

SWRCH35K 冷镦钢 120 t BOF-吹氩-LF-CC 流程的 冶炼工艺和质量控制

陈建东^{1,2} 梁素英² 苏德利³ 范耀东⁴

(1 上海重型机械集团有限公司大型铸锻件研究所, 上海 200245; 2 中天钢铁集团有限公司第三炼钢厂, 常州 213011;
3 江苏沙钢集团有限公司转炉炼钢厂, 张家港 215625; 4 龙腾特钢有限公司转炉炼钢厂, 常熟 215511)

摘要 通过 KR 铁水预脱硫 [S] ≤ 0.008%, BOF 预脱氧加铝量由 0.010% ~ 0.025% 提高到 0.020% ~ 0.035%, LF 精炼时加 Fe-Ca 丝由 3.0 m/t 增至 4.0 m/t, LF 精炼时间 ≥ 35 min, 白渣 ≥ 15 min, 改进中间包结构, 控制中间包钢水温度 1 520 ~ 1 540 °C, M-EMS 电流由 160 A 提高至 200 A, 改善二次段喷雾冷却, 控制拉速 2.2 ~ 2.4 m/min 等工艺措施, 生产的 SWRCH35K 冷镦钢 (C: 0.29 ~ 0.31, Si: 0.07 ~ 0.11, Mn: 0.69 ~ 0.71, P: 0.009 ~ 0.010, S: 0.008, Al: 0.038 ~ 0.041) 160 mm × 160 mm 铸坯的碳偏析指数 ≤ 1.06, Φ6.5 ~ 20 mm 热轧盘条组织为 P + F, 用其生产的 8.8 级及以上的标准件, 免退火后模具损耗率仅约为 8.5%。

关键词 120 t BOF-吹氩-LF-CC 流程 SWRCH35K 冷镦钢 盘条 精炼渣 中间包结构 夹杂物 冶金质量

Steelmaking Process and Quality Control of Cold-Heading Steel SWRCH35K by 120 t BOF-Argon Blowing-LF-CC Flowsheet

Chen Jiandong^{1,2}, Liang Suying², Su Deli³ and Fan Yaodong⁴

(1 Heavy Forge and Casting Research Institute, Shanghai Heavy Machine Plant Co Ltd, Shanghai 200245;
2 Third Steelmaking Plant, Zhongtian Iron & Steel Group Co Ltd, Changzhou 213011;
3 Converter Steelmaking Plant, Jiangsu Shagang Group Co Ltd, Zhangjiagang 215625;
4 Converter Steelmaking Plant, Longteng Special Steel Co Ltd, Changshu 215511)

Abstract With the process measures including KR pre-sulphurizing hot metal [S] ≤ 0.008%, to increase BOF pre-oxidizing adding aluminium amount from 0.010% ~ 0.025% to 0.020% ~ 0.035%, to increase adding Fe-Ca wire from 3.0 m/t to 4.0 m/t, LF refining time ≥ 35 min and white slag time ≥ 15 min, improving tundish structure, controlling temperature of liquid in tundish 1 520 ~ 1 540 °C, increasing M-EMS current from 160 A to 200 A, improving fog cooling process in secondary cooling zone and controlling casting speed 2.2 ~ 2.4 m/min, the carbon segregation index of produced 160 mm × 160 mm casting billet of cold-heading steel SWRCH35K (C: 0.29 ~ 0.31, Si: 0.07 ~ 0.11, Mn: 0.69 ~ 0.71, P: 0.009 ~ 0.010, S: 0.008, Al: 0.038 ~ 0.041) is ≤ 1.06, and the structure of Φ6.5 ~ 20 mm hot-rolled coil is P + F, the die attritions wear rate of ≥ 8.8 class standard products manufactured by the coil without annealing is only about 8.5%.

Material Index 120 t BOF-Argon Blowing-LF-CC Flowsheet, Cold-Heading Steel SWRCH35K, Coil, Refining Slag, Tundish Structure, Inclusion, Metallurgical Quality

SWRCH35K 是 K 系列中碳冷镦钢, 该钢种用于制造 8.8 级及以上的高强度螺栓、螺杆、螺钉等标准紧固件, 在冷镦成形过程中材料要承受 70% ~ 80% 的总变形量^[1]。为了实现降低成本、节能减排的目的, 下游用户省略了拉拔前的球化退火工序, 同时不影响顶锻时的模具使用寿命, 因而要求 SWRCH35K 盘条: 硬度 ≤ HRB82, Z ≥ 55%, 冷顶锻 1/3 无裂纹, 金相非金属夹杂物均 ≤ 2.0 级, 表面不得有裂纹、折迭、结疤、分层等缺陷, 盘条每边脱碳层深度不得大于钢材公差直径的 1.0%^[2]。

1 成分设计与工艺流程

1.1 成分设计

中天钢铁集团有限公司 (简称中天钢铁) 在多

次试验和对下游用户走访的基础上, 参照 GB/T6478-2001、日标 JIS G3507-1:2005 标准进行成分设计 (表 1) 与性能检测, 并按内控要求组织生产。

表 1 可见, 内控要求中, C 控制在中限; 由于铝脱氧钢中的氮被固定, 可防止动态应变时效, 铝脱氧钢的温间冷镦性能明显优于硅脱氧钢, 所以 Al 含量控制在比较高的范围内; Si 是铁素体强化元素, 减小其含量的目的是保持机体的塑性, 降低冷镦时的变形抗力^[3,4]。

1.2 工艺流程

KR 铁水预脱硫 → 120 t 顶底复吹转炉 → 精炼站吹氩 → LF 精炼 → 钙处理, 软搅拌 → 小方坯 → 10 机 10 流 R12 m 连铸机 → 高线控轧 → Stelmor 缓冷。

表1 SWRCH35K钢内控、精炼吹氩后和中间包钢水的成分

Table 1 Analysis composition of steel SWRCH35K for interior controlling requirement, after refining argon-blowing and in tundish

工艺	炉号	化学成分 / %									
		C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Cu	Ca
内控	888	0.34 ~ 0.36	0.10 ~ 0.20	0.65 ~ 0.80	≤0.015	≤0.010	0.020 ~ 0.035	≤0.20	≤0.20	≤0.25	
精炼吹氩后	888	0.31	0.11	0.69	0.009	0.008	0.041	0.09	0.06	0.025	
	889	0.29	0.07	0.71	0.010	0.008	0.038	0.09	0.08	0.025	
中间包	888	0.34	0.14	0.75	0.012	0.006	0.030	0.08	0.07	0.023	0.002 9
	889	0.35	0.15	0.77	0.011	0.007	0.028	0.09	0.06	0.024	0.002 6

2 SWRCH35K钢(任取二炉)的冶炼工艺研究

SWRCH35K钢冶炼工艺的改进主要有:(1) [Al]由0.010%~0.025%提高到0.020%~0.035%、[Si]由0.10%~0.25%减少到0.10%~0.20%;(2)炉后钢芯铝的用量由2.5 kg/t提高到5.0 kg/t;(3)Fe-Ca丝用量由3.0 m/t增加到4.0 m/t;(4)改进中间包结构,在钢流冲击区的边缘增加挡墙,在最边上的二流上增加挡墙、坝;(5)内置式M-EMS的电流由160 A提高到200 A;(6)连铸方坯由150 mm×150 mm改成160 mm×160 mm;(7)在喷淋架4个圆角上增加喷嘴、更换喷嘴型号以改善二冷段的喷雾冷却效果。改进前后冶金质量对比情况见表2。

2.1 BOF冶炼工艺

(1)通过KR处理后,入炉铁水成分为0.30%~0.80%Si,≤0.10%P,≤0.008%S,温度要求≥1300℃。

(2)造渣材料分两批加入,第1批(65%石灰+70%镁球+100%轻烧白云石)在开吹1~3 min加完,余下(35%石灰+30%镁球)在4~6 min加完。

氧枪采用高-低-高-低-高-低的6段式操作(图1)。开吹时采用高枪位化渣,迅速增加渣中(FeO),尽快形成具有一定碱度的炉渣,避免酸性炉渣对炉衬的侵蚀,炉渣化好后降枪脱碳;为避免较严重的炉渣返干现象,适时高枪位化渣,吹炼时的“轰、轰”声趋缓后再次降低枪位脱碳;炉内气氛平静后适时高枪位调整炉渣的流动性脱磷,接近终点时再次降枪位拉碳,确保终渣T. Fe在10%~15%。

表2 工艺改进前后SWRCH35K钢铸坯和模具产品冶金质量对比

Table 2 Comparison of steel SWRCH35K metallurgical quality of casting billet and mould product between before and after process improvement

工艺	铸坯质量/级			用户模具 损耗率
	中心疏松	中心缩孔	中心碳偏析	
改进前	2.0~2.5	1.5~2.5	≤1.11	~14
改进后	1.0~1.5	~1.0	≤1.06	~8.5

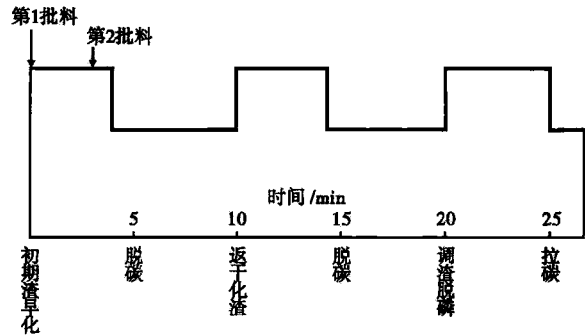


图1 120 t BOF顶底复吹6段式氧枪操作示意图

Fig. 1 Schematics of 120 t BOF oxygen lance operation with top and bottom combined blown with 6 sections

表3 120 t BOF终点控制参数

Table 3 120 t BOF end-point control parameters

炉号	化学成分 / %				终点温度/℃
	C	Mn	P	S	
888	0.20	0.13	0.007	0.008	1 640
889	0.16	0.10	0.006	0.008	1 632

(3)采用挡渣球+挡渣塞联合进行挡渣出钢,出钢下渣量≤150 kg,终点控制见表3。

(4)出钢到25 t钢水时按照钢芯铝→硅锰+高碳锰铁→增碳剂→合成渣的顺序进行预脱氧、炉外合金化等操作。

预脱氧及炉外合金化的产物为 Al_2O_3 、 $MnO \cdot SiO_2$ 。图2为入LF工位时所检测到的夹杂成分在相图^[5]上的分布情况, Al_2O_3 夹杂物的数量用n标记,图2中忽略了夹杂物低含量组元,将 Al_2O_3 、 SiO_2 和MnO或CaO、 Al_2O_3 和MgO的质量分数进行了归一化^[6]。

2.2 LF精炼工艺

(1)吹氩搅拌8~10 min时测温、取样(表1)。

(2)LF采用CaO- Al_2O_3 - SiO_2 基渣系,该渣系属于铝-硅镇静渣。LF精炼≥35 min,用电石粒脱氧,喂铝丝控铝,白渣≥15 min。精炼终渣成分见表4,精炼渣在相图^[5]中的分布情况见图3。

由图3可见,该渣系由于(SiO_2)低、(Al_2O_3)高,

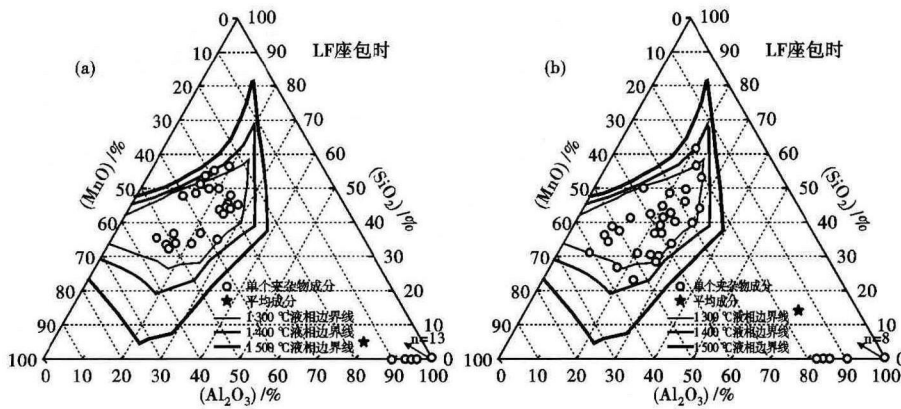


图 2 入 LF 工位时所检测的夹杂物成分: (a)888 炉; (b)889 炉
Fig. 2 Ingredient of slag analyzed before LF refining: (a) 888 heat; (b) 889 heat

表 4 精炼终点的炉渣分析
Table 4 Analysis of refining end slag

炉号	化学成分 / %							CaO/ Al ₂ O ₃	二元碱 度(R)
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	T. Fe	S		
888	49.76	6.32	31.28	6.45	0.20	0.54	0.505	1.59	7.87
889	48.87	5.84	32.05	7.02	0.20	0.53	0.509	1.52	8.37

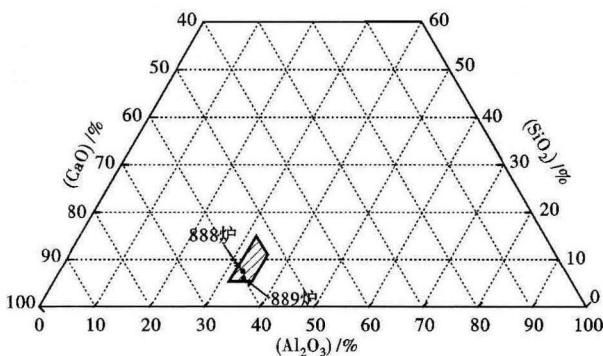


图 3 精炼渣在 CaO-Al₂O₃-SiO₂ 基渣系中的分布
Fig. 3 Distribution of refining slag in CaO-Al₂O₃-SiO₂ base slag series

在相图 3 中的分布范围比较窄,稍有不慎,会落入高熔点区域,因此,精炼期间需补加少量萤石降低炉渣的熔点^[6]。

SWRCH35K 的 $T_L = 1498\text{ }^\circ\text{C}$, 中间包钢水温度 $1520 \sim 1540\text{ }^\circ\text{C}$ 。出钢温度:开浇 $(1605 \pm 5)\text{ }^\circ\text{C}$, 连浇 $(1585 \pm 5)\text{ }^\circ\text{C}$ 。

(3) 钙处理、软搅拌。中间包钢水成分分析(表 1)表明, $[\text{Ca}]/[\text{Al}] \geq 0.08$ 、且 $[\text{S}] < 0.010\%$, 说明 SWRCH35K 钢经过钙处理后的夹杂物变性效果比较理想^[7]。

2.3 连铸控制

(1) SWRCH35K 钢使用中碳钢保护渣,要求液渣层吸收相当数量的夹杂物后,其黏度、凝固温度、

结晶性能等物性参数保持不变^[8]。表 5 为 SWRCH35K 钢保护渣的理化指标。

(2) 采用大容量中间包(图 4),增加中间包内钢水的镇静时间;在中间包内加挡墙、坝,以改变钢液流动方向,并将夹杂物带到钢-渣界面被渣相吸附而去除。中间包内夹杂物的碰撞和在壁面上的黏附都和流场的湍动能耗散率有关,对于铝镇静钢,绝大多数夹杂

是 Al_2O_3 ,也有一些铁、钙的铝酸盐^[9]。中间包挡墙、坝采用碱性材质,有吸附钢水中 Al_2O_3 能力^[7]。

图 4 中最边上二流再次设置挡墙、坝的目的是进一步改进包内流场,减少死角区^[10-11]。中间包采用碳碱性覆盖剂进行液面保护。分析表明,随着浇铸的进行,渣中的 Al_2O_3 逐渐升高,说明中间包内钢水流动状态得到了有效控制。

(3) 通过塞杆吹氩^[12] 结晶内的氩气泡在随后的上浮中将夹杂物带到液渣层。中天钢铁塞杆吹氩流量为 $6 \sim 7\text{ L/min}$,液面波动稳定在 $\pm 3\text{ mm}$ 。

中天钢铁二冷段采用弱冷模式,拉速 $(2.3 \pm 0.1)\text{ m/min}$,矫直前坯壳外表面温度 $\geq 900\text{ }^\circ\text{C}$ 。

(4) 采用 (M + F)-EMS 相结合的电磁搅拌方式, F-EMS 搅拌电流 580 A 、 2 Hz 。

3 成品质量

3.1 力学性能、显微硬度

由表 6 可见, $R_m < 620\text{ MPa}$, 满足了目标规定的力学性能要求, 屈强比 $(R_{eL}/R_m) \leq 0.65$, 硬度 $(\text{HRB}) \leq 82$, 线材在线软化效果较好。

3.2 冷顶锻性能

每 20 支连铸坯作为一个批次, 每批热轧盘条作 1/2 顶锻试验, 均未出现裂纹; 作 1/3 顶锻试验, 合格率达到 99.56%。金相观察脱碳层深度几乎全部

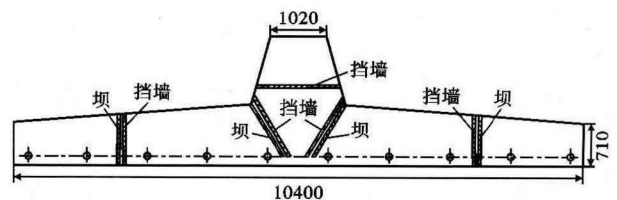


图 4 30 t 中间包内加挡墙、坝示意图
Fig. 4 Schematics of 30 t tundish adding wall and dam

为0。

3.3 金相组织和夹杂物

由图5可见,SWRCH35K钢热轧后的基体组织为珠光体(P)+铁素体(F),图中黑色部分为F,白色部分为P,且P稍微多于F。

对每批次的热轧盘条进行夹杂物评级,无A、C类夹杂;B类夹杂 ≤ 1.5 级;D类夹杂 ≤ 2.0 级;Ds类夹杂 ≤ 2.0 级。

4 产品使用情况

中天钢铁生产的多种规格SWRCH35K冷镢钢热轧盘条,已在江苏、浙江、上海、安徽等地多家标准件厂得到广泛使用,用户反映良好,免退火后模具损耗率约8.5%。

5 结论

通过(1)120tBOF使用预脱硫铁水;氧枪采用6段式操作;终渣T.Fe控制在10%~15%;(2)LF采用CaO-Al₂O₃-SiO₂基渣系,加CaF₂降低炉渣的熔点;(3)出钢后采用重钙处理;(4)使用中碳钢保护渣;中间包内设置挡墙、坝,以改变钢水的流动途径,减少死角区;(5)采用(M+F)-EMS相结合的搅拌方式,拉速(2.3±0.1)m/min,塞杆吹氩流量6~7L/min等工艺措施,SWRCH35K冷镢钢160mm×160mm铸坯的碳偏析指数 ≤ 1.06 ,热轧盘条的金相夹杂物主要以B、D、Ds类为主,所有夹杂物均 ≤ 2.0 级,组织为P+F,且P稍微多于F;力学性能

表5 SWRCH35K 钢结晶器保护渣的理化指标

Table 5 Physical and chemical indexes of mold powder for steel SWRCH35K

化学成分/%						熔点/	(1300℃)黏度/	(1300℃)熔速/
CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	R ₂ O	F ⁻	℃	(Pa·s)	[kg·(m ² ·s) ⁻¹]
29.5	26.8	1.7	3.8	5.6	6.4	1100	0.13	0.35

表6 SWRCH35K 钢热轧盘条力学性能,235 炉

Table 6 Mechanical properties of hot-rolled coil of steel SWRCH35K, 235 heats

直径规格/mm	R _{el} /MPa	R _m /MPa	A/%	Z/%	R _{el} /R _m	HRB
6.5	350~385	580~605	32~41	55~62	0.55~0.65	73~82
8.0	360~390	585~610	33~39	56~60	0.58~0.65	74~81
10	350~380	570~605	30~36	56~58	0.60~0.65	73~80
12	355~385	570~600	28~36	56~63	0.62~0.65	75~82
16	360~390	580~610	30~42	58~63	0.52~0.65	75~81
20	350~385	585~605	28~35	55~60	0.57~0.65	74~80

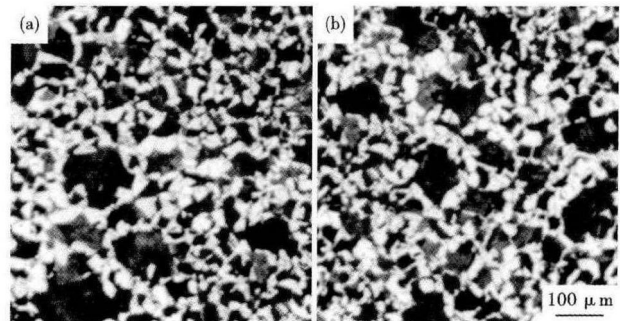


图5 SWRCH35K 钢热轧盘条典型组织形貌:(a)888 炉;(b)889 炉

Fig.5 Typical structure morphology of hot-rolled coil of steel SWRCH35K: (a) 888 heat and (b) 889 heat

Z 值 55%~63%,HRC 硬度值 73~82。免退火后模具损耗率降低至 8.5%。

参考文献

- [1] 惠卫军,翁宇庆,董瀚. 高强度紧固件用钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2009:21-28.
- [2] 项程云. 合金结构钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2002:313-321.
- [3] 陈少慧,麻哈. 沙钢高品质线材研发[C]. //北京:纪念《金属制品》创刊40周年暨2012年金属制品行业技术信息交流“论文集”,2012:154-161.
- [4] 董成瑞,任海鹏,金同哲,等. 微合金结构钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2000:39-43.
- [5] (西德)德国钢铁工程师协会编著. 渣图集[M]. 王俭,译. 北京:冶金工业出版社,1989:64-71.
- [6] 黄希祐. 钢铁冶金原理[M]. 北京:冶金工业出版社,2010:209-210.
- [7] 蔡开科. 连铸坯质量控制[M]. 北京:冶金工业出版社,2011.
- [8] 李殿明,邵天明. 连铸结晶器保护渣应用技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2008:14-15.
- [9] 张立峰,蔡开科,曲英. 连铸中间包钢水中夹杂物去除机理研究[J]. 北京科技大学学报,1997,48(2):26-30.
- [10] 王建军,包燕平,曲英. 中间包冶金学[M]. 北京:冶金工业出版社,2001:80-84.
- [11] 王勇,陈泽伟,陈伟庆,等. 40 t T型6流中间包结构优化对高碳钢中夹杂物的影响[J]. 特殊钢,2014,35(1):29-32.
- [12] Burty M, Larrecq M, Pusse C, et al. Experimental and Theoretical Analysis of Gas and Metal Flows in Submerged Entry Nozzles in Continuous Casting. La Revue de Metallurgie-CIT, October 1996: 1249-1255.

陈建东(1967-),男,工程师,1990年华东冶金学院(本科)毕业,炼钢连铸、大型钢锭浇铸工艺技术研究。

收稿日期:2014-10-15