

120 t LD-RH-LF CSP 流程生产 W600 无取向硅钢的工艺实践

李应江^{1,2} 包燕平¹

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2 鞍山钢铁股份有限公司第一钢轧总厂, 马鞍山 243000)

摘要 马钢一钢轧总厂通过 120 t LD(顶底复吹)-RH-LF-70 mm 和 90 mm 薄板连铸-连轧工艺生产 W600 无取向硅钢。通过控制转炉出钢[C]0.03%~0.04%, RH 真空脱碳至 0.002 5% C, RH 脱碳前补加 FeP, LF 二次精炼脱硫, RH-LF 调整 Als 等工艺措施控制钢中 C≤0.005%、P 0.050%、Als 0.20%、N≤40×10⁻⁶, 所生产的 W600 钢铸坯成分均匀, 钢板的力学性能满足技术要求。

关键词 W600 无取向硅钢 LD RH LF 成分控制

Process Practice for W600 Non-Oriented Silicon Steel Produced by 120 t LD-RH-LF CSP Flow Sheet

Li Yingjiang^{1,2} and Bao Yanping¹

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083;
2 No1 Steelworks, Maanshan Iron and Steel Co Ltd, Maanshan 243000)

Abstract The W600 non-oriented silicon steel is produced by 120 t LD (top and bottom combined blown)-RH-LF-70 mm and 90 mm thin slab concasting-continuous rolling process at No1 Steelworks, Maanshan Steel. The chemical composition C≤0.005%, P0.050%, Als0.20% and N≤40×10⁻⁶ was controlled by using the measures such as controlling LD tapping [C] 0.03%~0.04%, RH vacuum decarburizing to 0.002 5% C, adding FeP before RH decarburizing, LF secondary refining desulphurizing and RH-LF adjusting Als; the produced slab of W600 steel had even analyses and the mechanical properties met the technical requirement.

Material Index W600 Non-Oriented Silicon Steel, LD, RH, LF, Analyses Control

马钢第一钢轧总厂装备有铁水预处理脱硫站 2 座、顶底复吹 120 t 转炉 3 座、RH 精炼装置 1 座、LF 3 座(其中 120 t 2 座、95 t 1 座)、CSP 连铸机 2 台(表 1)。2005 年至 2008 年,经过多轮工艺实验,成功生产出 W600、W800 等系列无取向硅钢。

1 W600 无取向硅钢生产工艺路线和成分控制

W600 无取向硅钢对钢水的化学成分和力学性能提出了严格的要求(表 2),要求热轧板卷成品化学成分允许偏差应符合 GB222/T-1984 的规定。

1.1 生产工艺路线

马钢第一钢轧总厂装备有铁水预处理设备,采用镁基、CaO 基脱硫剂,可将铁水[S]脱至 0.002% 以下,采用扒渣机扒出脱硫渣;顶底复吹转炉采用烟气分析动态控制,C 设定值 0.035%,温度设定值

表 1 CSP 连铸机主要设备与工艺参数

Table 1 Main equipment and process parameters of CSP concaster

项目	参数	
机型	立弯式	
流数	单流	
断面	宽度/mm	900~1600
	厚度/mm	90→70,72→50
浇铸速度/(m·min ⁻¹)	2.2~6.0	
铸坯定尺/m	90 mm 坯	26.7(max)
	70 mm 坯	43.7(max)
结晶器	类型	漏斗型
	长度/mm	1100
	振幅/mm	±10(max)
	振频/(次·min ⁻¹)	400(max)

1680℃,底吹模式为 A 模式。出钢采用挡渣棒,视情况补加挡渣球,确保下渣量小于 500kg。RH 真

表 2 W600 钢化学成分和力学性能要求

Table 2 Requirement of chemical composition and mechanical properties of W600 steel

牌号	化学成分/%							N/10 ⁻⁶	屈服强度 (R _{e1})/MPa	抗拉强度 (R _m)/MPa	伸长率 (A ₈₀)/%
	C	Si	Mn	P	S	Als					
MG-W600	≤0.008	0.60~0.80	0.20~0.45	0.040~0.070	≤0.008	0.15~0.35	≤40	≤330	300~440	≥30	
内控	≤0.005	0.75	0.30	0.050	≤0.002	0.20	≤40				

注:不作为判钢条件,N+S+Ti≤100×10⁻⁶。

空度可达极限真空度,同时可进行化学升温,LF 可进行加热、造渣、钙处理、化学成分调整等。W600 生产工艺路线:铁水预处理→顶底复吹转炉→RH 精炼→LF→CSP 连铸。

1.2 化学成分控制

1.2.1 碳

顶底复吹转炉采用奥钢联(VAI)的转炉烟气分析动态控制技术实现转炉全过程动态炼钢,通过对转炉烟气的在线分析,确保终点[C]达到预定目标。RH 通过低真空度下 C-O 反应来进行脱碳。值得注意的是合金中碳含量对最终钢水[C]影响较大。LF 以及连铸浇铸过程是增碳过程,为确保成品[C]合格,需减少此工序的增碳量。表3反映了各冶炼工序 C、P、S、N 的变化。

表3 各冶炼工序[C]、[P]、[S]、[N]的变化/%

Table 3 Change of [C], [P], [S] and [N] in each steel-making phase / %

工序	[C]	[P]	[S]	[N]
脱硫站	-	-	0.002	-
转炉	0.03	0.023	0.015	-
吹氩站	-	-	-	0.001 9
RH	0.002 5	0.038	0.016	0.002 4
LF	0.003 7	0.045	0.002	0.003 1
中间包	0.004 4	0.046	0.002	0.003 8

生产中发现,保证成品[C] ≤ 50 × 10⁻⁶ 的主要措施为:(1)转炉出钢碳控制在 0.03% ~ 0.04%,活度氧 ≥ 600 × 10⁻⁶; (2)RH 真空度 ≤ 100 Pa,脱碳时间保持大于 23 min; (3)用微碳硅铁代替普通硅铁,用金属锰代替低碳锰铁以及含碳较低的 RH 脱硫剂; (4)LF 采用优质电极,并造好埋弧、发泡性能良好的炉渣,减少增碳; (5)采用超低碳钢包砖; (6)全过程用无碳材料在钢水表面保温。

1.2.2 磷、硫

适量的磷可以提高比电阻,能促使晶粒长大,降低涡流损失、矫顽力和磁滞损失。马钢 W600 钢种要求 0.040% ~ 0.070% P,由于转炉有良好的脱磷效果,初炼钢水[P]普遍小于 0.025%;因此,需要在后续工序中增磷。实际生产有 3 种方案:(1)在 RH 脱氧结束后补加 FeP; (2)在 RH 脱氧前补加 FeP; (3)在 LF 冶炼过程中补加 FeP。3 种方案均有优缺点:由于 FeP 中碳含量较高,方案(1)、(3)会导致钢水增碳;方案(2)会导致部分 P 氧化成 P₂O₅ 进入炉渣,必须通过 LF 的造渣操作将 P₂O₅ 还原,无疑此举会增加生产成本。实际生产中,采用了方案(2)。考虑到 LF 回磷约 0.010%,RH 终点 P 含量按“钢种下限

0.010%”控制。冶炼过程[P]的变化如表3所示。

硫是硅钢中的有害元素,主要是对磁性的有害影响,因此,成品中硫越低越好。目前,要将钢水硫脱至 0.003% 以下,一方面须减少入炉原料的硫含量,主要有降低入炉铁水的硫含量,增强铁水预处理的扒渣效果,选用优质的废钢原料和造渣料;另一方面,充分发挥二次精炼优势,将脱硫任务分解至 RH、LF。

RH 脱硫前须对炉渣进行有效改质。表4是试验炉次改质后的炉渣成分和 LF 终渣成分。

表4 LD、RH 前的炉渣成分和 LF 终渣成分

Table 4 Slag ingredient in LD, before RH and end refining slag ingredient in LF

工序	渣成分/%								碱度 (R)
	TFe	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	S	MnO	
转炉	14.17	16.48	44.55	9.46	2.65	2.592	0.059	2.90	2.7
RH 进站	5.50	8.80	44.91	11.49	25.00	0.674	0.109	1.73	5.1
LF 终点	1.31	2.01	54.59	5.81	35.27	0.150	0.170	0.20	-

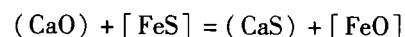
采用 KPB 喷粉 4 kg/t 后,硫含量的变化如表5所示。由表5可见,KPB 喷粉 4 kg/t, [S] 由 0.008% 脱至 0.005 7%,脱硫率为 28.8%,同时还有较大的增碳量,在初炼钢水[S]偏高的情况下,RH

表5 KPB 喷粉 4 kg/t 前后钢中 C、S 含量和钢水温度

Table 5 C and S content in steel and temperature of liquid steel before and after KPB powder injection with 4 kg/t

钢水量/t	喷粉量/kg	工序	C%	S%	温度/℃
128	521	喷粉前	0.004	0.008	1 620
		喷粉后	0.010	0.006	1 602

的脱硫能力不能满足要求,需要在 LF 进行造还原渣脱硫。由文献[1]可知:



此反应的平衡常数 K 为:

$$K = (a_{\text{CaS}} \cdot a_{[\text{O}]}) / (a_{\text{CaO}} \cdot a_{\text{S}})$$

式中:K- 反应平衡常数;a- 活度。

由于 W600 钢在 RH 工序脱氧非常完全,要进一步脱硫,必须提高炉渣碱度,需要在冶炼过程中补加足量石灰,同时,为提高脱硫动力学条件,强底吹氩也是必备条件之一。LF 终渣成分如表4。冶炼各工序 S 的变化如表3所示。

1.2.3 铝

在试验中,有两种方案:(1)RH 目标 Als 调整

到 0.20%，再在 LF 进行微调；(2) RH 将 Als 调整到 0.040%，在 LF 进行大量调整。二者都具有优、缺点，方案(1)具有较好的冶金效果，钢水脱氧充分，LF 脱硫速度快，但由于铝加入太早，[Als] 衰减大，成本高；而方案(2)恰恰相反。综合考虑，采纳了方案(1)。值得一提的是，铝的控制需要稳定的生产节奏为前提，在出 LF 前 15 min 不宜加铝，否则易引起水口结瘤。LF 铝粒的加入量要根据调整 Als 的时间点及后续时间所要满足的冶金功能如脱硫量的大小等决定。

1.2.4 氮

转炉在冶炼过程中能够有效的脱氮，而在转炉出钢过程、LF、连铸浇铸过程钢液吸氮是自发过程^[2]。根据不同的原始氮含量，RH 可以脱氮，也可以增氮。在试验炉次中，钢液在不同冶炼工序 N 变化如表 3 所示。由表 3 可知，钢液在转炉中发生脱氮，出钢过程中没有进行脱氧，吸氮很少，吹氩站工序氮含量为 19×10^{-6} ，在 RH 处理过程中，经过真空脱氮和合金化增氮的双重作用，表现为增氮，LF、浇铸过程表现为明显的增氮过程。

试验中减少增氮的措施主要有：(1) 转炉采用全程底吹氩模式并采用烟气分析动态控制自动化炼钢技术，减少了因补吹带来的钢水增氮；(2) LF 造泡沫渣埋弧，减少了电极加热次数，同时钙处理时控制好氩气流量，防止钢液同空气接触吸氮；(3) 连铸过程做好钢包到中间包的保护浇铸工作。采用长水口 + 氩封 + 浸入式水口可有效减少钢液增氮，另外，提高钢液自引率，减少烧氧也能有效减少钢包换包

过程的增氮量。

2 硅钢铸坯组织与常规力学性能

从图 1 可见，薄板坯连铸生产硅钢铸坯成分均匀，未发现严重的偏析现象。

硅钢常规力学性能检验结果见表 6。由表 6 可见，硅钢常规力学性能均满足要求。

表 6 W600 无取向硅钢力学性能

Table 6 Mechanical properties of W600 non-oriented silicon steel

热卷号	规格/ mm	取样类型	$R_{el}/$ MPa	$R_m/$ MPa	$A/$ %	冷弯 ($d=1.5a$)
1	2.3 × 1 275	生产样	270	410	35.5	
		科研样(横向)	207	368	33.3	合格
		科研样(纵向)	208	365	35.3	
2	3.0 × 1 244	生产样	285	420	39.5	
		科研样(横向)	245	368	31.8	合格
		科研样(纵向)	222	353	34.2	

3 结论

(1) 通过转炉出钢碳控制在 0.03% ~ 0.04%、活度氧大于 600×10^{-6} 、RH 在 100 Pa 脱碳时间 ≥ 23 min、LF 造埋弧、发泡性能良好的炉渣；同时，采用微碳合金、超低碳钢包砖、优质电极减少增碳，可生产出 $[C] \leq 0.005\%$ 的无取向硅钢。

(2) 采用在 RH 脱碳前补加 FeP，RH 终点目标 P 含量按“钢种下限 0.010%”控制的方法可保证 LF 终点 [P] 合格。

(3) 降低入炉铁水的硫含量，提高铁水预处理的扒渣效果，选用优质的废钢原料和造渣料；同时，充分发挥二次精炼优势，将脱硫任务分解至 RH、LF。

(4) 采用 RH 将目标 Als 调整到 0.20%，在 LF 进行微调工艺可提高 Als 的命中率。

(5) 钢液氮的控制贯穿于转炉、RH、LF 以及连铸全过程，重点在 LF 工序，造泡沫渣埋弧、减少下电极加热次数、控制好氩气流量是操作的关键。

参考文献

- 1 黄希祐. 钢铁冶金原理. 北京: 冶金工业出版社, 1986
- 2 刘阳春, 傅杰, 王天义, 等. 150 吨顶底复吹转炉全程吹 N 的试验研究. 2005 年薄板坯连铸机连轧品种与工艺技术研讨会, 扬州, 2005

李应江(1976-), 男, 硕士生, 2000 年华东冶金学院毕业, 从事精炼及连铸工艺研究。

收稿日期: 2008-05-18

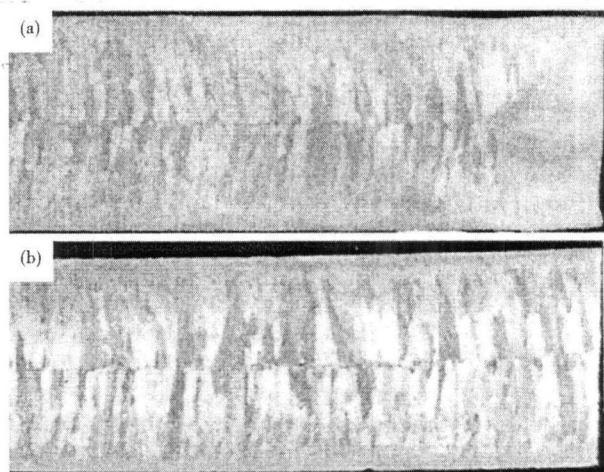


图 1 马钢 CSP 生产 MG-W600 硅钢铸坯(1 270 mm × 65 mm)低倍组织: 铸坯边部(a), 中部(b)

Fig. 1 Macrostructure of MG-W600 silicon steel cast slab 1 270 mm × 65 mm produced by CSP at maanshan steel; edge (a) and center (b) of slab