

工程机械用超高强钢的相变行为研究

郑东升¹, 范才河¹, 胡泽艺¹, 孙雅馨¹, 罗 登², 刘 丹², 张青学²

(1. 湖南工业大学材料与先进制造学院, 湖南 株洲 412007; 2. 湖南钢铁集团湘潭钢铁有限公司技术质量部, 湖南 湘潭 411101)

摘 要:借助 MMS-200 热模拟试验机研究了 Cr-Mo-Ni-B 系工程机械用超高强钢连续冷却条件下的相变行为, 通过热膨胀曲线、光学显微镜(OM)和扫描电镜(SEM)分析了冷却速度(0.5~40 °C/s)对其相变温度和微观组织的影响。结果表明, 随着冷却速度增大, 钢相变温度 B_s 、 B_f 、 M_s 、 M_f 均降低, 中低温相变加强。冷却速度在 2 °C/s 以下时, 发生珠光体相变和贝氏体相变; 冷却速度在 2~5 °C/s 时, 出现粒状贝氏体和板条马氏体的混合组织; 冷却速度在 5 °C/s 以上时, 粒状贝氏体消失, 微观组织为单一的板条马氏体。在中低温相变组织形成温度范围内, 冷却速度对 M-A 岛的形貌、尺寸、数量以及马氏体板条宽度有显著的影响。随着冷速的增大, M-A 岛的形貌由块状向颗粒状变化, 其尺寸减小, 数量增多; 马氏体板条的平均宽度减小。

关键词:工程机械用超高强钢; 相变行为; 冷却速度; 微观组织

中图分类号: TF76, TG142.4

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)06-0138-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.06.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Study on transformation behavior of ultra-high strength steel for construction machinery

Zheng Dongsheng¹, Fan Caihe¹, Hu Zeyi¹, Sun Yaxin¹, Luo Deng², Liu Dan², Zhang Qingxue²

(1. College of Materials and Advanced Manufacturing, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, Hunan, China; 2. Technology and Quality Department, Xiangtan Iron and Steel Co., Ltd., Hunan Iron and Steel Group, Xiangtan 411101, Hunan, China)

Abstract: Transformation behavior of Cr-Mo-Ni-B ultra-high strength steel for construction machinery under continuous cooling condition was studied by means of MMS-200 thermomechanical simulator. The effect of cooling rate (0.5~40 °C/s) on its transformation temperature and microstructure was analyzed by thermal dilatometry curves, optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM). The results show that transformation temperatures of B_s , B_f , M_s and M_f decrease and phase transformation at medium and low temperature is promoted with the increase of cooling rate. As the cooling rate is below 2 °C/s, pearlite and bainite transformations occur. Mixture microstructure of granular bainite and lath martensite is observed when cooling rate is in range of 2 °C/s and 5 °C/s. As the cooling rate is above 5 °C/s, granular bainite disappears and fully martensitic microstructure is obtained. In the formation temperature range of medium and low temperature transformation microstructure, the morphology, size and quantity of M/A islands as well as width of martensite lath are influenced significantly by cooling rate. With the increase of cooling rate, the morphology of M/A islands is modified from blocky

收稿日期: 2022-03-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(52271177); 湖南省科技创新领军人才项目(2021RC4036); 湖南工业大学大学生创新创业训练计划项目(2021-99)。

作者简介: 郑东升, 1982 年出生, 男, 山西应县人, 博士, 主要研究方向: 先进金属材料制备及其失效机理研究, E-mail: dongsheng210@163.com。

shape into granular shape, their size decreases and the volume amount increases. The average width of the martensite lath decreases as a result of increasing the cooling rate.

Key words: ultra-high strength steel for construction machinery, transformation behavior, cooling rate, microstructure

0 引言

随着工程机械向大型化、轻量化和重载荷方向发展,市场上对工程机械用钢的性能要求越来越高,越来越大的承重结构、输送系统及提升装置需要屈服强度在 900 MPa 以上的工程机械用超高强钢^[1-3]。从本世纪初开始,国内外研究了热机械工艺、热处理工艺对工程机械用超高强钢微观组织及力学性能的影响,并开发出屈服强度值从 900 MPa 到 1 300 MPa 的工程机械用超高强钢^[4-6]。由于工程机械用超高强钢具有优异的强度和韧性,可以有效减轻工程机械设备重量,提高工程机械工作效率,因此广泛应用于起重机和其他建筑机械领域^[7]。

工程机械用超高强钢一般采用马氏体组织,热轧后直接淬火或离线淬火的冷速确定显得尤为重要。在冷却过程中,微观组织出现铁素体、珠光体及贝氏体等时,其强度会有所降低。关于相变行为,Ali 等^[8]研究了冷速对高碳高合金工程机械用超高强钢微观组织的影响,Mandal、Bandyopadhyay 等^[9-10]研究了低碳高合金工程机械用超高强钢在连续冷却条件下的组织转变,Esterl 等^[11]研究了 Mn-Si-B 系、

Mn-Si-Nb-B 系和 Cr-Mo-Ni-Cu 系低碳低合金工程机械用超高强钢在不同冷速下的微观组织。和 Cr-Mo-Ni-Cu 系成分设计相比,Cr-Mo-Ni-B 系可以节约合金元素,并提高淬透性^[12-14],但复合添加 Cr、Mo、Ni、B 的低碳低合金工程机械用超高强钢的研究较少,并且 Cr-Mo-Ni-B 系低碳低合金工程机械用超高强钢在连续冷却条件下的组织特征及演变规律鲜有报道。为此,笔者以熔-铸-轧制备的 Cr-Mo-Ni-B 系试验钢为研究对象,利用 MMS-200 热模拟试验机测定了试验钢在一定奥氏体温度条件下的连续冷却转变曲线,系统研究了试验钢在连续冷却过程中的相变行为,分析了冷却速度对其相变温度及微观组织的影响,为工程机械用超高强钢离线淬火冷速的制定提供了依据。

1 试验方法

1.1 试验材料与设备

试验所用材料取自某厂,经转炉熔炼、浇铸后,在四辊可逆式轧机轧制成 10 mm 钢板,其主要化学成分如表 1 所示。轧板经锯床、车床和线切割后,加工成 $\varnothing 6\text{ mm}\times 9\text{ mm}$ 的圆柱形试样。

表 1 试验钢的主要化学成分
Table 1 Main chemical composition of the experimental steel

C	Si	Mn	P	S	Nb+V+Ti	Cr	Mo+Ni	B
0.18	0.24	0.8~1.0	0.006	<0.001 1	≤0.07	<0.45	≤1.9	0.001 9

试验在 MMS-200 热模拟试验机上进行。该试验机由加热系统、液压系统、控制与测量系统三个主要部分组成。试样加热由晶闸管控制的特殊变压器进行,冷却则由高压循环水控制,通过点焊在试样表面的热电偶反馈给计算机的温度信号来实现温度控制。试验时,采用高纯氮气作为保护气。在试样连续冷却过程中,通过自动记录仪将不同冷却速度下的膨胀量-温度曲线记录下来,根据切线法确定出相变产物的转变开始温度和结束温度。

1.2 试验方案

将圆柱形试样以 20 °C/s 的速度加热到 1 200 °C,保温 3 min 后以 10 °C/s 的冷却速度冷却到 850 °C,

保温 20 s 后以 0.5 ~ 40 °C/s 的速度冷却至室温,记录冷却过程中的热膨胀曲线。

试验结束后,试样在热电偶位置 1/4 直径处沿轴向切开。经研磨、抛光和 3% 硝酸酒精腐蚀后,在 Leica 光学显微镜和 JSM-6490 LV 扫描电镜上进行微观组织观察。

2 试验结果及分析

2.1 试验钢的连续冷却转变曲线

图 1 为试验钢的连续冷却转变(CCT)曲线。从 CCT 曲线可以看出,相变区域由珠光体区、贝氏体区和马氏体区组成。试验钢冷却速度在 1 °C/s 以

下时,发生珠光体相变,冷却速度在 $0.5 \sim 2 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 范围内时,发生贝氏体相变,冷却速度为 $2 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时,开始发生马氏体相变,冷却速度在 $5 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 以上时,发生单一的马氏体相变。同时,随着冷却速度的增大,各相变产物的转变温度也降低了。

图2为冷速对试验钢相变温度的影响。从图2可以看出,随着冷速的增大,贝氏体相变开始温度 B_s 、贝氏体相变结束温度 B_f 、马氏体相变开始温度 M_s 、马氏体相变结束温度 M_f 均降低。在 $0.5 \sim 2 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 冷速范围内,随着冷速的增大, B_s 、 B_f 的降幅较大。对于 M_s 、 M_f , 在 $5 \sim 10 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 范围内,随着冷速的增大,其降幅也较大,但在 $10 \sim 40 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 范围内的降幅较小。

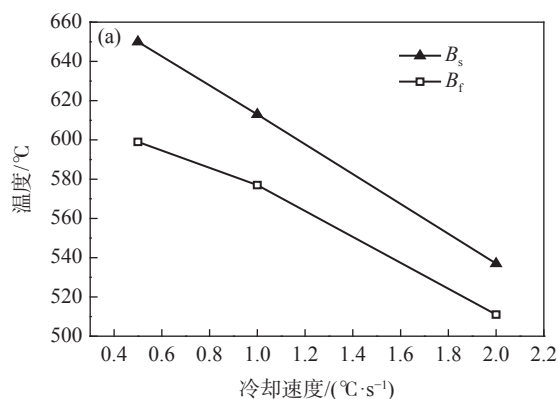


图2 冷却速度对试验钢相变温度的影响

Fig. 2 Effect of cooling rate on the transformation temperature of the experimental steel

2.2 试验钢的连续冷却转变组织

图3和图4为试验钢在不同冷却速度下的微观组织。由图3、4可以看出,冷速为 $0.5 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时,相变产物为珠光体和粒状贝氏体,粒状贝氏体占绝大部分, M-A 岛呈块状分布在粒状贝氏体基体上。冷速为 $1 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时,珠光体消失,微观组织为单一的粒状贝氏体, M-A 岛的形貌由块状向颗粒状变化,其尺寸减小,数量增多。冷速增大到 $2 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时,粒状贝氏体基体上的 M-A 岛尺寸进一步减小,同时组织中出现板条马氏体。冷速在 $5 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 以上时,微观组织均为板条马氏体,并且随着冷速的增大,马氏体板条的平均宽度减小。

微观组织表明,随着冷速增大,珠光体相变受到抑制,贝氏体及马氏体相变得到加强。这是因为珠光体的形成主要受碳扩散控制,冷速增大,过冷度增大,碳原子扩散困难。贝氏体相变兼有碳原子扩散和半切变特征,在中等冷速下易于进行。而冷速进一步增大时,铁及合金元素原子几乎不扩散,母相奥氏体以均匀切变方式转变为马氏体^[15]。

冷速为 $0.5 \sim 2 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时,均有粒状贝氏体相变发

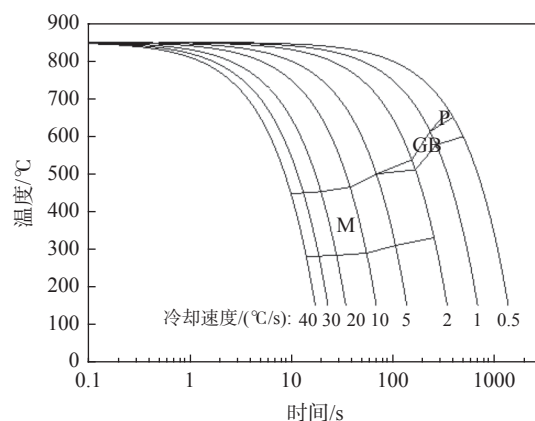
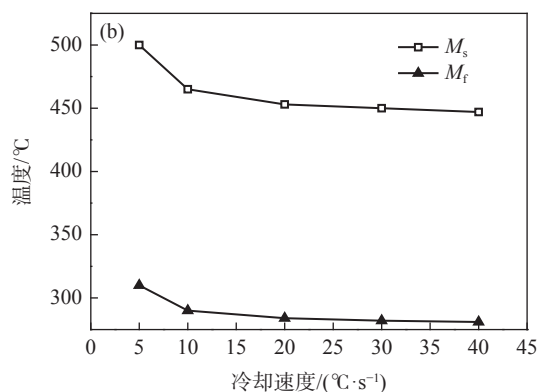


图1 试验钢的连续冷却转变曲线

Fig. 1 Continuous cooling transformation diagram of the experimental steel



生。随着粒状贝氏体铁素体相变的进行,残余奥氏体中的碳含量逐渐增加。从粒状贝氏体铁素体配分的碳稳定了残余奥氏体,当富碳奥氏体冷却到马氏体相变开始温度以下时,它将部分转变为马氏体,使最终的微观组织含有残余奥氏体和高碳马氏体。冷却速度很低时,有足够的时间进行奥氏体转变,很小的残余奥氏体颗粒会消失,留下更大尺寸的残余奥氏体。冷速增加时,贝氏体铁素体/奥氏体界面在相对较大的距离内移动更快,在高于马氏体相变开始温度时,产生更小尺寸的残余奥氏体颗粒^[16]。

冷速超过 $5 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时,马氏体板条的平均宽度随着冷速的增加而减小(如图4、5所示)。其原因在于马氏体在母相中是非均匀形核的,除了奥氏体晶界位置,奥氏体晶内的位错缺陷也可以作为马氏体的形核位置^[17]。在未变形奥氏体温度一定的前提下,冷速越大,相变前残留在母相奥氏体的位错数量越多,形成马氏体后,其板条宽度越小。这与 Ali、Dhua 等^[8,18] 在冷速对超高强钢马氏体组织影响方面的研究结果一致。

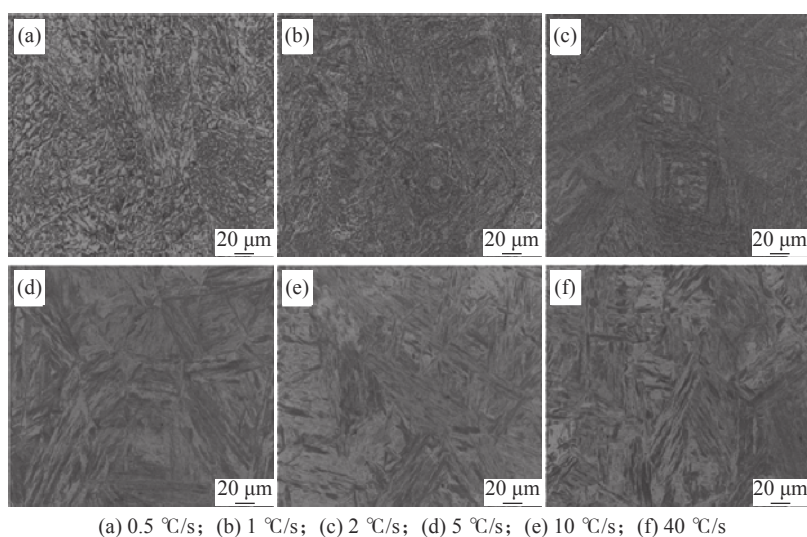


图3 试验钢在不同冷速下的光学显微照片

Fig. 3 Optical micrographs of the experimental steel obtained under various cooling rates

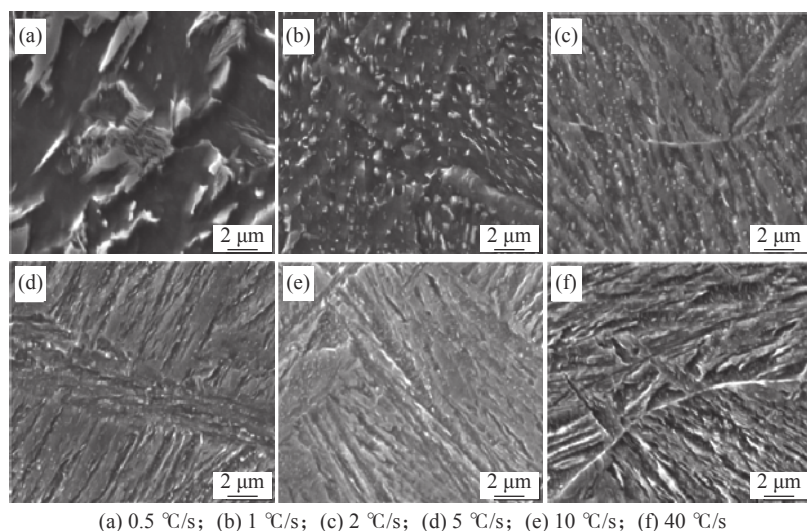


图4 试验钢在不同冷速下的 SEM 显微照片

Fig. 4 SEM micrographs of the experimental steel obtained under various cooling rates

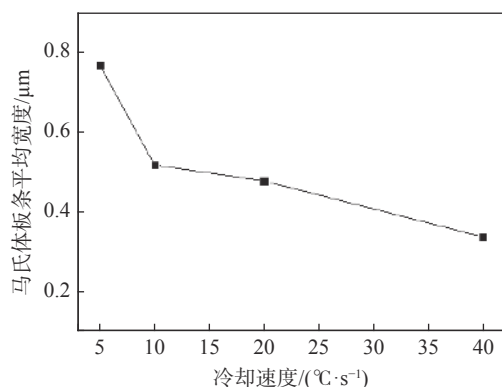


图5 冷却速度对马氏体板条平均宽度的影响

Fig. 5 Effect of cooling rate on the average width of martensite lath

不难看出, Cr-Mo-Ni-B 系低碳低合金工程机械用超高强钢在离线淬火时, 淬火冷速宜控制在 $40\text{ }^{\circ}\text{C/s}$

以上, 以获得单一的马氏体组织, 同时实现马氏体相变强化、位错强化, 提高其强度。但在实际生产中, 淬火冷速受淬火机冷却能力、水温及工程机械用超高强钢厚度限制。因此, 对于一定厚度的 Cr-Mo-Ni-B 系低碳低合金工程机械用超高强钢, 其离线淬火冷速要大于临界冷速, 且在淬火机冷却能力范围内。

3 结论

1) 随着冷速的增大, 试验钢的 B_s 、 B_f 、 M_s 、 M_f 相变温度均降低, 珠光体相变受到抑制, 贝氏体相变及马氏体相变得到加强。

2) 冷速在 $1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 以下时, 试验钢发生珠光体相变, 冷速为 $0.5\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时, 发生贝氏体相变, 在 $5\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 的冷速范围内, 发生单一的马氏体相变。

3) 在粒状贝氏体形成温度范围内,随着冷速的增大,M-A岛的形貌由块状向颗粒状变化,其尺寸减小,数量增多。在马氏体形成温度范围内,随着冷速的增大,马氏体板条的平均宽度减小。

4) 离线淬火冷速是Cr-Mo-Ni-B系低碳低合金工程机械用超高强钢离线热处理的重要参数,其数值不小于临界冷速,也不超过淬火机冷却能力。

参考文献

- [1] Akihide N, Takayuki I, Tadashi O. Development of YP 960 and 1100 MPa class ultra high strength steel plates with excellent toughness and high resistance to delayed fracture with excellent toughness and high resistance to delayed fracture for construction and industrial machinery[J]. JFE Technical Report, 2008, (11): 13-18.
- [2] Kah P, Pirinen M, Suoranta R, *et al.* Welding of ultra high strength steels[J]. Advanced Materials Research, 2014, 849: 357-365.
- [3] Salminen A, Farrokhi F, Unt A, *et al.* Effect of optical parameters on fiber laser welding of ultrahigh strength steels and weld mechanical properties at subzero temperatures[J]. Journal of Laser Applications, 2016, 28(2): 1-7.
- [4] Klein M, Rauch R, Spindler H, *et al.* Ultra high strength steels produced by thermomechanical hot rolling – advanced properties and applications[J]. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 2012, 157(3): 108-112.
- [5] Wen Changfei, Deng Xiangtao, Wang Zhaodong, *et al.* Influence of rolling and cooling process on microstructure and properties of ultra-high strength low alloy steel Q1300[J]. Steel Rolling, 2018, 35(5): 6-11.
(温长飞, 邓想涛, 王昭东, 等. 轧制冷却工艺对低合金超高强钢Q1300组织性能的影响[J]. 轧钢, 2018, 35(5): 6-11.)
- [6] Zheng Dongsheng, Liu Dan, Luo Deng, *et al.* Effect of tempering temperature on microstructure and mechanical properties of ultra-high strength steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41(12): 90-96.
(郑东升, 刘丹, 罗登, 等. 回火温度对超高强钢微观组织及力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(12): 90-96.)
- [7] Qiang X H, Jiang X, Bijlaard F S K, *et al.* Mechanical properties and design recommendations of very high strength steel S960 in fire[J]. Engineering Structures, 2016, 112: 60-70.
- [8] Ali M, Porter D, Kömi J, *et al.* Effect of cooling rate and composition on microstructure and mechanical properties of ultrahigh-strength steels[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2019, 26(12): 1350-1365.
- [9] Mandal G, Dey I, Mukherjee S, *et al.* Phase transformation and mechanical properties of ultrahigh strength steels under continuous cooling conditions[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 19: 628-642.
- [10] Bandyopadhyay P S, Ghosh S K, Kundu S, *et al.* Evolution of microstructure and mechanical properties of thermomechanically processed ultrahigh-strength steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42(9): 2742-2752.
- [11] Esterl R, Sonnleitner M, Schnitzer R. Influences of thermomechanical treatment and Nb micro-alloying on the hardenability of ultra-high strength steels[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, 50(7): 3238-3245.
- [12] Wang Huiling, Sun Dianqiang, Cheng Huimei, *et al.* Research on production technology of 900 MPa light gauge quenched and tempered high strength plate[J]. Wide and Heavy Plate, 2021, 27(3): 34-36.
(王会岭, 孙电强, 成慧梅, 等. 900 MPa级薄规格调质高强钢生产技术研究[J]. 宽厚板, 2021, 27(3): 34-36.)
- [13] Gao Zhiyu. Study on hot deformation behavior and microstructure evolution of HSLA steel for extra thick plate[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2016.
(高志玉. 特厚板用HSLA钢的热变形行为与组织演变研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2016.)
- [14] Zhang Shouqing, Hu Xiaofeng, Du Yubin, *et al.* Cross section effect of Ni-Cr-Mo-B ultra-heavy steel plate for offshore platform[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(9): 1227-1238.
(张守清, 胡小峰, 杜瑜宾, 等. 海洋平台用Ni-Cr-Mo-B超厚钢板的截面效应[J]. 金属学报, 2020, 56(9): 1227-1238.)
- [15] Wang Shunxing. Metal heat treatment principles and process (Second Edition)[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2009: 131.
(王顺兴. 金属热处理原理与工艺(第二版)[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2009: 131.)
- [16] Mousavi Anijdan S H, Yue S. The effect of cooling rate, and cool deformation through strain-induced transformation, on microstructural evolution and mechanical properties of microalloyed steels[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012, 43(4): 1140-1162.
- [17] Porter D A, Easterling K E, Sherif M Y. Phase transformations in metals and alloys (Third Edition)[M]. Boca Raton: CRC Press, 2009: 401-404.
- [18] Dhua S K, Mukerjee D, Sarma D S. Effect of cooling rate on the as-quenched microstructure and mechanical properties of HSLA-100 steel plates[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2003, 34(11): 2493-2504.