

含 Ti 低碳微合金钢的力学行为和强化机理

关建辉¹, 张继明¹, 孙 林¹, 曲锦波¹, 杨官林²

(1. 江苏省(沙钢)钢铁研究院, 江苏 张家港 215625; 2. 江苏沙钢集团有限公司, 江苏 张家港 215625)

摘 要: 采用 OM、SEM、拉伸试验等方法, 对不同 Ti 含量低碳微合金钢的显微组织与力学性能进行测试与表征, 并探讨了其强化机制。结果表明, 随着有效 Ti 含量的升高, 试验钢的强度提高, 延伸率下降, 屈强比升高。当 Ti 含量由 0.016% 提高到 0.137% 时, 试验钢的屈服强度由 327 MPa 提高到 710 MPa, 增加 383 MPa, 抗拉强度由 418 MPa 提高到 773 MPa, 增加 355 MPa。当有效 Ti 含量在 0~0.052% 和 0.052%~0.107% 区间时, 0.01% 的有效 Ti 含量增量对屈服强度的贡献分别约为 44 MPa 和 21 MPa。

关键词: 低碳钢; 微合金化; Ti; 沉淀强化; 细晶强化; 力学性能

中图分类号: TF823, TG115.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-7638(2020)06-0107-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2020.06.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Strengthening Mechanism and Mechanical Behavior of Low Carbon Microalloyed Steel Containing Ti

Guan Jianhui¹, Zhang Jiming¹, Sun Lin¹, Qu Jinbo¹, Yang Guanlin²

(1. Institute of Research of Iron and Steel, Shasteel, Zhangjiagang 215625, Jiangsu, China; 2. Jiangsu Shagang Group Co., Ltd., Zhangjiagang 215625, Jiangsu, China)

Abstract: Microstructure and strengthening mechanism of low carbon micro-alloyed steel with different contents of titanium were characterized by OM and SEM analysis and tensile and impact testing. With the increase of titanium content, the strength and yield ratio of the tested steel increased, while the elongation decreased. When the titanium content increased from 0.016% to 0.137%, the yield strength increased from 327 to 710 MPa, increasing by 383 MPa, while the tensile strength increased from 418 to 773 MPa, increasing by 355 MPa. When the effective titanium content in the ranges of 0~0.052% and 0.052%~0.107%, the increments of yield strength for each 0.01% of effective titanium content are roughly 44 MPa and 21 MPa, respectively.

Key words: low carbon steel, micro-alloyed, titanium, precipitation strengthening, fine-grain strengthening, mechanical behavior

0 引言

低合金钢中单独或复合加入 Nb、V 或 Ti 等微合金元素, 可通过晶粒细化和析出强化使其综合性能显著提升^[1]。目前常用微合金元素添加主要以 Nb

或 Nb+V 与 Ti 的复合添加为主, 较多文献从钢的加热工艺、析出行为、力学性能等方面进行了系统的研究^[2-4]。Nb 在钢中具有较强的细晶作用, V 在钢中具有较强的沉淀强化作用, Ti 在钢中兼有沉淀强化和细晶强化作用。

收稿日期: 2020-02-19

作者简介: 关建辉(1985—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事热轧卷板新品开发和组织性能控制研究, E-mail: guanjh-iris@shasteel.cn。

由于 Nb 和 V 储量较少,价格昂贵,而 Ti 相对便宜,随着冶炼技术的进步,Ti 微合金强化被逐步推广。当 Ti 含量较低时,Ti 主要与 N 结合形成稳定的 TiN,加热过程可抑制奥氏体晶粒长大,还可以改善钢的焊接性能。Ti 还可以作为钢中硫化物变性元素使用,用以改善纵横向性能差异。富余的 Ti 在较低的温度可以与 C 结合生成细小弥散的 TiC,起到明显的沉淀强化效果,如文献^[9]研究了 Ti 微合金钢中纳米碳化物析出及其强化作用,认为强化 TiC 的析出行为在提高屈服强度方面具有重要潜力。

目前针对钢中 Ti 微合金化的应用多集中在微 Ti 处理方面,Ti 元素主要起到固氮、抑制原奥晶粒长大的作用。关于 Ti 元素明显的析出强化的作用虽然较多的研究文献涉及,但多为定性研究,针对不同 Ti 元素添加对钢的力学行为和强化机理的研究却不多见。为系统研究 Ti 元素添加对钢力学行为和强化机理的影响,笔者在常规 C-Mn 钢的基础上仅添加不同含量的 Ti,保持其他合金元素及轧制工艺相同,定量研究 Ti 含量对低碳微合金钢组织与力学性能的影响,并分析其力学行为和强化机理。

1 试验材料及方法

试验用钢采用真空感应炉冶炼,目标 Ti 含量 0.015%~0.14%(编号分别为 1[#]、2[#]、3[#]、4[#]、5[#]),其余元素如 C、Si、Mn、P、S、Al 等采用相同的目标范围,具体实际熔炼成分见表 1。

表 1 试验钢的主要化学成分(质量分数)
Table 1 Main chemical compositions of experimental steels(mass fraction) %

编号	C	Si	Mn	P	S	Ti	Al	N
1 [#]	0.06	0.18	1.09	0.010	0.007	0.016	0.031	0.002 6
2 [#]	0.06	0.18	1.11	0.011	0.006	0.044	0.032	0.002 4
3 [#]	0.07	0.18	1.15	0.010	0.007	0.081	0.035	0.002 3
4 [#]	0.07	0.19	1.14	0.011	0.006	0.110	0.033	0.002 5
5 [#]	0.06	0.19	1.15	0.012	0.007	0.137	0.032	0.002 2

冶炼钢锭经精整后切成尺寸 120 mm×120 mm×140 mm 的坯料,在加热炉中加热至 1 200 ℃,保温 2 h,然后经 Ø750 mm 热轧中试机组轧成厚度 7 mm 的钢板。轧制工艺参数为:开轧温度 1 050 ℃,终轧温度 850 ℃,轧后冷却速度 25 ℃/s,终冷温度 620 ℃,冷却后钢板置于 620 ℃加热炉中保温 1 h 后炉冷至室温。

在钢板上沿轧制方向切取并制备拉伸试样,在

型号 Model 5582 100 kN 电子万能材料试验机上按 GB/T2282010 测量其拉伸性能。

沿钢板轧制方向取金相试样,采用体积分数为 4% 的硝酸酒精(4% HNO₃+96% C₂H₅OH) 溶液腐蚀 10 s,观察其金相组织,用蔡司 Axio Imager Z1m 显微镜 Axio Vision4 grain 模块测量其晶粒度及其平均晶粒尺寸。

2 试验结果及讨论

2.1 显微组织

图 1 为试验用钢金相组织形貌和平均晶粒尺寸,可见,含 Ti 微合金钢组织主要为铁素体+少量珠光体。其中,1[#]、2[#]钢基体组织为等轴状铁素体,3[#]、4[#]、5[#]钢基体组织主要为等轴状铁素体加部分不规则状多边形铁素体。并且,随着钛含量的不断升高,试验钢晶粒尺寸不断减小。

2.2 力学行为

表 2 为试验用钢的力学性能,可以看出,随着 Ti 含量的升高,屈服强度和抗拉强度均单调增加,伸长率呈降低趋势,屈强比单调上升。当 Ti 含量分别为 0.044%、0.081%、0.110%、0.137% 时,屈服强度依次为 434、615、630、710 MPa,且延伸率均大于 20%。通过低碳加 Ti 微合金化可以获得较好的强度和塑性配合。

随着 Ti 含量的增加,超过 Ti/N 理想化学配比,钢中多余的 Ti 与 C 结合生成 TiC 析出相。在轧制过程的较高温度析出的 TiC 会在 TiN 颗粒上外延生长,尺寸增大,强化效果并不明显。随着 Ti 含量的继续增加,多余的 Ti 在较低的温度以细小而弥散的 TiC 质点形式析出,出现强烈的沉淀强化效果。

含 Ti 微合金钢中 Ti 的化合物主要有如下几种:TiN、Ti₄C₂S₂、Ti(CN)、TiC。当 Ti 含量较低时,Ti 几乎全部用于形成 TiN($w(\text{Ti}) = 3.4w(\text{N})$),当 Ti 含量超过 3.4 $w(\text{N})$,开始形成 Ti₄C₂S₂。当 $\text{Ti} > 3.4w(\text{N}) + 3w(\text{S})$ 时,多余的 Ti 在铁素体中析出,形成细小弥散 TiC 颗粒,起沉淀强化作用^[9]。

文献^[9]引入有效 Ti 概念,有效 Ti 指钢中与碳结合生成 TiC 所消耗的钛。钢中有效 Ti 含量主要取决于 Ti、S、N 的含量。有效 Ti 含量的计算公式如式(1)所示。

$$[\text{Ti}] = w(\text{Ti}) - 3.4w(\text{N}) - 3w(\text{S}) \quad (1)$$

式中,[Ti] 为有效钛含量,%; $w(\text{Ti})$ 、 $w(\text{N})$ 和 $w(\text{S})$ 分别为 Ti、N 和 S 的含量,%。

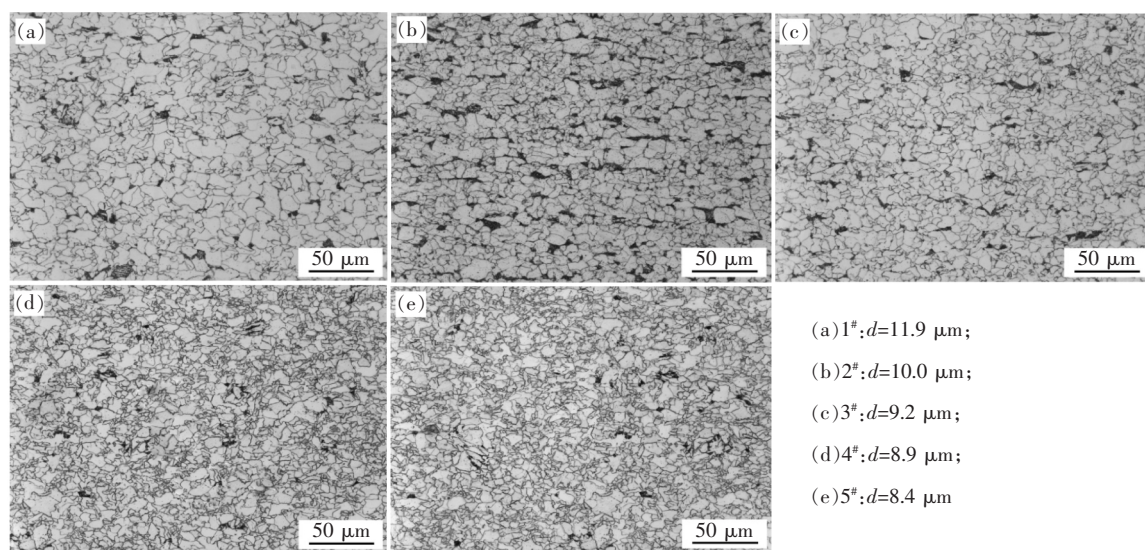


图 1 试验钢组织金相形貌及平均晶粒尺寸

Fig.1 Microstructure and average grain size of experimental steels

表 2 试验钢的拉伸性能

Table 2 Tensile properties of experimental steels

编号	屈服强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	伸长率 /%	屈强比
1 [#]	327	418	31.6	0.78
2 [#]	434	501	27.3	0.86
3 [#]	615	687	23.3	0.89
4 [#]	630	703	22.9	0.90
5 [#]	710	773	22.6	0.92

图 2 为试验钢有效 Ti 含量与力学性能的关系。

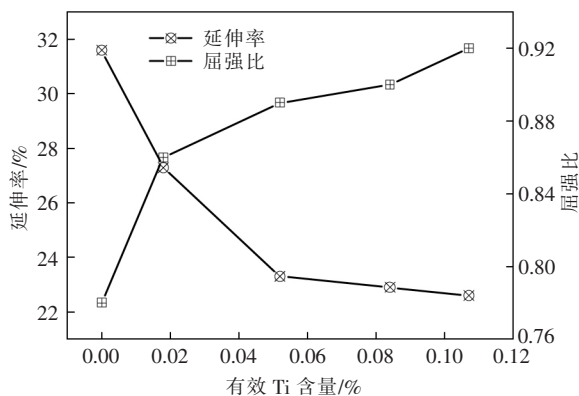
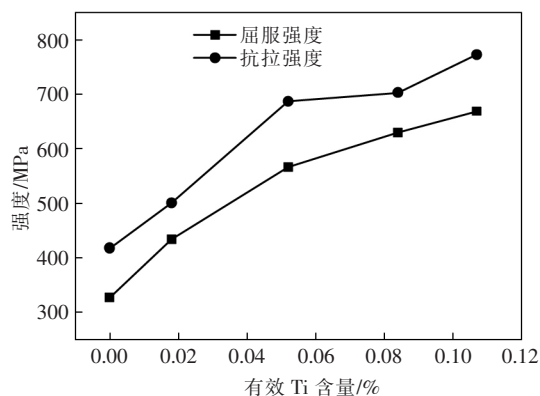


图 2 试验钢有效 Ti 含量与带钢力学性能的关系

Fig.2 Effective Ti content on mechanical properties of experimental steel

2.3 强化机理

微合金强化方面国内外开展了大量的研究^[9-11],低碳微合金钢的主要强化机制包括固溶强化^[12]、细晶强化^[13]、位错强化和沉淀强化^[14]。不同

随着有效 Ti 含量的增加,屈服强度和抗拉强度均明显上升,延伸率呈下降趋势,但均在 20% 以上。随着有效 Ti 含量的增加,TiC 析出量增加,沉淀强化效果增加,钢的屈强比上升。

试验钢的基体组织主要为铁素体组织,随着 Ti 含量增高,强度增量主要由铁素体中 TiC 沉淀析出导致的增量。沉淀强化使屈服强度的增幅大于抗拉强度的增幅^[8],因此 TiC 沉淀析出会导致屈强比的增加。

的合金化设计,各种强化机制的贡献有差异。本研究的含 Ti 微合金钢,主要变量为 Ti 含量,其他合金成分及轧制工艺均相同,主要从沉淀强化和细晶强化两种机制分析 Ti 含量对强化机理的影响。

沉淀强化机制可以用 Ashby-Orowan 模型描述^[3]:

$$\sigma_p = \left(\frac{10.8f^{1/2}}{X} \right) \left[\ln \left(X/6.125 \times 10^{-4} \right) \right] \quad (2)$$

式中, σ_p 为沉淀强化分量, MPa; f 为 TiC 析出相体积分, %; X 为析出相 TiC 粒径, μm 。

微合金钢中细晶强化分量可以用 Hall-Peich 公式(式(3))表示^[4]:

$$\sigma_g = k_y d^{-1/2} \quad (3)$$

式中, σ_g 为细晶强化分量, MPa; d 为铁素体平均晶粒尺寸, μm ; k_y 为比例系数, 低碳钢取值为 $17.4 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ 。

根据式(1)和式(2)计算沉淀强化强度分量, 根据式(3)计算细晶强化强度分量, 结合试验用钢强度实测值, 分别得出不同 Ti 含量试验用钢沉淀强化和细晶强化强度分量, 结果如表 3 所示。

表 3 试验钢沉淀强化和细晶强化分量及其贡献

Table 3 Precipitation strengthening and fine grain strengthening components of experimental steel and their contribution

试验钢编号	有效 Ti 含量 [Ti] / %	σ_p (沉淀强 化分量) / MPa	σ_g (细晶强 化分量) / MPa	屈服强度 / MPa	沉淀强化 贡献 / %	细晶强化 贡献 / %
1 [#]	0	0	160	327	0	49
2 [#]	0.018	57	175	434	13	40
3 [#]	0.052	105	181	566	19	32
4 [#]	0.084	124	184	630	20	29
5 [#]	0.107	142	190	669	21	28

从表 3 可以看出, 随着 Ti 含量的增加, 试验钢细晶强化分量从 160 MPa 增至 190 MPa, 变化幅度不大; 沉淀强化分量从 0 MPa 增至 142 MPa, 沉淀强化作用显著。

Ti 在钢中对强度的影响主要通过低温析出细小弥散 TiC 起作用, 钢中 N、S 也会与 Ti 结合消耗部分 Ti 含量, 笔者着重分析有效 Ti 含量对钢强度的影响。

图 3 为有效 Ti 含量与钢的屈服强度的关系, 钢的屈服强度增加和有效 Ti 含量的增加不是线性关系, 呈二次曲线关系, 其表达式如式(4)所示:

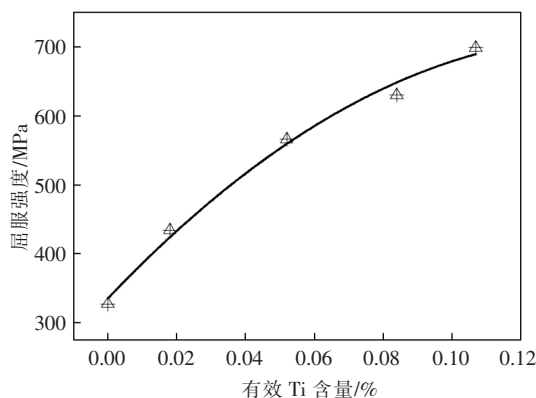


图 3 有效 Ti 含量与屈服强度的关系

Fig.3 Relationship between effective Ti content and yield strength

$$\sigma = -12\,178 [\text{Ti}]^2 + 5\,258 [\text{Ti}] + 355 \quad (4)$$

式中, σ 为屈服强度, MPa; $[\text{Ti}]$ 为有效 Ti 质量百分

数, %。

根据表 3 可以得出有效 Ti 含量在 0%~0.052%, 0.01% 的有效 Ti 对屈服强度的贡献约为 44 MPa, 0.052%~0.107% 区间, 0.01% 的有效 Ti 对屈服强度的贡献约为 21 MPa。

有效 Ti 含量在 0%~0.052%, 单位质量分数有效 Ti 引起的强度增量要大于 0.052%~0.107% 区间引起的强度增量。随着有效 Ti 含量的增高, 单位质量分数的有效 Ti 引起的强度增量逐渐降低, 强度增加逐渐平缓。试验钢中, 当 Ti 含量 0.016%, 有效 Ti 含量为 0, 钢中的 Ti 主要用于形成 TiN, 尺寸较大, 对沉淀强化贡献很小。当 Ti 含量 0.044%~0.081%, 有效 Ti 含量 0.018%~0.052%, 此部分 Ti 含量主要形成细小的 TiC, 沉淀强化效果显著。当 Ti 含量达到 0.081%~0.137%, 强度增加趋于平缓。文献[7]认为 Ti 含量较高时, 非共格析出物数量增加, 减弱了钢中的析出强化效果所致。同时较高 Ti 含量还会导致钢液凝固过程形成大尺寸的 TiN 颗粒增多, 降低钢的韧性。可见采用 Ti 强化生产微合金钢, 应采用合适的 Ti 含量, 过低起不到明显强化效果, 过高则对钢的综合性能不利。

3 结论

1) Ti 含量对微合金钢强度影响显著, 随着 Ti 含量增大, 微合金钢的强度增加, 延伸率下降。

2) 钢中的 Ti 含量由 0.016% 提高到 0.137% 时, 微合金钢的屈服强度由 327 MPa 提高到 710 MPa,

增加 383 MPa,而抗拉强度则由 418 MPa 提高到 773 MPa,增加 355 MPa。

3) Ti 主要通过沉淀强化机制影响微合金钢的强

度,有效 Ti 含量在 0%~0.052% 区间,0.01% 的有效 Ti 对屈服强度的贡献约 44 MPa; 0.052%~0.107% 区间,0.01% 的有效 Ti 对屈服的贡献 21 MPa。

参考文献

- [1] Wang Changjun, Yong Qilong, Sun Xinjun, *et al.* Effect of Ti and Mn contents on precipitation characteristics and strengthening mechanism of Ti microalloyed steels produced by CSP [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2011(12): 61-69.
(王长军, 雍岐龙, 孙新军, 等. Ti 和 Mn 含量对 CSP 工艺 Ti 微合金钢析出特征与强化机理的影响 [J]. *金属学报*, 2011(12): 61-69.)
- [2] Ding Zhimin, Fang Jianfei, Liang Bo, *et al.* Kinetics of austenite grain growth of V-Nb-(Ti) microalloyed steel [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2013, 34: 88-91.
(丁志敏, 方建飞, 梁博, 等. V-Nb-(Ti) 微合金化钢奥氏体晶粒长大的动力学 [J]. *材料热处理学报*, 2013, 34: 88-91.)
- [3] Hui Yajun, Pan Hui, Li Wenyuan, *et al.* Study on the heating schedule of 1 000 MPa grade Nb-Ti microalloyed ultra-high strength steel [J]. *Acta Metallica Sinica*, 2017(2): 3-13.
(惠亚军, 潘辉, 李文远, 等. 1 000 MPa 级 Nb-Ti 微合金化超高强度钢加热制度研究 [J]. *金属学报*, 2017(2): 3-13.)
- [4] Hui Yajun, Wu Kemin, Zhou Na, *et al.* Strengthening mechanism of 600 MPa grade Nb-Ti microalloyed high formability crossbeam steel [J]. *Shougang Technology*, 2017(5): 11-20.
(惠亚军, 吴科敏, 周娜, 等. 600 MPa 级 Nb-Ti 微合金化高成形性元宝梁用钢的强化机制 [J]. *首钢科技*, 2017(5): 11-20.)
- [5] Du Kaiping, Yu Yueguang, Zhang Shuting, *et al.* Nano-carbide precipitates in Ti microalloy steel under ultra fast cooling condition and there strengthening effect [J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering* 2016, 7(4): 27-32.
(杜开平, 于月光, 张淑婷, 等. 超快速冷却条件下 Ti 微合金钢中纳米碳化物及其强化作用 [J]. *有色金属科学与工程* 2016, 7(4): 27-32.)
- [6] Liu Qingyou, Han Wei. The effect of titanium on the structure and properties of automobile wheel steel [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 1994, 6(1): 49-54.
(刘清友, 韩伟. 钛对汽车车轮用钢组织和性能的影响 [J]. *钢铁研究学报*, 1994, 6(1): 49-54.)
- [7] Zhou Jian, Kang Yonglin, Mao Xiping, *et al.* Effect of Ti on mechanical properties of high strength weathering steel [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2006, 28(10): 926-930.
(周建, 康永林, 毛新平, 等. Ti 对高强耐候钢力学性能的影响 [J]. *北京科技大学学报*, 2006, 28(10): 926-930.)
- [8] Gao Huilin. Analysis and commentary of yield ratio of pipeline steel [J]. *Welded Pipe*, 2010(6): 11-15.
(高惠临. 管线钢屈服比分析与评述 [J]. *焊管*, 2010(6): 11-15.)
- [9] Lu Jiangxin. Research and development of a high strength micro-alloyed steel with yield strength of 700 MPa [D]. Shengyang: Northeastern University, 2005.
(陆匠心. 700 MPa 级高强度微合金钢生产技术研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2005.)
- [10] Dae-Bum Park, Moo-Young Huh, Jae-Hyeok Shim, *et al.* Strengthening mechanism of hot rolled Ti and Nb microalloyed HSLA steels containing Mo and W with various coiling temperature [J]. *Materials Science & Engineering A*, 560(none): 528-534.
- [11] Morales EV, Silva RA, Bott I S, *et al.* Strengthening mechanisms in a pipeline microalloyed steel with a complex microstructure [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2013, 585(585): 253.
- [12] Chen Yupeng. The research on composition design and controlled rolling controlled cooling technology of low-alloy steel for automobile [D]. Shengyang: Northeastern University, 2010.
(陈玉鹏. 汽车用低合金钢成分设计及控轧控冷工艺的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2010.)
- [13] Chen Jun, Tang Shuai, Liu Zhenyu, *et al.* Effect of cooling process on microstructure, mechanical properties and precipitation behavior of Nb-Ti microalloy steel [J]. *Acta Metallica Sinica*, 2012, 48(4): 441-449.
(陈俊, 唐帅, 刘振宇, 等. 冷却方式对 Nb-Ti 微合金钢组织和性能及沉淀行为的影响 [J]. *金属学报*, 2012, 48(4): 441-449.)
- [14] Sun Qian, Wang Xiaonan, Zhang Shunhu, *et al.* Effect of microstructure on fracture toughness of new type hot-rolled nano-scale precipitation strengthening steel [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2013, 49(12): 1501.
- [15] Ren Jiakuan, Wu Siwei, Chen Qiyuan, *et al.* Study on mechanical properties and prediction of Ti micro-alloyed low carbon steel [J] // *Proceedings of the 11th China Steel Annual Conference S03. Rolling and Heat Treatment*, 2017.
(任家宽, 吴思伟, 陈其源, 等. 含 Ti 微合金低碳钢的力学性能及预测 [J] // *第十一届中国钢铁年会论文集—S03. 轧制与热处理*, 2017.)
- [16] Xu G, Gan X, Ma G, *et al.* The development of Ti-alloyed high strength microalloy steel [J]. *Materials & Design*, 2010, 31(6): 2891-2896.
- [17] Yang Caifu, Zhang Yongquan, Wang Yujie. Effect of Ti content on mechanical properties of hot rolled strip [J]. *Iron and Steel*, 1995(8): 48-51.
(杨才福, 张永权, 王宇杰. 钛含量对热轧带钢力学性能的影响 [J]. *钢铁*, 1995(8): 48-51.)