

## 120 t 转炉生产 42CrMoA 合结钢水口结瘤分析及改善措施

丰 年

(山东钢铁股份有限公司莱芜分公司特钢事业部, 莱芜 271104)

**摘 要** 分析了 120 t 转炉生产 42CrMoA 合结钢( /% :0.28 ~ 0.45C, 0.17 ~ 0.37Si, 0.50 ~ 0.80Mn, ≤0.020P, ≤0.020S, 0.90 ~ 1.20Cr, 0.15 ~ 0.25Mo, Cu ≤0.20, Ni ≤0.30, 0.015 ~ 0.035Al) 塞棒和浸入式水口结瘤原因。分析表明塞棒结瘤物的主要为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和高熔点的 CaO · 2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 类钙铝酸盐, 浸入式水口结瘤物主要为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物聚集。通过控制转炉终点碳在 0.18% ~ 0.28%、转炉出钢水溶解氧含量 < 200 × 10<sup>-6</sup>、调整精炼终点钙铝参数(0.020% ~ 0.030% Al; 0.001 5% ~ 0.003 0% Ca)、连铸保护浇铸工艺实施等措施, 解决了转炉生产 42CrMoA 合结钢塞棒和水口结瘤问题。

**关键词** 42CrMoA 塞棒结瘤 120 t 转炉 浸入式水口结瘤 钙铝参数

## Analysis and Improvement Measures for Nodulation of Nozzle about Production of 42CrMoA Alloy Steel Melted by 120 t BOF

Feng Nian

(The Special Steel Division of Laiwu Branch, Shandong Iron and Steel Group Corporation, Laiwu 271104)

**Abstract** The reasons for the slug nodulation of 42CrMoA alloy steel ( /% :0.28 ~ 0.45C, 0.17 ~ 0.37Si, 0.50 ~ 0.80Mn, ≤0.020P, ≤0.020S, 0.90 ~ 1.20Cr, 0.15 ~ 0.25Mo, Cu ≤0.20, Ni ≤0.30, 0.015 ~ 0.035Al) melted by 120 t BOF and the submerged nozzle were analyzed. The results showed that the main nodule nodules were Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CaO · 2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aluminates with high melting point. By controlling the end point carbon of converter in 0.18% to 0.28%, the dissolved oxygen content of the molten steel in converter is less than 200 × 10<sup>-6</sup>, the parameters of calcium aluminum (0.020% ~ 0.030% Al; 0.001 5% ~ 0.003 0% Ca) at the end point of refining, and the casting technology of continuous casting are implemented, the nodulation of 42CrMoA junction steel stopper and the nozzle of the converter is solved.

**Material Index** 42CrMoA, Slug Nodulation, 120 t BOF, Submerged Nozzle Nodule, Parameters of Calcium and Aluminum

42CrMoA 合金结构钢属于中碳低磷铝镇静钢系列, 主要供轧钢工序轧制圆钢, 作为工程机械用钢原料使用<sup>[1]</sup>。采用转炉工艺生产 42CrMoA 汽车曲轴用钢具有生产周期较短、生产效率较高、生产成本较低和经济效益较好的特点<sup>[2]</sup>。但是由于转炉生产节奏快, 冶炼中碳低磷钢终点“去磷保碳”控制困难, 容易出现出钢下渣回磷; 终点二次点吹过氧化严重, 精炼周期受限制等因素的影响, 连铸浇铸过程中塞棒和浸入式水口内壁结瘤物附着较多, 塞棒趋势上涨明显严重时导致连铸非计划停浇事故的发生。本文较系统地研究了 42CrMoA 钢实际生产中的水口结瘤物的宏观形貌, 并用扫描电子显微镜及能谱分析仪对塞棒棒头和浸入式水口结瘤物的形貌及

微区成分进行了分析, 找出了结瘤物的形成原因, 并通过采取一系列措施减少该类事故的发生, 降低生产成本。

### 1 42CrMoA 钢生产工艺流程

42CrMoA 合结钢主要工艺流程如下: 铁水预处理→600 t 混铁炉→120 t 复吹转炉冶炼→120 t LF→120 t VD→大方坯合金钢连铸(断面 260 mm × 300 mm)→热轧圆钢。该钢种化学成分见表 1。

转炉工艺: 转炉入炉铁水 S ≤ 0.040%, 装入量实行定量装入, 4 t 废钢 + 120 t 铁水, 总装入量 (124 ± 0.5) t。转炉终渣碱度控制在 2.8 ~ 3.2, 转炉拉碳取样放钢, 终点碳 ≥ 0.10%。采用铝锰铁、硅

表 1 42CrMoA 钢化学成分/%  
Table 1 Chemical composition of steel 42CrMoA/%

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	Ni	Al
标准	0.38 ~ 0.45	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	≤0.020	≤0.020	0.90 ~ 1.20	0.15 ~ 0.25	≤0.20	≤0.30	-
内控	0.39 ~ 0.42	0.18 ~ 0.30	0.60 ~ 0.70	≤0.018	≤0.015	1.00 ~ 1.10	0.16 ~ 0.20	≤0.10	≤0.10	0.015 ~ 0.030

高锰、碳 Mn-Fe、高碳 Cr-Fe、钼铁进行脱氧合金化,出钢过程转炉每炉加入 400 kg 石灰,铝锰铁加入量为 2 kg/吨<sub>钢</sub>。脱氧剂加入顺序:见钢流先加铝锰铁 100 kg,之后高锰、高铬、硅锰、钼铁、剩余 140 kg 铝锰铁,再加 120 kg 预熔料,挡渣前全部加完。

精炼工艺:LF 精炼主要采用碳化钙和碳化硅脱氧,精炼渣碱度控制 3.0~4.0。LF 精炼工序在调出白渣后,根据铝含量喂入铝线补铝,LF 终点进行钙处理,不软吹。进 VD 前组织倒渣,VD 真空度 < 67 Pa 保持时间 ≥ 10 min。VD 氩气控制:实行分阶段控制。真空度达到 67 Pa 以前,压力 5~10 L/min;真空度 < 67 Pa 保持阶段,流量 25~35 L/min;破空之前及软吹阶段,压力 5~10 L/min。软吹前加覆盖剂 ≥ 80 kg/炉,再加碳化稻壳 ≥ 60 kg/炉,软吹时间 ≥ 15 min。

连铸工艺:使用整体塞棒中间包,全保护浇铸,三恒操作(恒中间包温度、恒结晶器液面、恒拉速)。260 mm × 300 mm 断面拉速控制在 0.6~0.7 m/min。中间包使用碱性覆盖剂,保护渣采用中碳 CrMo 合结钢专用保护渣(保护渣成分及性能见表 2、表 3),连铸二冷水配水采用弱冷工艺。

表 2 42CrMoA 钢保护渣成分和碱度

Table 2 Ingredient and basicity of shielding flux for steel 42CrMoA

渣成分/%								碱度
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O	F	C	(R)
4.77	33.35	21.61	1.73	1.02	8.79	5.87	14.50	0.65

表 3 42CrMoA 钢保护渣物理性能指标

Table 3 Physical properties of shielding flux for steel 42CrMoA

1350℃ 熔速/s	1300℃ 粘度(Pa·s)	H <sub>2</sub> O/ %	0.15~1 mm 粒度/%	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	熔点/ ℃
46	0.473	0.28	95	0.66	1078

## 2 塞棒和浸入式水口结瘤物检测分析

### 2.1 结瘤物形貌分析

42CrMoA 合结钢在浇铸 15 h 左右,连铸塞棒趋势上涨幅度较大,导致塞棒失控非计划停浇。停浇后吊处塞棒,同时留存更换下的浸入式水口,发现有大量结瘤物在浸入式水口内壁,下口端部聚集成絮状,观察调出的塞棒,结瘤物主要集中在塞棒棒头部位 10~20 cm 部位。塞棒和浸入式水口上附着的结瘤物都呈现黄色,具体情况见图 1。

### 2.2 结瘤物电镜和能谱分析

对图 1 中塞棒棒头和浸入式水口内黄色的结瘤物取样,使用扫描电子显微镜分别对塞棒结瘤物的表层、中层及浸入式水口附着物进行显微组织形貌观察,结瘤物微观形貌如图 2 所示。从图 2 结瘤物显微组织形貌可以看出塞棒棒头上结瘤物烧结较浸入式水口内夹杂物致密,浸入式水口内附着物程絮状,结构疏松,颗粒间没有烧结现象,是较多细小夹杂物聚集而成。

对塞棒结瘤物的表层图 3(a)、中层图 3(b)及浸入式水口附着物图 3(c)进行能谱分析。能谱分析结果中元素原子百分比含量如表 4 所示。从表 4 可以分析出塞棒结瘤物的主要成分为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和高熔点的 CaO·2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 类钙铝酸盐、硅酸盐夹杂物,浸入式水口絮状结瘤物主要成分为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物聚集。

### 2.3 42CrMoA 合结钢塞棒和浸入式水口结瘤原因分析

从扫描电镜对试样中夹杂物的观察来看,塞棒棒头结瘤物主要为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和高熔点的 CaO·2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 类钙铝酸盐夹杂物。浸入式水口絮状结瘤物主要成分为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物聚集。42CrMoA 合结钢为中碳低

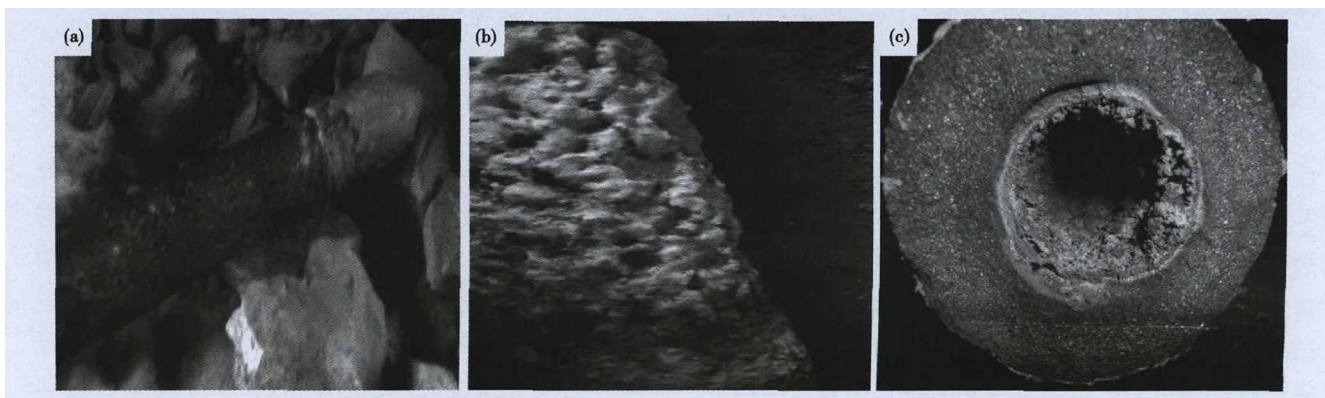


图 1 结瘤物宏观形貌:(a)塞棒整体样;(b)塞棒棒头结瘤物;(c)浸入式水口结瘤物

Fig. 1 Macromorphology of nodules:(a) Slug whole sample;(b) Stopper nodule;(c) Submerged nozzle nodule

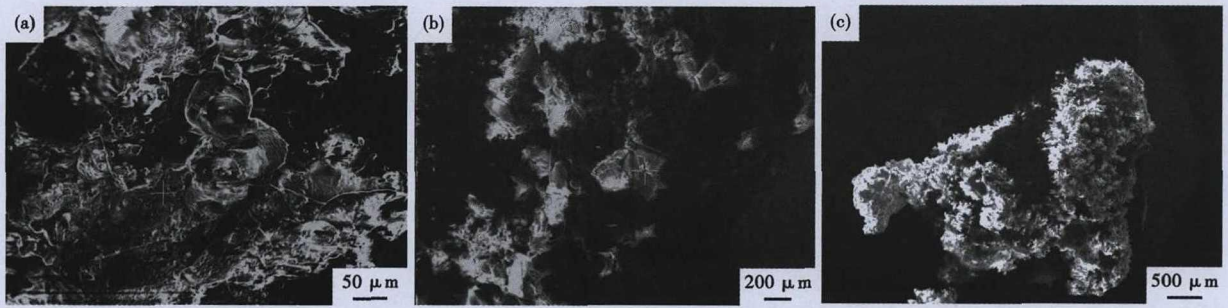


图 2 结瘤物扫描电镜形貌:(a)塞棒棒头结瘤物表层;(b)塞棒棒头结瘤物中层;(c)浸入式水口结瘤物

Fig. 2 Morphology of nodules, scanning electron microscope: (a) Stopper nodule surface; (b) Stopper nodule layer; (c) Submerged nozzle nodule

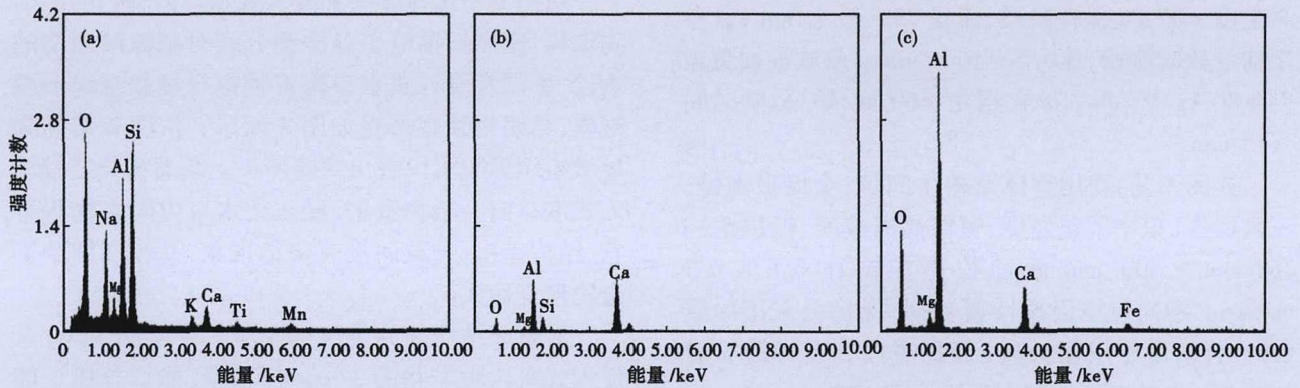


图 3 结瘤物能谱图:(a)塞棒棒头结瘤物表层;(b)塞棒棒头结瘤物中层;(c)浸入式水口结瘤物

Fig. 3 EDS of inclusions about nodule: (a) Stopper nodule surface; (b) Stopper nodule layer; (c) Submerged nozzle nodule

磷铝镇静钢,转炉冶炼中碳低磷钢低碳为了确保去磷效果,实现低磷出钢,要求转炉强化前期供氧强度,实现低碳低磷出钢。出钢过程通过加入大量增碳剂进行配碳,控制不当容易造成钢水过氧化严重。出钢过程加入铝块脱氧生成的  $Al_2O_3$  上浮不充分,精炼过程钢水钙铝参数控制不稳,不能对夹杂物  $Al_2O_3$  起到很好的变性处理,在连铸浇铸过程中生产的高熔点的  $CaO \cdot 2Al_2O_3$  类钙铝酸盐夹杂物和  $Al_2O_3$  类夹杂物在塞棒棒头处聚集,造成塞棒上涨影响连铸正常浇铸。现场实际生产过程中为了保证生产,对中间包上水口及塞棒进行烧氧处理,塞棒棒头上夹杂物在烧氧过程中烧结致密与塞棒棒头粘附在一起难于脱落,这也说明了塞棒棒头处结瘤物比浸入式水口内结瘤物致密原因。浸入式水口内结瘤物主要是连铸浇铸过程钢水中的酸溶铝与钢水中自由氧及浇铸过程保护不当吸入的空气一起生成的  $Al_2O_3$  类夹杂物在水口壁上聚集造成。对 42CrMoA 合结钢生产过

表 4 结瘤物元素原子百分比/%

Table 4 Elemental atomic percentage for nodule / %

部位	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe	K	Na	Mn	Ti
塞棒附着物表层	46.31	2.37	14.89	18.45	2.18	-	1.04	13.12	0.89	0.75
塞棒附着物中层	34.88	1.87	26.45	7.9	28.90	-	-	-	-	-
浸入式水口附着物	46.88	2.80	40.07	-	7.49	2.75	-	-	-	-

程中结瘤严重的的浇次钙铝参数进行分析,  $Ca/Al_s$  的比值为 0.072,  $Al_s/Al$  的比值为 0.77,由此可见生产过程铝、钙参数控制不稳,钙处理效果较差。

### 3 改进措施

#### 3.1 提高转炉终点碳命中率

钢水过氧化是夹杂物的源头<sup>[3]</sup>。在铁水成分和吹炼制度一定的情况下,要降低转炉吹炼终点钢液溶解氧含量,必须提高转炉终点碳含量,减少后期点吹次数<sup>[4]</sup>。研究表明不同终点碳含量下钢水中对应溶解氧含量随着转炉终点碳含量的降低而提高<sup>[5]</sup>,转炉终点碳含量越低,钢水中溶解氧含量和渣中(FeO)比例明显的增加<sup>[6]</sup>。通过对转炉炉口火焰观察,控制氧枪抢位,将 42CrMoA 合结钢终点碳

含量控制在0.18%~0.28%,同时提高转炉一次拉碳合格率,减少后期点吹次数,转炉出钢钢水溶解氧含量 $<200 \times 10^{-6}$ 。

### 3.2 钙铝参数的控制

相关理论表明<sup>[7]</sup>:当 $0.07\% < [Ca]/[Al] < 0.1\% \sim 0.15\%$ 时,生成的夹杂物主要为 $CaO \cdot 6Al_2O_3$ ,连铸过程容易导致水口结瘤;当 $[Ca]/[Al] > 0.1\% \sim 0.15\%$ 时,生成的夹杂物主要为低熔点的 $7CaO \cdot 2Al_2O_3$ ,大大改善钢水的流动性,可完全避免水口结瘤。因此生产过程加强终点钢水铝含量和钙含量控制,42CrMoA合结钢终点铝含量控制在0.020%~0.030%,钙含量控制在0.0015%~0.0030%。终点钙含量不可过高因为连铸水口和塞棒材质为 $Al_2O_3-C$ 质,含量过高容易侵蚀塞棒和水口,造成更严重的流动性事故。42CrMoA钢调整前后钙铝参数见表5所示,调整后 $Ca/Als > 0.1$ , $Als/Al > 0.9$ 确保钢水脱氧效果,降低钢水自由氧。同时优化转炉脱氧剂合金加入顺序,减少精炼铝线喂入量避免LF炉后期补铝情况出现,将LF炉软吹时间由10 min延长到15 min,保证夹杂物上浮时间。42CrMoA钢精炼渣成分见表6。

### 3.3 连铸保护浇铸工艺控制

中间包使用双层渣工艺,上层采用碳化稻壳保温,下层使用碱性覆盖剂吸附夹杂。同时提高钢包水口的密封性能,将长水口头部形状由碗式改为台

式,增大长水口碗口与钢包下水口的结合面积,这样水口依靠底封和圆锥侧壁双重密封,提高了密封效果,结合流量需求,改小长水口内径,避免水口流量大形成真空负压区吸气。同时调整钢包水口氩封氩气流量,由原来的 $4 \text{ m}^3/\text{h}$ 增加到 $5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,有效的避免了浇注过程钢包水口与长水口连接处吸气二次氧化钢水。

## 4 结语

通过扫描电子显微镜及能谱分析仪对42CrMoA合结钢生产过程中塞棒棒头和浸入式水口结瘤物的形貌及微区成分进行了分析,表明塞棒结瘤物的主要成分为 $Al_2O_3$ 和高熔点的 $CaO \cdot 2Al_2O_3$ 类钙铝酸盐、硅酸盐夹杂物,浸入式水口絮状结瘤物主要成分为 $Al_2O_3$ 夹杂物聚集。转炉吹炼过程钢水过氧化、精炼钙铝参数控制不当、连铸保护浇铸不好使造成结瘤的主要原因。通过提高转炉终点碳命中率、钙铝参数的控制、连铸保护浇铸工艺控制等工艺措施的实施,有效解决了塞棒和水口结瘤问题,保证了生产顺利进行。

### 参考文献

- [1] 蒲学坤. 42CrMoA合金结构钢大方坯连铸工艺的研究与应用[J]. 中国冶金, 2017, 17(9): 11-13.
- [2] 郑朝辉, 毛天荣. 转炉工艺生产42CrMo汽车曲轴钢的生产实践[J]. 河北冶金, 2006, 151(1): 41-43.
- [3] 李晶. LF精炼技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 20-25.
- [4] 韩宇, 张明博, 何晴, 等. 100 t转炉“留渣+双渣”提钒半钢冶炼低磷钢渣成分控制的工艺实践[J]. 特殊钢, 2017, 38(1): 31-35.
- [5] 蔡开科. 连铸坯质量控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 30-39.
- [6] 张大江, 王翠娜, 向华, 等. 铝镇静钢SPHC浸入式水口结瘤成因和控制工艺[J]. 特殊钢, 2015, 36(3): 30-33.
- [7] 马文, 孙艳辉. 钙处理对钢中非金属夹杂物行为的影响[J]. 钢铁研究, 2013, 41(2): 13-16.

丰年(1985-),男,工程师,2008年武汉科技大学(本科)毕业,炼钢工艺过程控制及产品研发。

E-mail: fnfengnian@163.com

收稿日期: 2018-04-23

表5 42CrMoA钢调整前后钙铝参数

Table 5 Parameters of calcium and aluminum before and after adjustment of steel 42CrMoA

参数	调整前	调整后
Ca/Als	0.065	0.12
Als/Al	0.83	0.92
Als/%	0.020	0.023
Al/%	0.024	0.025
Ca/%	0.0013	0.0027

表6 42CrMoA钢精炼渣成分和碱度

Table 6 Ingredient and basicity of refining slag for steel 42CrMoA

渣成分/%									碱度
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe	CaO	MgO	P	S	MnO	TiO <sub>2</sub>	(R)
12.39	12.04	0.99	57.88	5.62	0.32	0.86	0.06	0.86	4.67