

· 产品研发 ·



## 09CuPCrNi 耐候钢生产工艺研究

蒋栋初<sup>1</sup>, 刘从德<sup>1</sup>, 印传磊<sup>2</sup>

(1 江苏沙钢集团淮钢特钢股份有限公司炼钢厂, 淮安 223002;

2 江苏沙钢集团淮钢特钢股份有限公司总工办, 淮安 223002)

**摘要:**某钢厂采用“KR 铁水脱硫→90 t 转炉→LF 精炼→RH 精炼→150 mm×150 mm 方坯连铸”工艺流程工业化生产耐候钢 09CuPCrNi ( $w$ : 0.07~0.13C, 0.35~0.65Si, 0.70~1.00Mn,  $\leq$ 0.010S, 0.065~0.150P, 0.10~0.30Ni, 0.30~0.70Cr, 0.15~0.40Cu,  $\leq$ 0.040Al)。通过转炉采用石灰和白云石总用量 19 kg/t 的少渣量、终渣二元碱度控制在 2~3 的低碱度造渣、吹炼氧枪枪位 1.3 m 左右的低枪位吹炼工艺, 实现终点  $w$ [P] $\geq$ 0.065%。精炼过程采用铝强脱氧及渣面复合脱氧, 控制精炼炉渣碱度 7~9, RH 真空处理结束钙处理, 连铸弱冷冷却等工艺措施, 成功开发 09CuPCrNi 耐候钢, 化学成分稳定, 非金属夹杂物级别 A 类细 $\leq$ 1.0 级、B 类细 $\leq$ 1.5 级、C 类细 0 级、D 类细 $\leq$ 1.0 级、DS $\leq$ 1.5 级, 洁净度高, 轧材表面及低倍无裂纹, 晶粒度 6 级, 各项指标满足技术要求。

**关键词:**耐候钢; 转炉吹炼; 低碱度; 钙处理; 洁净度

**DOI:**10.20057/j.1003-8620.2023-00069 **中图分类号:**TF713

## Research on the Production Practice of 09CuPCrNi Weather Resistant Steel

Jiang Dongchu<sup>1</sup>, Liu Congde<sup>1</sup>, Yin Chuanlei<sup>2</sup>

(1 Steelmaking Works, Huaigang Special Steel Co., Ltd., Jiangsu Shagang Group, Huai'an 223002, China;

2 Technology Center, Huaigang Special Steel Co., Ltd., Jiangsu Shagang Group, Huai'an 223002, China)

**Abstract:** A steel mill uses "KR hot metal desulfurization→90 t converter blowing→LF refining→RH refining→150 mm×150 mm billet continuous casting" process for industrial production of 09CuPCrNi weathering Steel ( $w$ : 0.07-0.13C, 0.35-0.65Si, 0.70-1.00Mn, 0.065-0.150P,  $\leq$ 0.010S, 0.10-0.30Ni, 0.15-0.40Cu,  $\leq$ 0.040Al). By the converter adopts a low slag content of 19 kg/t with a total amount of lime and dolomite, and the final slag binary alkalinity is controlled at 2-3 low alkalinity slag making. The low gun position blowing process with a blowing oxygen gun position of about 1.3 m achieves an endpoint  $w$ [P] $\geq$ 0.065%. The refining process adopts aluminum strong deoxidation, slag surface composite deoxidation to control the alkalinity of the refining slag by 7-9 and the calcium treatment of the ending of RH vacuum treatment and continuous casting weak cooling and other process measures successfully developed 09CuPCrNi weathering Steel. It has chemical composition stability and non-metallic inclusion level A $\leq$ 1.0 grade, B $\leq$ 1.5 grade, C:0 grade, D $\leq$ 1.0 grade, DS $\leq$ 1.5 grade and high cleanliness. There are no cracks on the surface and low magnification of rolled products. The grain size $\geq$ 6 levels and all indicators meet the technical requirements.

**Key Words:** Weathering Steel; Converter Blowing; Low Alkalinity; Calcium Treatment; Cleanliness

随着国内工业化和现代化进程的加速推进, 特殊钢铁材料的社会需求日益增加, 由于使用环境条件恶劣、复杂, 每年因钢材腐蚀的量占国内生产总量近 20%<sup>[1]</sup>, 因此钢材的耐蚀性能受到行业的广泛关注。

耐候钢通过在钢中加入少量 Cu、P、Cr、Ni、Ti 等合金元素, 在大气和海水具有良好耐腐蚀性<sup>[2-6]</sup>, 广泛应用于建筑、桥梁、造船、车辆等领域中。某钢厂主要生产各类管坯钢、钢球钢、轨道用钢、汽车用调质/非调质钢、弹簧钢、轴承钢等钢种, 随着市场对耐候钢需求量的增长, 某钢厂进行 09CuPCrNi 钢的

研发。目前对 09CuPCrNi 钢生产冶炼的工艺研究, 更多为关注于转炉吹炼保磷工艺研究<sup>[7-12]</sup>, 而有关精炼、连铸等生产工序长流程的生产工艺研究却鲜有报道。09CuPCrNi 钢转炉保磷吹炼、精炼钢包渣系、连铸过程冷却水量的设定对钢的最终产品质量和生产成本有很大影响, 某钢厂对全流程关键工序工艺技术进行优化研究及生产实践, 以期对 09CuPCrNi 耐候钢生产提供相关生产实践的借鉴。

### 1 生产过程控制

某钢厂工业化生产 09CuPCrNi 钢时采用“KR 铁

水脱硫→90 t转炉→LF→RH→150 mm×150 mm方坯连铸”工艺流程,其目标成分见表1。

### 1.1 铁水预脱硫

转炉使用的铁水硫含量高,通常为0.050%~0.080%,为减轻后道工序脱硫压力,减少精炼脱S对钢液洁净度影响,对铁水进行预脱S。通过优化KR脱S操作工艺,脱硫前后扒渣处理,实现KR高效脱S<sup>[13-14]</sup>,入炉铁水 $w[S] \leq 0.005\%$ 。同时控制入炉铁水比>90%,达到转炉出钢低S含量,转炉出钢 $w[S]$ 稳定在0.015%以内。

### 1.2 转炉吹炼及出钢工艺

对于很多特殊钢种,钢中残余P含量要求严格,因此,转炉吹炼过程重要任务是进行脱P操作,一些钢种辅助采用钢包脱P工艺<sup>[15]</sup>,最终达到钢中低P含量要求。而对于09CuPCrNi耐候钢,通过控制钢中磷含量>0.05%,可以提高钢材的耐候性和硬度等<sup>[9]</sup>。因此,在生产09CuPCrNi钢时,若转炉吹炼继续采用脱P冶炼工艺技术使钢液P含量很低,转炉出钢和LF钢包精炼时需添加磷铁合金进行合金化操作,增加生产成本。某钢厂转炉冶炼使用的高炉铁水 $w[P]$ 为0.090%~0.110%,因此,冶炼09CuPCrNi钢时转炉吹炼过程采取脱硅脱碳保P操作。正常转炉冶炼过程脱P反应式为<sup>[16]</sup>:



磷分配比计算公式:

$$L_p=22350/T-16+0.08w(CaO)+2.5lg \sum w(Fe) \quad (2)$$

式中: $L_p$ 为钢渣间磷的平衡分配比; $T$ 为温度,K; $w(CaO)$ 、 $w(Fe)$ 为渣中氧化钙、铁的质量分数,%。

由式(1)、(2)可知转炉吹炼过程中炉渣二元碱度越高、T、Fe含量越高、钢液温度越低,则越有利于钢液脱P,同时采用大渣量降低渣中磷酸盐的活度,有利于钢液脱P。吹炼过程中,当温度>1 500 K,碳先于磷氧化,磷的氧化受到抑制<sup>[16]</sup>。

因此,生产09CuPCrNi钢时,转炉吹炼过程中采取降低过程渣料用量,石灰和白云石总用量由脱P工艺的25 kg/t降低至19 kg/t,同时渣料加入时采取前期少量加入方式,吹炼前期、中期、中后期分别按照20%、40%、40%比例加入。生产09CuPCrNi钢

时,转炉终点炉渣二元碱度由脱P工艺3~5降低至2~3,09CuPCrNi钢转炉吹炼终点炉渣成分见表2。炉渣碱度低易加重对炉衬耐材的侵蚀,因此,在转炉吹炼中后期增加镁改质剂用量,提高终渣MgO含量,减轻炉渣对耐材的侵蚀,终渣 $w(MgO)$ 含量较脱P冶炼炉次高5%左右。同时,吹炼过程中的氧枪枪位较脱P钢相比,冶炼09CuPCrNi钢吹炼前期枪位降低0.2 m,提高氧气穿透力和搅拌能力,实现快速脱碳保磷,使渣中FeO含量低。吹炼过程枪位降低0.1 m左右,减少枪位波动,保持渣中低FeO含量。冶炼09CuPCrNi钢的转炉吹炼过程枪位如图1所示。

转炉吹炼过程中,通过炉渣低碱度、低氧化性和少渣量及提高吹炼过程温度等操作,使整个吹炼过程脱P率降低到30%左右,实现转炉吹炼过程脱P量少,转炉吹炼终点钢中 $w[P]$ 达到0.065%~0.080%,吹炼终点钢液温度在1 650~1 690℃。

转炉吹炼结束,钢液出钢过程中,加入1.5 kg/t铝合金进行沉淀脱氧,将钢液中O含量降低,之后配加普通硅铁、锰铁、低碳铬铁合金进行初步合金化,加入4.5 kg/t石灰和4.2 kg/t精炼渣进行造渣。

### 1.3 钢包精炼工艺

LF精炼过程中,精炼前期用铝粒进行沉淀脱氧,将脱氧在精炼前期完成充分,使得钢中夹杂物有充足时间上浮、去除。精炼过程中,使用铝粒和电石进行扩散脱氧保持,控制精炼“白渣”时间>30 min。为避免钢包底吹大搅拌脱硫而带来的钢液的二次污染,通过精炼前期补加石灰对钢液进行辅助深脱硫,精炼终渣二元碱度控制在7~9,硫容量 $C_s$ 在0.001 0左右,炉渣具有良好的脱硫、吸附夹杂效果,成品硫含量<0.005%,炉渣主要成分见表3。根据进站钢液成分使用磷铁、镍铁、铜等合金对钢中元素成分微调,在精炼中期完成成分调整。

钢包精炼结束后,进行RH真空循环处理,钢液在真空度<100 Pa条件下循环时间>15 min,进一步去除夹杂物,提高钢液洁净度。真空循环处理结束后,为改善夹杂物类型,抑制钢中氧化铝在连铸过程中水口的蓄积结瘤,采用喂入钙线进行夹杂物的变性处理,钙线喂入量为0.8 kg/t。之后进行静置软吹,软吹氩时间控制在10~20 min。

表1 09CuPCrNi钢主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of 09CuPCrNi steel

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Al
0.07~0.13	0.35~0.65	0.70~1.00	0.065~0.150	≤0.010	0.10~0.30	0.30~0.70	0.15~0.40	≤0.040

表 2 冶炼 09CuPCrNi 钢转炉吹炼终点炉渣成分(质量分数)

%				
CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	TFe	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
36 ~ 38	10 ~ 13	13 ~ 15	11 ~ 13	1.3 ~ 1.6

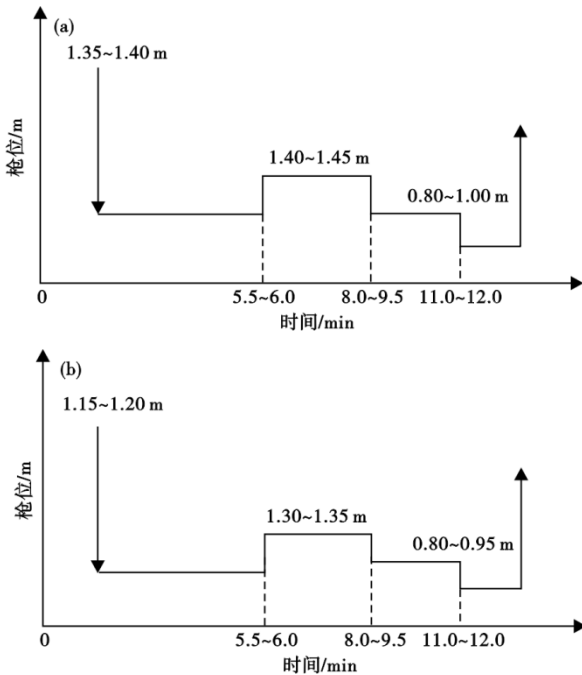


图 1 09CuPCrNi 钢转炉吹炼过程枪位示意图:(a)脱 P 工艺枪位,(b)转炉吹炼工艺枪位

Fig. 1 Schematic diagram of gun position during 09CuPCrNi steel converter blowing process: (a) dephosphorization process gun position, (b) blowing process gun position

表 3 09CuPCrNi 钢精炼终渣主要化学成分(质量分数)

%					
CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	TFe+MnO
52 ~ 59	4 ~ 8	5 ~ 7	22 ~ 35	0.4 ~ 0.9	<1.0

#### 1.4 钢液浇注工艺

对于碳含量为 0.10% ~ 0.15% 的耐候钢,铸坯产生纵裂的倾向较大<sup>[17]</sup>,钢中含有较高的磷、铜等元素,易使钢的晶界脆化,冷却过程易产生热应力和组织应力<sup>[18]</sup>。因此,钢液连铸浇注过程采用弱冷方式进行冷却,一冷水流量较正常包晶钢的流量降低 8%,一冷水流量设定为 100 m<sup>3</sup>/h,二冷水比水量由正常包晶钢的 0.40 L/kg 调整为 0.35 L/kg。

同时为了避免钢液二次污染,钢液浇注过程中,长水口采用氩气密封;各流浸入式水口插入深度控制在 110 ~ 120 mm,恒拉速 1.5 m/min 进行浇

注,以避免引起结晶器液位波动而导致保护渣卷入钢中<sup>[19]</sup>,使用钢包下渣自动检测,控制钢包无下渣。

#### 1.5 轧制工艺

铸坯采用冷装入炉加热轧制,150 mm×150 mm 铸坯在加热炉内停留 90 ~ 130 min,加热温度控制在 900 ~ 1 100 °C。加热后的铸坯经过 22 MPa 高压水除鳞,经过轧机轧制成 16 mm×42 mm 扁钢,扁钢表面温度控制在 320 ~ 400 °C 入坑缓冷。

## 2 结果与分析

### 2.1 转炉终点成分

结合热力学计算结果,生产 09CuPCrNi 钢时,转炉装入铁水比 >90%,采用石灰和白云石总用量减少 24%,同时前期按照 20% 的少量加入方式;以及吹炼过程中的氧枪枪位较脱 P 钢相比,前期枪位降低 0.2 m,控制在 1.15 ~ 1.20 m。控制炉渣中  $w(\text{CaO})$  为 36% ~ 38%、 $w(\text{SiO}_2)$  为 13% ~ 15%、 $w(\text{FeO})$  为 11% ~ 13%,吹炼终点钢液在较高的温度。达到 09CuPCrNi 钢初始  $w[\text{P}]$  为 0.065 ~ 0.080%,09CuPCrNi 钢转炉吹炼终点成分见表 4。

表 4 09CuPCrNi 钢转炉吹炼终点化学成分(质量分数)

%					
C	Si	Mn	P	S	O
0.03 ~ 0.05	<0.010	0.06 ~ 0.08	0.065 ~ 0.080	0.012 ~ 0.018	0.060 ~ 0.080

### 2.2 轧材洁净度

连铸生产的 09CuPCrNi 钢方坯轧制成扁钢(16 mm×42 mm)后,按照 GB/T10561—2005 中 A 法进行非金属夹杂物检验,硫化物 1.0 级以内,氧化物类夹杂物 1.5 级以内,夹杂物级别见表 5。钢中氧化物类夹杂物典型形貌特征如图 2 所示,夹杂物主要为钙铝镁复相夹杂物。钢中 T.[O] 含量为  $10 \times 10^{-6}$  ~  $15 \times 10^{-6}$ ,N 含量稳定在  $60 \times 10^{-6}$  以下。

表 5 09CuPCrNi 钢中非金属夹杂物级别/级

项目	A		B		C		D		DS
	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗	
实际值	≤1.0	≤0.5	≤1.5	≤1.0	0	0	≤1.0	≤1.0	≤1.5
标准	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤1.5	≤1.0	≤1.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0

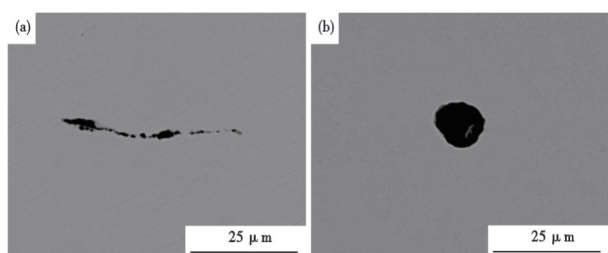


图2 09CuPCrNi钢中典型氧化物类夹杂物形貌:(a)链状,(b)颗粒状

Fig. 2 Typical morphology of oxide inclusions in 09CuPCrNi steel : (a) chain, (b) granular

### 2.3 轧材低倍及晶粒度

09CuPCrNi钢轧材横截面酸浸低倍无目视可见缩孔、气泡、裂纹、夹杂、白点,一般疏松和中心疏松均在0.5级以内,钢材低倍组织控制较好,轧材晶粒度6级,晶粒尺寸较小,如图3所示。

### 3 结论

(1)转炉采用石灰和白云石总用量19 kg/t的少渣量、终渣二元碱度控制在2~3的低碱度造渣工艺,吹炼氧枪枪位相比脱P工艺枪位降低0.1~0.2 m,可控制脱P率在30%左右,实现钢液保磷,转炉吹炼终点 $w[P]$ 达到0.065%~0.080%,减少精炼过程磷铁合金使用量。

#### 参考文献

- [1] 李臣生, 赵 斌, 褚跃民, 等. 硫化氢对气田钢材的腐蚀影响及防治[J]. 断块油气田, 2008, 15(4): 126-128.
- [2] 王传雅, 戚正风. 耐候钢的化学成分和性能[J]. 特殊钢, 1997, 18(1): 13-19.
- [3] 陈庆军, 康永林, 谷海容, 等. Nb、Ti对高强度耐候钢组织和性能的影响[J]. 特殊钢, 2005, 26(1): 30-33.
- [4] 周鲁军, 杨善武. 海洋工程用钢的大气腐蚀与耐候钢的发展[J]. 中国冶金, 2022, 32(8): 7-24.
- [5] 郑 健, 彭志贤, 袁 渊, 等. Cu/Sb/Sn/Mo/W对新国标09CrCuSb钢组织及力学性能的影响[J]. 特殊钢, 2023, 44(2): 84-89.
- [6] 黄 利, 董 磊, 徐 龙, 等. 耐候结构用热轧钢带Q355NHC研制与开发[J]. 特殊钢, 2022, 43(1): 66-68.
- [7] 吴 康, 郑 毅, 简 明, 等. 提高供氧强度冶炼含磷耐候钢的生产实践[J]. 炼钢, 2010, 26(2): 10-12+52.
- [8] 王 羽, 林利平, 王安军, 等. 控制高磷钢终点 $w[P]$ 的实践[J]. 钢铁研究, 2013, 41(1): 49-51.
- [9] 张思维, 曹 锟, 殷享兵, 等. 80 t转炉冶炼高磷钢生产实践[J]. 炼钢, 2015, 31(6): 53-56.

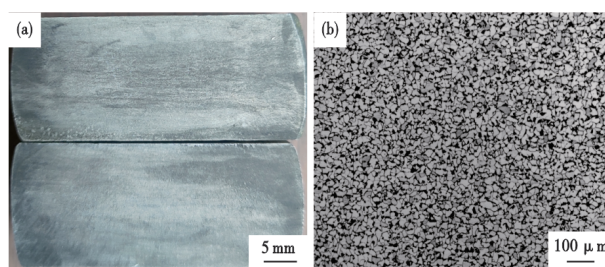


图3 09CuPCrNi钢轧材低倍及金相:(a)轧材横截面,(b)轧材晶粒组织

Fig. 3 Macrostructure and metallographic pictures of 09CuPCrNi rolled products : (a) cross section of rolled material , (b) grain structure of rolled material

(2)钢液经过LF钢包精炼,钢液铝镇静强脱氧和渣面复合脱氧,炉渣碱度控制在7~9,并经过RH真空循环处理,以及钙处理,浇注过程采取保护浇注和防止下渣。09CuPCrNi钢的氧化物类夹杂物主要为钙铝镁复相夹杂物,钢中非金属夹杂物A类细 $\leq 1.0$ 级、B类细 $\leq 1.5$ 级、C类细0级、D类细 $\leq 1.0$ 级、DS $\leq 1.5$ 级,钢的洁净度高。

(3)钢液浇注过程采用二冷水比水量为0.35 L/kg的弱冷冷却,最终轧材表面无裂纹、横向低倍疏松0.5级以内,钢材晶粒度6级。

- [10] 吕 亚, 刘 磊, 王新志, 等. 安钢150 t转炉高磷耐候钢生产实践[J]. 河南冶金, 2018, 26(2): 33-35.
- [11] 张 波, 何智荣, 赵 科. 高磷钢转炉冶炼的工艺研究[J]. 南方金属, 2018(2): 1-3+32.
- [12] 管 挺, 邹东东, 程奎生, 等. 低磷低硅铁水180 t复吹转炉冶炼高磷钢的工艺优化[J]. 特殊钢, 2014, 35(6): 24-27.
- [13] 印传磊, 田春阳, 杨丽梅, 等. KR法铁水预脱硫工艺优化试验研究[J]. 炼钢, 2019, 35(4): 8-11+70.
- [14] 印传磊, 杨丽梅, 田春阳, 等. KR铁水脱硫剂逸散及搅拌器黏渣分析[J]. 钢铁, 2020, 55(1): 34-37+71.
- [15] 杨丽梅, 印传磊, 马庆丰, 等. ZG-12超低磷钢90 t BOF-RH-CC工艺的生产实践[J]. 特殊钢, 2023, 44(1): 15-18.
- [16] 黄希祜. 钢铁冶金原理[M]. 3版. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [17] 阮晓明. 宝钢耐候钢连铸实践[J]. 钢铁, 2001, 36(2): 20-22.
- [18] 汪洪峰, 郭振和, 姜家和. 耐候钢连铸工艺的改进[J]. 上海金属, 2004, 26(2): 26-28.
- [19] 印传磊, 翟万里, 蒋栋初, 等. 42CrMo钢大尺寸夹杂物的来源与控制[J]. 中国冶金, 2021, 31(1): 36-41.