

文章编号: 1004-0609(2004)S1-0082-09

新一代低碳钢——HSLC 钢^①

傅 杰

(北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘 要: 在整个钢生产过程中, 综合考虑了钢的冶金质量控制和轧制工艺控制, 实现了低碳钢晶粒细化和第二相析出综合强化, 使普通成分的低碳钢或不添加微合金元素 V, Nb 的低 C-Mn 钢的屈服强度达到了 400~500 MPa, 开发了新一代低碳钢——HSLC 钢。介绍了 HSLC 钢的力学性能及其冶金质量控制, 主要为 HSLC 钢与 HSLA 钢的力学性能对比; CSP 条件下低碳钢中碳的控制; 电炉钢低氮控制理论与控制技术; 夹杂物超细化—纳米硫化物和氧化物固态析出的成分设计原则和控制技术以及钢中铝的作用与控制。并对低碳钢中纳米铁碳化物的析出及其对钢的强化作用、转炉薄板坯连铸连轧生产 HSLC 钢以及 HSLC 钢用于建筑钢筋生产的可能性进行了分析讨论, 指出 HSLC 钢具有广阔的发展前景。

关键词: 低碳高强度钢; HSLC; 成分控制; 纯洁度控制; 析出强化; 综合强化

New generation low carbon steel—HSLC steel

FU Jie

(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The metallurgical quality control and rolling technology control of steel were considered comprehensively during the all production process, and the integrated strengthening of grain refinement and the second phase precipitation was realized in low carbon steel which result in the yield strength of low carbon steel and low C-Mn steel without microalloy element V or Nb addition reach 400~500 MPa. The new generation low carbon steel—high strength low carbon(HSLC) steel was developed in China. The mechanical properties and metallurgical quality control of HSLC steel including the mechanical property comparison between HSLC steel and HSLA steel, control of carbon content in low carbon steel produced by EAF-CSP technology, low nitrogen control theory and technology of EAF steel, ultra refinement of inclusions, the chemistry composition design principle and control technology of nano-scale sulfide and oxide precipitated in solid phase, effect and control of aluminum were introduced. The precipitation of nano-scale iron carbide in low carbon steel and its strengthening effect, the possibility of HSLC steel production using BOF-TSCR process and reinbar production using HSLC steel were analyzed and discussed. It was pointed out that the HSLC steel had a broad development prospects.

Key words: high strength low carbon steel; HSLC; chemistry composition control; cleanness control; precipitation strengthening; integrated strengthening;

我国目前广泛应用的屈服强度为 195~345 MPa 的低碳钢或低合金钢板材和长材的年产量超过 1 亿吨, 使这一类钢材的屈服强度大于 400 MPa 对我国国民经济建设和钢铁工业的可持续发展以及提高国际竞争力具有重要意义。

广州珠江钢铁有限责任公司(以下简称珠钢)建立的电炉-CSP 生产线是我国第一条薄板坯连铸连轧生产线。珠钢与北京科技大学合作, 在普通碳素钢 Q195, Q235 及低 C-Mn 钢 Q345 成分基础上, 研究开发出了低碳高强度(HSLC)钢热轧薄板。

① 作者简介: 傅 杰(1937-), 男, 教授。

通讯作者: 傅 杰, 教授; 电话: 13311572119, 010-82843791

HSLC 钢是一种低 G-Mn 系钢,其特征是不添加微合金元素 V, Nb, Ti, 屈服强度可达到 400~ 500 MPa。

本文介绍了 HSLC 钢的力学性能及其冶金质量控制,对 HSLC 钢的强化机理、转炉薄板坯连铸连轧生产 HSLC 钢以及 HSLC 钢用于建筑钢筋生产的可能性进行了分析讨论。

1 HSLC 钢的力学性能

珠钢用电炉-CSP 工艺生产 HSLC 钢的力学性能如表 1 和图 1 所示^[1~6]。从表和图中可以看出,珠钢生产的 HSLC 钢热轧板屈服强度 σ_s 可达到 400~ 500 MPa(11# 钢强度系平均值,其中 40% 钢卷的屈服强度高于 500 MPa, 70% 钢卷的抗拉强度高于 600 MPa) 并有较高的延伸率,且各向同性。它们不含钒或铌,锰含量较低,但在屈服强度要求不高于 450 MPa 的条件下,其强度水平与国外生产的含钒或铌的 HSLA 钢相当,其屈强比及塑性可通过成分、轧制及冷却工艺来调整。

2 HSLC 钢的冶金质量控制

冶金质量控制包括成分控制、纯洁度控制和铸态组织控制^[7,8]。下面简单介绍 HSLC 钢的冶金质量控制。

2.1 CSP 条件下低碳钢中碳的控制

目前,采用 CSP 工艺难以生产成分落在包晶反应区、即碳含量在 0.07%~ 0.16% 范围的低碳钢。为此,将 HSLC 钢的碳含量控制在 $\leq 0.06\%$ 或 0.17%~ 0.20%。

生产含碳量低于 0.06% 的钢种,要解决 2 个技术难题: 1) 减少电炉出钢后至连铸结束过程中钢液增碳量,珠钢可使这一增碳量低达 0.010% 左右; 2) 防止钢液过氧化。热力学研究结果表明: 在珠钢生产条件下,即 1 600 ℃ 时 [C] 和 [Fe] 选择氧化的临界点为 [C] = 0.035%,也就是说,当 [C] 低于 0.035% 时,先氧化铁后氧化碳,实测的 [C]-[O] 关系曲线示于图 2^[9]。

$$[O] = 0.003\ 2[C]^{-0.944\ 1}$$

(1)

珠钢根据这一原理开发了电炉终点碳控制技术,使每年生产的几十万吨低碳(碳 $\leq 0.06\%$) 钢的电炉终点碳(0.035%~ 0.050%) 的命中率 > 95%。

2.2 电炉钢的低氮控制

钢中自由氮高导致钢的时效性能、冷弯性能、成形性能及焊接性能降低。美国电炉钢氮含量在 10^{-4} 左右,为变害为利,成功地开发出了用 V, Nb, N 微合金化,屈服强度为 310~ 450 MPa 的 HSLA 钢。

珠钢为了降低成本,提高性能/成本比,对钢液脱氮和吸氮动力学进行了深入系统地研究,开发 HSLC 钢时选择了生产低氮电炉钢的路线。HSLC

表 1 用 EAF-CSP 工艺生产的 HSLC 钢与低合金高强度(HSLA) 钢的化学成分及力学性能对比

Sample No.	钢种	厚度/mm	w / %								$d/\mu\text{m}$	σ_s/MPa	σ_b/MPa	$\delta/\%$
			C	Mn	Si	S	V	Nb	Al	N				
1	HSLA	3.0	0.050	0.74		0.007 0	0.049		0.032	0.009 1		378	461	29. 2
2		6.3	0.050	0.76		0.007 0	0.052		0.032	0.008 4		361	461	30. 8
3		4.7	0.050	1.07		0.007 0	0.060		0.032	0.008 3		392	498	26. 8
4		2.1	0.050	0.80		0.007 0	0.052		0.032	0.007 6		393	470	25. 2
5*		6.3	0.055	1.10				0.045		0.009 0		402	486	32. 7
6*												456	547	32. 2
7		7.0	0.074	1.42	0.32	0.001 0		0.038	0.037	0.010 0	8.02	398	498	34. 0
8**	HSLC	2.0~ 6.0	0.050	0.30	0.060	0.004 9			0.02~ 0.04	< 0.005 0	5~ 6	387	433	33. 0
9		6.0	0.060	0.61	0.17	0.006 0			0.015	< 0.005 0	8.22	439	494	31. 5
10		6.0	0.180	0.56	0.21	0.003 0			0.028	< 0.005 0	6.86	437	543	29. 4
11*		6.0	0.170	1.21	0.28	0.004 0			0.024	< 0.005 0	5.68	492	597	27. 8
12*		6.0	0.160	1.22	0.30	0.003 0			0.037	< 0.005 0	7.87	408	566	34. 0

1) * —不同的轧制与冷却工艺; ** —121 炉, 18 000 t 钢的平均值; d —平均晶粒尺寸。
2) Sample No. 1~ 4—数据来源于文献[1]; Sample No. 5~ 6—文献[2]; Sample No. 7—文献[3] 热模拟; sample No. 8~ 12—文献[4]。

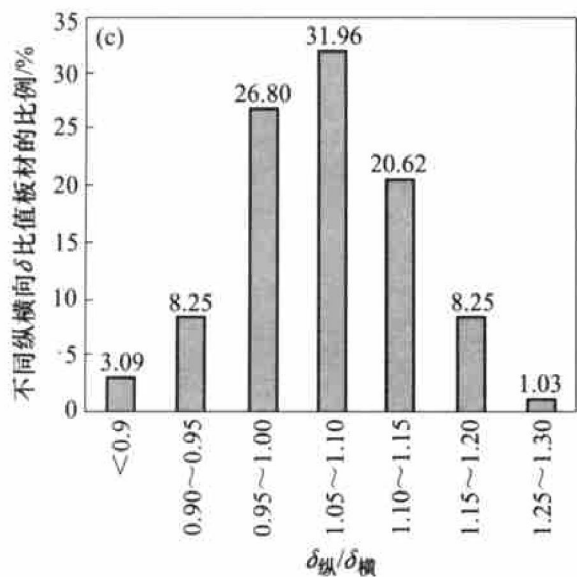
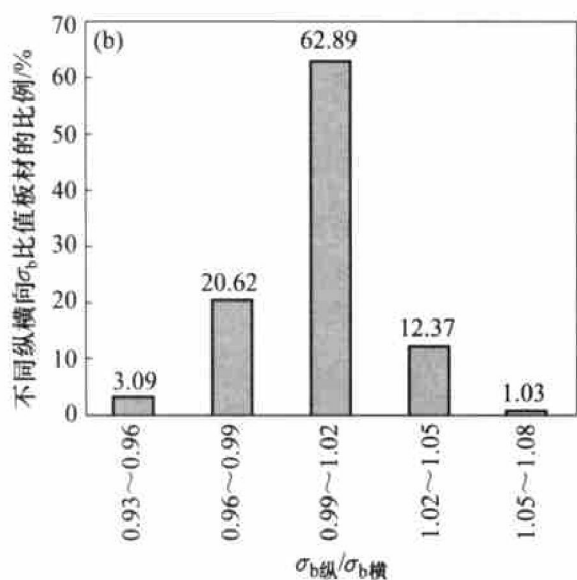
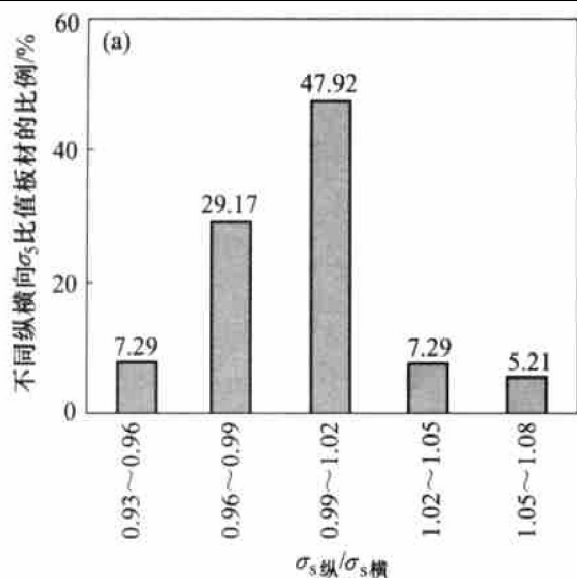


图 1 CSP 工艺生产的 HSLC 钢 ZJ330 板材纵横向 σ_s 、 σ_b 和 δ 比值

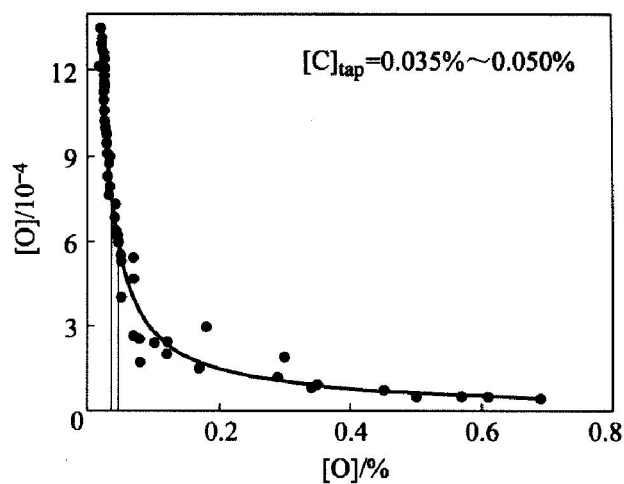


图 2 实测 [C]-[O] 关系曲线
 $([O] = 0.0032[C]^{-0.9441})$

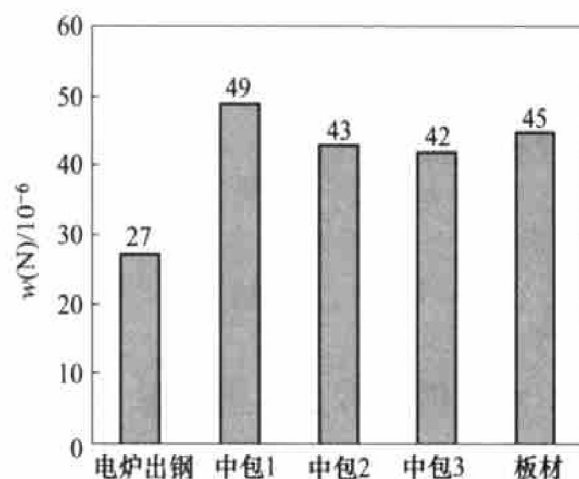


图 3 珠钢电炉- CSP 过程中钢中氮含量的变化

表 2 HSLC 钢 ZJ330 热轧薄板中氮化物的
 化学相分析结果* (质量分数, %)

类型	Al	Ti	V	Cr	Mn	Ni
AIN	0.004 2					
(F _{0.994} Mn _{0.002} Cr _{0.003} Ni _{0.001}) γ (C _{0.979} N _{0.021})				0.002	0.001	0.000 5
(Ti _{0.644} V _{0.135} Nb _{0.044} M _{0.078}) γ (C _{0.200} N _{0.800})		0.001 4	0.000 3			
Σ	0.004 2	0.001 4	0.000 3	0.002	0.001	0.000 5
类型	Mo	Fe	Nb	C	N	
AIN					0.002 2	
(F _{0.994} Mn _{0.002} Cr _{0.003} Ni _{0.001}) γ (C _{0.979} N _{0.021})		0.638		0.450	0.001 1	
(Ti _{0.644} V _{0.135} Nb _{0.044} M _{0.078}) γ (C _{0.200} N _{0.800})	0.000 8		0.000 2	0.000 1	0.000 5	
Σ	0.000 8	0.638	0.000 2	0.045 1	0.003 8	

钢中氮含量 $< 5 \times 10^{-5}$, 自由氮可 $< 1 \times 10^{-5}$, 见图 3 和表 2^[10, 11]。

* 钢中碳含量为 0.054%, 氮含量为 0.004 4% ($w(N)_{\text{free}} = 0.0044\% - 0.0038\% = 0.0006\%$)。

2.3 钢中锰和硫的控制

在普通低碳钢中, 硫以 MnS 夹杂物形式存在, 为有害杂质元素。在 HSLC 钢中, 控制锰、硫浓度积, 使 MnS 热力学开始析出温度低于固相线温度甚至低于 CSP 均热温度 ($1100 \sim 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$), 析出物尺寸 $< 1\text{ }\mu\text{m}$, 有的为纳米级, HSLC 钢是“零硫化物夹杂钢”, 硫成为有利元素。图 4 为钢中 MnS 的稳定性图。由图 4 可见, HSLC 钢 $w(\text{Mn}) \leq 0.3\%$, $w(\text{S}) = 0.005\%$ 时, MnS 的开始析出温度约为 $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 低于均热温度^[4]。

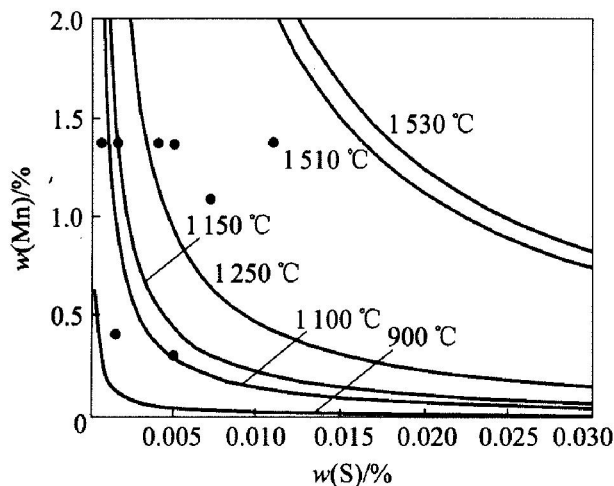


图 4 钢中 MnS 的稳定性曲线

对 ZJ330 (相当于 Q195, $w(\text{C}) \leq 0.06\%$, $w(\text{Mn})$ 为 0.30%) 钢进行扫描电镜、薄晶体和萃取复型试样透射电镜 (TEM) 和 X 射线能谱 (XEDS) 研究, 并进行了化学相分析。文献 [12-14] 研究结果表明: 试样中很难观察到尺寸大于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 硫化物夹杂, 发现钢中存在大量的线度为 $20 \sim 400\text{ nm}$ 硫化物粒子。化学相分析结果表明: 电解粉末中以化合物形式存在的硫含量为 0.0047% , 试验钢中硫含量为 0.0050% , 即钢中的硫主要以硫化物形式存在, 它们可能是 Mn , Ca , Fe , Cu 的硫化物或氧硫化物, 试验条件下主要是 $(\text{Mn}_x\text{Fe}_y)\text{S}$ 。

由图 4 可知, 当钢中锰含量高时, 为保证 MnS 析出温度低于均热温度, $w(\text{S})$ 应降低, 例如, 生产 $w(\text{Mn}) = 0.6\%$ 的 HSLC 钢时, $w(\text{S})$ 应控制在 $\leq 0.0030\%$; 当 $w(\text{Mn})$ 高于 1.2% 时, $w(\text{S})$ 应控制在 $\leq 0.0020\%$ 。由于硫是表面活性元素, 偏聚于晶界, 晶界硫化物的热力学开始析出温度应比图 4 所示温度高一些。

2.4 氧的控制

ZJ330 钢中的氧主要以 2 种形式存在, 一类是氧化物夹杂, 金相观察结果表明, 氧化物夹杂物的尺寸主要为 $2 \sim 5\text{ }\mu\text{m}$, 表 3 是 ZJ330 钢中的氧化物夹杂的成分与数量, 钢中的氧主要是以夹杂物形式

存在; 另一类是氧化物析出物, 其尺寸一般 $< 200\text{ nm}$, 它们主要是铁氧化物、氧硫化物或复杂氧化物, 图 5 为复型试样观察到的氧化物的形貌 (a) 及其 XEDS 谱 (b), 也发现有纳米尺寸的 Al_2O_3 析出物。

表 3 HSLC 钢 ZJ330 热轧薄板中氧化物夹杂化学相分析结果* (质量分数, %)

Al_2O_3	SiO_2	CaO	FeO	MgO
0.001 78	0.002 57	0.000 96	0.000 66	0.000 30
TiO_2	MnO_2	NiO	Cr_2O_3	Σ
0.000 02	0.000 03	0.000 01	0.000 03	0.006 36

* 钢中总氧含量为 0.0030% 。

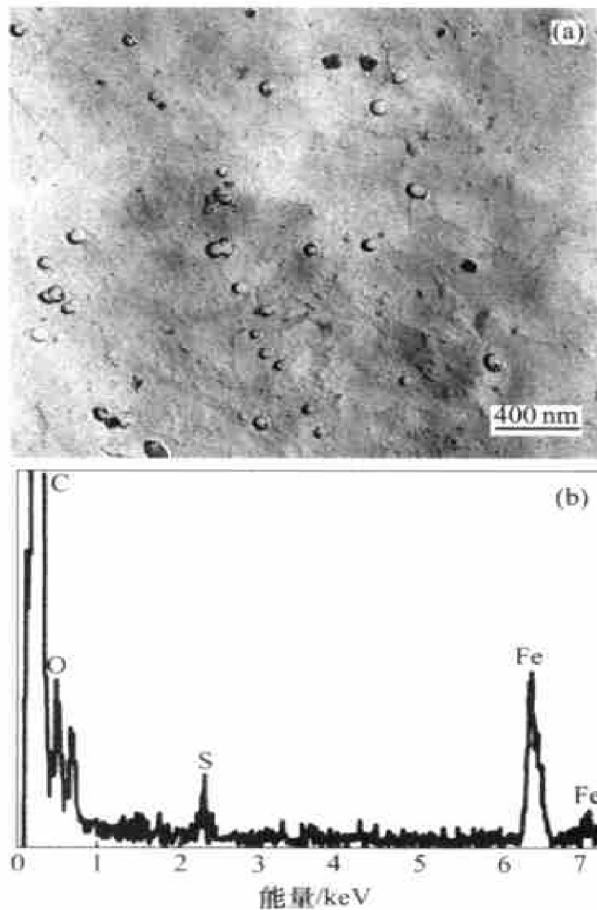


图 5 复型试样观察到的氧化物的形貌及其 XEDS 谱

在氧的控制方面^[12, 13, 15], 在铝镇静钢中, 氧在液态时就会形成氧化物夹杂。通常条件下, 浇铸时钢中存在的溶解氧可能在液固两相区的液相中, 且在原有氧化物夹杂基体上再生成氧化物使夹杂物长大。为发挥氧的有利作用, HSLC 钢采用低碳成分设计, 使钢的固相线温度升高, 液固两相区变窄, 使钢中溶解氧在快冷条件下在 δ 相或 γ 相中弥散析出。为此, 应尽量降低夹杂物总量, 特别是外来大型夹杂物。有关纳米级氧化物的析出规律、其对钢力学性能的影响以及钢中溶解氧的控制有待进一步研究。

2.5 铝的作用与控制

表 4 示出了 HSLC 钢 ZJ330 中铝对钢组织性

表 4 HSLC 钢 ZJ330 中铝对钢组织性能的影响*

炉号	卷号	<i>w</i> / %				σ_s / MPa	σ_b / MPa	δ / %	σ_s / σ_b	冷弯* *	晶粒尺寸 / μm
		Al _T	Al _s	Ti	V						
53660	53890- 1 53890- 2	0. 046 4	0. 043 0	0	0	350. 3 349. 8	420. 9 418. 0	29. 0 31. 7	0. 83 0. 83	合格	10. 86
53680	53900- 1 53900- 2	0. 023 0	0. 019 0	0	0	333. 0 344. 0	400. 0 406. 0	34. 0 29. 0	0. 83 0. 85	合格	9. 84
53670	53911- 1 53911- 2	0. 019 8	0. 016 0	0. 001	0	348. 5 356. 5	413. 3 420. 1	30. 9 30. 3	0. 84 0. 85	合格	11. 92
53690	53921- 1 53921- 2	0. 020 0	0. 016 0	0	0. 001	360. 0 371. 1	404. 4 422. 4	28. 6 31. 7	0. 89 0. 88	合格	8. 89
53700	53931- 1 53931- 2	0. 013 0	0. 008 0	0	0	362. 8 364. 9	423. 7 424. 4	28. 8 29. 8	0. 86 0. 86	合格	8. 75
53710	53941- 1 53941- 2	0. 005 5	0. 004 7	0. 001	0	342. 0 348. 0	403. 0 404. 0	26. 0 29. 0	0. 85 0. 86	合格	9. 78

* 1—纵向, 2—横向; * *: $d=1.5a$, 180° 。

能的影响, 由表可见, 钢中酸溶铝在 0. 043 0% ~ 0. 004 7% 范围内, 热轧板材的晶粒度及力学性能差别不大。有关铝在 HSLC 钢中的作用及最佳含量的控制有待进一步研究。铝的作用可能与降低钢中自由氮含量和起沉淀强化作用有关。

3 HSLC 钢强化机理的初步探讨

如前所述, HSLC 钢的强度与 HSLA 钢的强度水平相当。初步研究结果表明^[4, 15~22]: 其强化机制与 HSLA 钢类似, 包括铁素体细晶强化、固溶强化、沉淀强化、珠光体强化及位错亚结构强化, 与 HSLA 钢的差别在于细化晶粒和起沉淀强化的弥散析出粒子种类和体积分数不同。

1) 细晶强化

由于铸坯薄、拉速快、冷却速度高、偏析小以及奥氏体再结晶, 使 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变前奥氏体晶粒细小; 层流冷却过程中, 冷却速度快, 过冷度大, 铁素体在奥氏体晶界和晶粒内部大量形核, 最终导致组织明显细化, HSLC 钢的铁素体晶粒尺寸通常为 4~10 μm ^[16]。尺寸 < 1 μm 的硫化物粒子的析出也可能促进细晶强化。图 6、表 5 和图 7 分别为实验室冶炼的 Q345 钢中硫含量对钢的硫化物尺寸、晶粒尺寸和强度的影响^[15]。

表 5 晶粒尺寸与硫含量的关系

序号	<i>w</i> (S) / %	晶粒尺寸 / μm
1	0. 001	8. 6
2	0. 002	9. 0
3	0. 004	9. 8
4	0. 005	11. 5
5	0. 011	13. 4

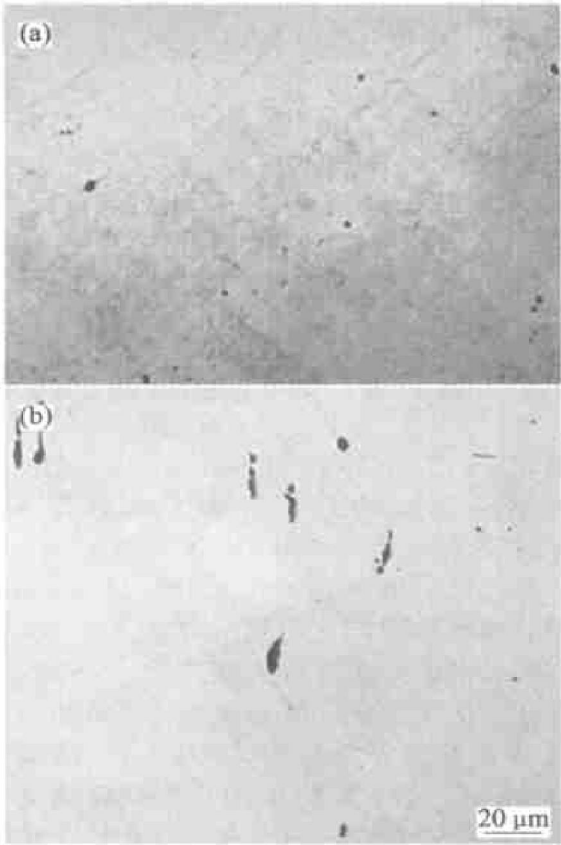


图 6 硫含量对钢中硫化物尺寸的影响

(a) —硫含量为 0. 001%; (b) —硫含量为 0. 011%

由表 5, 图 4 和图 7 可见, 随硫含量的减少, MnS 析出温度降低, 晶粒尺寸变小, 屈服强度升高。这应与低硫条件下可能析出尺寸 < 1 μm 的硫化物具有细化晶粒的作用有关。

2) 沉淀强化

用化学相分析及 X 射线小角散射法对 HSLC 钢电解粉末的组成及粒度分布进行了研究。图 8 和图 9 所示分别为 ZJ330 和 ZJ550(w (C) 为 0. 18%, w (Mn) 为 1. 21%) 的电解粉末粒度分布直方图, 表 6 示出了 HSLC 钢 ZJ330 成品板、轧卡件及连铸坯

表 6 小于 18 nm 颗粒的质量分数(%)

实验材料	电解粉末总量	试样中不同尺寸颗粒比例*				< 18 nm 的颗粒
		1~ 5 nm	5~ 10 nm	10~ 18 nm	< 18 nm	
ZJ330 热轧板	0.888	0.25/ 1.0	0.53/ 2.7	0.28/ 2.2	- / 5.9	0.052
ZJ550 热轧板	2.278	0.21/ 0.8	0.46/ 2.3	0.11/ 0.9	- / 4.0	0.091
ZJ330 铸坯	0.749	0.30/ 1.2	0.65/ 3.7	0.47/ 3.7	- / 8.2	0.061
ZJ330 轧卡件	0.755	0.47/ 1.9	0.99/ 4.9	0.82/ 6.6	- / 13.4	0.101

* 一分子为 $f(D)$, %/nm; 分母为不同尺寸颗粒质量分数占整个颗粒质量分数的比例。

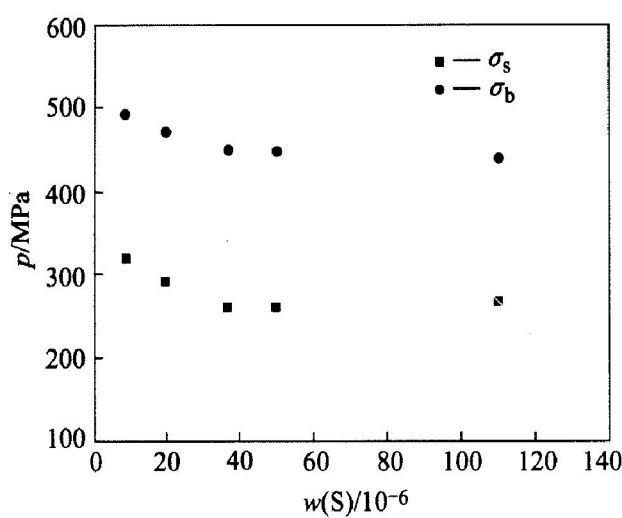


图 7 硫含量对钢板试样强度的影响^[15]

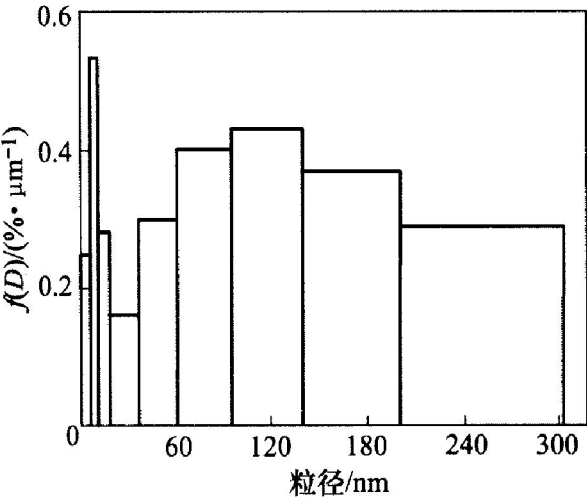


图 8 ZJ330 电解粉末粒度分布直方图

和 ZJ550 成品板中弥散析出的尺寸 < 18 nm 的第二相粒子质量分数。研究结果表明^[18, 19] 纳米粒子主要为铁碳化物及 AlN。其质量分数为 0.052% ~ 0.101%, 比从文献[3]数据获得的 HSLA 钢中尺寸小于 18 nm 的 $M(C_xN_y)$ 质量分数(0.015%) 大很多, 应能起沉淀强化作用。图 10 和图 11 分别为铁碳化物及 AlN 的透射电镜照片。

3) 固溶强化

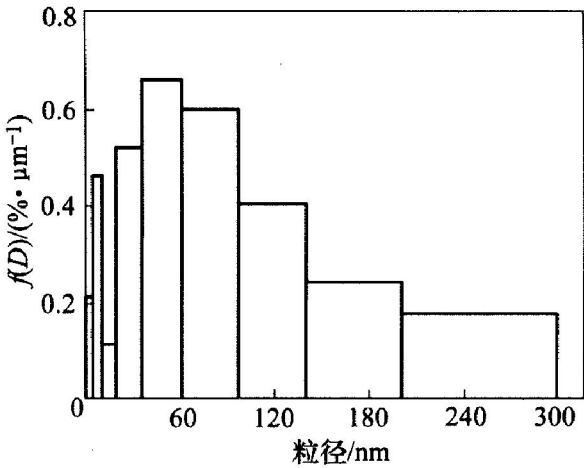


图 9 ZJ550 电解粉末粒度分布直方图

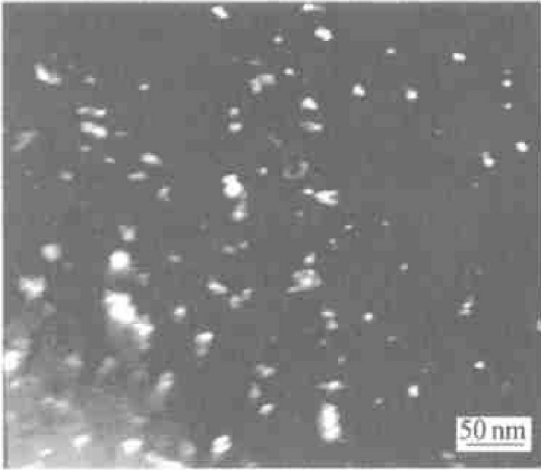


图 10 低碳钢中弥散析出颗粒的透射电镜薄膜试样暗场像

HSLC 钢中 $w(Mn)$, $w(Si)$ 和自由氮 $w(N)_{free}$ 起固溶强化作用。屈服强度随 $w(Mn)$, $w(Si)$ 及 $w(N)_{free}$ 的增加而增加。

4) 不同强化机制对 HSLC 钢屈服强度的贡献
参考 HSLA 钢的经验公式, HSLC 钢的屈服强度可以表达为:

$$\sigma_s = 88 + 37w(Mn) + 83w(Si) + 2900w(N)_{free} + 15.1d_a^{-0.5} + \sigma_P + \sigma_d + \sigma_{db} \tag{2}$$

式中 $w(N)_{free}$ 为钢中自由氮的含量; d_a 为晶粒尺寸; σ_P 为珠光体对强度的贡献; σ_d 为第二相粒子

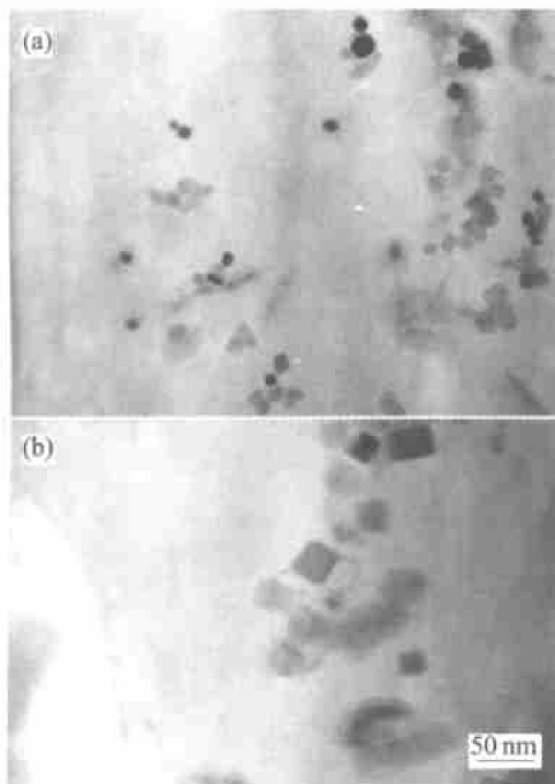


图 11 电解粉末中 AlN 粒子的 TEM 照片
(a) 一尺寸较小的粒子; (b) 一尺寸较大的粒子

的弥散沉淀对强度的贡献; σ_{db} 为位错亚结构对强度的贡献。

表 7 中列出了珠钢用 CSP 工艺生产的 HSLC 钢的 σ_s 及其影响因素, 由表可见, 细晶强化对 σ_s 的贡献为 150~200 MPa; 沉淀强化等对 HSLC 钢的强度也有着相当大的贡献, 为 100~150 MPa, 其中以 σ_d 为主。根据文献[22], Ashby-Orowan 修正模型可以表示为

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

式中 σ_d 为弥散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 80.26×10^3 MPa; b 为柏氏矢量, 2.48×10^{-4} μm ; f 为第二相粒子的体积分数。

表 7 珠钢 CSP 工艺生产 HSLC 钢的强度

序号	$w(\text{C})/\%$	$w(\text{Si})/\%$	$w(\text{Mn})/\%$	σ_s/MPa	$d_s/\mu\text{m}$	$15.1d_s^{-0.5}$	$(\sigma_p + \sigma_d + \sigma_{db})/\text{MPa}$
1	≤ 0.06	≤ 0.1	~ 0.3	350	~ 10	~ 150	~ 100
2	≤ 0.06	≤ 0.1	~ 0.3	390~400	5~6	~ 200	~ 100
3	0.06	0.17	0.61	439	8.22	166	152
4	0.18	0.21	0.56	437	6.86	182	128
5	0.18	0.28	1.21	492	5.68	200	140

对于铁-铁的碳化物系统:

$$f = \frac{\rho(\text{Fe})}{\rho(\text{C})} \quad (4)$$

式中 $\rho(\text{Fe})$, $\rho(\text{C})$ 分别为 Fe 和 C 的密度; $\rho(\text{Fe})/\rho(\text{C}) = 1/0.94$ 。

对表 7 中 $w(\text{C}) \leq 0.06\%$, $w(\text{Mn}) = 0.3\%$ 的 HSLC 钢, $r = 5 \times 10^{-3}$ μm , $f = 0.052\%/0.94 = 0.055\%$, $\sigma_d = 88.1$ MPa; $w(\text{C}) = 0.18\%$, $w(\text{Mn}) = 1.21\%$ 的 HSLC 钢, $r = 5 \times 10^{-3}$ μm , $f = 0.091\%/0.94 = 0.097\%$, $\sigma_d = 117.0$ MPa。

4 HSLC 钢的发展前景

珠钢自 2001 年 1 月至 2003 年 12 月共生产销售了 ZJ330、ZJ400 ($w(\text{C}) = 0.17\% \sim 0.18\%$, $w(\text{Mn}) = 0.3\%$), ZJ510L 和 ZJ550 等 HSLC 钢板约 180 万 t, 形成了年产 80~100 万 t HSLC 钢的生产能力, 成为国内外率先生产 HSLC 钢最多的企业, 并根据上述冶金质量控制与轧制工艺控制原理, 在国外专家认为不能生产集装箱板的珠钢电炉-CSP 生产线上, 成功地生产出 $w(\text{C}) < 0.06\%$ SPA-H 钢, 2003 年珠钢集装箱板产量达 56 万 t, 2004 年计划生产 100 万 t, 约占世界集装箱板总产量的 1/4。珠钢成为了世界上最大的集装箱板生产基地之一。

转炉薄板坯连铸连轧与电炉 CSP 相较, 转炉薄板坯连铸连轧的钢中氮含量低, 若采用与电炉 CSP 相同的冶金质量控制和轧制工艺控制, 更有利于生产 HSLC 钢。为此, 在用转炉薄板坯连铸连轧工艺生产屈服强度低于 450 MPa 的热轧板时, 可不加微合金元素 V, Nb, Ti。

我国每年生产几千万 t 屈服强度为 335 MPa 的 20MnSi 二级钢筋, 并开始生产屈服强度为 400 MPa 的 20MnSiV 或 20MnSiNb 三级钢筋, 建议根据上述生产 HSLC 钢的组织性能控制理论, 即综合考虑钢的冶金质量控制和轧制工艺控制, 实现晶粒细化与第二相析出综合强化, 开展用 HSLC 钢试制三级钢筋或将 20MnSi 二级钢筋升级为三级钢筋的研究。

HSLC 钢对促进传统冶金产业的改造和提升, 对我国国民经济建设和钢铁工业的可持续发展, 提高国际竞争力将起重要作用, 具有广阔的发展前景。

5 结论

1) 在 $\sigma_s \leq 450$ MPa 的条件下, 珠钢用电炉 CSP 工艺生产的 HSLC 钢的力学性能与国外 CSP 钢厂生产用 V, Nb, N 微合金化的 HSLA 钢处于同一水平, HSLC 钢不含 V, Nb 且 Mn 含量较低。用 HSLC 钢代替屈服强度为 450 MPa 级以下的 HSLA 钢, 特别是低合金钢和普通碳素钢应具有重大的经济效益和社会效益。

2) HSLC 钢中存在纳米级的硫化物、氧化物、氮化物和碳化物。纳米级铁碳化物与 AlN 可能起沉淀强化作用。

3) 细晶强化、固溶强化、沉淀强化、珠光体强化及位错亚结构强化对屈服强度具有不同程度的影响, 细晶强化对屈服强度的贡献为 150~200 MPa; 沉淀强化、珠光体强化及位错亚结构强化的贡献为 100~150 MPa, 其中以沉淀强化为主。

4) HSLC 钢的成份控制要点为终点碳控制, 低氮和低自由氮控制; MnS 浓度积控制和最佳 Al 及溶解氧含量控制。

5) HSLC 钢的力学性能可以通过在薄板坯连铸连轧条件下控制成分、轧制及冷却工艺进行调整。

6) 转炉薄板坯连铸连轧更有利于生产 HSLC 钢, 要求屈服强度不高于 450 MPa 时, 可考虑不加微合金元素 V, Nb, Ti, HSLC 钢组织性能的综合控制理论可供建筑钢筋生产和对传统冶金产业进行改造提升时参考, HSLC 钢具有广阔的发展前景。

参考文献

- [1] Glodowski R J. Vanadium-Nitrogen Microalloyed HSLA Strip Steels Produced by Thin Slab Casting, HSLA Steel's 2000[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 313~318.
- [2] Garcia C I, Tokary C, Graham C, et al. Niobium HSLA steels produced using the thin slab casting process: hot strip mill products, properties and applications[A]. Proc of TSCR'2002[C]. Guangzhou: The Chinese Society for Metals, 2002. 194~210.
- [3] ZHANG Hong-tao, LIU Su, WANG Rui-zhou, et al. Laboratory study of the influence of thin slab casting and direct rolling process on the mechanical properties and microstructure of Nb microalloyed steel [A]. Proc of TSCR'2002[C]. Guangzhou: The Chinese Society for Metals, 2002. 282~291.
- [4] FU Jie, WANG Zhong-bin, KANG Yong-lin, et al. Research and development of HSLC steels produced by EAF-CSP technology [A]. Proc of TSCR'2002 [C]. Guangzhou: The Chinese Society for Metals, 2002. 301~312.
- [5] 傅杰, 王中丙, 柳得槽, 等. 电炉 CSP 工艺基础研究与技术创新[A]. 薄板坯连铸连轧技术交流与开发协会第一次会议[C]. 广州: 广州珠江钢铁有限责任公司, 2002. 13~28.
- [6] 王中丙, 李烈军, 康永林, 等. 薄板坯连铸连轧 CSP 线生产低碳钢板的力学性能特征[J]. 钢铁, 2001, 36(10): 33~36.
- [7] 傅杰, 陈恩普, 谢继莹, 等. 特种冶炼[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982. 20~28.
- [8] 傅杰. 特种熔炼与冶金质量控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999. 6.
- [9] 傅杰, 李晶, 徐晓达, 等. 电弧炉冶炼终点碳的控制[J]. 钢铁, 2001, 36(6): 18~20.
- [10] 傅杰. 钢冶金过程动力学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- [11] FU Jie, ZHOU Shi-xiang, DI Ling, et al. Effects of temperature and [S] on the kinetics of nitrogen removal from liquid steel[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2001, 17(2): 233~236.
- [12] LIU De-lu, HUO Xiang-dong, WANG Yuan-li, et al. Oxide and sulfide dispersive precipitation in ultra-low carbon steels[J]. Journal of University of Sci & Tech Beijing, 2001, 8(4): 314~315.
- [13] LIU De-lu, FU Jie, KANG Yong-lin, 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.
- [14] HUO Xiang-dong, LIU De-lu, CHEN Nan-jing, et al. Microstructure evolution of low carbon steel produced by compact strip production[A]. Proceedings of First International Conference on Advanced Structural Steels [C]. Tsukuba: The Iron and Steel Institute of Japan, 2002. 217~218.
- [15] 赵增武, 常国威, 王新华. 氧、硫对高纯净低合金钢强韧性的影响研究[A]. 新一代钢铁材料研讨会论文集[C]. 北京: 中国金属学会, 2001. 431~434.
- [16] KANG Yong-lin, YU Hao, WANG Ke-lu, et al. Study of microstructure evolution and strength mechanism of

- low carbon steel of CSP line[A]. Proc of TSCR' 2002 [C]. Guangzhou: The Chinese Society for Metals, 2002. 313 - 322.
- [17] KANG Yong-lin, WANG ke-lu, YU Hao, et al. Research on microstructures evolution and precipitation behavior of hot strip of low carbon steel produced by CSP [A]. Proceedings of First International Conference on Advanced Structural Steels[C]. Tsukuba: The Iron and Steel Institute of Japan, 2002. 27 - 28.
- [18] KANG Yong-lin, YU Hao, FU Jie, et al. Morphology and precipitation kinetics of AlN in hot strip of low carbon steel produced by compact strip production[J]. Materials Science and Engineering A351, 2003. 265 - 271.
- [19] 傅 杰, 康永林, 柳得槽, 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.
- [20] 柳得槽, 王元立, 霍向东, 等. CSP 低碳钢的晶粒细化与强韧化[J]. 金属学报, 2002, 38(6): 647 - 651.
- [21] Lagneborg R. The Significance of Precipitation Reactions in Microalloyed Steels[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000. 61 - 70.
- [22] Kneissl A C, Garcia C I, DeArdo A J. Characterization of precipitates in HSLA steel[A]. HSLA Steels: Processing, Properties and Applications [C]. USA: The Minerals, Metals and Materials Society, 1992. 99 - 105.

(编辑 李艳红)