

## BOF-LF-RH-CC 流程高压锅炉管用钢 12Cr1MoVG 的生产实践

邓通武

(攀钢集团研究院有限公司材料所,攀枝花 617000)

**摘要**  $\Phi 110 \sim \Phi 280$  mm 锅炉管用热轧圆钢 12Cr1MoVG ( $\% : 0.08 \sim 0.15\text{C}, 0.17 \sim 0.35\text{Si}, 0.40 \sim 0.70\text{Mn}, \leq 0.015\text{P}, \leq 0.010\text{S}, 0.90 \sim 1.20\text{Cr}, 0.25 \sim 0.35\text{Mo}, 0.15 \sim 0.30\text{V}, \leq 0.015[\text{Alt}]$ ) 的生产工艺流程为 120 t 顶底复吹转炉-LF-RH-CC-轧制。通过控制铁水 [As]、[Sn]、[Sb]、[Pb]、[Bi], 控制转炉终点 [C] 0.04% ~ 0.08%、[P]  $\leq 0.010\%$ 、[S]  $\leq 0.010\%$ , 出钢过程铝铁脱氧, 钢包喂铝线控制 [Alt]  $\leq 0.015\%$  并用复合精炼渣和少量铝丸终脱氧, 控制中间包钢水过热度 20 ~ 35  $^{\circ}\text{C}$ , 全程保护浇注等工艺措施, 使试验钢的 [As] + [Sn] + [Sb] + [Pb] + [Bi]  $\leq 0.029\%$ 、[P]  $\leq 0.011\%$ 、[S]  $\leq 0.008\%$ 、[Alt]  $\leq 0.011\%$ , 各类夹杂物级别均  $\leq 1.0$ , 满足用户的技术要求。

**关键词** 高压锅炉管 12Cr1MoVG 钢 120 t BOF-LF-RH-CC 热轧圆钢

## Production Practice of Steel 12Cr1MoVG for High Pressure Boiler Tube by BOF-LF-RH-CC Process

Deng Tongwu

(Institute for Material Research, Panzhihua Iron and Steel Institute Co Ltd, Panzhihua 617000)

**Abstract** The production flow sheet of  $\Phi 110 \sim \Phi 280$  mm hot rolled round steel 12Cr1MoVG for boiler tube ( $\% : 0.08 \sim 0.15\text{C}, 0.17 \sim 0.35\text{Si}, 0.40 \sim 0.70\text{Mn}, \leq 0.015\text{P}, \leq 0.010\text{S}, 0.90 \sim 1.20\text{Cr}, 0.25 \sim 0.35\text{Mo}, 0.15 \sim 0.30\text{V}, \leq 0.015[\text{Alt}]$ ) is 120 t top and bottom combined blown converter-LF-RH-CC-Rolling process. With the process measures including to control hot metal [As], [Sn], [Sb], [Pb] and [Bi], control converter end point [C] 0.04% ~ 0.08%, [P]  $\leq 0.010\%$  and [S]  $\leq 0.010\%$ , deoxidize by aluminum iron during tapping, feed Al wire in ladle to control [Alt]  $\leq 0.015\%$ , refine by compound refining slag and some aluminum shot in LF process, control tundish liquid superheating extent 20 ~ 35  $^{\circ}\text{C}$ , whole-shielding-cast etc, the [As] + [Sn] + [Sb] + [Pb] + [Bi] is  $\leq 0.029\%$ , the [P], [S] and [Als] are respectively  $\leq 0.011\%$ ,  $\leq 0.008\%$  and  $\leq 0.010\%$ , and the rating of each series inclusion is  $\leq 1.0$  to meet the technical requirement of user.

**Material Index** High Pressure Boiler Tube, Steel 12Cr1MoVG, 120 t BOF-LF-RH-CC, Hot-Rolled Round Steel

12Cr1MoVG 钢管是广泛应用于电站锅炉过热器、集箱及主蒸汽导管等部件的一种低合金耐热钢, 最高使用温度可达 580  $^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>。攀钢针对用户的特殊要求, 采取了相应的技术措施, 通过 BOF-LF-RH-CC 的生产工艺流程, 成功开发出了  $\Phi 110 \sim \Phi 200$  mm 的 12Cr1MoVG 热轧圆钢。

### 1 工艺流程和主要技术条件

铁水预处理→120 t 顶底复吹转炉冶炼→LF 精炼→RH 真空处理→6 机 6 流 280 mm × 380 mm 方坯连铸→ $\Phi 950 + \Phi 800 + \Phi 850$  轧机轧制。

由于 12Cr1MoVG 属低合金耐热钢, 在高温、高压的恶劣环境中服役, 因此, 要求具有良好的综合性能和较高的纯净度, 在 YB/T5137-1998 规定的技术条件外, 用户还提出以下要求:

(1) [P]  $\leq 0.015\%$ 、[S]  $\leq 0.010\%$ 、[Alt]  $\leq 0.015\%$ 、[H]  $\leq 0.0002\%$ ; (2) [As]  $\leq 0.015\%$ 、

[Sn]  $\leq 0.015\%$ 、[Sb]  $\leq 0.010\%$ 、[Pb]  $\leq 0.008\%$ 、[Bi]  $\leq 0.010\%$ 、[As] + [Sn] + [Sb] + [Pb] + [Bi]  $\leq 0.050\%$ ; (3) 非金属夹杂物 (/级): A、B、D 类  $\leq 2.0$ , C、Ds 类  $\leq 1.0$ , A + B + C + D 类  $\leq 4.5$ 。

### 2 主要控制措施

#### 2.1 五害元素控制

钢长时间高温加热过程中, As、Sn 逐渐向晶界移动, 晶界富集因数可高达 250, 当 As、Sn 在晶界的含量达到一定数值可大幅降低钢的韧性<sup>[2]</sup>。钢中含 0.05% Sn 会导致连铸坯热塑性明显恶化<sup>[3]</sup>。同时, 由于 12Cr1MoVG 需长时间在高温下服役, 进一步增加了五害元素向晶界偏聚的倾向, 从而降低其高温机械性能。

攀钢铁水的五害元素含量通常为 (/%) : 0.015 ~ 0.020 [As]、0.010 ~ 0.015 [Sn]、0.010 ~ 0.015 [Sb]、0.005 ~ 0.010 [Pb]、0.005 ~ 0.010

[Bi]。目前在钢的冶炼过程中,除[Pb]能够去除以外,[As]、[Sn]、[Sb]、[Bi]均没有经济有效的去除方法。因此,采取了严格选料的技术措施:首先选择条件较好的铁水进行冶炼,要求入炉铁水中五害元素为(/%):[As]≤0.010、[Sn]≤0.010、[Sb]≤0.005、[Pb]≤0.005、[Bi]≤0.010;然后在钢的冶炼过程中,要求使用五害元素含量较低的辅料及合金。

## 2.2 夹杂物控制

### 2.2.1 转炉冶炼

由于用户对[Alt]和C类夹杂物提出了较为严格的要求,因此,在这种低碳、低铝的条件下,降低钢水初始氧含量是关键,可为钢中的全氧控制及精炼打下基础。由碳氧平衡曲线可知,控制较高的终点碳含量可降低钢中的氧含量,但同时容易出现成品碳含量超标、终点磷高及出钢温度低的难题。12Cr1MoVG钢转炉终点控制目标为(/%)0.04~0.08[C]、≤0.010[P]、≤0.010[S],出钢温度≥1680℃。采取以下几点技术措施,使转炉终点钢水达到要求:

(1)由于攀钢采用的是半钢冶炼(铁水需进行提钒处理),导致了半钢中的碳含量和入炉温度较低,对出钢温度、终点碳及钢中氧的控制极为不利,因此,在生产中尽量选取半钢碳含量和温度相对较高的半钢来冶炼12Cr1MoVG;

(2)强化前期脱磷,减轻冶炼后期的脱磷负担;

(3)采取转炉顶底复吹技术促进钢-渣反应,以及合理的供氧制度确保钢水不深吹;

(4)出钢过程中采用挡渣塞挡渣出钢,严格控制下渣量,减轻精炼过程回磷和精炼负担。

### 2.2.2 脱氧及精炼工艺

由于技术条件中对C类夹杂物和[Alt]具有较高要求,为脱氧及精炼工艺的制定造成了极大的难度。若采取硅脱氧,则C类夹杂物容易超标;若采取铝脱氧,则[Alt]也容易超标。在实际生产过程中,采取了微量铝脱氧再配以专用复合精炼渣精炼的工艺技术。

在出钢过程加入适当的铝铁进行预脱氧,炉后小平台根据钢水氧活度补喂铝线,在确保[Alt]≤0.015%的同时,尽可能脱除钢中的氧,并可有效避

免C类夹杂物超标。喂线后再进行软吹氩,以利于夹杂物的上浮及成分的均匀。

在LF精炼工序,化渣后加入复合精炼渣和少量铝丸,进行终脱氧,并适当降低钢渣碱度,以利于D类和Ds类非金属夹杂物的有效控制。LF精炼过程全程吹氩,并保证一定的吹氩时间。

在RH工序进行真空处理,确保[H]≤0.0002%,并进一步去除钢中的夹杂。

### 2.3 铸坯质量控制

在生产过程中,采取了0.75 m/min的恒速浇铸措施,并严格控制中间包钢水过热度在20~35℃。进行结晶器电磁搅拌和浇铸末端轻压下,进一步提高铸坯质量。

采用全程保护浇铸,钢包长水口套密封圈和吹氩密封,浸入式水口增加纤维密封垫圈等措施。中间包采用PC-1覆盖剂和结晶器采取中低碳钢专用保护渣保护浇铸,减少温降和促进夹杂物的上浮吸收。

### 2.4 轧制

12Cr1MoVG钢280 mm×380 mm铸坯在步进式加热炉中进行加热,经Φ950、Φ800和Φ850轧机分别轧制成Φ110~Φ200 mm的圆管坯。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 化学成分

生产实践结果表明,通过采取严格选料以及控制入炉铁水、辅料和合金中的五害元素含量的技术措施,确保了钢中五害元素控制在较低的范围之内(表1,表2)。同时采取微量铝脱氧制度以达到脱氧的目的及满足[Alt]≤0.015%的技术条件要求。

### 3.2 圆管坯低倍

用户要求一般疏松、中心疏松和偏析均≤2.0级,圆管坯的低倍检验结果为:一般疏松0.5~1.0级,中心疏松0.5~1.5级,偏析0~0.5级。从检验结果来看,一般疏松均≤1.0级、中心疏松≤1.5级、偏析≤0.5级,没有其它缺陷,热轧圆钢的内、外质量较好。

### 3.3 非金属夹杂物

用户要求12Cr1MoVG钢C类夹杂≤1.0级,限制了采用[Si]进行脱氧,否则极易造成C类夹杂物

表1 12Cr1MoVG钢主要化学成分/%

Table 1 Main chemical composition of steel 12Cr1MoVG /%

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Alt
控制范围	0.10~0.13	0.20~0.29	0.50~0.58	≤0.011	≤0.008	1.03~1.12	0.26~0.32	0.18~0.21	≤0.011
用户要求	0.08~0.15	0.17~0.35	0.40~0.70	≤0.015	≤0.010	0.90~1.20	0.25~0.35	0.15~0.30	≤0.015

表2 12Cr1MoVG 钢残余元素/%  
Table 2 Residual elements in steel 12Cr1MoVG /%

元素	Cu	Ni	As	Sn	Pb	Sb	Bi	[As + Sn + Sb + Pb + Bi]
控制范围	≤0.04	≤0.04	≤0.010	≤0.006	≤0.005	≤0.006	≤0.002	≤0.029
用户要求	≤0.20	≤0.25	≤0.015	≤0.015	≤0.008	≤0.010	≤0.010	≤0.050

表3 12Cr1MoVG 钢热轧材非金属夹杂物检验结果/级  
Table 3 Examination results of nonmetallic inclusions in hot rolled products of steel 12Cr1MoVG /rating

项目	A		B		C		D		A+B+C+D		Ds
	粗	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗	细	
检验结果	0	0.5~1.0	0.5	0.5	0	0	0.5	0.5~1.0	0.5~1.0	1.5~3.0	0~0.5
用户要求	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤1.0	≤1.0	≤2.0	≤2.0	≤4.5	≤4.5	≤1.0

超标。同时, [Al] 在钢中易形成尖锐棱角形  $Al_2O_3$  夹杂, 对钢的韧性负面影响较大, 钢中存在链状  $Al_2O_3$  或含  $Al_2O_3$  夹杂物, 也易在高压下成为裂纹源<sup>[4]</sup>, 从而影响 12Cr1MoVG 高压锅炉管的使用寿命。并且 [Al] 在钢中对铸坯的表面质量易产生不良影响, 文献表明<sup>[5]</sup>, 在 SA-210C 锅炉管中, 随 [Alt] 的增加, 铸坯角部裂纹指数明显增加, 当 [Alt] ≤

0.010% 时, 铸坯角部裂纹指数相对较低。因此, 用户提出了 [Alt] ≤0.015% 的技术条件要求。

在实际生产中采取的转炉低氧钢冶炼、微量铝脱氧和专用复合精炼渣精炼等工艺措施, 有效避免了硅脱氧造成 C 类非金属夹杂物超标, 并确保了钢中 [Alt] ≤0.015% 和钢水具有较高的洁净度。

表3为热轧圆钢的非金属夹杂物检验结果, 典型照片见图1, 其中 A 类粗系均为 0 级、细系均 ≤1.0 级, B 类粗系、细系均为 0.5 级, C 类均为 0 级, D 类粗系均为 0.5 级、细系均 ≤1.0 级, Ds 类均 ≤0.5 级, A+B+C+D 粗系 ≤1.0 级、细系 ≤3.0 级,



图1 12Cr1MoVG 钢圆管坯的非金属夹杂物形貌:(a)A类;(b)B类;(c)Ds类

Fig.1 Morphology of nonmetallic inclusions in round tube stock of steel 12Cr1MoVG; inclusion type: (a) A; (b) B; (c) Ds

全部满足了用户提出的严于 BG/T5137-1998 的技术条件要求。

#### 4 结语

(1) 针对五害元素的严格要求, 对原辅料进行了严格控制, 使试验钢的五害元素满足了用户的要求, 其中 [Als] ≤0.010%、[Sn] ≤0.006%、[Pb] ≤0.005%、[Sb] ≤0.006%、[Bi] =0.002%。

(2) 在低碳低铝的条件下, 采取了微量铝脱氧制度及合理的精炼工艺, 生产的 12Cr1MoVG 高压锅炉管管坯 [Alt] ≤0.011%、各类夹杂物均 ≤1.0 级, 满足了用户提出的技术条件要求。

#### 参考文献

- 1 彭自胜, 周雍茂, 钟春生. 高压锅炉管用 12Cr1MoVG 钢水平连铸圆管坯的试制. 特殊钢, 2004, 25(4): 47-49.
- 2 洗爱平, 张 盾, 王仪康. 钢中参与元素及其对钢性能的研究. 钢铁, 1999, 34(10): 64-68.
- 3 Matsuoka Hideki, Osawa Koichi, Ono Moriaki. Influence of Cu and Sn on Hot Ductility of Steel With Various C Content [J]. ISIJ International, 1997, 37(3): 255.
- 4 王 平, 傅 杰. 管线钢冶炼技术现状. 特殊钢, 1993, 14(4): 1-5.
- 5 钱 刚, 阮小江, 冷永磊. 低碳钢连铸方坯角部横裂形成分析和控制工艺. 特殊钢, 2006, 27(6): 41-43.

邓通武(1978-), 男, 工程师, 2002年东北大学毕业, 金属压力加工, 优特钢新产品开发. E-mail: dengtw@sina.com

收稿日期: 2012-03-26