

# 电站锅炉管用钢 15CrMoG 的生产实践

寄海明

(攀钢集团攀枝花钢铁有限公司科技创新部,攀枝花 617000)

**摘要** 锅炉管用钢 15CrMoG( /% : 0.12 ~ 0.18C, 0.17 ~ 0.35Si, 0.40 ~ 0.70Mn, ≤0.015P, ≤0.010S, 0.80 ~ 1.10Cr, 0.40 ~ 0.55Mo, ≤0.08V, ≤0.020Alt) 要求非金属夹杂物的级别 C ≤ 1.0, Ds ≤ 1.0。该钢的生产流程为铁水预处理-120 t LD-LF-RH-280 mm × 380 mm 连铸坯-轧制 Φ100 ~ Φ120 mm 圆管坯。通过铁水深脱硫、LD 终点控制 0.03% ~ 0.09% C, 0.004% ~ 0.012% P, 0.006% ~ 0.015% S, 加铝铁 2.5 kg/t 的低铝脱氧, 使用碱度为 3 ~ 4 的精炼渣, 使中间包钢水的 P 含量为 0.005% ~ 0.012%, S 含量 0.005% ~ 0.008%, Al 含量为 0.004% ~ 0.008%, 圆管坯的各项指标均满足用户协议要求。

**关键词** 电站 锅炉管用钢 15CrMoG 磷 硫 铝 生产实践

## Commercial Production Practice on Steel 15CrMoG for Boiler Tube of Power Station

Ji Haiming

(Science and Technology Development Department, Panzhihua Steel and Vanadium Co Ltd, Pangang Group, Panzhihua 617000)

**Abstract** The rating of inclusions in steel 15CrMoG for boiler tube ( /% : 0.12 ~ 0.18C, 0.17 ~ 0.35Si, 0.40 ~ 0.70Mn, ≤0.015P, ≤0.010S, 0.80 ~ 1.10Cr, 0.40 ~ 0.55Mo, ≤0.08V, ≤0.020Alt) is that C series ≤ 1.0 and Ds series ≤ 1.0. The production flow sheet of the steel is hot metal pretreatment-120 t LD-LF-RH-280 mm × 380 mm bloom casting-rolling to Φ100 ~ Φ120 mm round tube blank. With hot metal deepening desulphurization, LD end point controlling 0.03% ~ 0.09% C, 0.004% ~ 0.012% P, 0.006% ~ 0.015% S, low aluminium deoxidation with adding 2.5 kg/t aluminium-iron, and using refining slag with basicity 3 ~ 4, as a result in liquid steel in tundish the P content is 0.005% ~ 0.012%, the S content is 0.005% ~ 0.008% and the aluminium content is 0.004% ~ 0.008%, and the each index of round tube blank all meet the requirement of user terms of agreement.

**Material Index** Power Station, Steel 15CrMoG for Boiler Tube, P, S, Al, Production Practice

15CrMoG 钢主要用来制造高压和超高压锅炉的过热器管、再热器管、主蒸汽管道等受热部件, 必须具备良好的高温力学性能、组织稳定性以及抗腐蚀和氧化能力<sup>[1]</sup>。攀钢采用大方坯连铸工艺进行了 15CrMoG 钢的工业试制, 并实现了批量生产。

### 1 主要技术难点

#### 1.1 化学成分控制

由表 1 可见, 用户要求 15CrMoG 钢的 P ≤ 0.015%, S ≤ 0.010%, 同时对五害元素及铝含量提

出了要求。由于锅炉钢精炼采用中碱度渣系, 脱硫能力弱; 并且转炉后序可能出现增磷及回磷, 要把磷、硫稳定控制在用户要求范围内, 难度较大; 此外, 攀钢高炉使用的铁矿种类较多, 质量波动大, 导致钢中五害元素波动较大。

#### 1.2 脱氧工艺

用户协议要求化学成分 Alt ≤ 0.020%, 同时 C、Ds 类非金属夹杂物评级不大于 1 级。要达到铝的要求, 冶炼时应采用无铝脱氧工艺, 即硅钙钡脱氧,

表 1 15CrMoG 钢化学成分

Table 1 Requirement for chemical composition and analysis of steel 15CrMoG /%

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Alt	H	Cu	Ni
协议要求	0.12 ~ 0.18	0.17 ~ 0.35	0.40 ~ 0.70	≤0.015	≤0.010	0.80 ~ 1.10	0.40 ~ 0.55	≤0.08	≤0.020	≤0.000 2	≤0.20	≤0.25
GB5310-2008	0.12 ~ 0.18	0.17 ~ 0.37	0.40 ~ 0.70	≤0.025	≤0.015	0.80 ~ 1.10	0.40 ~ 0.55	≤0.08	-	-	≤0.20	≤0.30
实际分析	0.14 ~ 0.17	0.23 ~ 0.33	0.50 ~ 0.56	0.007 ~ 0.015	0.004 ~ 0.010	0.88 ~ 1.00	0.40 ~ 0.49	0.01 ~ 0.02	0.004 ~ 0.016		0.04 ~ 0.05	0.05 ~ 0.06

注: 协议要求( /% ): ≤0.015As, ≤0.015Sn, ≤0.010Sb, ≤0.008Pb, ≤0.010Bi, (As + Sn + Sb + Pb + Bi) ≤0.050; 实际范围( /% ): 0.005 ~ 0.010As, 0.006 ~ 0.011Sn, 0.002 ~ 0.010Sb, 0.001Pb。

但采用硅钙钡脱氧会产生大块的硅酸盐类夹杂物,会导致 C、Ds 类非金属夹杂超出协议要求范围。

### 1.3 钢的洁净度

A 类夹杂随着轧制方向延伸,造成各向异性,对横向冲击影响较大;B 类夹杂物具有尖锐的棱角,降低锅炉钢高温疲劳性能;此外,应尽量减少 AlN、TiN 类夹杂。用户要求 C、Ds 类非金属夹杂物评级不大于 1 级,同时 A、B、C、D 四类夹杂物总和必须小于 4.5 级,控制难度较大。

## 2 工艺控制要点及技术措施

生产工艺流程为:铁水预处理→120 t LD→LF、RH 精炼→1# 方坯连铸(280 mm × 380 mm)→缓冷→步进式加热炉→950 轧机轧制→Φ100 ~ Φ120 mm 圆钢→检查→发货<sup>[2]</sup>。

### 2.1 冶炼工艺

磷、硫及五害元素在钢液结晶、冷却过程中很容易在晶界附近偏聚、析出,使晶界弱化,降低加工性能及蠕变性能,常导致焊接头强度弱化及蠕变失效<sup>[3]</sup>。在预处理工序把铁水(半钢)中的 S 控制在 0.010% 以下;采用大渣量单渣法冶炼,初期采用高枪位操作,保证炉内尽早成渣,脱除铁水磷。加强副枪使用维护,确保副枪的正常投运,提高终点命中率,减少补吹次数。钢水终点成分实际控制为(%) : 0.03 ~ 0.09C、0.004 ~ 0.012P、0.006 ~ 0.015S。为了保证铝、C 及 Ds 类夹杂物满足用户标准要求,采用低铝脱氧工艺,严格按试验计划要求加入铝铁(2.5 kg/t<sub>钢</sub>),实际生产中小平台 Al 控制在 0.02% ~ 0.03%。为了防止碳超标,合金化采用低碳铁合金。

### 2.2 精炼工艺

为了防止 D 类及 Ds 类夹杂物超标,精炼渣系碱度应适当降低。精炼渣二元碱度 R 在 2.5 ~ 3.0 范围内炉渣具有较好的脱氧、脱硫能力及较好的夹杂物吸附能力<sup>[4]</sup>。但脱硫能力较高碱度渣系较弱,因此 LF 采用扩散脱氧工艺造还原渣。采用少量铝丸脱氧效果最好<sup>[5]</sup>;同时采用大流量吹氩,促进钢渣反应。精炼造渣工艺:出钢过程在钢包加入高碱度精炼渣,在 LF 定量加入复合精炼渣(表 2)对精炼渣成分及碱度进行调整。LF 精炼渣碱度控制在 3 ~ 4,LF 脱硫情况见表 3。真空处理参数为:氩气流量 1 200 ~ 1 400 L/min,真空度 ≤ 300 Pa,处理时间大于 12 min。

### 2.3 大方坯连铸

表 2 复合精炼渣成分/%

成分	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	发气量/ (L · kg <sup>-1</sup> )
含量	36 ~ 46	15 ~ 23	16 ~ 28	7 ~ 15	≥ 200

表 3 LF 精炼过程 15CrMoG 钢的脱硫情况

Table 3 Desulphurization condition of steel 15CrMoG in LF refining process

项目	进站 S/%	出站 S/%	脱硫率/%
范围	0.006 ~ 0.011	0.005 ~ 0.011	0 ~ 28.6
平均	0.009	0.008	14.5

连铸过程采用保护浇注。15CrMoG 钢液相线温度为 1 515 ℃,中间包过热度控制在 25 ~ 50 ℃;中间包采用 PC-1 覆盖剂,结晶器采用中低碳钢保护渣;结晶器电磁搅拌为 400 A, 2.4 Hz。由于钢中含有较高的 Cr、Mo,易产生裂纹,二冷制度采用弱冷;拉速控制在 0.6 ~ 0.9 m/min。铸坯堆垛缓冷,时间 ≥ 24 h,连铸坯清理须采用砂轮,清理终了温度高于 150 ℃。

### 2.4 圆钢的轧制

采用 950 轧机线进行轧制,主要轧制规格为(mm):Φ100、Φ110、Φ120,铸坯的加热段温度控制在 1 240 ~ 1 300 ℃,均热段温度控制在 1 260 ~ 1 280 ℃,总加热时间应大于 2.5 h。

### 2.5 锅炉无缝钢管生产

15CrMoG 钢管主要工艺流程:酸洗修磨→穿孔→定径→修磨→热处理→矫直→酸洗润滑→冷拔(轧)→成品热处理→探伤(涡流、超声)。

其中穿孔设备为 Φ76 mm、Φ100 mm;冷拔设备为 LB100 t、LB50 t、LB30 t;冷轧设备为 LG150、LG120、LG110、LG80、LGH60(5 台)、LG55(2 台);成品热处理工艺 900 ~ 960 ℃ 正火 + 680 ~ 730 ℃ 回火。

## 3 试验结果

### 3.1 化学成分和气体含量

从表 1 中可见,Al、P、S 均控制较好。残余元素均控制在协议要求之内。图 1(a, b)为全流程 P 和 S 含量变化情况。

图 1(c)为全流程 Al 变化情况。整个过程 Al 有下降的趋势,炉后小平台 [Al] 平均 0.018%, LF 处理前降低到 0.015%, LF 处理后降低到 0.010%,最后成品控制在 0.005% 左右。

锅炉钢成品氧、氮、氢含量(10<sup>-6</sup>)分别为 18 ~ 28、33 ~ 66、0.5 ~ 1.3,其中氧、氮从圆钢半径

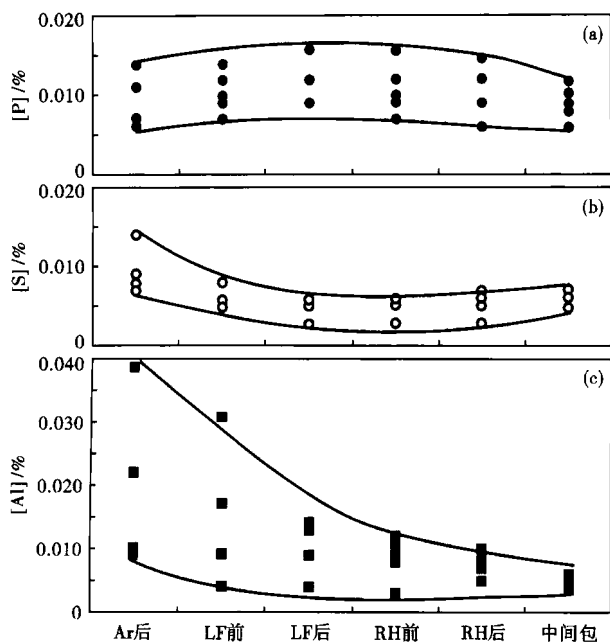


图 1 精炼过程 15CrMoG 钢 [P] (a)、[S] (b) 和 [Al] (c) 的变化

Fig. 1 Change of [P] (a), [S] (b) and [Al] (c) of steel 15CrMoG in refining process

1/2处取样检测,氢为熔炼分析。圆钢中T[O]为 $(18 \sim 42) \times 10^{-6}$ ,N含量为 $(33 \sim 66) \times 10^{-6}$ 。气体含量控制较好。

### 3.2 圆钢低倍非金属夹杂物

圆钢内部质量控制良好(表4)。各类非金属夹杂物均满足协议要求,并且钢质洁净度控制较好(表4、表5)。

### 3.3 锅炉钢管成品性能

从统计的 28 炉成品管  $\Phi(38.1 \sim 73) \text{ mm} \times (6 \sim 12.5) \text{ mm}$  检验结果看,其内壁+外壁脱碳层在 0.10~0.30 mm;非金属夹杂物 A 类 1.0~1.5 级, B 类 0.5~1.0 级, C 类 0.5~1.5 级, D 类 0.5~1.0 级, (A+B+C+D) 类在 3.5~4.0 级;晶粒度为 7.0~7.5 级,组织均为 F+P+B;低倍一般疏松均为 1.0 级;常温力学性能检验结果见表 6。

## 4 结论

(1) 采用铁水预处理→120 t LD→LF、RH 精炼→1# 方坯连铸→步进式加热炉→950 轧机轧制流程

表 4 15CrMoG 圆管坯低倍组织非金属夹杂物/级, 样本数 53

Table 4 Macrostructure and non-metallic inclusions of steel 15CrMoG round tube blank /rating, samples 53

项目	中心疏松	一般疏松	偏析	一般点状偏析	边缘点状偏析	非金属夹杂物					
						A	B	C	D	D <sub>s</sub>	A+B+C+D
范围	0.5~1.0	0.5~1.0	0	无	无	0.5~1.5	0.5~2.0	0.5~1.0	0.5~1.0	0.5~1.0	2.0~4.5
技术要求	≤2.0	≤2.0	≤2.0	不允许有		≤2.0	≤2.0	≤1.0	≤2.0	≤1.0	≤4.5

表 5 15CrMoG 圆钢非金属夹杂物分布/炉

Table 5 Distribution of non-metallic inclusions of steel 15CrMoG round tube blank, heats

级别/级	A 类		B 类		C 类		D 类		D <sub>s</sub> 类
	粗	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗
0.5	25	8	44	38	51	51	49	49	40
1.0	27	27	6	12	2	2	4	4	13
1.5	1	16	2	3	0	0	0	0	0
2.0	0	2	1	0	0	0	0	0	0

表 6 成品 15CrMoG 钢管力学性能

Table 6 Mechanical properties of steel 15CrMoG tube products

项目	力学性能			压扁工艺试验
	R <sub>el</sub> /MPa	R <sub>m</sub> /MPa	A/%	
范围	370~545	440~570	23~36	合格
平均	425	500	30.5	
GB5310-2008	≥295	440~640	≥21	

生产的 15CrMoG 锅炉管用钢,化学成分、低倍以及非金属夹杂物评级等各项指标均满足用户协议要求,工艺设计合理可行。

(2) 用低铝脱氧工艺与 LF 的中碱度渣系配合的

技术生产的 15CrMoG 锅炉管用钢,全铝含量及 C 类和 D<sub>s</sub> 类非金属夹杂物评级能够满足用户协议要求。

(3) 用低铝脱氧工艺及 LF 扩散脱氧的方式生产的 15CrMoG 锅炉钢 T[O] 为  $(18 \sim 42) \times 10^{-6}$ , [N] 为  $(33 \sim 66) \times 10^{-6}$ 。

### 参考文献

- 1 阳 燕,刘建华,包燕平. 高压锅炉管用钢 P12 的洁净度分析[J]. 钢铁钒钛,2010,31(4):62-66.
- 2 唐海燕,李京社,何建勋,等. EAF-LF/VD-CC 流程生产高压锅炉钢的工艺[J]. 北京科技大学学报,2007,29(增刊1):90-92.
- 3 秦明富,古晓明,曹 勇,等. 电站锅炉管用钢 T91 冶炼工艺研究[J]. 特钢技术,2003(1):9-14.
- 4 唐海燕,李京社,刘 亮,等. 高压锅炉钢非金属夹杂物研究[J]. 炼钢,2008,24(4):26-29.
- 5 官常忠. 电站锅炉管用钢 T91 脱磷、去硫研究[J]. 特钢技术,2002(2):35-39.

寄海明(1984-),男,助理工程师,2007 年四川大学毕业,特钢新产品开发。

收稿日期:2012-03-22