

终冷温度对 Ti 微合金化汽车大梁用钢组织和性能的影响

韩楚菲^{1,2}, 董毅^{1,2}, 时晓光^{1,2}, 孙成钱^{1,2}, 王俊雄^{1,2}, 徐海健^{1*}

(1. 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室, 辽宁 鞍山 114009; 2. 鞍钢集团钢铁研究院, 辽宁 鞍山 114009)

摘 要: 对成分为 0.11C-1.20Mn-0.055Ti 的 510L 汽车大梁钢进行热轧及层流冷却试验, 研究了不同终冷温度 (650、610 °C 和 570 °C) 对其组织和力学性能的影响。试验结果表明: 随着终冷温度的降低, 钢的强度显著降低, 伸长率增加; 组织中等轴状铁素体含量逐渐减少, 珠光体含量逐渐增加, 晶粒逐渐细化。透射分析结果表明, Ti 微合金化的 510L 汽车大梁钢组织中, 析出相为立方结构的 TiC 相, 终冷温度降低导致弥散细小 TiC 析出相的数量降低, 终冷温度对 Ti 微合金化汽车大梁钢强度的影响是细晶强化和析出强化共同作用的结果。在其它工艺参数不变的情况下, 为了保证钢板强韧性指标满足要求, 应将钢板的终冷温度保持在 650 °C。

关键词: 汽车大梁钢; 钛微合金化; 析出相; 强度; 组织

中图分类号: TF76, TG156.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)05-0173-04

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.05.023

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者
聊科研

Influence of final cooling temperature on the microstructure and mechanical properties of Ti microalloyed automobile beam steel

Han Chufei^{1,2}, Dong Yi^{1,2}, Shi Xiaoguang^{1,2}, Sun Chengqian^{1,2}, Wang Junxiong^{1,2}, Xu Haijian^{1*}

(1. State Key Laboratory of Metal Materials for Marine Equipment and Applications, Anshan 114009, Liaoning, China;
2. Iron and Steel Research Institute of Angang Group, Anshan 114009, Liaoning, China)

Abstract: In order to reveal the influence of final cooling temperature on microstructure and mechanical properties of Ti-microalloyed automobile 510L beam steel, the hot rolling and laminar cooling (LC) experiment was conducted on 0.11C-1.20Mn-0.055Ti beam steel. The experimental results showed that with the final cooling temperature decreasing, the strength of the steels decreased and the elongation increased. Moreover, the ratio of equiaxed ferrite in the steel decreased while the ratio of pearlite increased. And the average grain gradually refined. The TEM observation results showed that the precipitation of dispersed and fine particles was cubic structure TiC particles in the Ti-microalloyed automobile 510L beam steel. The number density of TiC particles decreased with decreasing the final cooling temperature. The effects of final cooling temperature on the strength of the 510L beam steel combine precipitation strengthening and fine grain strengthening.

Key words: automobile beam steel, Ti microalloy, precipitates, strength, microstructure

收稿日期: 2023-08-05

作者简介: 韩楚菲, 1991 年出生, 女, 硕士研究生, 工程师, 主要从事先进钢铁结构材料的研究, E-mail: chufeihan2021@163.com; * 通讯作者: 徐海健, 1987 年出生, 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事先进钢铁结构材料的研究; E-mail: haijianxu2013@163.com。

0 引言

随着世界经济的快速发展,工程机械、重卡车辆产量大幅度增加,被广泛应用于工程机械、重卡汽车等车架上的纵梁、横梁和保险杠的汽车大梁用高强度结构钢需求量也日趋增加^[1-5]。由于工程车辆在行驶及工作的过程中受到各种交变冲击和载荷,大梁作为车辆承受载荷的主要结构件,几乎承载着车辆的全部载荷,其质量的影响对车辆的服役周期和安全性具有重要意义^[6-7]。因此,汽车大梁用高强结构钢必须有良好的强韧性匹配。为提高车辆承载能力,延长其服役寿命,同时满足节能、节材等要求,以 510L 为代表的高强度结构钢板已成为目前汽车大梁钢发展的主流趋势^[8]。

目前国内外各钢厂多采用单一 Nb 微合金化或 Nb-Ti 复合微合金化的成分设计体系生产 510L 汽车大梁用高强度结构钢。然而,近年来 Nb 的价格越来越贵,且我国 Nb 资源短缺,几乎全部依赖进口,如果能找到其它微合金元素替代 Nb 来制造 510L 高强钢,将给钢铁及车辆制造企业带来显著的经济效益,同时也能有效缓解矿产危机,实现我国重要机械车辆保供^[9-10]。我国已探明 Ti 资源储量丰富,与 Nb 价格相比,成本优势明显,且 Ti 也是强碳氮化物形成元素,可以起到显著的析出强化作用,同时含有 Ti 的钢板也具有良好的可焊接性和易成型性。在不降低终轧温度和终冷温度条件下,采用以 Ti 代 Nb 的微合金钢可解决 Nb 微合金钢在控轧的过程中存在的混晶问题^[11]。因此,开发以 Ti 微合金化汽车大梁钢 510L 是一种降低制造成本、提高钢板综合性能的极佳选择,具有重要的理论和实际生产意义。

目前为止,有关采用单一 Ti 微合金化设计生产 510L 汽车大梁用高强度结构钢的组织及工艺研究鲜有报道,笔者以单一 Ti 微合金化汽车大梁钢 510L 为研究对象,进行热轧及层流冷却试验,研究终冷温度对组织演变规律及性能的影响,从而为实现单一 Ti 微合金化汽车大梁用高强度结构钢批量生产提供理论基础。

1 试验材料与方法

采用鞍钢生产的成分为 0.11C-1.20Mn-0.055Ti 连铸坯进行试验,510L 汽车大梁钢连铸坯生产工艺路径为:铁水预处理—转炉冶炼—LF+RH(精炼)—板坯连铸。为了确定不同终冷温度对 Ti 微合金化的 510 MPa 汽车大梁钢微观及力学性能的影响,在

相同工艺参数条件下进行不同终冷温度的工艺研究。其具体工艺参数如下:铸坯加热温度设定为 1 220 ℃,采用两阶段轧制工艺(二次开轧温度 960 ℃,终轧温度 850 ℃),中间坯空冷待温,轧后利用层流冷却进行冷却,冷却速度 30 ℃/s,钢板终冷温度分别为 650、610 ℃ 和 570 ℃,对不同终冷温度钢板进行取样并进行拉伸和微观组织检验及观察,拉伸试验标准按照 ASTM A370 标准进行,利用 4% 硝酸酒精溶液对不同终冷温度试样进行研磨、抛光和化学腐蚀,以观察其微观组织演变规律及力学性能变化。不同终冷温度下 510L 汽车大梁钢的组织形态、析出相结构及尺寸观察分别利用蔡司 Axio Vert.A1 型光学显微镜、日本电子 6 500F SEM 系统和日本电子 2 100F 透射电镜进行。

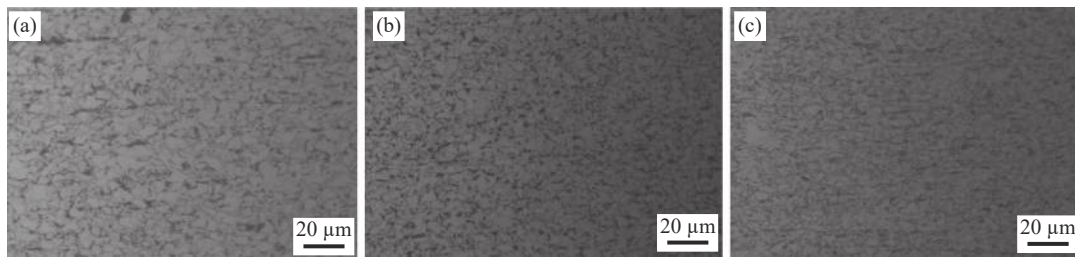
2 试验结果与分析

2.1 终冷温度对 510L 汽车大梁钢组织的影响

图 1 给出了 3 种不同终冷温度下 510L 汽车大梁钢组织形貌。由图 1 可知,3 种不同终轧温度下钛微合金化的汽车大梁钢板的组织都由珠光体(P)和铁素体(F)组成。随着终冷温度降低,珠光体的含量逐渐增加;终冷温度为 570 ℃ 时仍发现有部分铁素体晶粒未完全再结晶,呈针状、扁平状或边界无规则的多边形分布;终冷温度为 650 ℃ 和 610 ℃ 时,铁素体晶粒尺寸相对较大,在 10 ~ 20 μm 范围内,而珠光体的含量相对较少,铁素体晶粒主要呈等轴状分布,且铁素体和珠光体晶粒都发生长大的现象。由于钢板含有 Ti 微合金元素,Ti 元素会提高钢的再结晶温度,钢板的终轧温度为 850 ℃,在精轧阶段累积的压下率使奥氏体晶粒被伸长,同时晶粒内有大量的变形带;随着终冷温度降低,钢板在高温区停留的时间缩短,在原始奥氏体晶界和变形带上发生铁素体和珠光体快速形核,相变后得到的铁素体和珠光体晶粒没有足够时间充分长大,导致晶粒尺寸趋于细小。采用 Imagepro plus 图像分析软件对不同终冷温度下晶粒尺寸进行统计,钢板终冷温度分别为 650、610 ℃ 和 570 ℃ 时,其平均晶粒尺寸分别为 11.2、9.3 μm 和 7.8 μm。

2.2 终冷温度对 510L 汽车大梁钢析出相的影响

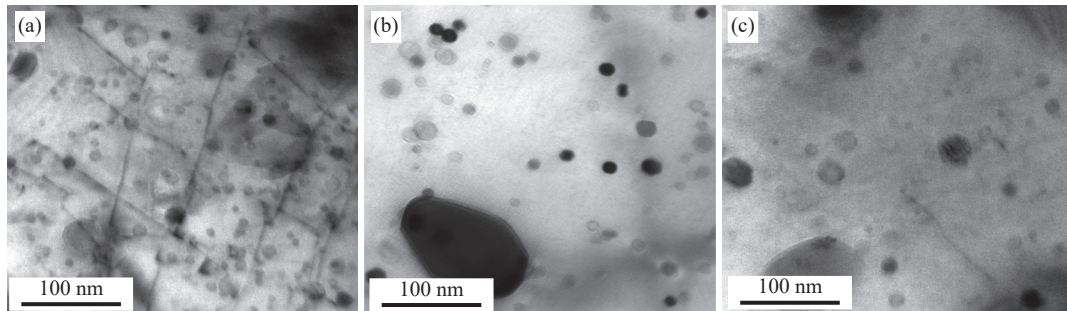
图 2 为不同终冷温度下(570、610 ℃ 和 650 ℃ 时)钛微合金化的汽车大梁钢板 510L 的析出相的 TEM 照片,由图 2 可知,在不同终冷温度下,钛微合金化的汽车大梁钢板 510L 中纳米析出相尺寸主要存在两类析出相:5 ~ 20 nm 的小尺寸析出相和 20 ~ 100 nm 的大尺寸析出相,大尺寸析出相和小尺寸析出相部分重叠,且随着终冷温度降低,纳米析出相的密度逐渐增加。



(a) 650 °C; (b) 610 °C; (c) 570 °C

图 1 不同终冷温度下 510L 汽车大梁钢组织形貌

Fig. 1 Microstructure of the automobile 510L beam steel at different coiling temperatures



(a) 650 °C; (b) 610 °C; (c) 570 °C

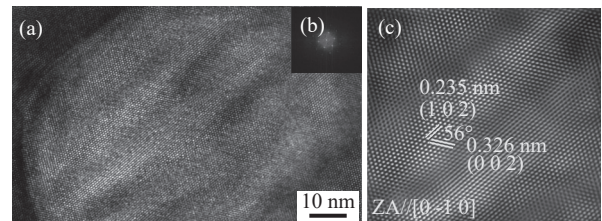
图 2 不同终冷温度下 510L 汽车大梁钢纳米析出相形貌

Fig. 2 Morphologies of precipitates of the automobile 510L beam steel at different cooling temperatures

利用 HRTEM(High Resolution Transmission Electron Microscope)对大尺寸和小尺寸析出相的晶体结构分别进行分析标定,结果如图 3、4 所示。图 3(a)为尺寸 60 nm 的椭圆形大尺寸析出相 HRTEM 形貌。图 3(b)为大尺寸析出相的傅里叶变换(FFT)。图 3(c)为大尺寸析出相经过傅里叶过滤的 HRTEM 晶格原子像,经过标定,其对应的原子面间距分别为 0.235 nm 和 0.326 nm,晶面夹角约 60°,析出相的晶带轴为 [0-10],经过标定,大尺寸析出相为六方结构的 MnS。图 4(a)为尺寸 13 nm 的小尺寸析出相 HRTEM 晶格相。图 4(b)为小尺寸析出相的 FFT,经过傅里叶过滤的 HRTEM 晶格像对应的原子面间距分别为 0.244 nm 和 0.212 nm,晶面夹角为 90°,析出相的晶带轴为 [01-1],经过标定,小尺寸析出相为立方结构的 TiC。从 HRTEM 分析结果可知,MnS 尺寸明显大于 TiC 相。

钛微合金化的汽车大梁钢板 510L 连铸坯在 1 220 °C 高温加热过程中,富 Ti 的氮化物发生高温回溶,在精轧阶段随着轧制变形量增加,造成钢板位错密度增加,产生应变诱导效应,在随后轧制及冷却过程中重新析出,通过 Thermal-Cal 热力学软件计算得出(图 5 所示),665 °C 为立方结构 TiC 析出的“鼻尖温度”,在终冷温度为 650 °C 时,钛微合金化的汽车大梁钢板 510L 在 TiC 析出“鼻尖温度”附近

停留的时间越长,TiC 相析出驱动力较大,析出的细小 TiC 相数量密度越高。终冷温度为 610 °C 时,TiC 析出相的数量介于两者温度之间。而随着钢板终冷温度的逐渐降低,TiC 析出相在冷却后的保温过程中析出驱动力减弱,导致细小 TiC 析出相数量密度减少。



(a) 高分辨晶格像; (b) 高分辨的傅里叶变换;

(c) FFT 过滤的高分辨晶格像

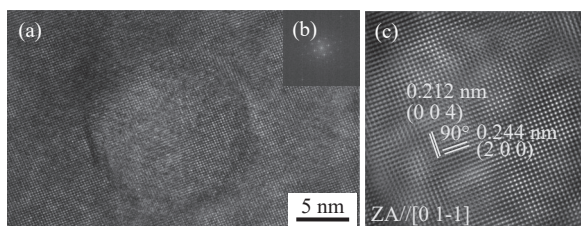
图 3 MnS 析出相的 TEM 分析

Fig. 3 TEM analysis of MnS precipitates

2.3 终冷温度对 510L 汽车大梁钢性能的影响

图 6 为钛微合金化汽车大梁钢板 510L 在不同终冷温度下(570、610 °C 和 650 °C)的力学性能的变化规律,随着终冷温度的降低,钢板屈服、抗拉强度显著降低。终冷温度 570 °C 时,相变强化和细晶强化所带来的影响作用更大,但屈服和抗拉强度反而最低,这可能是由于相变强化和细晶强化的共同作用并不能弥补其损失的析出强化作用效果。随着终冷温度降低,珠光体的含量逐渐增加,晶粒得到细

化,细晶强化提高了基体组织的强度,但由于终冷温度降幅较小,细晶强化效果弱于 TiC 析出强化引起的效果,从而导致终冷温度为 640 ℃ 时的强度高于 570 ℃ 的强度。但随着终冷温度降低,延伸率逐渐增加,这主要是由于终冷温度降低对晶粒细化粗化起到了抑制作用,造成裂纹扩展受到了强烈阻碍,从而改善材料韧性。因此在其它工艺参数不改变的情况下,为了保证钢板强韧性指标满足要求,应将钢板的终冷温度保持在 650 ℃。



(a) 高分辨晶格像; (b) 高分辨的傅里叶变换;
(c) FFT 过滤的高分辨晶格像

图 4 TiC 析出相的 TEM 分析

Fig. 4 TEM analysis of TiC precipitates

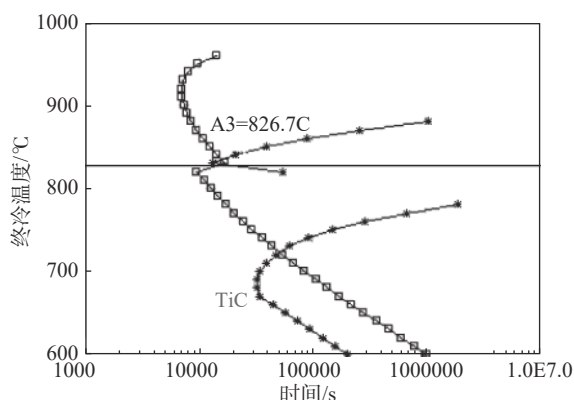
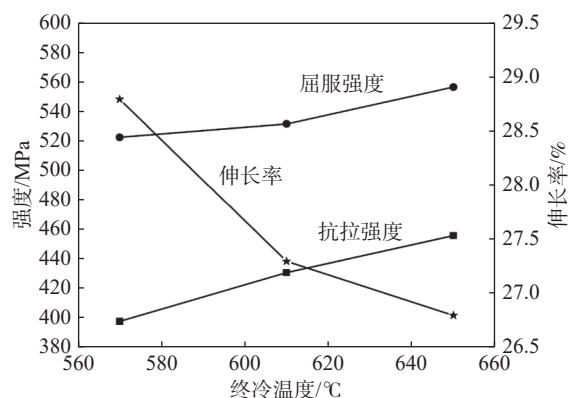


图 5 不同终冷温度下 510L 汽车大梁钢相图

Fig. 5 Phases diagram of automobile 510L beam steel at different cooling temperatures



(a) 650 ℃; (b) 610 ℃; (c) 570 ℃

图 6 不同终冷温度下 510L 汽车大梁钢力学性能

Fig. 6 Mechanical properties of the automobile 510L beam steel at different cooling temperatures

3 结论

1)不同终冷温度下钛微合金化汽车大梁钢板 510L 的组织都由铁素体和珠光体组成。终冷温度 570 ℃ 时仍发现有部分铁素体晶粒未完全再结晶,呈针状、扁平状或边界无规则的多边形分布。

2)钛微合金化的汽车大梁钢板 510L 中纳米析出相尺寸主要存在两类析出相: 5 ~ 20 nm 的小尺寸 TiC 析出相和 20 ~ 100 nm 的大尺寸 MnS 析出相,且随着终冷温度降低,纳米析出相的密度逐渐增加。

3)在相同的轧制工艺条件下,终冷温度降低,钢板屈服、抗拉强度显著降低,伸长率增加,终冷温度对大梁钢 510L 强度的影响是析出强化、细晶强化和相变强化共同作用产生的结果,因此在其它工艺参数不变的情况下,为了保证钢板强韧性指标满足要求,应将钢板的终冷温度保持在 650 ℃。

参考文献

- [1] Wu Gang, Shi Zhiyong. Research and development applications of product series for automobile frame plate in BX steel[J]. Bengang Technology, 2006(2): 15-19.
(吴刚, 史志勇. 本钢汽车大梁板系列产品开发与应用研究 [J]. 本钢技术, 2006(2): 15-19.)
- [2] Chen Qiyuan, Liu Zhenyu, Zhou Xiaoguang, *et al.* Current situation and development of hot-rolled automotive frame steel[J]. Steel Rolling, 2016, 33(2): 51-55.
(陈其源, 刘振宇, 周晓光, 等. 热轧汽车大梁钢生产现状及其发展趋势 [J]. 轧钢, 2016, 33(2): 51-55.)
- [3] Wang Xin, Kang Yonglin, Yu Hao, *et al.* Analysis on the microstructure and mechanical properties of low C-Mn 510L beam plate produced by FTSR technology[J]. Automobile Technology & Material, 2006(2): 6-8.
(王欣, 康永林, 于浩, 等. FTSR 工艺生产低 C-Mn 钢 510L 汽车大梁板的组织性能分析 [J]. 汽车工艺与材料, 2006(2): 6-8.)

(下转第 204 页)

- (王彦君, 郑炎官, 李波, 等. GB/T 4698《海绵钛、钛及钛合金化学分析方法》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.)
- [17] Liang Xinbang, Li Jiulin, Tao Liying, *et al.* GB/T 228-2002 Metallic materials-Tensile testing at ambient temperature[S]. Beijing: China Standards Press, 2002.
(梁新邦, 李久林, 陶立英, 等. GB/T 228-2002《金属材料 室温拉伸试验方法》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.)
- [18] Zhao Junping, Li Jiulin, Zhu Tiezhu, *et al.* GB/T 4338-2006 Metallic materials-Tensile testing at elevated temperature[S]. Beijing: China Standards Press, 2006.
(赵俊平, 李久林, 祝铁柱, 等. GB/T 4338-2006《金属材料 高温拉伸试验方法》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.)
- [19] Gao Yifei, Dong Li, Liu Tao, *et al.* GB/T 228.1-2021 Metallic materials - Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature[S]. Beijing: China Standards Press, 2021.
(高怡斐, 董莉, 刘涛, 等. GB/T 228.1-2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.)
- [20] Luo Jing, Gao Yifei, Zhao Junping, *et al.* GB/T 228.2-2015 Metallic materials - Tensile testing – Part 2: Method of test at elevated temperature [S]. Beijing: China Standards Press, 2015.
(罗静, 高怡斐, 赵俊平, 等. GB/T 228.2-2015《金属材料 拉伸试验 第 2 部分: 高温试验方法》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.)
- [21] Mu Danning, Shi Wen, Li Jian, *et al.* GB/T 23605-2020 Determination of β transus temperature of titanium alloys[S]. Beijing: China Standards Press, 2020.
(穆丹宁, 史文, 李剑, 等. GB/T 23605-2020《钛合金 β 转变温度测定方法》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.)
- [22] Wang Yongmei, Feng Junning, Huang Yongguang, *et al.* GB/T 23604-2009 Methods of sampling for mechanical properties testing of titanium and titanium alloy products[S]. Beijing: China Standards Press, 2009.
(王永梅, 冯军宁, 黄永光, 等. GB/T 23604-2009《钛及钛合金产品力学性能试验取样方法》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.)

编辑 张继东

(上接第 176 页)

- [4] Yu Hao, Kang Yonglin, Zhao Zhengzhi, *et al.* Study of microstructure and cementite in automobile beam steels produced by compact strip production with flexible technologies[J]. Mater. Sci. Eng. , A 2005, 408: 47-52.
- [5] Sha Qingyun, Sun Zuqing. Grain growth behavior of coarse-grained austenite in a Nb-V-Ti microalloyed steel[J]. Mater. Sci. Eng. , A 2009, 523: 77-84.
- [6] Wan Lanfeng, Leng Xianggui. Development of hot strip BM510L microalloyed with Nb and Ti for automobile frame[J]. Automobile Technology & Material, 2005(4): 12-15.
(万兰凤, 冷祥贵. 铌钛微合金化汽车大梁用热轧板带 BM510L 的开发 [J]. 汽车工艺与材料, 2005(4): 12-15.)
- [7] Zhang Jikui, Xin Ying, Zhang Manman, *et al.* Property and development of high strength low alloy hot rolled steel sheet for truck frame use[J]. Automobile Technology & Material, 2004(6): 42-46.
(张继魁, 辛莹, 张曼曼, 等. 汽车大梁用低合金高强度钢板性能与发展 [J]. 汽车工艺与材料, 2004(6): 42-46.)
- [8] Yang Cheng. Properties controlling of automobile beam steel WL510[J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36(10): 11-14.
(杨澄. 汽车大梁板 WL510 钢的性能控制 [J]. 金属热处理, 2011, 36(10): 11-14.)
- [9] Soto R, Saikaly W, Bano X, *et al.* Statistical and theoretical analysis of precipitates in dual-phase steels microalloyed with titanium and their effect on mechanical propertie[J]. Acta Materialia, 1999, 47(12): 3475-3481.
- [10] Shi Zhongran, Chai Xiyang, Chai Feng, *et al.* The mechanism of intragranular ferrite formed on Ti-rich (Ti, V) (C, N) precipitates in the coarse heat affected zone of a V-N-Ti microalloyed steel[J]. Materials Letters, 2016, 175(14): 266-270.
- [11] Mao Xinping, Huo Xiangdong, Sun Xinjun, *et al.* Strengthening mechanisms of a new 700 MPa hot rolled Ti-microalloyed steel produced by compact strip production[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(12): 1660-1666.

编辑 邓淑惠