

# 薄板坯连铸连轧铁素体 + 珠光体 类型钢的强化与软化

傅 杰, 吴华杰, 刘阳春

(北京科技大学, 北京 100083)

[摘要] 根据钢的综合强化理论, 控制  $A_1$  附近温度下钢中碳的析出, 研究了 HSLC 钢的强化与软化问题。结果表明: 薄板坯连铸连轧 HSLC 钢, 强度还可进一步提高; 通过回火缓冷, 薄板坯连铸连轧 HSLC 钢 ZJ330 的  $\sigma_s$  从 344 MPa 降至 225 MPa, 能满足冷轧基板要求。讨论了有关铁素体轧制、超细晶粒钢以及一种可能的新型建筑材料等问题。

[关键词] HSLC 钢; 强化; 软化; 冷轧基板; 超级钢

[中图分类号] TG335.13 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)04-0065-08

## 1 前言

铁素体 + 珠光体类型钢包括低碳钢 (例如 Q195, Q235,  $\sigma_s$  (屈服强度) 为 200 MPa 左右)、低合金钢 (例如 16Mn, SPA-H,  $\sigma_s$  大于 345 MPa) 和微合金钢 (例如 Q345,  $\sigma_s$  大于 345 MPa)。

铁素体 + 珠光体类型钢是我国目前广泛使用的钢铁结构材料主体, 在薄板坯连铸连轧产品中, 这类钢材占 95% 以上,  $\sigma_s$  的水平为 200 ~ 345 MPa, 但随着国民经济的发展, 制造  $\sigma_s$  为 400 MPa 的铁素体 + 珠光体类型钢显得尤为重要。为此, 国家“九七三”项目“新一代钢铁材料的重大基础研究”, 将 400 MPa 碳素钢研究工作定为项目的第一期重点, 目标是使碳素钢热轧板  $\sigma_s$  达到 400 MPa, 研制出 III 级钢筋碳素钢长型材<sup>[1]</sup>。

在国家科技部的关心和支持下, 经过广大研究单位和研究人员的多年努力, 该项目取得了重大成果。宝钢用与 16Mn 类似的成分, 采用常规热连轧工艺, 生产出了  $\sigma_s$  为 400 MPa 级的热轧薄板; 首钢集团公司用与 Q235 类似的成分, 生产出了屈服强

度 360 MPa 的中板; 广州珠江钢铁有限责任公司 (下称珠钢) 用与 Q195 类似成分, 用电炉 - CSP 工艺大批量生产出了  $\sigma_s$  为 330 ~ 390 MPa 的热轧薄板; 淮钢特钢有限公司生产试制成功碳素钢 III 级钢筋<sup>[1]</sup>。

但是, 不同学者对钢的强化机理存在不同意见, 一种观点是形变诱导铁素体相变, 超细晶强化<sup>[1]</sup>; 另一种观点是基于发现薄板坯连铸连轧低碳钢中存在大量纳米析出物而提出的钢的综合强化机制。文献[2]首先发现薄板坯连铸连轧低碳钢中存在大量纳米尺寸的氧化物和硫化物, 其尺寸一般为几十纳米至几百纳米, 并发现钢中存在大量尺寸小于 20 nm 的沉淀粒子, 它们具有尖晶石结构; 文献[3 ~ 5]指出: 薄板坯连铸连轧低碳钢中尺寸小于 20 nm 的析出物主要为含氧的铁碳析出物, 是在  $A_1$  温度以下由于碳的析出而形成的, 对钢的强度具有重要影响。400 MPa 级铁素体 + 珠光体类型钢中存在包括沉淀强化在内的综合强化机制, 沉淀强化的贡献与细晶强化的贡献相当<sup>[6]</sup>。

常规热连轧和薄板坯连铸连轧等钢板的强度

[收稿日期] 2007-03-12

[基金项目] 国家自然科学基金项目 (50334010); 国家重点基础研究发展计划 (G1998061500)

[作者简介] 傅 杰 (1937 -), 男, 湖南湘潭市人, 北京科技大学教授, E-mail: fujie9@263.net; 吴华杰 (1978 -), 男, 安徽黄山市人, 北京科技大学讲师, E-mail: whjyeh@163.com

高,给冷轧带来了困难,因此在使用薄板坯连铸连轧生产冷轧基板时,通常采用碳含量更低( $w(C) \leq 0.04\%$ )的钢种,从而要求在生产流程中带有真空精炼工序(VD或RH),如能将碳含量为0.06%左右的铁素体+珠光体类型钢通过薄板坯连铸连轧或常规热连轧,使钢的 $\sigma_s$ 能满足冷轧基板的要求,显然会具有重大的经济效益和理论意义。

笔者基于对 $A_1$ 温度以下纳米铁碳析出物的控制,进一步研究了薄板坯连铸连轧过程中铁素体+珠光体类型钢的强化与软化问题。

## 2 铁素体+珠光体类型钢的强化

ZJ330钢是铁素体+珠光体类型低碳高强度钢(HSLC钢)中产量最大的钢种之一。考虑到 $A_1$ 温

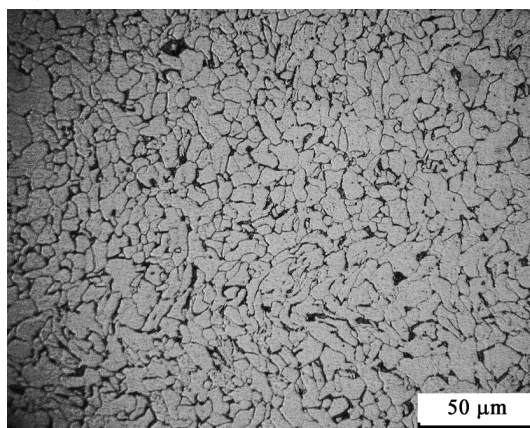
度以下钢中碳的析出对其组织性能具有重要影响,研究了在不同回火温度(500~700℃)保温20min后水冷(回火快冷)对ZJ330钢力学性能的改变。结果示于表1。图1是实验钢的金相组织照片。

表1  $A_1$ 温度以下回火快冷对ZJ330力学性能的影响

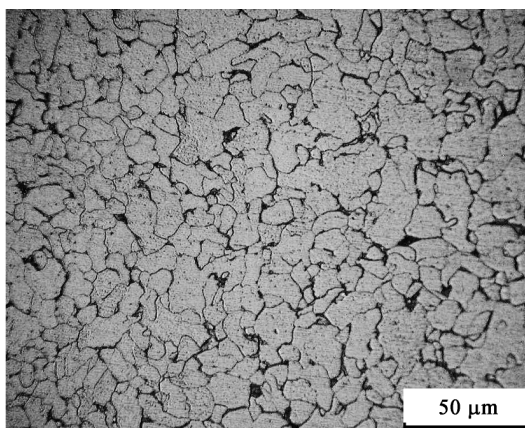
Table 1 Effect of temper - rapid cooling under  $A_1$  temperature on mechanical properties of ZJ330 steel

试验材料	回火温度/℃	冷却方式	$\sigma_s$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_s/\sigma_b$	延伸率/%
1	原始板材		344	408	0.84	39
5	500	水冷	342	420	0.81	41
6	600	水冷	410	490	0.84	29
7	700	水冷	458	625	0.77	16

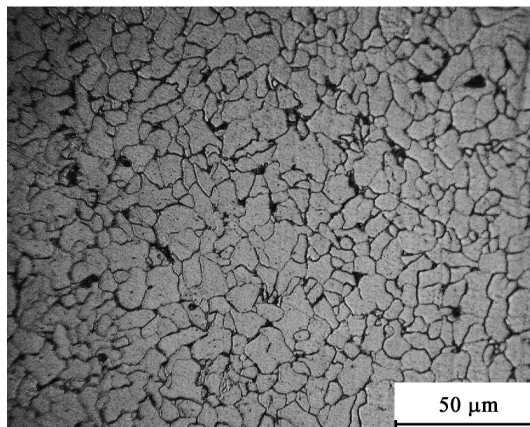
注: $\sigma_b$ 为抗拉强度



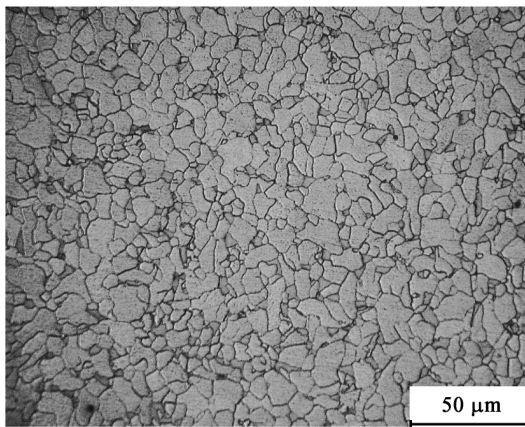
(a) 原始板材



(b) 500℃快冷



(c) 600℃快冷



(d) 700℃快冷

图1 实验钢原始组织和经不同温度回火快冷处理后的组织照片

Fig. 1 The microstructure before(a) and after temper - rapid cooling at different temperatures(b~d) for testing steels

由表1可见,随回火温度的升高,水冷后钢的强度升高,延伸率降低,这是典型的析出强化特征。500℃时,处理前后钢的力学性能相当;600℃回火快冷处理后,钢的屈服强度在成品板的基础上增加

了66MPa,并保持较高的延伸率(29%);700℃时,钢的强度最高,延伸率下降较多。

从图1金相照片看,500~700℃亚调质处理钢与原始钢均为铁素体+珠光体组织,晶粒度差不多,

约为 8 μm 左右。在实验中,ZJ330 钢的终轧温度为 890 ℃,未发现形变诱导相变对强化的作用,回火快冷处理前后,晶粒尺寸没有超细化,处理过程没有细化,但  $\sigma_s$  大幅度提高,可以认为强度的增加不是由于晶粒细化的作用,而是由于  $A_1$  温度以下纳米铁碳析出物的析出强化作用。

按 Hall - Petch 公式,  $\sigma_s = \sigma_{s0} + k_d d^{-1/2}$ , 晶粒尺寸  $d$  从常规工艺的 20 μm 细化到 CSP 工艺的 7 ~ 10 μm,  $\sigma_s$  因晶粒细化而增加的量约为 40 ~ 80 MPa。

实验条件下,600 ℃ 保温时,ZJ330 钢在原保温温度以下析出的铁碳析出物颗粒溶解,再冷却时,由于冷却速度比原薄板坯连铸连轧过程相应阶段(卷取后冷却)更快,重新析出的纳米颗粒尺寸更小,使强度升高;随回火温度的升高,溶解的碳越多,再次快冷时,除尺寸更小外,纳米铁碳析出物的体积分数可能更大,强度也更高。

对用电炉 - CSP 工艺生产的 SPA - H 集装箱板进行 600 ℃ 的回火快冷处理也得到同样规律<sup>[7]</sup>。

表 2 目前国内外用常规热连轧工艺生产的冷轧基板的碳含量及力学性能

Table 2 Carbon contents and mechanical properties of basal plate for cold rolling produced by traditional hot continuous rolling technology in domestic and overseas

级别	钢种	碳含量/%	$\sigma_s$ /MPa	$\sigma_s/\sigma_b$	$\delta$ /%
CQ	SPHC	0.040 ~ 0.045	260 ~ 300	0.72 ~ 0.82	35 ~ 41
DQ	08Al	0.040	250 ~ 290	0.70 ~ 0.80	37 ~ 43
DDQ	03Al	0.020 ~ 0.030	240 ~ 280	0.68 ~ 0.78	39 ~ 45
IF	无间隙原子	< 0.0050	120 ~ 160	< 0.68	> 45

实践表明,通过回火快冷,控制钢中碳的析出,可以提高钢的强度,由此可以考虑从控制钢中碳析出的过程出发,尝试通过回火缓冷来降低钢的强度。为此进行了 ZJ330 钢的回火缓冷试验,试验过程中采用了两种方案,一是研究  $A_1$  附近温度回火缓冷的加热温度对钢力学性能的影响;二是研究不同冷却方式的作用。结果列于表 3、图 2、图 3。

表 3  $A_1$  附近温度回火缓冷对 ZJ330 钢力学性能的影响

Table 3 Effect of temper - slow cooling around  $A_1$  temperature on mechanical properties of ZJ330 steel

处理工艺	温度/℃	力学性能			
		$\sigma_s$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_s/\sigma_b$	$\delta$ /%
X °C 加热保温 20 min, 炉冷至室温	600	322	397	0.81	43
	700	310	370	0.83	46
	760	265	335	0.79	51
	800	225	310	0.72	50
800 °C 加热, 保温 20 min, 炉冷至 Y °C 水冷至室温	700	305	400	0.76	34
	600	250	360	0.69	35
	500	245	345	0.71	36
	400	245	340	0.72	40

上述结果表明:薄板坯连铸连轧热轧板的强度仍可进一步提高,可以通过改进工艺与设备来实现。

### 3 铁素体 + 珠光体类型钢的软化

薄板坯连铸连轧钢板具有强度高的特点,这给冷轧基板的生产带来了一定的困难。我国的薄板坯连铸连轧厂家,除珠钢全部生产热轧板材以外,其他厂家产品大纲中均有相当数量的冷轧板,为此,经济地生产冷轧基板成为各厂亟待解决的问题。

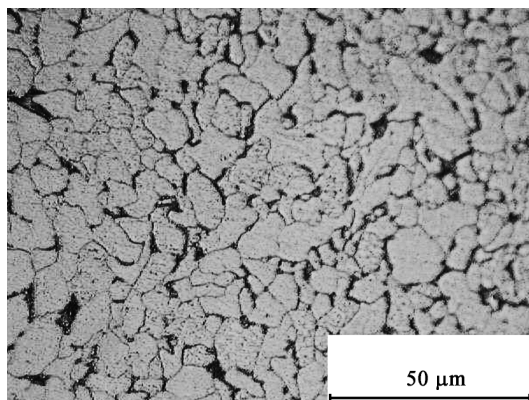
有效的解决办法是降低钢的碳含量,生产一些碳含量小于 0.04 % 的钢种,包括碳含量只有百万分之几十的 IF 钢,进行铁素体轧制。为此要求在薄板坯连铸连轧流程中设置真空精炼工序,例如 VD 或 RH 工序。文献[6]列出了目前国内外用常规热连轧工艺生产的冷轧基板的碳含量及力学性能(见表 2)。如果能用碳含量为 0.06 % 左右的钢种生产  $\sigma_s$  小于 275 MPa 的冷轧基板,可以显著地简化工艺、降低生产成本。

由表 3 可知:随回火温度的升高, $\sigma_s$  降低, $\sigma_b$  降低,延伸率增加,600 ~ 800 ℃ 保温炉冷,可降低  $\sigma_s$  并保持较低的屈强比和较高的延伸率;600 ℃ 以下水冷对力学性能的影响不大。因此,600 ℃ 是一个很重要的温度,在这温度附近,碳原子扩散速度较大,对碳析出过程起促进作用。

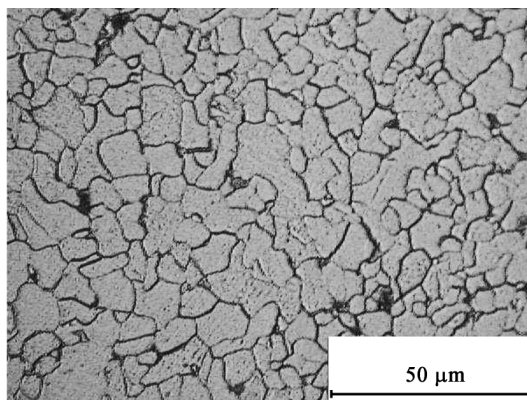
由图 3 可见,600 ℃ 与 700 ℃ 处于  $A_1$  温度以下,回火缓冷对钢的组织及晶粒度影响不大,但强度与原始钢相较有所降低;760 ℃ 与 800 ℃ 处于  $A_1$  温度以上,钢的平衡组织为奥氏体 + 铁素体,即处于两相区。在这一温度区间降温时,在奥氏体中有先共析铁素体析出,这些铁素体可能尺寸细小,分布在奥氏体晶界。800 ℃ 保温时,晶粒长大。缓冷时,当温度低于  $A_{11}$ ,在奥氏体中要析出碳,它们或与先共析铁素体在晶界上形成珠光体,或析出纳米碳化物。然后,奥氏体相变为铁素体(有的先共析铁素体也可能与由奥氏体相变而来的铁素体合并,或作为奥氏体 - 铁素体相变的核心)。最后得到铁素体晶粒

较大(12  $\mu\text{m}$ )、珠光体尺寸也较大的铁素体 + 珠光体组织(见图 2(d))。760  $^{\circ}\text{C}$  加热时,部分先共析铁

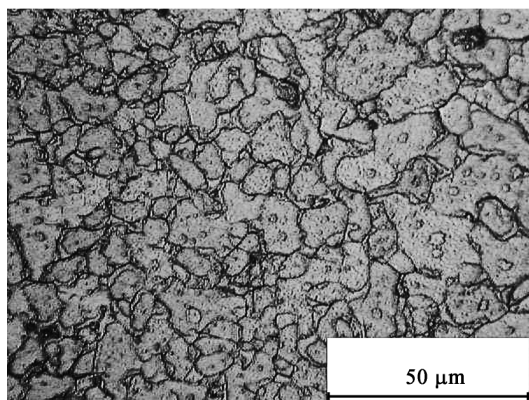
素体可能来不及与由奥氏体相变而来的铁素体合并而长大,故得到如图 2(c) 所示的组织。



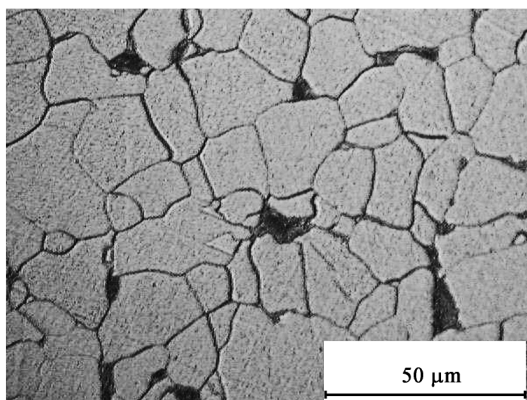
(a) 600  $^{\circ}\text{C}$  缓冷



(b) 700  $^{\circ}\text{C}$  缓冷



(c) 760  $^{\circ}\text{C}$  缓冷



(d) 800  $^{\circ}\text{C}$  缓冷

图 2 ZJ330 钢在不同温度下回火缓冷的金相组织

Fig. 2 The microstructure after temper - slow cooling at different temperatures for ZJ330 steel

800  $^{\circ}\text{C}$  加热,采用不同的缓冷制度时,晶粒尺寸均较大。缓冷至 600  $^{\circ}\text{C}$  以下水冷与缓冷至室温的强度差别不大,但均处于较低的水平。

从以上实验结果可知,800 ~ 600  $^{\circ}\text{C}$  缓冷可以增大铁素体晶粒的尺寸,但从晶粒粗化的幅度(从 8  $\mu\text{m}$  粗化到 12  $\mu\text{m}$ )看,晶粒粗化对降低钢的屈服强度的贡献只有几十兆帕;而回火缓冷可以使 ZJ330 钢的  $\sigma_s$  从 344 MPa 降至 225 MPa,显然软化不只是由于晶粒粗化而引起的,更重要的是与钢中的纳米铁碳析出物的溶解、再析出、粗化等有关。在 600  $^{\circ}\text{C}$  以上温度加热保温过程中,钢中原加热温度以下析出的碳化物溶解、再冷却后,重新析出。由于缓冷,析出物长大,故强度降低,塑性提高。

根据以上研究结果,可以通过改进工艺来改善含碳 0.06 % 左右的冷轧板的生产状况。

## 4 讨论

### 4.1 铁素体轧制

铁素体轧制是指粗轧在奥氏体区完成,然后通过精轧机和粗轧机之间的超快速冷却系统,使带钢温度在进入第一架精轧机前降到  $A_{c3}$  以下,进行精轧。

只有碳含量为百万分之几十的 IF 钢,精轧才可能完全在铁素体区进行。碳含量为 0.03 % 左右的低碳钢在  $A_{c3}$  温度以下精轧时,由于碳含量低,组织中铁素体分数大,精轧基本上具有铁素体轧制特征,但实际上是在奥氏体 + 铁素体两相区轧制的。铁素体轧制时室温钢的屈服强度较低,可能主要是由于碳含量低、晶粒较粗、析出强化的份额较小,钢的软化从另一角度也证明低碳钢具有综合强化机制。

## 4.2 对将 HSLC 钢作为新型建筑用钢的可行性分析

建筑用钢是一种广泛使用的钢种。现代建筑,特别是高层建筑,越来越多地采用钢结构。珠钢和

北京科技大学开发的 HSLC 钢具有较高的强度和良好的韧性,不添加微合金元素,成本较低,钢中含碳低,具有较好的焊接性能,笔者曾建议将其作为一种新型的建筑用钢<sup>[3,7]</sup>。

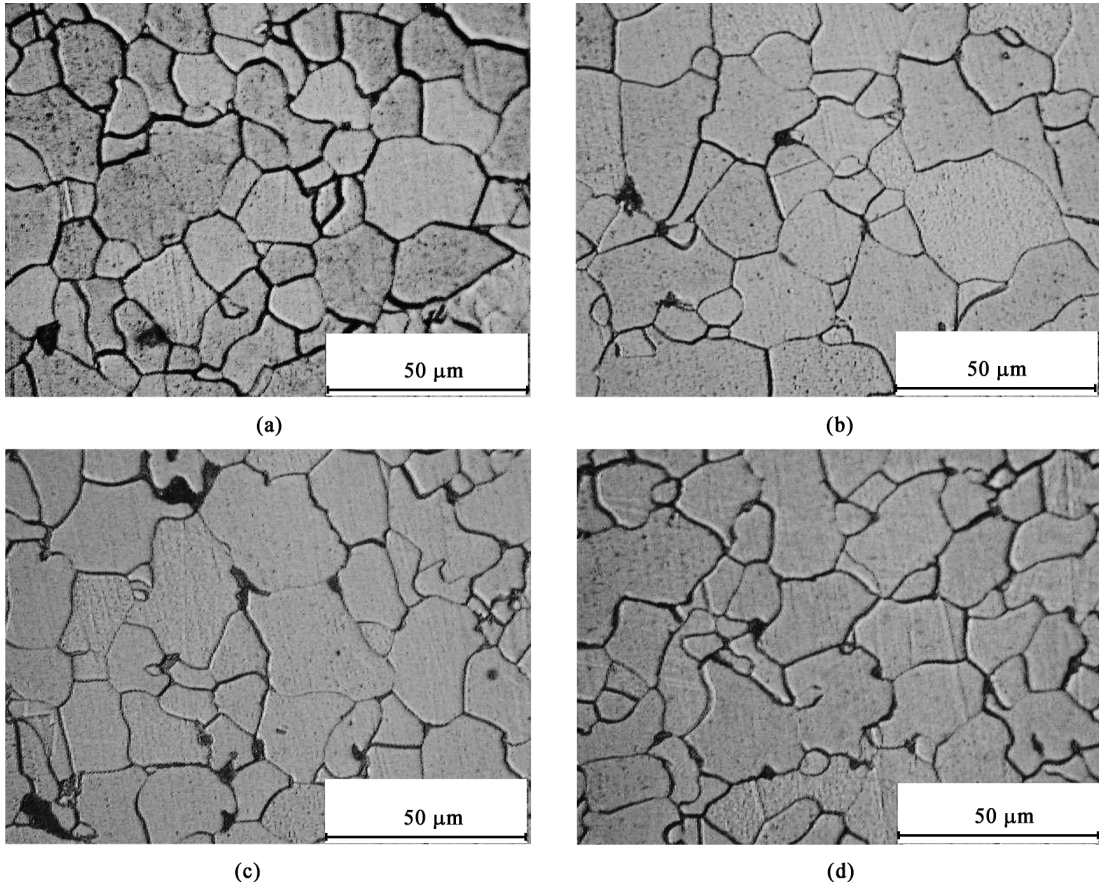


图3 ZJ330 钢在不同冷却方式下的金相组织

Fig. 3 The microstructure after different cooling methods for ZJ330 steel

为了研究 HSLC 钢作为新型建筑用钢的耐火性,曾对 ZJ330 钢进行了不同温度的拉伸实验,结果(见表4)表明 ZJ330 钢的抗拉强度在 500 °C 时为 245 MPa,仍具有较高的强度(耐火钢要求 600 °C 时屈服点大于 217 MPa)。

表4 ZJ330 的不同温度时的拉伸实验结果

Table 4 Results of tensile experiment at different temperatures of ZJ330 steel

温度/°C	200	300	400	500	600
抗拉强度/MPa	500	465	345	245	130

研究认为,在 ZJ330 钢成分的基础上增加 Mn 含量(例如  $w(C) < 0.06\%$ ,  $w(Mn) > 1.2\%$ )可能会进一步提高钢的强度和韧性(例如达到 ZJ510 钢的水平)。为提高其耐候性,可向钢中增加适量合金元素,HSLC 钢可能是一种经济有效的有发展前

景的新型建筑用钢。薄规格热轧板可考虑制作屋顶材料,特别是开启式屋顶。长型材可考虑做碳素钢 III 级钢筋。

## 4.3 关于超细晶钢

21 世纪,钢铁仍是占主导地位的结构材料。经济建设和社会发展要求大幅度提高钢的强韧性,提高钢的质量,降低生产成本,发展新的品种。按照可持续发展的要求,开发节约资源和能源、与环境友好的基础材料已成为从事钢铁材料研究和生产单位的历史任务。

近年来,各国政府和钢铁材料界对开发先进钢铁材料给予了高度的重视。1997 年到 1998 年,日本、中国和韩国在各自政府的支持下,相继开展了研制新型钢铁材料的工作,日本称之为“超级钢”,我国称之为“新一代钢铁材料”,韩国称之为“高性能

结构钢”,2001年欧洲也启动了相应的项目。我国与国外不同,在“新一代钢铁材料的重大基础研究”中包括对使用广泛的400 MPa级碳素钢的研究,研究目标是制造400 MPa级屈服强度热轧板卷和以Ⅲ级钢筋为标准的长型材。这两种产品的组织为铁素体+珠光体,现有强度 $\sigma_s$ 约200 MPa,目标强度 $\sigma_s$ 约400 MPa<sup>[1]</sup>。

为了实现铁素体+珠光体类型钢的强度翻番或升级,我国许多学者做了大量的工作,他们各自在不同的理论指导下,分别进行了深入细致的研究。这些工作大都是根据Hall-Petch公式,通过形变诱导(强化)铁素体相变(DIFT或DEFT)进行的<sup>[1]</sup>。

在20世纪50年代,Hall和Petch仔细测试了室温和液氮温度下碳含量为0.036%~0.155%的低碳钢的断裂强度,提出铁素体+珠光体类型低碳钢中铁素体晶粒尺寸与断裂强度的关系<sup>[8]</sup>:

$$\sigma_c = \sigma_{c0} + k_y d^{-1/2} \quad (1)$$

Petch用位错理论推导出了这一关于零塑性变形的公式,并预测 $\sigma_s$ 与之类似,有:

$$\sigma_s = \sigma_{s0} + k_y d^{-1/2} \quad (2)$$

Petch还研究了晶粒尺寸对钢韧性的影响,并指出,对钢的韧脆转变温度有<sup>[9]</sup>:

$$T_c = A - B d^{-1/2} \quad (3)$$

其中, $T_c$ 为韧脆转变温度; $d$ 为晶粒平均直径; $A, B$ 为常数。

从Hall-Petch公式可知,细晶强化既可提高钢的强度,又可提高钢的韧性。因此,Hall-Petch公式成为了发展超细晶钢的理论基础和指导思想。但如何理解Hall-Petch公式,笔者认为有两点值得注意。

#### (1) Hall-Petch公式的适用范围

对钢这一多晶体,Hall-Petch公式只考虑晶界面积的影响,即把研究对象简化为单晶体,不涉及晶界及晶内析出物对位错运动的影响,对于低碳钢,在铁素体内部未发现纳米析出物的时候(20世纪50年代的生产水平及文献[8]的实验方法决定实验钢中析出物尺寸较大,不起强化作用),假定钢中碳含量、珠光体对钢的强度影响不大,对钢强度起决定作用的只是晶粒尺寸。这种假设是成立的,理论计算与实际相符,几种不同的实验材料屈服强度与铁素体晶粒尺寸的关系处于同一直线上。这时, $\sigma_{c0}$ 约为几十兆帕,代表晶内溶质原子对位错运动的影响,即晶格摩擦力。

70年代以后,为提高钢的强韧性,国外发展了HSLA钢,发现添加的微合金元素V, Nb, Ti等在晶界和晶内形成了大量的纳米微合金元素的碳氮化物 $M(C_xN_y)$ ,它们具有显著的沉淀强化作用,以Hall-Petch公式计算出来的强度理论值显著地低于实际值,但用实际生产数据回归出的屈服强度与铁素体晶粒尺寸的关系仍具有Hall-Petch公式的形式,从而确认了Petch预测的 $\sigma_s = \sigma_{s0} + k_y d^{-1/2}$ 。但此时,该公式只是一个经验公式, $\sigma_{s0}$ 和 $k_y$ 在不同条件下具有不同的值, $\sigma_{s0}$ 代表除细晶强化以外其他强化方式对钢强度的贡献, $k_y$ 代表一定条件下晶粒尺寸对强度的影响程度,与原来公式(1)提出时的物理意义已经有所不同。

Hall-Petch公式提出以后,各国学者对钢铁材料屈服强度的Hall-Petch关系进行了大量的实验研究,提出了不同条件下的不同关系式。根据文献[1,10]的研究,纯铁、超低碳微合金钢、低碳微合金钢的屈服强度与晶粒尺寸有如公式(4)~(6)所示关系,按其可以计算出不同条件下晶粒细化对强度的贡献。

1) 纯铁(晶粒范围92~6.2  $\mu\text{m}$ ):

$$\sigma_s = 92.4 + 23.1 d^{-1/2} \quad (4)$$

若晶粒细化程度为 $d$ 从20  $\mu\text{m}$ 到8  $\mu\text{m}$ ,则 $\Delta\sigma_s = 94.3$  MPa。

2) 超低碳微合金钢(晶粒范围20~1.4  $\mu\text{m}$ ):

$$\sigma_s = 246.1 + 9.3 d^{-1/2} \quad (5)$$

若晶粒细化程度为 $d$ 从20  $\mu\text{m}$ 到2  $\mu\text{m}$ ,则 $\Delta\sigma_s = 142.2$  MPa。

3) 低碳微合金钢(晶粒范围10~1.0  $\mu\text{m}$ ):

$$\sigma_s = 376.4 + 7.0 d^{-1/2} \quad (6)$$

若晶粒细化程度为 $d$ 从10  $\mu\text{m}$ 到1  $\mu\text{m}$ , $\Delta\sigma_s = 151.3$  MPa。

由上述结果可知,晶粒尺寸对HSLA钢屈服强度的影响比纯铁小,表现为 $k_y$ 值小,其他强化方式对HSLA钢的屈服强度的贡献比纯铁大,表现为 $\sigma_{s0}$ 大;在超低碳微合金钢和低碳微合金钢中,晶粒细化导致强度的增量小于 $\sigma_{s0}$ ,表明在一定的条件下,晶粒细化的贡献不是影响钢强度的主要因素。

(2) 应该区别晶粒强化和晶粒细化强化的贡献

根据文献[11]提出的公式( $\sigma_s = 88 + 37(\% \text{Mn}) + 83(\% \text{Si}) + 2900(\% \text{N}_{\text{free}}) + 15.1 d_a^{(-1/2)} + \sigma_d + \sigma_{\text{ab}}$ ,  $\sigma_{d_a} = 15.1 d_a^{(-1/2)}$ ),可得图4。



由图4可见,平均尺寸为5  $\mu\text{m}$  的细晶粒对钢屈服强度的贡献约为220 MPa,而铁素体晶粒从20  $\mu\text{m}$  细化到5  $\mu\text{m}$  导致的晶粒细化对强度的贡献约为110 MPa。

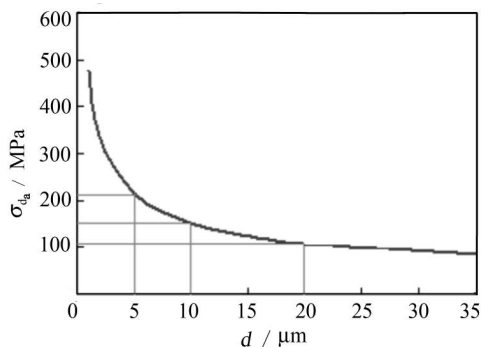


图4 晶粒尺寸与强度的关系

Fig. 4 Relationship of yield strength and grains size

对于400 MPa级的铁素体+珠光体类型碳素钢,按Hall-Petch公式,若 $\sigma_{s0} = 100 \text{ MPa}$ ,则必须 $d \leq 3.4 \mu\text{m}$ 。

早在1989年以前,文献[1]曾指出:在大生产条件下要得到1  $\mu\text{m}$  的铁素体晶粒几乎是不可能的,在当时的条件下要得到低于5  $\mu\text{m}$  的铁素体晶粒在经济上是不合算的<sup>[12]</sup>。在目前的工业生产条件下,使晶粒细化到5  $\mu\text{m}$  以下仍较困难,在经济上也受限制,但在薄板坯连铸连轧过程中,铁素体晶粒尺寸为5~10  $\mu\text{m}$ ,ZJ330低碳钢的屈服强度可达400 MPa级,ZJ510钢达到450 MPa级,可以认为400 MPa级的铁素体+珠光体类型低碳钢的高强度主要不是由于超细晶的影响,这类不含微合金元素的碳素钢和低合金钢具有综合强化机制。

看来,对于数以亿吨计的400 MPa级的碳素钢热轧板卷及钢筋,用追求超细晶的办法来指导生产的方式,值得商榷。

## 5 结语

1)应重视 $A_1$ 以下碳的析出对钢组织性能的影响,600  $^{\circ}\text{C}$ 时,对低碳高强度铁素体+珠光体类型钢的回火快冷处理可以进一步提高钢的强度,HSLC钢ZJ330的强度尚有提高空间,可通过改进工艺及设备条件来实现;

2)800~600  $^{\circ}\text{C}$ 的回火缓冷,可以降低ZJ330的强度水平, $\sigma_s$ 从344 MPa降至225 MPa,可以满足生产冷轧板的要求,在生产中可通过改进工艺及设备条件来实现;

3)目前我国铁素体轧制,实质上是在奥氏体+铁素体区轧制,软化的原因可能是低碳导致的;

4) $w(\text{C}) < 0.06\%$ , $w(\text{Mn}) > 1.2\%$ ,O,S,N含量低的HSLC钢可能是一种经济有效的有发展前景的新型建筑用钢;

5)对于数以亿吨计的400 MPa级的碳素钢热轧板卷及钢筋,用追求超细晶的办法来指导生产是值得商榷的,低碳钢的强化与软化从正反两方面证明400 MPa级铁素体+珠光体类型低碳钢具有包括沉淀析出强化作用的综合强化机制。

## 参考文献

- [1] 翁宇庆. 超细晶钢-钢的组织细化理论与控制技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2003
- [2] Liu Delu, Fu Jie, Kang Yonglin, et al. Oxide and sulfide dispersive precipitation and effects on microstructure and properties of low carbon steels[J]. J. Mat. Sci. Tech., 2002, 18(1): 7-9
- [3] 傅杰. 新一代低碳钢——HSLC钢[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(1): 82-90
- [4] 傅杰,康永林,柳得檀,等. CSP工艺生产低碳钢中的纳米碳化物及其对钢的强化作用[J]. 北京科技大学学报, 2003, 25(4): 328-331
- [5] 傅杰,吴华杰,刘阳春,等. HSLC和HSLA钢中的纳米铁碳析出物[J]. 中国科学E辑, 2007, 37(1): 43-52
- [6] 康永林,傅杰,柳得檀,等. 薄板坯连铸连轧钢的组织性能控制[M]. 北京:冶金工业出版社,2006
- [7] 傅杰,吴华杰,刘阳春. 400 MPa级铁素体+珠光体类型钢组织性能的综合控制[J]. 钢铁研究学报(2006北京国际材料周钢铁分会论文集), 2006, 18(2): 5-11
- [8] Petch N J. The cleavage strength of polycrystals[J]. Journal of the Iron and Steel Institute, 1953, 174: 25-28
- [9] Petch N J. The ductile-brittle transition in the fracture of  $\alpha$ -Iron: I [J]. The Philosophical Magazine. 1958, 3: 1089-1097
- [10] 范建文. 800 MPa级低合金钢超细晶粒钢组织与力学性能的研究[D]. 北京:钢铁研究总院,2001
- [11] 傅杰,康永林,柳得檀,等. 电炉CSP工艺生产HSLC钢的研究与开发[J]. 北京科技大学学报, 2003, 25(5): 449-453
- [12] 雍歧龙,马鸣图,吴宝榕,等. 微合金钢-物理和力学冶金[M]. 北京:机械工业出版社,1989

# Strengthening and Softening of Ferrite + Pearlite Steels Produced by Thin Slab Casting and Rolling

Fu Jie, Wu Huajie, Liu Yangchun

(*University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China*)

[ **Abstract** ] Based on the principle of the integrated strengthening of steel, the strengthening and the softening of HSLC steel have been studied by controlling the precipitation of carbon in steel around  $A_1$  temperature. The results show that strength of HSLC steel produced by TSCR can be further increased. By using temper – slow cooling,  $\sigma_s$  of HSLC steel(ZJ330) produced by TSCR can be decreased from 344 MPa to 225 MPa to meet the requirement of producing basal plate for cold rolling. Problems about ferrite rolling, ultra fine grain steel and a possible new type building materials have been discussed.

[ **Key words** ] HSLC steel; strengthening ; softening; basal plate for cold rolling; super steel