

高压锅炉管用钢 P11 Φ250 ~ 350 mm 连铸圆坯的开发

尹修刚¹ 姚忠¹ 王社教²

(1 承德建龙特殊钢有限公司研发处,承德 067201;2 武汉钢铁集团鄂城钢铁有限责任公司,鄂州 436000)

摘要 开发的 P11 钢(/% :0.08 ~ 0.14C, 0.65 ~ 0.85Si, 0.40 ~ 0.60Mn, ≤0.010P, ≤0.010S, 1.10 ~ 1.30Cr, 0.46 ~ 0.60Mo, ≤0.015Al) 连铸圆坯的生产流程为 KR 铁水预处理-70 t 顶底复吹转炉-LF-VD-圆坯连铸工艺。通过控制 /% :0.09 ~ 0.11C, 1.15 ~ 1.20Cr, 0.07 ~ 0.08P, 0.002 ~ 0.005S, 0.008 ~ 0.015Als, 中间包钢液温度(1 538 ± 5)℃, 连铸拉速 0.70 ~ 1.05 m/min, 二次冷却比水量 0.35 ~ 0.40 L/kg, 矫直温度 ≥900℃, 缓冷坑温度 ≥500℃ 等工艺措施, 检验结果表明, 铸坯表面质量合格, 缩孔 ≤0.5 级, 中心疏松 ≤1.0 级, 钢 P 含量为 0.007% ~ 0.008%, S 含量 0.002% ~ 0.005%, 该钢在工作温度下有较好的耐流动加速腐蚀性(FAC)。

关键词 70 t BOF-LF-VD-CC 流程 高压锅炉管 P11 钢 Φ250 ~ 350 mm 连铸圆坯 耐流动加速腐蚀性

Development of Φ250 ~ 350 mm Casting Round Bloom of Steel P11 for High Pressure Boiler Pipe

Yin Xiugang¹, Yao Zhong¹ and Wang Shejiao²

(1 Research and Development Department, Chengde Jianlong Special Steel Co Ltd, Chengde 067201; 2 Echeng Iron and Steel Co Ltd, Wuhan Iron and Steel Group, Ezhou 436000)

Abstract The production flowsheet for developed casting round bloom of steel P11 (/% : 0.08 ~ 0.14C, 0.65 ~ 0.85Si, 0.40 ~ 0.60Mn, ≤0.010P, ≤0.010S, 1.10 ~ 1.30Cr, 0.46 ~ 0.60Mo, ≤0.015Al) is KR metal pretreatment-70 t top and bottom combined blown converter-LF-VD-round bloom casting process. With using the measures including controlling the elements content /% : 0.09 ~ 0.11C, 1.15 ~ 1.20Cr, 0.07 ~ 0.08P, 0.002 ~ 0.005S and 0.008 ~ 0.015Als, controlling tundish liquid temperature (1 538 ± 5)℃, casting speed 0.70 ~ 1.05 m/min, secondary cooling water ratio 0.35 ~ 0.40 L/kg, strengthening temperature ≥900℃ and temperature of slow cooling pit furnace ≥500℃, the examination results show that the surface quality of casting bloom is qualified with rating of shrinkage cavity ≤0.5 and rating of central porosity ≤1.0, the P content in steel is 0.007% ~ 0.008% and the S content in steel is 0.002% ~ 0.005%, so the steel has better flowing accelerating corrosion (FAC) resistance at service temperature.

Material Index 70 t BOF-LF-VD-CC Flowsheet, High Pressure Boiler Pipe, Steel P11, Φ250 ~ 350 mm Casting Round Bloom, Flowing Accelerating Corrosion Resistance

高压锅炉管用钢 P11 是一种进口耐热低碳合金钢,在 450 ~ 550℃ 时有较高的热强性,可用于核电^[1]、锅炉、石油裂化^[2]等行业超高压蒸汽管道,用途较为广泛。其最大的优点是可以 100% 回收再利用,符合环保、节能、节约资源的国家战略。

未来我国高压锅炉管 P11 钢长材的需求年均增长可达 10% ~ 12%,有着较大的发展前景。目前我国 P11 钢管消费量占钢材总量的比重仅为发达国家的一半,P11 钢管使用领域的扩大为行业发展提供更广阔的空间。

1 高压锅炉管用钢 P11 钢的生产控制

2016 年,建龙特钢公司开发了 Φ250 ~ 350 mm 规格高压锅炉管用钢 P11,该钢要求有害元素 P ≤ 0.010%、S ≤ 0.007%,具备抗 H₂S 的腐蚀能力,具体成分要求详见表 1。此钢种轧制成无缝钢管广泛用于制造超高压蒸汽管道,使用过程中存在着流动加

速腐蚀(Flow Accelerated Corrosion, 简写 FAC)现象^[2],但较高的铬含量具有耐 FAC 的能力^[2];原理是铬与腐蚀介质中的氧作用,在表面形成一种很薄的氧化膜(钝化膜),可以阻止进一步腐蚀,其中铬的含量越高效果越好。

通过研究高压锅炉管用钢 P11 钢的特性,建龙特钢公司设计其冶炼连铸工艺路线如下:70 t 转炉提钒-KR 铁水预处理-70 t 顶底复吹转炉冶炼-LF 精炼-VD 真空处理-圆坯连铸,试验生产 Φ350 mm 与 Φ250 mm 两个断面,将铬含量控制在中线 1.15% ~ 1.20%,P ≤ 0.008%、S ≤ 0.005%,确保 P11 钢的耐

表 1 P11 钢的化学成分 /%

Table 1 Chemical composition of steel P11 /%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Alt
0.08 ~ 0.14	0.65 ~ 0.85	0.40 ~ 0.60	≤ 0.010	≤ 0.010	1.10 ~ 1.30	≤ 0.20	≤ 0.20	0.46 ~ 0.60	≤ 0.015

腐蚀性能。

1.1 转炉提钒

建龙特钢公司位于国家钒钛资源基地河北省承德市,拥有钒钛铁矿的资源优势。高炉采用钒钛铁矿冶炼,提钒转炉通过吹氧将含钒 0.30% 左右的铁水中的钒进行氧化,生成钒渣,供钒厂焙烧、萃取,剩下的半钢水则进入铁水预处理工序。

1.2 铁水预处理脱硫

提钒后的半钢水进入 KR 后,在处理过程中加入适量铝粒及脱硫剂,经 KR 搅拌处理后,半钢水中终点硫含量约为 0.005%;然后再进行扒渣,防止转炉回硫。

1.3 顶底复吹转炉冶炼

要求提钒后半钢水 $S \leq 0.005\%$ 、 $P \leq 0.080\%$,使用洁净的返回废钢;转炉冶炼前,根据炉内钢液中碳含量、氧活度、温度存在一定的统计关系,采用多元回归分析法,建立转炉终点氧含量预报模型;冶炼前期强化脱磷操作,尽快形成高碱度、高氧化性、流动性良好的前期渣,快速脱磷;并要求终点成分控制在 $0.03\% \leq C \leq 0.05\%$ 、 $P \leq 0.005\%$,出钢温度 $1630 \sim 1650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

出钢采用铝锭 ($\sim 1.5\text{ kg/t}$) 对钢水进行强脱氧,并随钢流加入预熔渣 + 白灰造渣,然后再加入合金进行合金化。出钢同时采用滑板挡渣 + 红外报警装置对转炉出钢下渣进行控制,做到无渣出钢,保证钢水质量。在实现深度脱氧的同时,促进钢中夹杂物的上浮并有效去除,提高了脱氧效果,保证钢中较低的氧含量。

1.4 LF 精炼

LF 精炼在钢水进站后,采用双透气砖吹氩,保证良好的透气性及搅拌效果,以促进脱硫。并根据钢水情况,选择适当的电压、电流快速化渣,精炼过程分批加入精炼造渣料和脱氧剂,尽快形成白渣,约 15 min 后进行测温、取样。

由于转炉放钢时钢水经过合成渣洗,脱氧产物得到降低。同时使精炼渣系(表 2)也发生较大变化,提高了精炼渣碱度为精炼造白渣脱硫创造了有利的热力学和动力学条件。精炼成白渣后保持白渣精炼时间 $\geq 20\text{ min}$,并根据过程温度及成分对离站

表 2 LF 精炼终渣成分和碱度

Table 2 Ingredient of LF refining end slag and basicity

终渣成分 / %							碱度
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	V ₂ O ₅	FeO	MnO	(R)
50 ~	10 ~	25 ~	6 ~	0.06 ~	\leq	\leq	4.5 ~
55	13	30	7	0.07	0.5	0.2	5.5

温度及成分进行调整。

1.5 VD 真空处理

为保证 VD 处理过程中不回硫回磷回碳,必须对 VD 精炼的防溅盖上的积渣进行清理,并用低磷低硫低碳钢水进行涮防溅盖,防止回磷回硫回碳,成品成分范围见表 3。

钢水真空处理要求真空度在 $\leq 67\text{ Pa}$ 下,保持时间 $\geq 20\text{ min}$,真空处理后 $H_2 \leq 0.5 \times 10^{-6}$;定氢后根据钢中 [Als] 情况喂入适量硅钙线,对钢中夹杂物进行球化处理,VD 喂硅钙线前 [Als] 控制在 0.008% ~ 0.015%,控制钙铝比 0.10 ~ 0.14。喂线后保持软吹状态,软吹时间 $\geq 15\text{ min}$,确保钢中夹杂物能够充分上浮。

1.6 圆坯连铸

连铸是生产 P11 钢的关键工序,因 P11 钢碳含量较低 0.08% ~ 0.14%,属于包晶钢,铸坯在凝固过程中会发生包晶反应;包晶反应时线收缩量较大,坯壳与结晶器器壁容易形成气隙,气隙的过早形成会导致收缩不均和坯壳厚度不均,在薄弱处容易形成裂纹,容易发生漏钢事故和铸坯表面质量缺陷^[3-5]。因而在成分设计时在保证铸坯性能的前提下,将碳含量内控范围设计为 0.09% ~ 0.10%,同时采取低过热度、低拉速、二冷弱冷等工艺技术,降低因包晶反应导致的漏钢及裂纹风险。另连铸采用全程保护浇铸,防止钢水二次氧化,并优化结晶器电磁搅拌参数,确保铸坯化学成分均匀并促进非金属夹杂物的上浮,提高铸坯内部和表面质量。关键工艺控制参数如下:

(1) 连铸中间包温度控制 $(1538 \pm 5)\text{ }^{\circ}\text{C}$;

(2) 连铸拉速 0.70 ~ 1.05 m/min;

(3) 结晶器水量 1780 ~ 2370 L/min,二次冷却比水量控制 0.35 ~ 0.40 L/kg。

要求矫直前铸坯温度 $\geq 900\text{ }^{\circ}\text{C}$,并保证入坑缓

表 3 P11 钢成品成分 / %

Table 3 Chemical composition of finished steel P11 / %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al _t	Al _s
0.09 ~ 0.11	0.70 ~ 0.80	0.45 ~ 0.50	0.07 ~ 0.08	0.002 ~ 0.005	1.15 ~ 1.20	0.04 ~ 0.05	0.01 ~ 0.02	0.47 ~ 0.50	≤ 0.015	≤ 0.015

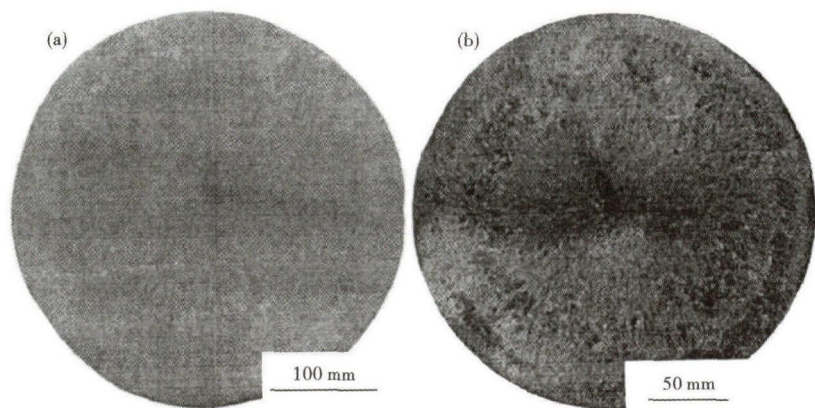


图1 Φ 350 mm(a)和 Φ 250 mm(b)P11 钢连铸坯酸浸低倍组织形貌
Fig.1 Morphology of pickling macrostructure of Φ 350 mm (a) and Φ 250mm (b) casting bloom of steel P11



图2 P11 钢连铸坯表面质量
Fig.2 Surface quality of casting bloom of steel P11

冷温度 $\geq 500\text{ }^{\circ}\text{C}$,减少表面裂纹产生倾向,提高铸坯表面质量。

2 高压锅炉管用钢 P11 连铸圆坯的表面质量及客户使用跟踪

采用上述方法生产工艺浇铸的高压锅炉管用钢 P11 连铸圆坯,钢的纯净度较高,低倍质量好(图1),缩孔 ≤ 0.5 级,中心疏松 ≤ 1.0 级,无其它低倍缺陷;铸坯经抛丸+滚检人工检查,未发现影响使用的表面裂纹及凹陷(图2),完全符合用户的标准要求。

经过客户轧制成管材,各项性能指标均符合用户要求。

3 结论

(1)采用“转炉提钒-KR 铁水预处理-转炉冶炼-LF 精炼-VD 真空处理-圆坯连铸”工艺流程可以实现高压锅炉管用钢 P11 钢的生产,钢中磷含量平均控制水平为 0.0065%,硫含量平均控制水平为 0.003%,具有良好的耐流动加速腐蚀(FAC)的能力。

(2)采取低过热度、低拉速、二冷弱冷工艺,该钢的低倍质量较好,缩孔 ≤ 0.5 级,中心疏松 ≤ 1.0 级,无其它低倍缺陷。

(3)通过成分设计,将碳控制在 0.09% ~ 0.10%,并提高铸坯矫直前温度 $\geq 900\text{ }^{\circ}\text{C}$,保证入坑缓冷温度 $\geq 500\text{ }^{\circ}\text{C}$,有效减少表面裂纹产生倾向,铸坯表面质量合格,符合用户对产品的要求。

参考文献

- [1] 孙中原,王立军,陈春红,等.厚壁 A335-P11 超高压蒸汽管道的焊接工艺[J].制造与安装,2005,22(1):29-32.
- [2] 伊成龙,张乐福,徐雪莲,等.P11 钢在湿蒸汽中流动加速腐蚀性能的模拟与实验研究[J].工业锅炉,2013,47(2):197-201.
- [3] 卢盛意.包晶钢的碳含量及相关的凝固收缩[J].连铸,2008(5):31-32.
- [4] 马勤学.低碳包晶钢连铸工艺及纵裂纹的控制[J].炼钢,2000,16(5):28-30.
- [5] 孙立根,张家泉.包晶钢圆坯结晶器出口安全坯壳厚度的研究[C].圆坯大方坯连铸技术论文集,营口,2009.

尹修刚(1974-),男,研发处副处长,2009 年淮阳工学院(本科)毕业,特钢产品研发和炼钢、轧钢工艺研究。
E-mail:yxgknaile@163.com

2016-07-03

欢迎订阅 2017 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183

定价:16.00 元/期 96.00 元/年

邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社