金属材料；Q345B 钢；淬火+回火处理；组织与性能；最佳工艺

**中图分类号**：TG142.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1674-2850(2015)23-2448-06

# Effects of quenching and tempering process on microstructure and properties of Q345B casting

WANG Biao, CHEN Shifu, GAO Han

(*School of Resources and Materials, Northeastern University, Qinhuangdao Branch, Qinhuangdao, Hebei* 066004, *China*)

**Abstract:** This paper mainly discusses the effects of heat treatment process of Q345B steel at 900-1 060℃ quenching +450℃ tempering process on the performance of steel. After heat treatment, the steel samples of different treatments were taken to observation and test to get the statistical analysis of test results by changing heat treatment on the properties of the steel. Results show that the quenching process enhance the strength and hardness of the steel significantly. After tempering at 450℃, the plasticity and toughness of steel has also been picked up. The steel has good corrosion resistance when the quenching at 980-1 020℃. Considering the strength, hardness, plasticity and toughness, and the heating temperature, production practice, the heat treatment process of quenching at 940℃+450℃ tempering of steel samples, can make the steel obtain excellent comprehensive properties, which is of great economic significance and practical significance.

**Key words:** metallic materials; Q345B steel; quenching and tempering process; microstructure and properties; the optimum process

## 0 引言

近年来，国内低合金高强度钢产量逐年增长[1]，但在强度、质量、品种系列化等方面与国外先进水平还有一定差距，仍有相当多的高强韧性钢板需要进口[2~6]。国外许多研究者已用组织性能预测的方法较精确地预测计算低合金高强度钢的高温热变形行为[7~8]，并通过控制铁素体的形态实现钢的强化，其效果超过了 Peierls-Na-barro 强度及固溶强化[9~10]。日本在抗震建筑用钢方面代表了世界先进水平，已开发出

**基金项目**：河北省教育厅自然科学研究指导项目（Z2010217）

**作者简介**：王彪（1974—），男，讲师，主要研究方向：低合金高强度钢. E-mail: wangb204@163.com

强度为 590～1 275 MPa 系列高强度抗震钢筋[11]。Q345B 钢是我国产量最大、应用最广的低合金高强度钢，其凝固坯壳高温塑性低，在冷却强度大、冷却不均匀的情况下，容易产生晶间裂纹[12]，且国内外冶金工作者对连铸坯高温过程中铸坯性能和组织变化不甚明了[13]。而淬火和回火，可消除内部残余应力，稳定组织，可调整硬度、强度、塑韧性[14]。探究不同使用环境对 Q345B 钢的性能要求，探究淬火+回火处理工艺，充分挖掘 Q345B 钢的性能潜力，得到高级别力学性能和各种优异使用性能的材料，是新一代钢铁材料的发展趋势[15]，可大大提升材料价值。

## 1 试验材料与方法

试验用 Q345B 钢样成分为：C 0.16，Si 0.36，Mn 1.37，P 0.016，S 0.007，Nb 0.026，余量为 Fe[16]，临界点测定结果为 Ac1=770℃，Ac3=917℃，Ms=400℃[17]. 因此，将 5 个 150 mm×8 mm×7 mm，5 个 25 mm× 8 mm×7 mm 规格的钢样分别在 900，940，980，1 020，1 060℃进行保温，以水为淬火介质。将回火温度设定为 450℃，回火后，取 6 个 25 mm×8 mm×7 mm 钢样，进行磨、抛光、4%硝酸酒精溶液腐蚀处理后，通过 DMI5000M 型金相显微镜观察钢样显微组织。

用 6 个 150 mm×8 mm×7 mm 规格的钢样在 WDW3100 型微控电子万能试验机下进行拉伸实验；通过 6 个 25 mm×8 mm×7 mm 规格的钢样在洛氏硬度计下进行硬度测试，获取 Q345B 钢在力学性能方面的变化信息；用金相切割机切割 6 个 150 mm×8 mm×7 mm 规格的钢样，取 6 个大约 5 mm×8 mm×7 mm 规格的钢样制作工作电极，并配制质量分数为 3.5%的 NaCl 溶液（作为腐蚀溶液），用 CS150-LK2005A 型电化学测试系统进行电化学腐蚀实验，获取 Q345B 钢在耐蚀性能方面的变化信息；将 6 个拉伸试样断口、腐蚀表面保存完好的钢样底面磨好，用 SPURA 55 型扫描电子显微镜（scanning electronic microscopy，SEM）观察拉伸断口的形态，判断处理后钢的塑韧性。

## 2 结果与分析

### 2.1 Q345B 钢热处理后的拉伸试验分析

通过模拟拉伸试验得到试验力–位移数据，分别除以原截面积和试样标距（50 mm），作图得到应力–应变曲线。经处理后的钢样性能变化，如图 1～图 4 所示。

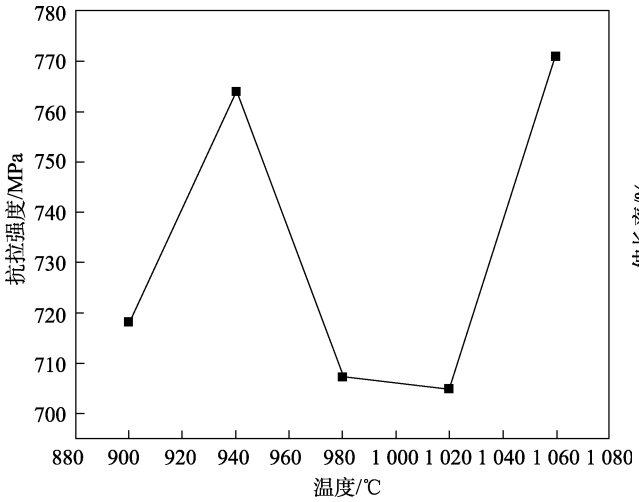



图 1 抗拉强度的变化

Fig. 1 Tensile strength change

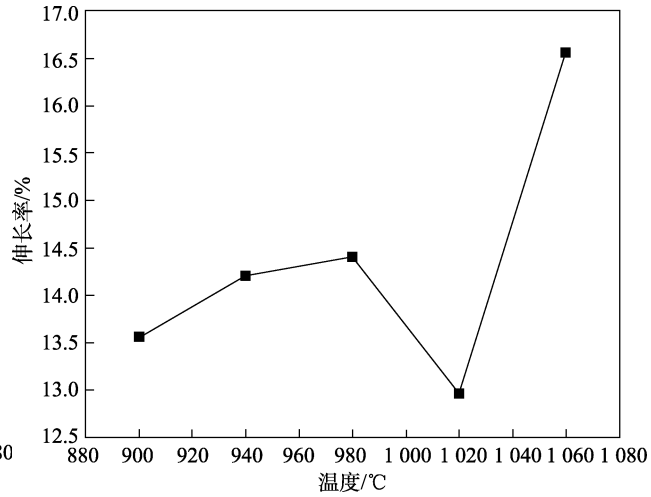



图 2 伸长率变化

Fig. 2 Extensibility change

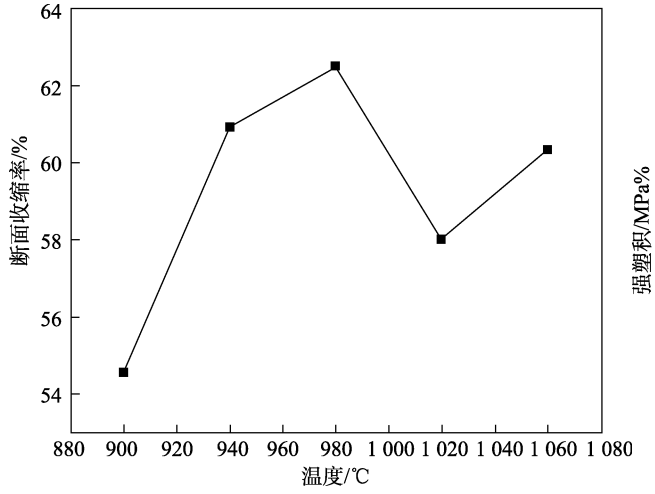



图 3 断面收缩率变化

Fig. 3 Section shrinkage change

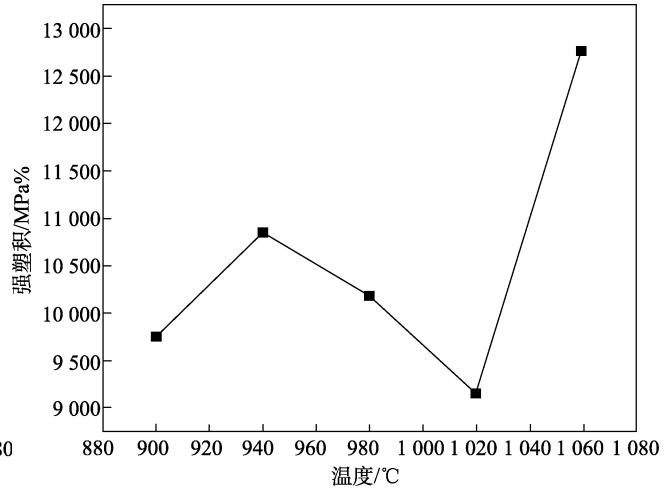



图 4 强塑积变化

Fig. 4 Product of tensile strength and elongation change

未处理钢样的力学性能：抗拉强度 516.54 MPa，断后伸长率 25.2%，断面收缩率 62.58%，强塑积 13 016.81 MPa%. 观察处理后钢样：1）强度方面：淬火处理能显著提高抗拉强度（σb）的值 40%～50%，其中淬火温度在在 940℃左右 σb 有一个峰值，1 050℃以上 σb 有上升趋势。2）塑性方面：淬火处理降低了塑性、断后伸长率和断面收缩率，其中断后伸长率下降 35%～50%，淬火温度在 980℃时断后伸长率和断面收缩率较高且 1 050℃以上有上升趋势。3）静态韧性方面：淬火处理降低了强塑积，淬火温度在 1 050℃以上强塑积有上升趋势。

考虑到钢的组织变化对力学性能的影响，可分析：淬火处理增加了钢的强度，降低了钢的塑性和静态韧性，主要是由于淬火组织中出现了高强度的马氏体和软韧相铁素体的减少，马氏体高强度的原因是多方面的，主要包括碳原子的固溶强化、相变强化及时效强化。同时，在淬火后的回火过程，马氏体中的碳原子脱溶析出、淬火马氏体分解、回火马氏体形成、渗碳体聚集长大等过程一定程度地降低了淬火钢的抗拉强度，使淬火钢的塑韧性得到了较好的提升，使钢能够兼备较好的强度和塑韧性，获得较高的综合性能和使用价值。

### 2.2 Q345B 钢热处理后的洛氏硬度试验分析

经处理，绘出钢样硬度变化图，如图 5 所示。

未处理钢样的平均硬度为 51.3 HRA，观察淬火钢样可知淬火处理增加了钢样的硬度，增长量大约在 10%左右，且硬度值基本随淬火温度的提高而降低。

考虑钢的组织变化对硬度的影响，可分析：淬火处理增加了钢的硬度，主要是由于淬火组织中高硬度马氏体的出现和软韧相铁素体的减少，而随淬火温度升高，原始奥氏体晶粒变大，淬火形成的马氏体板条群尺寸增大，钢的硬度略有降低。同时，在淬火后的回火过程中，马氏体中的碳原子脱溶析出、淬火马氏体分解、回火马氏体形成、渗碳体聚集长大等过程一定程度地降低了淬火钢的硬度，使钢能够兼备较好的硬度和塑韧性。

### 2.3 Q345B 钢热处理后的电化学动力学腐蚀试验分析

根据每一组工作电极第一次试验保存的试验数据得到塔菲尔曲线，如图 6 所示。耐蚀性大小顺序为：淬火 1 020℃＞淬火 980℃＞原样、淬火 900℃、淬火 940℃、淬火 1 060℃. 实际情况钢表面浸泡在质量

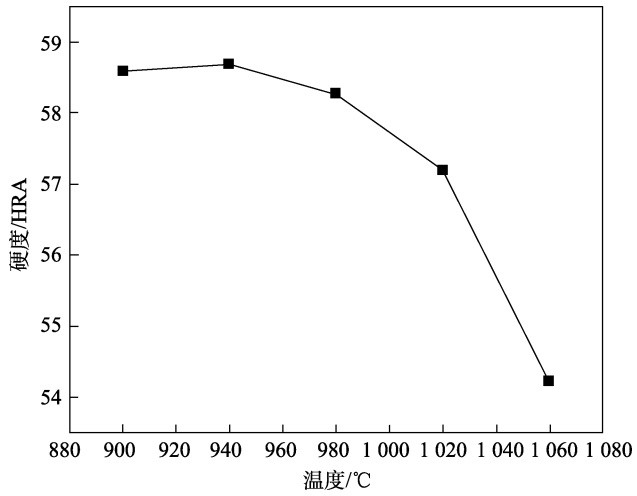



图 5 洛氏硬度

Fig. 5 Hardness

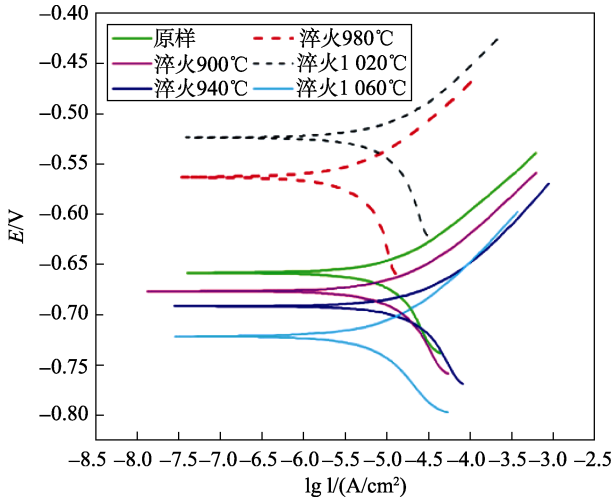


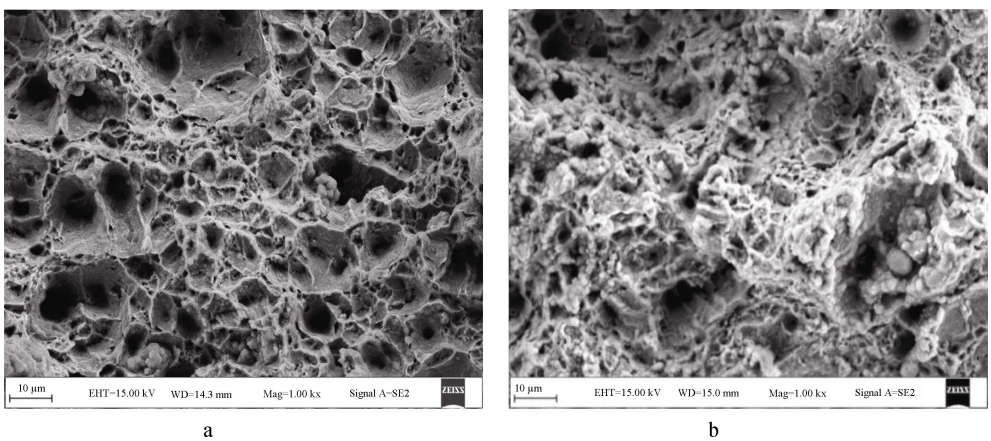

图 6 塔菲尔曲线

Fig. 6 Tafel curves

分数为 3.5%的 NaCl 溶液中，发生的腐蚀几乎是全面腐蚀（只有极少的点蚀）。综合考虑塔菲尔曲线之间的相对位置，可知淬火温度在 980～1 020℃时有较好的耐蚀性。

## 2.4 拉伸试样断口分析

处理后钢样的断裂是韧性断裂，且发生颈缩。用体视镜拍摄宏观断口，为纤维状断口，即塑韧性断口。SEM 图如图 7 所示。




a b

图 7 刚样断口形貌（×1 000）

Fig. 7 Fracture morphology (×1 000)

a—原样钢样断口形貌；b—900℃淬火+450℃回火的钢样断口形貌

a-Original steel sample; b-900℃quenching +450℃ tempering steel sample

用 SEM 观察可知，原样和处理后钢样的断口都存在一定数量的等轴韧窝，断裂均为穿晶方式，属于韧性断口。原样断口上，分布有较多空洞大韧窝，中心是大颗粒的 MnS 夹杂物[18]，或大韧窝由大颗粒 MnS 夹杂物剥落形成，还有细小的 MnS 夹杂物形成的众多小韧窝，成为了连接空洞大韧窝的“桥梁”，由 MnS 夹杂物形成的韧窝彼此串联，导致试样断裂。

夹杂物开裂的临界尺寸开裂方式和应变资料如表 1 所示[19]。

因为夹杂物的存在破坏了基体的连续性，使基体和夹杂物之间的应力传递方式不同。在外力作用下，夹杂物周围首先产生应力集中从而引起塑性变形，于是夹杂物周围产生大量位错塞积[20]。当位错塞积的应力值达到夹杂物的断裂强度或夹杂物和基体的界面强度时，夹杂物开裂或夹杂物与基体界面分离形成微裂纹。微裂纹不断扩展和相互连接最后造成断裂。由表 1 可知，当应变很小时，只有尺寸很大的夹杂物开始开裂，随应变的不断增大，尺寸较小的 MnS 夹杂物才开始开裂，同时大夹杂物内部的裂纹条数会增多并与界面渐渐脱开而形成空洞。

**表 1 夹杂物开裂的临界尺寸开裂方式和应变**

Tab. 1 Inclusion cracking way of critical crack size and strain

| 夹杂物 | 临界$\varepsilon$/% | 夹杂物开裂临界尺寸/(L/μm) | 夹杂物开裂方式 |
|---|---|---|---|
| MnS | 0.1 | 57.80 | 自身 |
| | 3.0 | 20.40 | 自身 |
| | 5.0 | 13.60 | 自身 |
| | 18.0 | 3.40 | 自身 |

淬火处理钢样的断口上，由于象征塑韧性的韧窝数量相对减少，韧窝密度不如原样断口大，从而使淬火组钢的塑韧性降低。同时淬火形成的板条马氏体中存在一定量的细微孪晶马氏体，任芝兰等[21]指出，板条马氏体中微细孪晶马氏体的存在是微细裂纹的产生和扩展根源，它使形变时有效滑移系的数量大大减少，增加形变阻力，进而导致应力集中，降低钢材的韧性，使钢的脆性增大。

## 3 结论

给出了 Q345B 钢在 900～1 060℃淬火+450℃回火的热处理工艺对钢性能的影响。结果表明：1）淬火+回火处理显著提高了钢的抗拉强度和硬度，其中淬火温度在 940℃左右 σb 有一个峰值，在 1 050℃以上 σb 有上升趋势，随淬火温度的升高，钢的硬度逐渐降低。2）淬火+回火处理降低了钢的塑性、断后伸长率和断面收缩率，但由于回火温度 450℃选择合适，回火后保持较高的塑韧性。3）淬火温度在 980～1 020℃时有较好的耐蚀性。4）综合考虑，淬火温度 940℃时，钢样在强度、硬度、塑韧性等方面均保持较高水平，且加热温度不是很高，符合环境、资源的要求。结合生产实际，940℃淬火+450℃回火的热处理工艺，能使钢材获得优良的综合性能，具有很大的经济意义和现实意义。

## [参考文献] (References)

[1] WENG Y Q, YANG C F, SHANG C J. The state of art and development trends of HSLA steels in China[J]. Journal of Iron and Steel Research (International), 2011(S1): 1-13.

[2] 徐平光，白秉哲，方鸿生. 高强度低合金中厚钢板的现状与发展[J]. 机械工料，2001，25（2）：4-8，25.
XU P G, BAI B Z, FANG H S. Current status and development of high strength low alloy steel plate[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2001, 25(2): 4-8, 25. (in Chinese)

[3] 高泽平. 低合金高强度钢的强化机理及生产工艺的探讨[J]. 湖南冶金，2001，1（1）：17-20.
GAO Z P. Approach to strengthening mechanism and production process of low-alloy-high strength steel[J]. Hunan Metallurgy, 2001, 1(1): 17-20. (in Chinese)

[4] DONG T, FU J Y. Prospect of Chinese steel industry and Nb-microalloyed steel in the 21th century[R]. Beijing: The Round Table Discussion of “Prospect for New Century Development of Nb-microalloyed Steel Science-Technology”, 1999.

[5] TABLE S N, MITAO S, ENDO S. Recent development in microscructural control technologies through the thermo-mechanical control process (TMCP) with JFE steel’s high-performance plates[J]. JFE Technical Report, 2008(11): 1.

[6] MABUCH H. Metallurgical features of steel plats with ultra fina grains in surface layers and their formation mechanism[J]. ISIJ International, 1999, 5: 479-483.

[7] HODGSON P D, GIBBS R K. A mathematical model to predict the mechanical properties of hot rolled C-Mn and microalloyed steels[J]. ISIJ International, 1992, 32(12): 1329-1334.

[8] PORIER J P. 晶体的高温塑性变形[M]. 关德林，译. 大连：大连理工大学出版社，1989.
PORIER J P. Crystals of high temperature plastic deformation[M]. Translated by GUAN D L. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1989. (in Chinese)

[9] GARCIA C, SUIKKANEN P P, DEARDO A J. Modern microalloyed steels[J]. Journal of Iron and Steel Research (International), 2011(S1): 14-21.

[10] GARCÍA MATEO C, CAPDEVILA C, CORNIDE J, et al. Influence of V(C,N) precipitates on microstructure and mechanical properties of continuous cooled C-Mn-V[J]. Journal of Iron and Steel Research (International), 2011(S1): 266-270.

[11] 杨才福. 高强度建筑钢筋的最新技术进展[C]//2009 年全国建筑钢筋生产、设计与应用技术交流研讨会. 北京：中国金属学会，2009:1-11.
YANG C F. Recent development of high strength rebars for building, iron and steel[C]//2009 national construction steel production, design and application of technical exchange seminar papers. Beijng: The Chinese Society for Metals, 2009: 1-11. (in Chinese)

[12] 王天义. 薄板坯连铸连轧工艺技术实践[M]. 北京：冶金工业出版社，2005.
WANG T Y. Technology practice of thin slab continuous casting and rolling[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005. (in Chinese)

[13] 陈登福，高兴健. Q235G 钢连铸坯的高温力学性能分析[J]. 过程工程学报，2009，9（1）：10-13.
CHEN D F, GAO X J. High temperature mechanical properties analysis of Q235G steel continuous casting billet[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2009, 9(1): 10-13. (in Chinese)

[14] 德希. Q390、Q345B 钢感应回火工艺及性能的研究[D]. 包头：内蒙古科技大学，2012.
DE X. Study on technology and property of Q390 and Q345B steels by induction tempering[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)

[15] 王国栋，刘相华，朱伏先，等. 新一代钢铁材料的研究开发现状和发展趋势[J]. 鞍钢技术，2005（4）：1.
WANG G D, LIU X H, ZHU F X, et al . Present situation of studying a new generation iron and steel material and its development tendency[J]. Angang Technology, 2005(4): 1. (in Chinese)

[16] 宿成. 低合金高强度钢 Q345B 高温力学性能研究[D]. 包头：内蒙古科技大学，2011.
SU C. The research on high temperature mechanical properties of micro-alloyed Q345B structural steel[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)

[17] 林武，张希旺，赵延阔，等. Q345 钢奥氏体连续冷却转变曲线(CCT 图)[J]. 材料科学与工艺，2009（2）：247-250.
LIN W, ZHANG X W, ZHAO Y K, et al. Continuous cooling transformation cyrve of undercooling austenite about Q345 steel[J]. Materials Science and Technology, 2009(2): 247-250. (in Chinese)

[18] 郑建平，黄贞益，姜辉，等. Q345B 钢轧后拉伸分层试样的显微组织研究[J]. 热处理，2009，24（1）：42-46.
ZHENG J P, HUANG Z Y, JIANG H, et al. Microstructure in lam inated tensile specimens of Q345B steel after rolling[J]. Heat Treatment, 2009, 24(1): 42-46. (in Chinese)

[19] 李静媛，章为夷，魏成富，等．钢中夹杂物与钢的性能及断裂[M]. 北京：冶金工业出版社，2012.
LI J Y, ZHANG W Y, WEI C F, et al. The inclusions in steel and steel properties and the fracture[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012. (in Chinese)

[20] 王智轶，乐可襄．Q345B 中厚板拉伸试验断口分层的原因分析[J]．宽厚板，2009，15（3）：11-14．
WANG Z Y, LE K X. Analysis on the cause of fracture lamination during tensile test of Q345B medium plate[J]. Wide and Heavy Plate, 2009, 15(3): 11-14. (in Chinese)

[21] 任芝兰，唐明华，胡双开，等. 淬火工艺对大口径石油套管组织与性能的影响[J].材料热处理学报，2012，33（12）：116-120.
REN Z L, TANG M H, HU S K, et al. Influence of quenching process on microstructure and properties of large diameter oil casing[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(12): 116-120. (in Chinese)