

## 薄板坯连铸连轧流程 V 微合金化 HSLA 钢的开发

毛新平<sup>1</sup> 李春艳<sup>2</sup> 刘清友<sup>3</sup> 林振源<sup>2</sup> 庄汉洲<sup>2</sup> 高吉祥<sup>2</sup>

(1 广州珠江钢铁有限责任公司, 广州 510730; 2 广钢集团技术中心 CSP 应用技术研究, 广州 510730;

3 钢铁研究总院结构材料研究所, 北京 100081)

**摘要** 珠钢采用 EAF-LF-CSP 工艺生产 1.8~6.3 mm V 微合金化 HSLA S-F80 钢带 (C: 0.03~0.07%, 1.10~1.60Mn, ≤0.05Nb, ≤0.05Ti, 0.05~0.25V, 0.010~0.035N)。试验结果表明, 采用再结晶控制轧制工艺 (开轧温度 1000~1100 °C, 终轧温度 820~950 °C, 卷取温度 550~650 °C), 钢带的组织 3~4 μm 超细铁素体 + 少量珠光体, 析出相 V(C,N) 粒度为 44 nm, 钢带的屈服强度 590~620 MPa。

**关键词** 薄板坯连铸连轧 V 微合金化 高强度钢 超细晶粒

## Development of V Microalloy HSLA Steel Produced by Thin Slab Casting and Rolling Process

Mao Xinping<sup>1</sup>, Li Chunyan<sup>2</sup>, Liu Qingyou<sup>3</sup>, Lin Zhenyuan<sup>2</sup>, Zhuang Hanzhou<sup>2</sup> and Gao Jixiang<sup>2</sup>

(1 Guangzhou Zhujiang Steel Co Ltd, Guangzhou 510730;

2 CSP Applying Technology Institute, Technology Center, GISE, Guangzhou 510730;

3 Central Iron and Steel Institute, Beijing 100081)

**Abstract** The 1.8~6.3 mm strip of V microalloying HSLA S-F80 steel (0.03~0.07C, 1.10~1.60Mn, ≤0.05Nb, ≤0.05Ti, 0.05~0.25V, 0.010~0.035N) is produced by EAF-LF-CSP process at Zhujiang steel. The examination results showed that with recrystallization control rolling process - breakdown temperature 1000~1100 °C, finishing temperature 820~950 °C and coiling temperature 550~650 °C, the structure of strip was 3~4 μm extra-fine ferrite + minor pearlite, the size of precipitated phase V(C,N) was 44 nm and the yield strength of strip was 590~620 MPa.

**Material Index** Thin Slab Casting and Rolling, V Microalloying, High Strength Steel, ExtraFine Grain

### 1 试验材料及方法

采用 V 微合金化技术在薄板坯连铸连轧流程工业化试制屈服强度 550 MPa 级 HSLA S-F80 高强钢 (表 1)。用 150 t 超高功率电弧炉冶炼和 150 t LF 精炼, 利用立弯式连铸机浇铸<sup>[1]</sup>, 铸坯以 950 °C 左右的表面温度进入均热炉, 以 1150~1200 °C 的均热温度均热 15~20 min, 然后在 6 机架热连轧机上分别轧制成 1.8, 3.2, 6.3 mm 的热轧钢带。其中钒氮合金在钢液洁净的情况下, 加入 LF 中。采用再结晶控制轧制工艺, 开轧温度 1000~1100 °C、终轧温度 820~950 °C、卷取温度 550~650 °C。

### 2 试验结果

#### 2.1 显微组织和析出物

钢带组织为超细晶粒铁素体 + 少量珠光体, 铁素体平均晶粒尺寸为 3~4 μm。

##### 2.1.1 铸坯均热前和均热后析出物分析

试验钢铸坯均热前和均热后析出物化学相分析结果见表 2。均热前, 铸坯中 V(CN) 绝大部分已析出, 均热后铸坯中仍有约 50% V 析出物存在, 析出物类型为 V(CN)。对化学萃取沉淀粒子进行了小角度衍射分析, 结果见表 3。均热前铸坯中析出物平均粒度 40 nm, 均热后铸坯中析出物平均粒度 44 nm。

表 1 试验钢化学成分/%

Table 1 Chemical composition of test steel /%

C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Ti	N
0.03~0.07	0.01~0.05	1.10~1.60	≤0.030	≤0.020	0.05~0.25	≤0.05	≤0.05	0.010~0.035

表 2 铸坯和钢带析出物化学相分析结果  
Table 2 Analysis results of chemical phase of precipitates in slab and strip

项目	M(C,N),MN 相中各元素占合金的质量分数/%							M(C,N),MN 相的组成结构	
	V	Ti	Mo	Cr	C*	N	Σ		
铸坯	均热前	0.115 1	0.004 0	0.002 1	0.002 4	0.014 0	0.017 4	0.155 0	(V <sub>0.973</sub> Ti <sub>0.035</sub> Cr <sub>0.019</sub> Mo <sub>0.009</sub> )(C <sub>0.485</sub> N <sub>0.515</sub> )
	均热后	0.057 3	0.004 3	0.002 4	0.002 2	0.004 9	0.012 2	0.083 3	(V <sub>0.877</sub> Ti <sub>0.070</sub> Cr <sub>0.033</sub> Mo <sub>0.020</sub> )(C <sub>0.321</sub> N <sub>0.679</sub> )
钢带	1.8 mm	0.094 3	0.004 1	0.002 3	0.002 2	0.009 7	0.016 8	0.129 4	(V <sub>0.924</sub> Ti <sub>0.043</sub> Cr <sub>0.021</sub> Mo <sub>0.012</sub> )(C <sub>0.401</sub> N <sub>0.599</sub> )
	3.2 mm	0.077 2	0.003 9	0.002 4	0.002 2	0.007 0	0.015 2	0.107 9	(V <sub>0.911</sub> Ti <sub>0.049</sub> Cr <sub>0.025</sub> Mo <sub>0.015</sub> )(C <sub>0.348</sub> N <sub>0.652</sub> )
	6.3 mm	0.058 0	0.003 8	0.002 3	0.002 3	0.004 1	0.013 2	0.083 7	(V <sub>0.885</sub> Ti <sub>0.062</sub> Cr <sub>0.032</sub> Mo <sub>0.019</sub> )(C <sub>0.267</sub> N <sub>0.733</sub> )

注: \* 为计算数据

表 3 铸坯和钢带中不同粒度析出物的体积分数/%  
Table 3 Volume fraction of different granularity precipitates in slab and strip / %

项目		粒子尺寸/nm								
		1~5	5~10	10~18	18~36	36~60	60~96	96~140	140~200	200~300
铸坯	均热前	2.24	4.45	1.01	2.01	0.40	0.11	0.09	0.05	0.04
	均热后	0.98	2.10	1.95	2.78	0.20	0.12	0.10	0.06	0.04
钢带	1.8 mm	0.88	1.83	0.97	1.94	0.85	0.17	0.15	0.09	0.06
	3.2 mm	1.41	2.84	0.92	2.01	0.53	0.23	0.14	0.09	0.04
	6.3 mm	0.98	2.04	1.04	2.16	0.51	0.20	0.14	0.10	0.07

### 2.1.2 钢带析出物分析

由表 2 可以看出钢带越薄,即轧制压下量越大,析出物数量越多,说明变形有利于 V(CN)析出。对化学萃取沉淀粒子进行了小角度衍射分析,结果见表 3。其中 1.8 mm 钢带析出物平均粒度 57 nm;3.2 mm 钢带析出物平均粒度 52 nm,6.3 mm 钢带析出物平均粒度 59 nm。

### 2.2 性能和应用

对钢带进行拉伸试验、V 型冲击试验和冷弯试验,结果见表 4。ASTM A1011/A1011 M-2000 标准规定屈服强度 550 MPa 级 HSLA S-F80 高强度钢性能为:(1) 强度  $\sigma_s \geq 550$  MPa,  $\sigma_b \geq 620$  MPa; (2) 延伸率  $\delta \geq 16\%$ , 因此钢带的各项性能均达到或超过了屈服强度 550 MPa 级性能指标。

表 4 钢带的机械性能  
Table 4 Mechanical properties of steel strip

规格/mm	屈服强度/MPa		抗拉强度/MPa		延伸率 A <sub>4</sub> /%		宽冷弯 b=35 mm d=1.5 a,180°	Charpy-V 缺口韧性/J 试样(mm):5×10×55		结晶断口 百分比/%	
	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向		0℃	-20℃	0℃	-20℃
1.8	620	615	690	675	25	22	完好	-	-	-	-
3.2	590	600	650	645	27	26	完好	-	-	-	-
6.3	590	600	670	665	30	30	完好	81	69	0	6

此次生产的试验钢,主要应用于出口北美半挂车和欧洲铆接车型的侧立柱、滑轨梁、纵梁及横梁等一些重要部件上。目前,在国内该钢已经替代部分进口钢带使用在半挂车上。

### 3 结论

(1) 均热前铸坯中的 V(CN)绝大部分析出,平均粒度 40 nm。均热后铸坯中仍有约 50% V 析出物存在,平均粒度 44 nm。试验钢晶粒尺寸为 3~4 μm,细晶强化是薄板坯连铸连轧流程 V 微合金钢的主要强化方式。

(2) 采用薄板坯连铸连轧流程 V 微合金化

技术,开发出了屈服强度 550 MPa 级 HSLA S-F80 高强度钢,其组织均匀、晶粒超细化、成型性能和焊接性能优良。

### 参考文献

- 1 毛新平,庄汉洲,李春艳,等. 殊钢 150 t EAF-LF-CSP 工艺 X60 管线钢的开发. 特殊钢,2006,27(4):45

毛新平(1965-),男,博士,教授级高级工程师,从事薄板坯连铸连轧技术。

收稿日期:2006-03-08