

## 优化脱氧工艺提高 38CrMoAl 钢连浇成功率

周伟基<sup>1</sup> 薄永明<sup>1</sup> 吉海峰<sup>1</sup> 潘利<sup>1</sup> 战东平<sup>2</sup>

(1 抚顺特殊钢股份有限公司技术中心, 抚顺 113001; 2 东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004)

**摘要** 研究了连铸 38CrMoAl 钢 (/% : 0.35 ~ 0.42C, 0.20 ~ 0.45Si, 0.30 ~ 0.60Mn, 1.35 ~ 1.65Cr, 0.15 ~ 0.25Mo, 0.70 ~ 1.10Al) 夹杂物类型和形成原因。通过优化脱氧制度; 提高 60 t EAF 终点 [C] ≥ 0.010%, 保持高碱度渣 ( $R \geq 2.5$ ), 出钢前 2 ~ 3 min 向熔池喷吹碳粉, 控制 (FeO), 出钢过程减少 Si-Fe 加入量; LF 喂铝线并用铝粒扩散脱氧, 采用 (/% ) 50 ~ 60CaO, 10 ~ 15SiO<sub>2</sub>, 15 ~ 20Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ≤ 0.7 (FeO + MnO), ≤ 5MgO 高碱度渣; 做好 VD 后保护浇铸, 有效地降低钢中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 类型非金属夹杂物。结果表明, 优化工艺后 38CrMoAl 钢连浇炉数达到 9 炉, 夹杂物废品率 ≤ 1%。

**关键词** EAF-LF-VD-CC 流程 38CrMoAl 钢 脱氧 夹杂物 连续浇铸炉数

## Increasing Continuous-Continuous Casting Success Rate of Steel 38CrMoAl by Optimizing Deoxidation Process

Zhou Weiji<sup>1</sup>, Bo Yongming<sup>1</sup>, Ji Haifeng<sup>1</sup>, Pan Li<sup>1</sup> and Zhan Dongping<sup>2</sup>

(1 Technical Center, Fushun Special Steel Co Ltd, Fushun 113001;

2 School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004)

**Abstract** The types and formation cause of inclusions in casting steel 38CrMoAl (/% : 0.35 ~ 0.42C, 0.20 ~ 0.45Si, 0.30 ~ 0.60Mn, 1.35 ~ 1.65Cr, 0.15 ~ 0.25Mo, 0.70 ~ 1.10Al) are studied. By optimizing deoxidation technique including increasing 60 t EAF end [C] ≥ 0.010% and maintaining high basicity slag ( $R \geq 2.5$ ), injecting carbon powder in bath before tapping for 2 ~ 3 min and controlling (FeO), decreasing adding Si-Fe amount during tapping; in LF refining process feeding aluminium wire and using aluminium shot for diffusion deoxidation, using high basicity refining slag (/% : 50 ~ 60CaO, 10 ~ 15SiO<sub>2</sub>, 15 ~ 20Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ≤ 0.7 (FeO + MnO), ≤ 5MgO); and doing best shielding casting after VD process, the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> types non-metallic inclusions in steel is effectively decrease. Results show that with optimum process the continuous-continuous castin heats of steel 38CrMoAl are up to 9 heats, the rejection rate for inclusions is ≤ 1%.

**Material Index** EAF-LF-VD-CC Flow Sheet, Steel 38CrMoAl, Deoxidation, Inclusions, Continuous-Continuous Casting Heats

合金结构钢 38CrMoAl 具有高的表面硬度、耐磨性及疲劳强度, 并具有良好的耐热性及耐腐蚀性。用于制作高耐磨性、高疲劳强度和相当大的强度、处理后尺寸精度高的氮化零件, 如仿模、气缸套、齿轮、高压阀门、镗杆、蜗杆、磨床主轴等。东北特钢集团抚顺特殊钢股份有限公司(抚顺特钢)采用 60 t 超高功率电弧炉冶炼 38CrMoAl 钢时, 由于该钢种含有约 1% 的 Al(成分见表 1), 钢液粘度较大, 且存在较为严重的夹杂物问题, 在连铸浇注过程中位于水口部位沉积, 极易出现絮流现象, 钢水的连浇性差。本文主要通过扫描电镜分析 38CrMoAl 钢的夹杂物类型, 在分析缺陷产生原因的基础上, 对脱氧制度进行

优化研究, 提高了连浇成功率, 减少夹杂废品。

### 1 原工艺操作情况及实施效果

#### 1.1 原工艺操作情况

原工艺为: 60 t 电弧炉(出钢合金化)-LF(白渣精炼)-扒渣-VD(加铝合金化、真空处理)-弱吹氩-连铸。抚顺特钢采用这种工艺生产 38CrMoAl 钢时, 连铸最多能实现 3 连浇, 连浇过程水口絮流的倾向非常严重。为分析夹杂物及絮流的主要原因, 在试验时按电弧炉出钢、LF 样 1、LF 样 2、VD 工位以及成品材(简称成品)取样分析夹杂物, 以便确定夹杂物在整个冶炼周期的变化情况, 为工艺的优化及改进奠定基础。原工艺的典型夹杂物形貌及数量情况分布见图 1、表 2。

由图 1 和表 2 可以看出, 从对冶炼过程夹杂物的整个变化来看, 电弧炉终点氧含量较高, 至少为  $500 \times 10^{-6}$ , 此时加铝脱氧生成的主要是大骨骼状的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物。另外, 部分此类夹杂物中还含有一

表 1 38CrMoAl 钢化学成分/%

Table 1 Chemical composition of steel 38CrMoAl /%					
C	Si	Mn	Cr	Mo	Al
0.35 ~ 0.42	0.20 ~ 0.45	0.30 ~ 0.60	1.35 ~ 1.65	0.15 ~ 0.25	0.70 ~ 1.10

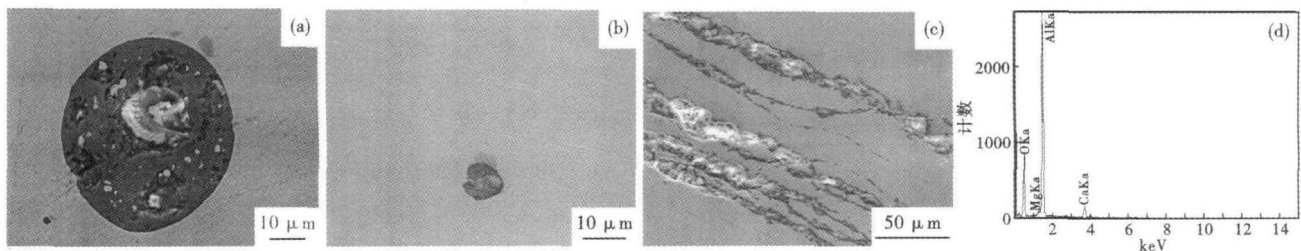


图1 原工艺38CrMoAl钢中典型非金属夹杂物形貌(a,b,c)及其能谱分析(d):(a)电弧炉;(b)VD;(c)成品材;(d)成品

Fig. 1 Morphology of typical non-metallic inclusions (a, b, c) in steel 38CrMoAl melting by original process and energy spectrum figure (d): (a) EAF; (b) VD; (c) finished product; (d) finished product

表2 原工艺38CrMoAl钢中的夹杂物数量及尺寸变化  
Table 2 Change of amount and size of inclusions in steel 38CrMoAl melting by original process

项目	电弧炉	LF样1	LF样2	VD
夹杂物直径/ $\mu\text{m}$		夹杂物个数		
10	0	0	21	0
15	5	1	5	0
20	10	2	7	5
30	4	1	4	2
40	5	1	1	3
50	3	2	1	6
100	2	3	0	2
500	1	0	0	0
夹杂物面积/ $\text{mm}^2$	0.295	0.022	0.001	0.002
试样面积/ $\text{mm}^2$	525	476	429	363
面积比/ $10^{-6}$	561	56	25	6

定量的 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{MnO}$ 。进入LF-1精炼期,钢中的溶解氧含量下降至 $(10 \sim 20) \times 10^{-6}$ ,此阶段主要为 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物,部分夹杂物中含有 $\text{CaS}$ ,但 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 尖晶石类夹杂物较少。此阶段夹杂物多呈球状。到LF精炼后期,LF-2中出现了大量 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 尖晶石类夹杂物。表明随着冶炼过程的进行,钢包 $\text{MgO-C}$ 砖被侵蚀或钢包顶渣中的 $\text{MgO}$ 进入钢液中;此时,存在钙含量高的 $\text{CaS}$ 夹杂物。由于该钢种Al含量较高,浇注过程保护浇注不好,钢水极易被氧化生成大量的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物沉积在水口导致浇铸过程絮流。图1(c)也说明到成品仍有大颗粒的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物存在,这是造成水口絮流的原因之一。

## 2 脱氧制度的优化及保护浇注

通过对原工艺的夹杂物形成过程的分析,新工艺着重对各个环节夹杂物的生成时机、上浮及防止二次氧化等方面进行控制。

### 2.1 电弧炉控制工艺

从定氧仪的数据统计可知,电弧炉钢液中的溶解氧含量通常在 $(800 \sim 1300) \times 10^{-6}$ [1-2]。根据C-O平衡和T-O平衡关系可知,在一定的温度下,钢中

的 $[\text{O}]$ 和 $[\text{C}]$ 成反比;而在一定的碳含量下,钢中的 $[\text{O}]$ 和钢液温度成正比[3-4]。38CrMoAl钢在电弧炉出钢前钢水过氧化严重;钢液温度较高,一般 $T \geq 1650^\circ\text{C}$ ,此时钢中溶解氧达到峰值。

因此可以采用钢水温度控制和终点碳含量控制等方式控制氧含量,综合比较各方式对氧含量的影响,采用适当提高终点碳( $[\text{C}] \geq 0.010\%$ )和保持高碱度渣( $R \geq 2.5$ )的工艺更为合理,因此38CrMoAl钢电弧炉钢液氧含量控制工艺如下:

(1)在出钢前2~3 min时,向熔池中喷吹碳粉,控制炉渣中的 $(\text{FeO})$ ,达到最大程度去除钢液中的溶解氧含量的目的。

(2)减少出钢过程中Si-Fe合金的加入量,避免因Si-Fe大量氧化造成渣子碱度降低,防止在后期加铝合金化后还原渣中的硅,导致 $[\text{Si}]$ 成分不合格。

### 2.2 LF工艺

经钢包脱氧合金化后,钢水中的溶解氧含量大幅度下降,夹杂物(主要是 $\text{Al}_2\text{O}_3$ )大量增加[5]。因此LF精炼过程的脱氧任务主要是继续降低钢中溶解氧和一次夹杂物( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )。为此LF工艺设计为:

(1)LF到位后按一定量喂入铝线,使钢液中保持一定量的酸溶铝,在精炼过程继续进行沉淀脱氧,把钢中溶解氧迅速降下来,加快精炼进程。

(2)用铝粒进行扩散脱氧,使用铝粒快速将渣中的 $(\text{FeO})$ 、 $(\text{MnO})$ 等氧化物还原,提高精炼渣的还原性。同时加入碳粉,在不降低炉渣碱度的情况下,生成CO脱氧产物,降低炉气中的氧分压,减少LF精炼过程中的二次氧化。

(3)白渣精炼是LF冶炼的工艺特征,由于碱性渣中的 $\text{CaO}$ 可以显著降低渣中 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 等氧化物的活度,从而提高了钢中Si、Ti、Al等元素的脱氧能力。根据碱度与钢中溶解氧的关系[6],新工艺提高了LF精炼渣碱度即提高石灰中 $\text{CaO}$ 含量和活性,不用含 $\text{SiO}_2$ 的材料造渣,LF精炼渣的成分

表 3 LF 精炼渣成分设计/%

Table 3 Design ingredient of LF refining slag /%

CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO + MnO	MgO
50 ~ 55	10 ~ 15	15 ~ 20	≤ 0.7	≤ 5

设计见表 3。

(4) LF 精炼后期, 在钢中除铝含量外其它成分符合标准要求、脱氧良好、温度合适的前提下, 对炉渣进行改质处理, 且不计炉中原始铝含量按一定量加铝合金化。根据实际情况控制出钢温度, 保证连铸过热度合适。

### 2.3 保护浇注与连铸

VD 真空处理后的纯净钢液在连铸过程中必须作好保护浇注措施, 尽可能的减少浇注过程中的二

次氧化产生铁尖晶石 ( $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) 夹杂物以致污染钢液及造成絮流。

连铸采用高液位浇注, 且要求液面稳定, 为夹杂物在中间包中最后的上浮创造条件。

### 3 工艺优化的效果

优化工艺炉中夹杂物的尺寸大小如图 2 所示, 优化工艺 38CrMoAl 钢中的夹杂物数量及尺寸大小的变化统计见表 4。由表 4 可以看到, 优化工艺后, 夹杂物主要为球形  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物, 数量明显减少, 尺寸也明显降低, 这极大地改善了钢液的洁净度, 降低了连铸水口絮流几率, 采用优化后的冶炼工艺可以稳定地实现 9 炉连浇, 钢坯成材后探伤夹杂废品率 ≤ 1%。

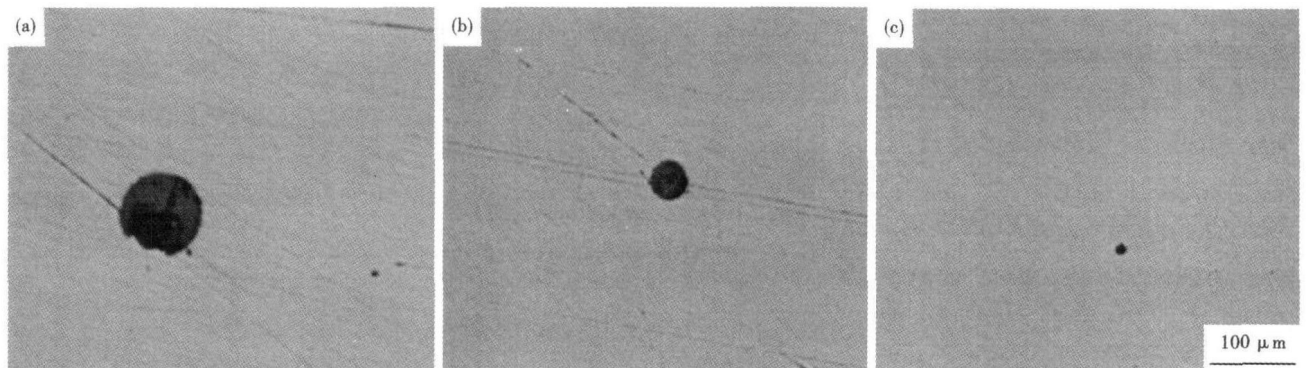


图 2 优化工艺 38CrMoAl 钢中夹杂物的尺寸大小: (a) LF 样 1; (b) LF 样 2; (c) VD

Fig. 2 Dimension and size of typical non-metallic inclusions in steel 38CrMoAl melting by improved process: (a) LF sample 1; (b) LF sample 2; (c) VD

表 4 优化工艺后 38CrMoAl 钢中的夹杂物数量及尺寸变化  
Table 4 Change of amount and size of inclusions in steel 38CrMoAl melting by improved process

项目	LF 样 1	LF 样 2	VD
夹杂物直径/ $\mu\text{m}$		夹杂物个数	
10	2	3	3
15	3	0.5	1
20	1	1	1
30	2	1	0
40	1	0	0
50	1	0	0
100	2	0	0
夹杂物面积/ $\text{mm}^2$	0.034	0.002	0.001
试样面积/ $\text{mm}^2$	954	1 089	1 088
面积比/ $10^{-6}$	35	2	0.7

## 4 结论

(1) 38CrMoAl 钢在工艺优化前连铸性差主要是由于以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为代表的夹杂物在水口沉积造成。

(2) 优化冶炼工艺后, 有效地提高了钢水的纯净度, 减少钢中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  类型非金属夹杂物的数量, 保

证连铸连浇顺利进行, 稳定实现 9 炉连浇。

### 参考文献

- 三本木贡治. 炼钢技术 [M]. 王舒黎译. 北京: 冶金工业出版社, 1980: 159.
- 赵沛. 炉外精炼及铁水预处理实用技术手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004: 49.
- 宫下芳雄. 铁と鋼夹杂物 [J]. 日本金属学会会报, 1973(4): 15
- Seiji Nishi, Kanehiro Ogawa. Melting of Clean Maraging Steel by Vacuum Induction Method [J]. 神户制钢技报, 1989, 39(1): 73-76
- 姜祖庚, 陈再枝. 模具钢 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988: 163-164.
- 曾新光. 高洁净度铝脱氧镇静钢冶炼技术 [J]. 辽宁特殊钢, 2005(2): 6

周伟基 (1974-), 男, 硕士, 高级工程师, 1998 年内蒙古科技大学毕业, 电弧炉冶炼、电渣重熔、二次精炼、连铸工艺研究。  
E-mail: zhouwj-gs@sohu.com

收稿日期: 2012-03-19