

控制冷却工艺对 Ti 微合金化中碳钢板组织和性能的影响

杨波¹, 孙健², 郭宏丽³

(1. 宝武钢铁集团鄂城钢铁有限公司, 湖北 鄂州 436002;

2. 广州盖勒斯机械科技有限公司, 广东 广州 511300; 3. 武汉钢铁有限公司, 湖北 武汉 430080)

摘要:采用控制轧制-控制冷却-淬火-回火工艺制备 20 mm 厚的 Ti 微合金化中碳钢板,研究了控制冷却工艺(冷却速度)对该钢有效晶粒尺寸和析出相的影响,并探讨了其强韧化机理。结果表明:冷却速度越快,有效晶粒尺寸越小,马氏体板条宽度越窄,含 Ti 析出相越细小,使其兼具高强度和良好的塑性韧性。主要是由于快速冷却保留了轧制时获得的晶体缺陷和形变能,使再加热奥氏体细化,而且快速冷却抑制了 Ti 在冷却过程中析出,使 Ti 处于过饱和状态,再加热过程中逐渐析出细小的含 Ti 析出相,能更有效地阻止奥氏体晶粒长大。有效晶粒细化以及纳米级含 Ti 析出相使该钢板具有良好的力学性能。

关键词: Ti 微合金化中碳钢板; 冷却工艺; 析出相; 晶粒尺寸; 力学性能

中图分类号: TG156.31 **文献标志码:** A **文章编号:** 0254-6051(2021)04-0118-05

Effect of controlled cooling process on microstructure and properties of Ti-microalloyed medium carbon steel plate

Yang Bo¹, Sun Jian², Guo Hongli³

(1. Baowu Iron and Steel Group Echeng Iron and Steel Co., Ltd., Ezhou Hubei 436002, China;

2. Guangzhou Guilaxy Mechanical Technology Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 511300, China;

3. Wuhan Iron and Steel Co., Ltd., Wuhan Hubei 430080, China)

Abstract: Ti-microalloyed medium carbon steel plate of 20 mm thickness was prepared by controlled rolling-controlled cooling-quenching-tempering processes. The effect of controlled cooling process (cooling rate) on effective grain size and precipitates of the steel was studied, and the strengthening and toughening mechanisms were also discussed. The results show that the faster the cooling rate, the smaller the effective grain size is, the narrower the martensite lath width is, and the finer the Ti-containing precipitates are, so that the steel has both high strength, good ductility and toughness. This is mainly because the rapid cooling can retain the crystal defects and deformation energy obtained during rolling, making the austenite refined during reheating. Moreover, the rapid cooling inhibits the precipitation of Ti in the cooling process, making Ti in the super-saturated state. In the reheating process, fine Ti-containing precipitates gradually precipitate, which can effectively prevent the growth of austenite grains. Effective grain refinement and nano Ti precipitates make the steel plate having good mechanical properties.

Keywords: Ti-microalloyed medium carbon steel plate; cooling process; Ti precipitates; grain size; mechanical properties

马氏体组织具有高强度、高硬度。增加碳含量能有效强化马氏体组织,但对韧性、塑性、焊接性能不利。采用微合金化,通过在钢中引入第二相粒子,能显著提高强度并改善可塑性^[1],成为目前钢铁材料的研究热点。然而,关于中碳钢的微合金化和析出相的研究相对较少,尤其在析出相的控制工艺、析出相对中碳钢强韧化的作用等方面的研究不够充分。Deng 等^[2]和 Kim 等^[3]分别研究了轧制工艺、冷却工艺、热处理工艺对中碳马氏体钢中析出相及性能的影响,但对加热奥氏体化过程中析出相的变化仍存在疑问。Hiroshi

Funakawa 等国内外学者^[4,6]分别研究了微合金化中碳钢的强韧化机理,但强韧化效果不够,且合金成本较高、生产工艺比较复杂。实际应用的中碳钢韧性、塑性、焊接性能很难满足应用需求。

因此,本文以中碳钢为研究对象,采用 Ti 微合金化,通过轧后冷却工艺控制微观组织形貌和析出相,达到最佳强韧化效果,开发出一种低成本、工艺相对简单、综合性能优良的高强度高韧性钢,并探讨其强韧化机理。

1 试验材料与方法

试验材料为某厂 130 t 转炉冶炼的 Ti 微合金化中碳钢,其化学成分如表 1 所示,除添加 Mn、Mo、Ti 等合金元素外还添加了适量的 B,提高试验钢淬透性以获得均匀马氏体组织,同时控制 N、S 含量,避免 Ti 在凝

收稿日期:2020-10-06

作者简介:杨波(1985—),男,工程师,主要研究方向为轧钢及热处理工艺, E-mail: C12951@baosteel.com

DOI:10.13251/j.issn.0254-6051.2021.04.020



固过程中析出成为大颗粒夹杂物^[7]。

表1 试验钢的化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical composition of the tested steel (mass fraction, %)

C	Mn	Si	P	S	Mo	B	Ti
0.31	1.4	0.22	0.009	0.0025	适量		0.08

采用该厂4300 mm宽厚板生产线进行轧制和热处理试验。先将铸坯加热至1230℃保温适当时间,既要保证合金元素充分固溶又要避免奥氏体晶粒过分长大,然后采用两阶段控制轧制方式完成轧制,轧后以不同冷却速度(50、10、2℃/s)冷却至室温再进行离线热处理,具体工艺如图1所示。最终制得厚度为20 mm的钢板。

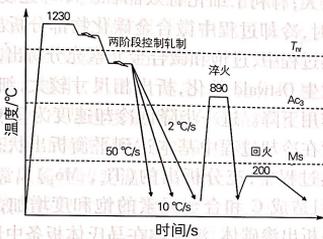


图1 试验钢的轧制和热处理工艺流程图

Fig. 1 Schematic diagram of rolling and heat treatment processes of the tested steel

从热处理后的钢板上取样进行力学性能测试和微观组织分析。采用横向8 mm圆棒试样,在液压拉伸试验机上进行拉伸试验;采用横向10 mm×10 mm×55 mm标准冲击试样,在ZBC2452-3摆锤冲击试验机上进行冲击试验,试验温度为-40℃。试验结束后采用冷场发射扫描电镜(SEM)观察拉伸和冲击断口,并配备的EBSD设备统计有效晶粒。试样精细组织和

析出相采用JEM-2100F型透射电镜(TEM)进行观察,并用INCA能谱仪对析出相进行成分分析,薄膜样品采用电解双喷减薄技术制备,电解液为6%高氯酸乙醇溶液,双喷电压为25 V,温度为-20℃。

2 试验结果与讨论

2.1 冷却速度对有效晶粒尺寸的影响

经定量测量分析知,冷速分别为50、10、2℃/s时,试验钢平均有效晶粒尺寸分别为 (2.52 ± 0.21) 、 (3.17 ± 0.19) 、 (3.59 ± 0.24) μm,即随着冷却速度降低而增大,如图2所示(其中晶粒取向大于15°的有效晶粒以不同颜色显示)。由图2可以看出,轧制后钢板以不同冷却速度冷却至室温,当冷却速度较大时,钢板在高温阶段停留时间较短,来不及进行充分的回复和再结晶,使轧制时获得的晶体缺陷和形变能得以保留,能促进随后再加热奥氏体化过程的形核,从而细化奥氏体晶粒和最终马氏体组织。

2.2 冷却速度对析出相的影响

不同轧后冷速条件下试验钢的TEM形貌如图3所示,可以看出,马氏体基体上分布着不同尺寸和形貌的纳米级第二相粒子(所选视场之外还可见少量亚微米级含Ti颗粒)。当冷却速度为50℃/s时,基体上分布着大量直径小于15 nm的析出相,能谱显示这些尺寸较小的析出相由Ti、Mo、C元素组成;当冷却速度降低至10℃/s时,基体上有大量直径约为25 nm左右的 $(Ti_x, Mo_y)C_{1-x-y}$ 析出相;冷却速度进一步降至2℃/s时,马氏体基体上仅有少量细小尺寸的针状渗碳体,没有纳米级的含Ti析出相。

Ti微合金化钢中的析出相在凝固、轧制、轧后冷却、热处理等阶段的析出量和形貌均有所不同。凝固阶段析出相以TiN为主,颗粒尺寸一般大于50 nm且有棱角;在奥氏体区轧制阶段,在形变诱导作用下,Ti

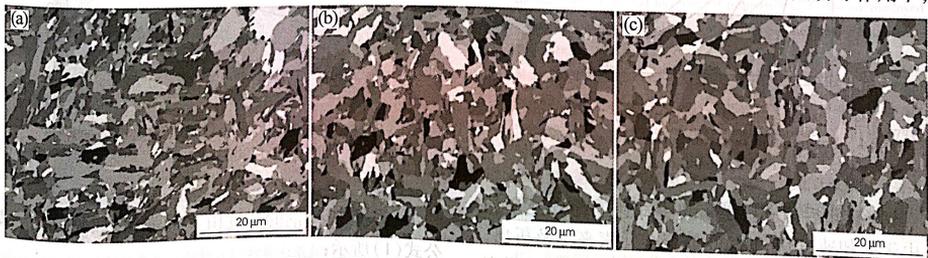


图2 不同轧后冷速条件下试验钢的EBSD分析

Fig. 2 EBSD analysis of the tested steel under different cooling rates after rolling

(a) 50 °C/s; (b) 10 °C/s; (c) 2 °C/s



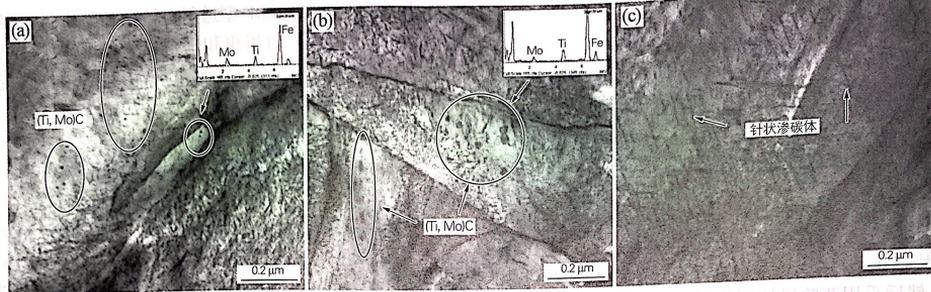


图 3 不同轧后冷速条件下试验钢马氏体基体上的析出相
Fig. 3 Precipitates in matrix of the tested steel under different cooling rates after rolling
(a) 50 °C/s; (b) 10 °C/s; (c) 2 °C/s

的析出量基本达到该区域的热力学平衡状态,析出量较少、析出相尺寸较大^[8];低温阶段 Mo 会与 Ti 复合析出,并能降低析出相尺寸。

本试验中不同的冷却工艺主要影响 Ti 在轧后冷却和后熟热处理阶段的析出行为。冷却过程中 Ti 在钢中的析出动力学广泛采用 Avrami 方程来描述,在驱动力和元素扩散的双重作用下,析出量与时间的关系曲线呈“C”型^[9]。升温过程中,当微合金元素处于过饱和状态时,在较低温度阶段尽管析出驱动力较大但不利于元素的扩散,而在较高温度阶段元素的扩散速度加快但析出驱动力较低,因此,升温过程中的动力学曲线也应呈“C”型^[10]。由此可以得出,不同冷却工艺条件下析出相的析出行为可用图 4 表示。当微合金元素析出结束后,析出相会发生 Ostwald 熟化。

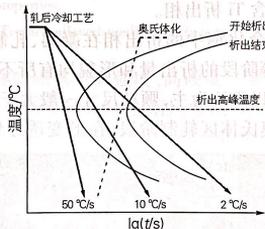


图 4 不同冷却工艺下的析出动力学曲线
Fig. 4 Precipitation behavior curves under different cooling conditions

体晶粒长大,有利于细化有效晶粒。冷却速度降低为 10 °C/s 时,冷却过程中微合金碳化物部分析出,随后的再加热过程中,过饱和微合金元素充分析出,并在高温阶段发生 Ostwald 熟化,析出相尺寸较大,细化有效晶粒的作用下降。进一步降低冷却速度为 2 °C/s 时,合金元素在冷却过程中基本达到平衡析出状态,随后的再加热过程中,充分析出的 (Ti_x, Mo_y)C_{1-x-y},逐步溶解,并且造成 C 和合金元素的饱和度增加,低温回火时容易析出渗碳体,渗碳体在马氏体条中形核,一般沿马氏体的(110)惯习面生长成细针状^[11]。

2.3 冷却速度对力学性能的影响

不同轧后冷速条件下试验钢的力学性能如图 5 所示,可以看出,随着冷却速度的增加试验钢的强度、塑性和冲击性能均得到提高。

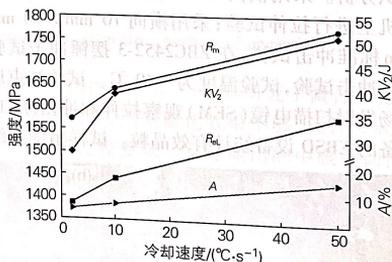


图 5 不同轧后冷速条件下试验钢的力学性能
Fig. 5 Mechanical properties of the tested steel under different cooling rates after rolling

板条马氏体钢的强度由多种强化机制决定^[12],如公式(1)所示:

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_s + \sigma_p + \sigma_\sigma + \sigma_g \quad (1)$$

式中: σ_0 为恒量,代表纯铁的内摩擦应力; σ_s 、 σ_p 、 σ_σ 、

试验钢轧后以 50 °C/s 的冷却速度冷却至室温时,由于冷却速度快,Ti、Mo 等合金元素来不及析出,处于过饱和状态,且基体中保留了轧制时获得的形变储能和高密度位错,因此,在随后的再加热过程中,大量细小的 (Ti_x, Mo_y)C_{1-x-y} 持续析出,并能阻止奥氏



σ_s 分别为固溶强化、沉淀强化、位错强化和细晶强化对强度的增量,可分别表示为:

$$\sigma_s = 46[C] + 37[Mn] + 83[Si] + 59[Al] + 2918[N] + 680[P] + 80.5[Ti] \quad (2)$$

$$\sigma_p = 0.538Gb d^{-1/2} \ln(d/2b) \quad (3)$$

$$\sigma_p = \alpha M G b \rho^{1/2} \quad (4)$$

$$\sigma_g = k_g D^{-1/2} \quad (5)$$

式中: G 和 b 分别为剪切模量和伯氏矢量, f 和 d 分别为析出相的体积分数和直径, α 和 M 为常数, ρ 为位错密度, k_g 代表Hall-Petch斜率, D 代表有效晶粒尺寸。

由式(2)~(5)可以看出,对于本试验的中碳板条马氏体钢, σ_s 主要由C含量决定, σ_p 取决于析出相的体积分数和大小,当粒子平均直径大于40 nm时,沉淀强化作用较小, σ_p 由板条内部的位错和小角度晶界决定, σ_g 取决于有效晶粒尺寸。由此可见, σ_p 、 σ_p 、 σ_g 是引起试验钢强度差异的主要原因,有效晶粒尺寸越小、析出相尺寸越小、析出量越多,强化作用越显著。因此,增大轧后冷却速度能细化有效晶粒、促进纳米级第二相析出,使试验钢具有更高的强度。

通常以脆性转变温度衡量板条马氏体钢的韧性,其与有效晶粒尺寸之间为线性关系,如公式(6)所示:

$$T = B - AD^{-1/2} \quad (6)$$

式中: T 表示脆性转变温度, A 、 B 为常数, D 为有效晶粒尺寸。对于本试验的中碳板条马氏体钢,其有效晶粒尺寸与低温冲击吸收能量基本符合这种线性关系,即有效晶粒越大韧性越差。这主要是由于裂纹扩展时穿越有效晶粒界面(大角度晶界)发生大角度转折,从而起到阻碍裂纹扩展的作用,提高了韧性。由不同有效晶粒尺寸时的冲击断面形貌(如图6所示)可以看出,当有效晶粒尺寸较小时断面形貌呈浅切窝特征,有利于提高韧性,当有效晶粒尺寸较大时断面形貌呈河流状解理特征,断面高低不平,初塑性明显恶化。此外,大颗粒的含Ti析出相和针状渗碳体对韧性也不利,而纳米级含Ti析出相对韧性影响较小。

3 结论

1) Ti微合金化中碳钢控制轧制后采用快速冷却可保留轧制形成的晶体缺陷和形变能,为再加热奥氏体化提供更多形核位置,能有效细化奥氏体晶粒。

2) 轧后冷却过程中增大冷却速度能抑制Ti析出,使其在再加热升温过程中逐渐析出,获得纳米级含Ti析出相,并阻止奥氏体晶粒长大。

3) 细化有效晶粒尺寸并获得纳米级含Ti析出相,可增加细晶强化和沉淀强化作用,细化有效晶粒尺寸能提高初塑性,而且纳米级含Ti析出相对于初塑性损害较小,可提高中碳钢的力学性能。

参考文献:

- [1] Hu J, Du L X, Ma Y N, et al. Effect of microalloying with molybdenum and boron on the microstructure and mechanical properties of ultra-low-C Ti bearing steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 640: 259-266.
- [2] Deng X, Wang Z, Misra R D K, et al. Transformation precipitation behaviour of Ti-Mo bearing high strength medium-carbon steel[J]. Materials Science and Technology, 2013, 29(9): 1112-1117.
- [3] Kim Y W, Kim J H, Hong S G, et al. Effects of rolling temperature on the microstructure and mechanical properties of Ti-Mo microalloyed hot-rolled high strength steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 605: 244-252.
- [4] Matsuda H, Mizuno R, Funakawa Y, et al. Effects of auto-tempering behaviour of martensite on mechanical properties of ultra high strength steel sheets[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 577(S1): 661-667.
- [5] 陈颜堂, 郭爱民, 李平和. Nb-Ti微合金化超低碳低合金高强度钢中第二相的析出行为[J]. 金属热处理, 2007, 32(9): 51-54.
- [6] 李颜堂, 郭爱民, 李平和. Nb-Ti微合金化超低碳低合金高强度钢中第二相的析出行为[J]. 金属热处理, 2007, 32(9): 51-54.
- [7] 李大赵, 庄治华, 申丽媛, 等. 先进高强钢微观组织调控研究现状及发展趋势[J]. 金属热处理, 2019, 44(5): 12-17.

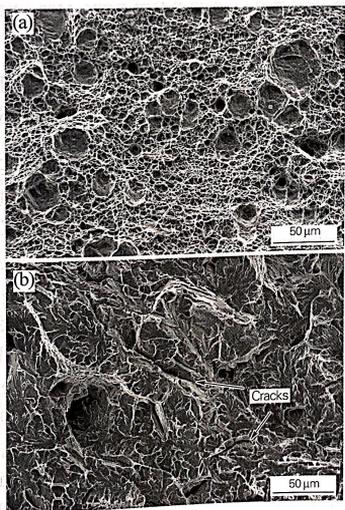


图6 试验钢不同有效晶粒尺寸时的冲击断面形貌
(a)较细有效晶粒;(b)较粗有效晶粒

Fig.6 Impact fracture morphologies of the tested steel with different effective grain sizes
(a) finer grain size; (b) coarser grain size

