

钛含量对 0.17C-0.30Si-1.40Mn 钢组织与力学性能的影响

刘阳春¹, 白凤霞¹, 徐 彬², 张云鹤², 李 蓓¹, 张世龙²

(1. 首钢集团有限公司技术研究院, 北京 100434; 2. 首钢集团北京首钢股份有限公司, 河北 迁安 064404)

摘 要:在某钢厂冶炼的 0.17C-0.30Si-1.40Mn 钢中添加不同含量的微合金化元素钛, 热连轧成板卷后逐卷取样进行力学性能测试和金相组织检验, 并采用碳复型萃取方法制作薄膜样品进行透射电镜观察, 研究了钛含量对 0.17C-0.30Si-1.40Mn 钢组织和力学性能的影响。结果表明: 随钢中钛含量由 0 增加至 0.073%, 当 Ti 含量 $\leq 0.020\%$ 时, 强度缓慢提高; 当 Ti 含量为 0.021%~0.038% 时, 强度显著提高; 当 Ti 含量 $> 0.038\%$ 时, 强度增加趋缓。钛加入 0.17C-0.30Si-1.40Mn 钢越多, 钢的延伸率和冲击功下降就越多。钛对 0.17C-0.30Si-1.40Mn 钢的显微组织影响不大, 仅能使其晶粒尺寸略微减小。钛在 0.17C-0.30Si-1.40Mn 钢中只能沉淀析出少量尺寸较大的 $\text{Ti}(\text{N}, \text{C})$ 和 $\text{Ti}_4\text{C}_2\text{S}_2$ 颗粒, 起到微弱的细晶强化作用, 但是钛在钢中能够沉淀析出大量细微的 TiC 颗粒, 产生强烈的沉淀强化作用。此外, 研究发现钛含量对低碳锰钢力学性能的影响还与钢中碳含量有关, 钢中碳含量不同, 强度随钛含量转变曲线上的 2 个拐点也不相同。

关键词:0.17C-0.30Si-1.40Mn 钢; 微合金化; 钛含量; 力学性能; 组织; 细晶强化; 沉淀强化

中图分类号: TF76

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)03-0139-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.03.022

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Effect of titanium content on the microstructure and mechanical properties of 0.17C-0.30Si-1.40Mn steel

Liu Yangchun¹, Bai Fengxia¹, Xu Bin², Zhang Yunhe², Li Bei¹, Zhang Shilong²

(1. Research Institute of Technology of Shougang Group Co., Ltd., Beijing100434, China; 2. Shougang Group Beijing Shougang Co., Ltd., Qian'an 064404, Hebei, China)

Abstract: 0.17C-0.30Si-1.40Mn steels with different titanium contents were prepared by smelting process. After hot rolling into hot-rolled coils, samples were taken for mechanical property test and metallographic structure inspection. Thin-film samples were made by the carbon replica extraction method for transmission electron microscope observation. The effect of titanium content on the microstructure and mechanical properties of 0.17C-0.30Si-1.40Mn steel was studied. The results show that the strength evolution corresponds to the Ti content (from 0 to 0.073%). The strength increases slowly when the Ti content is less than 0.020%, subsequently the strength increases significantly when the Ti content is 0.021%-0.038%, finally, the strength increases slowly again when the Ti content is more than 0.038%. The more titanium is added into 0.17C-0.30Si-1.40Mn steel, the more the elongation and impact energy decrease. Titanium has little effect on the microstructure of 0.17C-0.30Si-1.40Mn steel and can only slightly reduce its grain size. A small amount of $\text{Ti}(\text{N}, \text{C})$ and $\text{Ti}_4\text{C}_2\text{S}_2$ particles of large size can be precipitated in 0.17C-0.30Si-1.40Mn steel, which weakly plays a fine-grain strengthening; however, a large

收稿日期: 2021-10-29

作者简介: 刘阳春 (1965—), 男, 工学博士, 高级工程师, 通讯作者, 研究方向: 特殊钢材料开发, E-mail: lyc65525@126.com。

number of fine TiC particles can be precipitated in the steel, resulting in strong precipitation strengthening effect. It is found that the influence of titanium content on the mechanical properties of low carbon manganese steel is also related to the carbon content in the steel. The two inflection points of the curve about strength transformation with titanium content also vary with different carbon content in the steel. Thereby restraining martensitic phase transformation.

Key words: 0.17C-0.30Si-1.40Mn steel, microalloying, titanium content, microstructure, mechanical property, fine grain strengthening, precipitation strengthening

0 引言

近年来钛的细晶强化和析出强化作用得到了普遍重视,钛作为单一微合金化元素添加到钢中也得到了广泛应用^[1-3]。

目前对钛微合金化的研究和应用主要集中在碳含量<0.10%的低碳钢品种。Liu等^[4]从理论上计算了Ti的碳化物在奥氏体中的等温析出曲线,所用试验钢的碳含量为0.05%,钛含量为0.05%~0.25%。Turkdogan^[5]对高强度低合金钢中氮化物和碳氮化物析出的原因及影响进行了研究。Saikaly等^[6]研究了TiC的析出行为以及对钢屈服强度的贡献,试验钢的化学成分体系是0.085C-0.23Si-0.96Mn, Ti含量为0.045%~0.130%,结合适当的热加工工艺, TiC对试验钢屈服强度的贡献可达100~250 MPa。Soto等^[7]研究了0.07C-(0.04-0.13)Ti钢的固溶钛含量随温度的变化情况,平衡条件下, TiC的析出温度范围约为1150~800℃,随着Ti含量的增加, TiC开始析出温度逐步升高;当温度低于800℃时,钢中的固溶Ti几乎全部析出。霍向东等^[8]以普通集装箱板的化学成分为基础,研究了钛含量对热轧带钢组织和力学性能的影响:钛含量变化对铁素体晶粒尺寸影响不大,随钢中钛含量增加, TiN尺寸增大, TiC体积分数增加,粒子平均尺寸减小,产生显著的沉淀强化作用。

另一方面,对含有更高碳含量的钢种应用钛微合金化研究和应用很少。王建锋等^[9]对钛微合金化Q345E钢进行了试验研究,该钢的碳含量为0.12%~0.15%,钛含量为0.025%~0.035%,认为强度增加主要是钛细晶强化及沉淀强化作用引起的。赵小婷等^[10]研究了钛含量对碳锰钢厚板力学性能的影响,该钢的碳含量为0.16%左右,分别添加0.08%、0.14%、0.18%的钛,认为随着试验钢中Ti含量的增加,强度、韧性呈下降趋势,与析出更多的未溶粗大TiC粒子有关。

笔者选择典型的0.17C-0.30Si-1.40Mn低碳锰

钢,该化学成分体系钢碳含量为0.17%左右,应用极其广泛。对该钢添加不同含量的钛元素进行微合金化,探讨钛含量对含碳为0.17%左右的低碳锰钢组织和力学性能的影响。

1 试验材料和方法

试验所用的0.17C-0.30Si-1.40Mn钢取自某钢厂。其冶炼工艺流程是:铁水预处理→210 t转炉冶炼→LF炉精炼→板坯连铸→精整→入库。2160 mm热连轧机轧制工艺流程是:板坯加热→高压水除鳞→二机架可逆式粗轧机粗轧→六机架连轧式精轧机精轧→层流冷却→卷取→入库。

按照相同的冶炼工艺冶炼6炉碳含量为0.17%的低碳锰钢,其化学成分体系是0.17C-0.30Si-1.40Mn,并且分别向钢中添加0、0.020%、0.030%、0.040%、0.050%和0.070%的钛,然后均采用相同的轧制工艺轧制成热轧板卷,其中终轧温度为840℃,卷取温度为600℃,轧成板卷厚度为11.50~15.75 mm。

热轧板卷逐卷取样进行力学性能测试、金相组织检验和透射电镜观察,以此探讨钛含量对含碳0.17%低碳锰钢组织和力学性能的影响。拉伸试样取样方向与轧制方向垂直,拉伸试验在室温下进行。在热轧板卷宽度四分之一处切取金相试样,用标准程序制样后再用4%硝酸酒精溶液侵蚀,借助徕卡DMI5000M倒置金相显微镜进行显微组织观察,并利用Imagepro-plus软件测量晶粒尺寸。采用碳复型萃取方法制作薄膜样品,利用JEM2100F型透射电镜观察碳膜上附着的析出相粒子。

2 试验结果

2.1 化学成分

表1是6炉试验钢的主要化学成分。其中1号样未添加钛铁,2~5号样分别含有0.021%、0.032%、0.038%、0.054%和0.073%的钛含量。

表 1 6 炉试验钢的主要化学成分
Table 1 Main chemical compositions of 6 heats of test steel

编号	C	Si	Mn	P	S	Al _L	Al _S	Ti	O	N
1	0.16	0.35	1.40	0.015	0.008	0.017	0.016	0	0.001 8	0.002 5
2	0.17	0.30	1.38	0.015	0.005	0.026	0.025	0.021	0.001 7	0.002 3
3	0.17	0.32	1.40	0.017	0.008	0.029	0.028	0.032	0.001 9	0.002 4
4	0.16	0.31	1.38	0.014	0.008	0.027	0.025	0.038	0.001 7	0.003 1
5	0.17	0.27	1.39	0.012	0.006	0.022	0.021	0.054	0.002 3	0.002 6
6	0.17	0.31	1.38	0.011	0.005	0.031	0.029	0.073	0.001 6	0.002 1

2.2 力学性能

将表 1 中的 6 炉试验钢轧制成热轧板卷, 拉伸性能检测结果如图 1 所示, 其中屈服强度 R_{eL} 、抗拉强度 R_m 和延伸率 A 的数据均为各炉若干热轧板卷平均值。可以看出, 在相同的生产工艺条件下, 含碳 0.17% 低碳锰钢添加微合金化元素钛可以产生明显的强化作用: 当钛含量 $\leq 0.020\%$ 时, 强度缓慢提高, 延伸率少量降低; 当钛含量为 $0.021\% \sim 0.038\%$ 时, 强度显著提高, 延伸率明显降低; 当钛含量大于 0.038% 时, 强度增加趋缓, 延伸率进一步降低。钛含量为 $0.021\% \sim 0.073\%$ 时, 钛对试验钢屈服强度的贡献可达 $10 \sim 145 \text{ MPa}$ 。

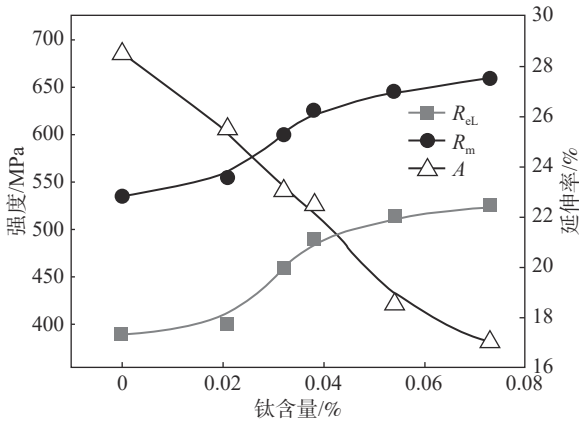


图 1 钛含量对 0.17C-0.30Si-1.40Mn 低碳锰钢拉伸性能的影响
Fig. 1 Effect of titanium content on tensile properties of 0.17C-0.30Si-1.40Mn low carbon-manganese steel

对表 1 中的 6 炉试验钢轧制成的热轧板卷进行系列温度冲击试验: 每个板卷各取 1 组系列冲击试样, 每 1 个试验温度取 3 个冲击试样, 3 个冲击试样实测数据的平均值作为该卷在各试验温度下的冲击试验数值; 冲击试样方向为纵向, 试样尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}$ 。试验结果如图 2 所示, 其中各数据点数值为各热轧板卷在各试验温度下冲击

功数值的平均值。可以看出: 随着钢中钛含量的增加, 钢的冲击功则不断下降。

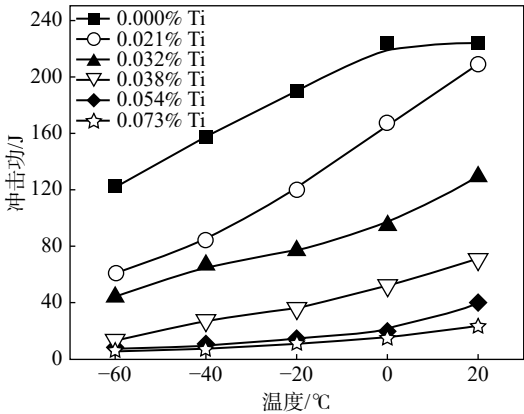


图 2 钛含量对 0.17C-0.30Si-1.40Mn 低碳锰钢系列温度冲击性能的影响
Fig. 2 Effect of titanium content on temperature impact properties of 0.17C-0.30Si-1.40Mn low carbon-manganese steel

2.3 显微组织

对 6 炉试验钢热轧板卷的显微组织进行检测, 部分板卷的显微组织如图 3 所示。由图 3 可以看出, 试验钢组织均由铁素体+珠光体+少量魏氏体组成; 随着钢中钛含量的增加, 热轧板卷的晶粒尺寸略微变细。

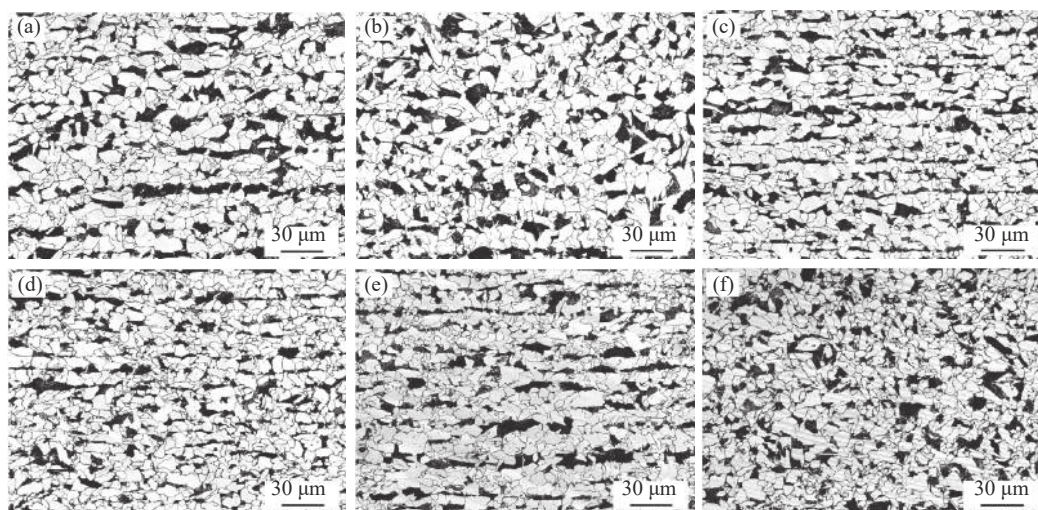
图 4 是 6 炉试验钢热轧板卷的晶粒尺寸检测结果, 图中数据均为各炉若干热轧板卷晶粒尺寸平均值。可以看出, 随着钢中钛含量自 0 增加至 0.073% , 平均晶粒尺寸自 $8.33 \mu\text{m}$ 减小至 $6.50 \mu\text{m}$, 钢的晶粒尺寸略微细化。

2.4 含钛析出物

透射电镜观察和能谱分析表明, 对表 1 中 6 炉试验钢添加钛元素, 随钢中 Ti 含量由 0 增加到 0.073% , 很难观察到 TiN , 但是均能够观察到 $\text{Ti}_4\text{C}_2\text{S}_2$ 、 $\text{Ti}(\text{CN})$ 和 TiC , Ti 含量越高, 这些颗粒的数

量越多,尤其是随钢中 Ti 含量增高, TiC 颗粒的数量急剧增加。Ti₄C₂S₂、Ti(C,N) 和部分大尺寸 TiC

颗粒尺寸大多约 10 ~ 100 nm, 大量微细 TiC 颗粒尺寸一般 < 10 nm。



(a) 1 号样, 0Ti; (b) 2 号样, 0.021%Ti; (c) 3 号样, 0.032%Ti; (d) 4 号样, 0.038%Ti; (e) 5 号样, 0.054%Ti; (f) 6 号样, 0.073%Ti

图 3 钛含量对 0.17C-0.30Si-1.40Mn 低碳锰钢热轧板卷显微组织的影响

Fig. 3 Effect of titanium content on microstructures of hot rolled coil of 0.17C-0.30Si-1.40Mn low carbon-manganese steel

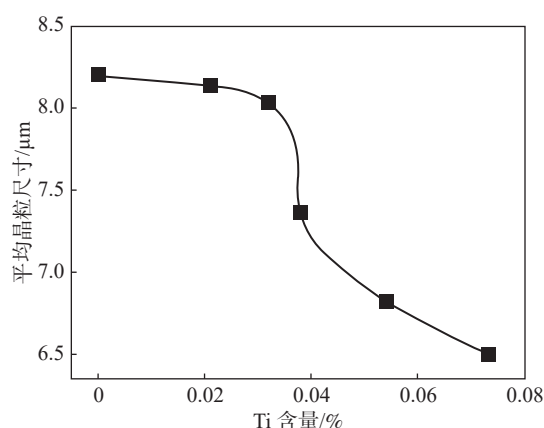


图 4 钛含量对 0.17C-0.30Si-1.40Mn 低碳锰钢平均晶粒尺寸的影响

Fig. 4 Effect of titanium content on average grain size of hot rolled coil of 0.17C-0.30Si-1.40Mn low carbon-manganese steel

例如 2 号试验钢添加 0.021% 钛元素, 其试样中的含钛析出物形貌及其能谱分析如图 5 所示, 图中 23 号和 26 号颗粒是 Ti(C,S), 24 号和 25 号颗粒是 Ti(C,N), 27 号和 28 号颗粒是 TiC。

图 6 是含钛 0.032% ~ 0.073% 试验钢试样的碳复型透射电镜照片, 显示随钢中钛含量增加, 能够沉淀析出大量的 TiC 颗粒。这些 TiC 颗粒形状呈不规则状态分布, 边界不甚清晰, 少量沿铁素体晶界析出, 大部分在铁素体晶粒内部析出, 大部分颗粒尺寸 ≤ 10 nm。

3 分析与讨论

3.1 钛含量对钢力学性能的影响

有很多文献对钛在钢中的析出行为及其对力学性能的影响进行了大量的研究, 得到了很多有益的试验结果, 例如文献 [11] 研究了碳含量为 0.055% 耐大气腐蚀钢 SPA-H 钢中钛含量与屈服强度的关系, 发现针对碳含量为 0.055% 的低碳锰钢, 强度随 Ti 含量转变的 2 个拐点分别是 0.045% 和 0.095%。然而本论文研究结果表明: 针对碳含量为 0.17% 的低碳锰钢, 虽然强度随钛含量转变的曲线形状与文献中大致相似, 但是强度随 Ti 含量转变的 2 个拐点分别是 0.020% 和 0.038%, 二者明显不同。

上述差异可以这样定性解释: 文献采用常规耐大气腐蚀钢 SPA-H 进行钛微合金化, 其碳含量为 0.055% 左右, 而本论文采用 0.17C-0.30Si-1.40Mn 低碳锰钢进行钛微合金化, 其碳含量为 0.17% 左右, 碳含量明显高出很多, 而碳含量的大幅增加可以大大加快钢中 Ti(C,N)、Ti₄C₂S₂ 和 TiC 颗粒的沉淀析出, 因而使强度随钛含量转变的 2 个拐点提前出现。

因此钛对钢力学性能的影响还是比较复杂的, 至少钛对钢的力学性能的影响还与钢中碳含量有关, 至于钛含量对含有更高碳含量的钢, 例如中碳钢 (≥ 0.30%) 和高碳钢 (≥ 0.60%) 的力学性能的影响还几乎没有文献报道。

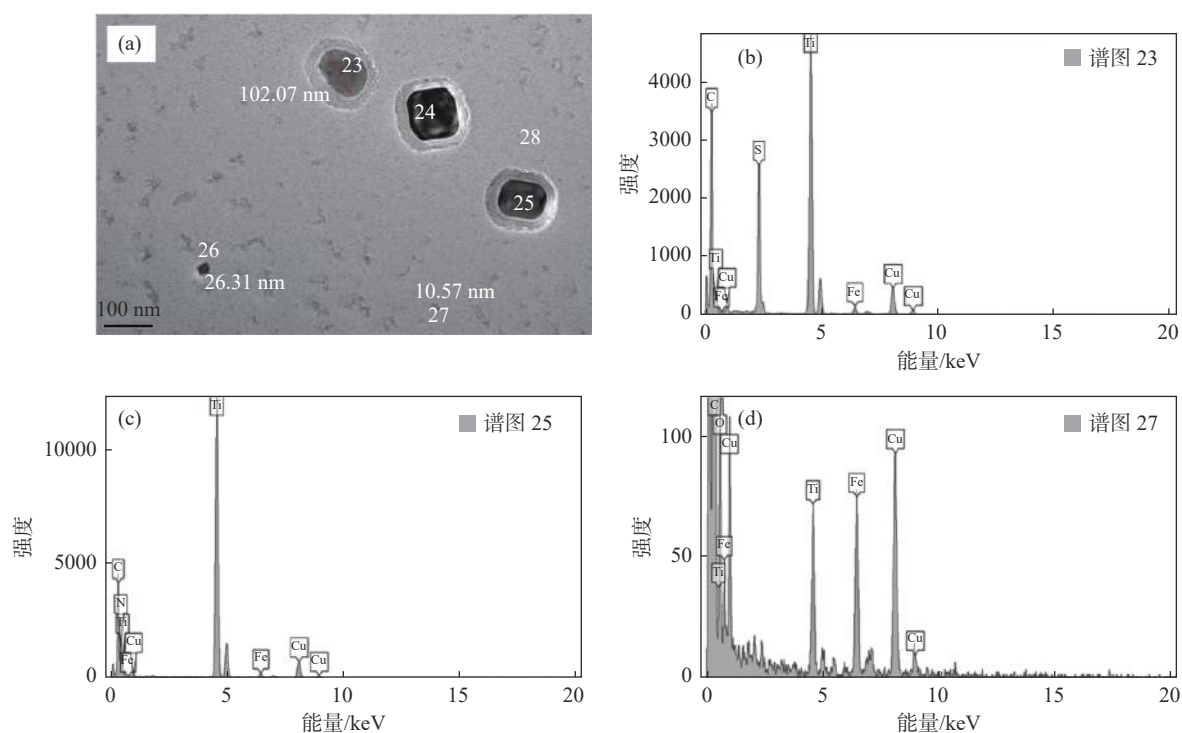


图 5 含钛 0.021% 试验钢试样中的含钛析出物形貌及其能谱分析

Fig. 5 Morphology and energy spectrum analysis of titanium precipitates in sample of testing steel bearing 0.021% titanium

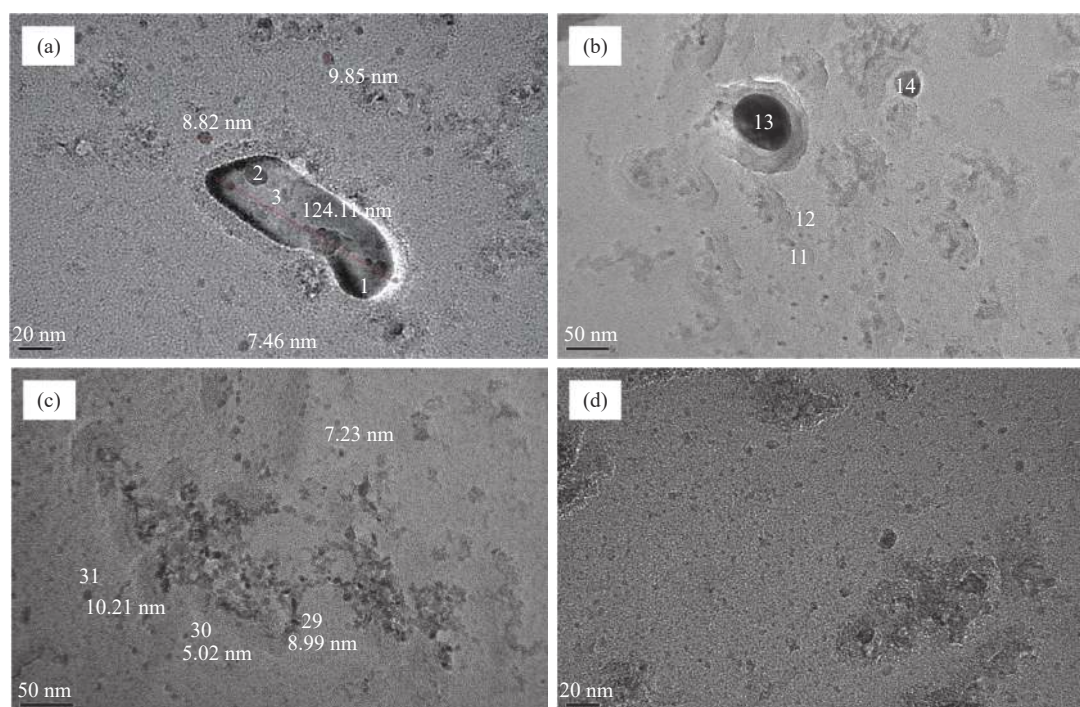


图 6 含钛 0.032%~0.073% 试验钢试样中的 TiC 颗粒形貌

Fig. 6 Morphologies of TiC particals in sample of testing steel bearing 0.032%~0.073% titanium

3.2 钛含量对钢晶粒尺寸的影响

根据 Hall-Petch 公式^[12-13], 对于铁素体+珠光体

类型低碳钢, 屈服强度 σ_s 与铁素体晶粒尺寸有如下关系:

$$\sigma_s = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \quad (1)$$

式中, k_y 为系数, 对于大角度晶界, 其值为 $15.1 \sim 18.1 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ (低碳钢中常采用 $17.4 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$); d 为铁素体晶粒平均直径, mm。

由图3和图4可以看出钛对 0.17C-0.30Si-1.40Mn 低碳锰钢的显微组织影响不大, 仅能使其晶粒尺寸略微减小。例如, 钢中添加 0.073% 的钛, 仅能使其平均晶粒尺寸由 $8.20 \mu\text{m}$ 细化至 $6.50 \mu\text{m}$, 根据 Hall-Petch 公式可以计算得出细晶强化增量为:

$$\Delta\sigma_g = 17.4 (0.0065^{-1/2} - 0.0082^{-1/2}) = 24 \text{ MPa}$$

图1显示, 0.17C-0.30Si-1.40Mn 低碳锰钢添加 0.073% 钛, 其热轧板卷屈服强度平均值提高 145 MPa, 因此晶粒细化的强化作用极其有限, 贡献率仅有 $24/145=16.6\%$ 。

对上述定量计算结果可以定性解释为: 现代冶炼流程普遍采用洁净钢生产工艺技术, 包括深脱氧、深脱硫、低氮钢、钢水残余元素控制等技术, 以及全过程保护浇注技术等, 使钢中的氮、氧、硫等元素控制在较低水平, 并且还往往向钢中添加一定数量的铝, 因此能够与钛化合形成 TiN 或者 Ti(CN) 的氮实在太少。例如本论文所用试验钢氮含量很低(仅有 $0.0021\% \sim 0.0031\%$), 即使钢中添加更多的钛元素, 也难以析出 TiN 颗粒, 只能析出少量的 Ti(N,C) 或者 $\text{Ti}_4\text{C}_2\text{S}_2$ 颗粒, 而且尺寸较大(如图5所示), 只能起到微弱的细晶强化作用, 这样就可以很好地解释图3和图4的试验结果。

3.3 钛微合金化钢的强化机理

根据 Gladman 等人对 Ashby-Orowan 修正模型的处理^[14], 细小粒子的沉淀强化作用可表示为:

$$\sigma_d = \frac{10\mu b}{5.72\pi^{3/2}r} f^{1/2} \ln\left(\frac{r}{b}\right) \quad (2)$$

其中, σ_d 为沉淀强化对钢屈服强度的贡献, MPa; r 为平均粒子半径, μm ; μ 为剪切系数, 对于钢材(铁素体)其值为 $80.26 \times 10^3 \text{ MPa}$; b 为柏氏矢量, $2.48 \times 10^{-4} \mu\text{m}$; f 为第二相粒子的体积分数。

要估算 TiC 颗粒的沉淀强化作用, 需要确定 TiC 颗粒的平均颗粒半径和 TiC 颗粒的体积分数, 目前的相关试验不能确定这 2 个参数, 因此无法利用公式 3 来计算钢中 TiC 颗粒的沉淀强化作用。

透射电镜分析表明: 针对 0.17C-0.30Si-1.40Mn 低碳锰钢, 随钢中 Ti 含量由 0 增加到 0.073%, 很难观察到 TiN 颗粒, 但是能够观察到少量的尺寸较大的 $\text{Ti}_4\text{C}_2\text{S}_2$ 、Ti(CN) 颗粒, 以及大量的微细 TiC 颗粒, Ti 含量越高, 这些微细 TiC 颗粒的数量越多, 根据公式(3)就可以定性推断: 尽管钢中存在的大量的微细 TiC 颗粒的本质及其析出过程有待进一步澄清, 但根据其尺寸和分布特征, 它们在钢中能够起到强烈的沉淀强化作用, 因此钢中主要强化方式是大量微细 TiC 颗粒所产生的强烈的沉淀强化作用。

正是因为钛在 0.17C-0.30Si-1.40Mn 低碳锰钢中只能起到微弱的细晶强化作用, 主要强化方式是大量微细 TiC 粒子所产生的沉淀强化作用, 因此含碳 0.17% 碳钢中加入越多钛, 钢的延伸率和冲击功下降就越多, 其系列温度冲击曲线上没有明显的韧脆转折点。

4 结论

1) 钛对 0.17C-0.30Si-1.40Mn 低碳锰钢组织和力学性能的影响是: 结合适当的热加工工艺, 钛含量为 $0.021\% \sim 0.073\%$ 时, 钛对试验钢屈服强度的贡献可达 $10 \sim 145 \text{ MPa}$ 。当钛含量 $\leq 0.020\%$ 时, 强度缓慢提高; 当钛含量为 $0.021\% \sim 0.038\%$ 时, 强度显著提高; 当钛含量大于 0.038% 时, 强度增加趋缓。钛加入到含碳 0.17% 低碳锰钢中越多, 钢的延伸率和冲击功下降就越多, 其系列温度冲击曲线上没有明显的韧脆转折点。钛对钢的显微组织影响不大, 仅能使其晶粒尺寸略微减小。

2) 钛微合金化 0.17C-0.30Si-1.40Mn 低碳锰钢的强化机理是: 钢中添加一定数量的钛元素, 只能沉淀析出少量的 Ti(N,C) 和 $\text{Ti}_4\text{C}_2\text{S}_2$ 颗粒, 尺寸较大, 只能起到微弱的细晶强化作用; 但是钛在钢中能够沉淀析出大量的细微 TiC 颗粒, 能够产生强烈的沉淀强化作用, 因此钛微合金化含碳 0.17% 低碳锰钢的主要强化方式是大量细微 TiC 析出相粒子所产生的沉淀强化作用。

3) 钛含量对低碳锰钢力学性能的影响还与钢中碳含量有关, 钢中碳含量不同, 强度随钛含量转变曲线上的 2 个拐点也不相同。

参考文献

- [1] Xu Fengyun, Bai Bingzhe, Fang Hongsheng. Development of titanium micro-alloying in high strength low alloy steel[J]. Heat

[Treatment of Metals](#), 2007, 32(12): 29–34.

(许峰云, 白秉哲, 方鸿生. 低合金高强度钢钛微合金化进展[J]. [金属热处理](#), 2007, 32(12): 29–34.)

- [2] Cai Zhen, Han Bin, Tan Wen, *et al.* Development status of titanium micro-alloying technology[J]. [China Metallurgy](#), 2015, 25(2): 1–5.

(蔡珍, 韩斌, 谭文, 等. 钛微合金化技术发展现状[J]. [中国冶金](#), 2015, 25(2): 1–5.)

- [3] Mao Xinping, Chen Qilin, Zhu Dayan. Recent development of microalloying technology in thin slab casting and rolling process[J]. [Iron and Steel](#), 2008, 43(4): 1–9.

(毛新平, 陈麒麟, 朱达炎. 薄板坯连铸连轧微合金化技术发展现状[J]. [钢铁](#), 2008, 43(4): 1–9.)

- [4] Liu W J, Jonas J J. Nucleation kinetics of Ti carbonitride in microalloyed austenite[J]. [Metallurgical Transactions A](#), 1989, 20A: 689–697.

- [5] Turkdogan E T. Causes and effects of nitride and carbonitride precipitation in HSLA steels in relation with continuous casting[J]. *Steelmaking Conference Proceedings(AIME)*, 1987, 70: 399–416.

- [6] Saikaly W, Bano X, Issartel C, *et al.* The effects of thermomechanical processing on the precipitation in a industrial dualphase steel microalloyed with titanium[J]. [Metallurgical and Materials TransactionsA](#), 2001, 32A(8): 1939–1947.

- [7] 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 properties[J]. [Acta Material](#), 1999, 47(12): 3475–3481.

- [8] Huo Xiangdong, Mao Xinpin, Chen Kangmin, *et al.* Influence of titanium content on microstructure and mechanical properties of hot rolled strips[J]. [Iron Steel Vanadium Titanium](#), 2009, 30(1): 23–28.

(霍向东, 毛新平, 陈康敏, 等. Ti含量对热轧带钢组织和力学性能的影响[J]. [钢铁钒钛](#), 2009, 30(1): 23–28.)

- [9] Wang Jianfeng, Deng Shen, Rao Jiangping, *et al.* Experimental study on the Ti microalloyed Q345E steel[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2010, 31(2): 20–25.

(王建锋, 邓深, 饶江平, 等. 钛微合金化Q345E钢的试验研究[J]. [钢铁钒钛](#), 2010, 31(2): 20–25.)

- [10] Zhao Xiaoting, Song Guobin, Li Hongbin. Effect of Ti content on mechanical properties of C-Mn steel in heavy plate[J]. [Hot Working Technology](#), 2012, 41(14): 77–79.

(赵小婷, 宋国斌, 李红斌. Ti含量对碳锰钢厚板力学性能的影响[J]. [热加工工艺](#), 2012, 41(14): 77–79.)

- [11] Mao Xinping, Sun Xinjun, Kang Yonglin, *et al.* Physical metallurgy for the titanium microalloyed strip produced by thin slab casting and rolling process[J]. [Acta Metallurgical Sinica](#), 2006, 42(10): 1091–1095.

(毛新平, 孙新军, 康永林, 等. 薄板坯连铸连轧Ti微合金化钢的物理冶金学特征[J]. [金属学报](#), 2006, 42(10): 1091–1095.)

- [12] Petch N J. The cleavage strength of polycrystals[J]. [Journal of the Iron and Steel Institute](#), 1953, 174: 25–28.

- [13] Gladman T, Pickering F B. Grain-coarsening of austenite[J]. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 1967, 205(6): 653–664.

- [14] Gladman T, Mcivor I D, Pickering F B. Effect of carbide and nitride particles on the recrystallization of ferrite[J]. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 1971, (5): 380–390.

实习编辑 梁光芬

编辑 杨冬梅