

LF 精炼工艺对 36MnVNS4 含硫非调质钢硫含量和夹杂物形貌的影响

熊玉彰 张贤忠

(宝钢股份中央研究院武汉分院, 武汉 430080)

摘要 试验的 36MnVNS4 含硫非调质钢(/% : 0.36C, 0.66Si, 1.00Mn, 0.010P, 0.045S, 0.26V, 0.011 0N) 的冶炼工艺流程为铁水 + 废钢-70 t EBT EAF-LF-方坯连铸-轧制。研究了 LF 19.82% Al₂O₃, (CaO)/(SiO₂) = 2.64 和 14.63% Al₂O₃, (CaO)/(SiO₂) = 2.15 两种渣系精炼对软吹后钢中氧含量, 喂 S 线后 S 的收得率以及钢中夹杂物成分和形貌的影响。结果表明, 高碱度白渣精炼工艺有利于钢中氧含量的降低, 但不利于钢中硫含量的稳定; 精炼渣碱度 (CaO)/(SiO₂) 由 2.64 降低至 2.15 时, 有利于钢中硫含量的稳定控制, 硫的回收率由 35% 提高至 75%; 两种精炼工艺下钢中的夹杂物分布、形貌和组成基本相同。通过钢包钙处理, 长条状 MnS 夹杂转变为球状复合夹杂。

关键词 含硫非调质钢 LF 精炼 精炼渣碱度 脱氧 钙处理 硫化物

Effect of LF Refining Process on Sulphur Content and Morphology of Inclusions in Sulphur Bearing Non-Quenching and Tempering Steel 36MnVNS4

Xiong Yuzhang and Zhang Xianzhong

(Wuhan Branch, Baosteel Central Research Institute, Wuhan 430080)

Abstract The steelmaking process flowsheet of tested sulphur bearing non-quenching and tempering steel 36MnVNS4 (/% : 0.36C, 0.66Si, 1.00Mn, 0.010P, 0.045S, 0.26V, 0.011 0N) is hot metal + scrap-70 t EBT EAF-LF-square billet casting-rolling. The effect of LF both slag series- 19.82% Al₂O₃, (CaO)/(SiO₂) = 2.64 and 14.63% Al₂O₃, (CaO)/(SiO₂) = 2.15 on oxygen content in liquid after soft argon blowing, S yield after feeding S wire, and compound and morphology of inclusions in steel has been studied. Results show that refining by high basicity white slag is available to decrease the oxygen content in steel, but it is unfavourable to stabilize the sulphur content in steel; decreasing the refining slag basicity (CaO)/(SiO₂) from 2.64 to 2.15 is favourable to stabilized control the sulphur content in steel, and the yield of sulphur increases from 35% to 75%; with both refining process the distribution, morphology and ingredient of inclusions in steel are basically the same. By calcium treatment in ladle the long strip MnS inclusions modify to spheroid compound inclusions.

Material Index Sulphur Bearing Non-Quenching and Tempering Steel, LF Refining, Basicity of Refining Slag, De-oxidation, Calcium Treatment, Sulphide

非调质钢^[1]应具有高洁净度来提高疲劳性能的同时, 还要求有良好的切削加工性能来保证表面光洁度和减少刀具磨损, 这就要求非调质钢中的氧含量应尽可能低、氧化物夹杂尽可能少和适当的 S 含量可形成 MnS 夹杂物改善切削加工性能。因此, 非调质钢的二次精炼承担着两项任务: 一是要减少氧化物夹杂物的数量; 二是添加 S 保证合适的硫化物夹杂, 改善硫化物夹杂的形态和性质^[2-3]。

钢包精炼脱氧和脱硫是相互促进的关系, 降低钢中氧含量, 有利于硫在钢渣中分配比 L_s 的提高; 同时, 提高精炼渣的碱度, 有利于钢液中氧化物夹杂的传递, 促进氧化物夹杂的去除^[4-7]。对于含硫非调质钢, 要求钢液具有较低氧含量的同时, 必须保证钢中有较高的硫含量来提高钢材的切削加工性能, 这在同一钢包精炼期是互相制约的精炼过程。因此对

非调质钢精炼工艺进行研究。

1 试验材料和试验方法

1.1 试验材料

36MnVNS4 含硫非调质钢的化学成分如表 1 所示。冶炼工艺为: 高炉铁水 + 废钢 → 70 t 电弧炉冶炼 → EBT 出钢 → 70 t LF 精炼 → 方坯连铸。

1.2 试验方法

试验采用两种方法来研究精炼工艺对含硫非调质钢氧、硫的控制及夹杂物的影响。表 2 分别为两

表 1 含硫非调质钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of sulphur bearing non-quenching and tempering steel / %

项目	C	Si	Mn	P	S	V	N
试验钢	0.36	0.66	1.00	0.010	0.045	0.26	0.011 0
标准	0.34 ~ 0.38	0.60 ~ 0.75	0.95 ~ 1.05	≤ 0.035	0.035 ~ 0.045	0.25 ~ 0.35	0.010 ~ 0.015

表2 A、B精炼渣系化学组成
Table 2 Ingredient of A and B refining slag series

工艺	精炼渣组成/%								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	FeO	TFe	CaF ₂	(CaO)/(SiO ₂)
A	17.50	19.82	46.16	7.72	0.43	1.25	1.02	1.98	2.64
B	21.20	14.63	45.60	8.62	0.19	2.37	1.71	2.93	2.15

注:工艺A-高碱度白渣工艺,以Al脱氧为主,Si-Mn脱氧为辅(加铝0.5 kg/t,硅锰合金10 kg/t);工艺B-适当降低渣的碱度,以Si-Mn脱氧为主,Al脱氧为辅(加铝0.2 kg/t,硅锰合金11 kg/t)。

种工艺下的精炼渣系。

在精炼各阶段取钢水浇注成柱状试样,并加工成Φ5 mm×10 mm试样在LEOC氧氮仪进行钢水氧含量分析。

将连铸坯轧制成Φ50 mm试样,对其进行金相观察。金相试样经打磨、抛光后用3%的硝酸酒精腐蚀,在OLYMPUS PME3-323UN光学显微镜下观察组织,采用JXA-8800R型电子探针分析试验钢中夹杂物的种类、形貌和成分。

2 试验结果与分析

2.1 精炼工艺对钢中氧含量的影响

由图1可以看出,钢水在进入LF精炼炉前经向钢中加入锰铁、硅铁和铝块等合金进行沉淀脱氧后,其钢水中的氧含量已从电弧炉的高氧含量($>100 \times 10^{-6}$)降低到 35×10^{-6} 。在LF精炼过程中,由于采用的精炼渣系不同,钢中氧含量有一定差别。在B精炼工艺下,钢中氧含量较高,在软吹后,其氧含量为 16×10^{-6} ;而在A精炼工艺,钢中氧含量较低,达到 14×10^{-6} 。

脱氧方式和脱氧剂用量决定了钢中平衡氧含量,表3为1550℃时钢中合金含量与之平衡的氧含量。由表3可以看出,采用Al脱氧的效率远高于Si-Mn脱氧,因此,工艺A通过增加Al脱氧剂量降

表3 与Si-Mn、Al脱氧相平衡的氧含量($T=1550\text{℃}$)/%
Table 3 Oxygen content in steel in equilibrium with Si-Mn and Al deoxidation at 1550℃ / %

脱氧方式	[Si]	[Mn]	[Al]	[O]
Si-Mn	0.60	0.90	-	0.012 0
Al	-	-	0.004	0.000 11

低了钢中的氧含量,但在实际生产过程中,钢中过高的铝含量不利于钢水的连续浇注,在连铸过程中易产生水口结瘤,影响钢水的可浇性。另外,钢中氮含量较高,过高的铝含量易在钢中产生较多的氮化铝夹杂,对含硫非调质钢的疲劳性能有不利影响。因此,主要采用Si-Mn脱氧和扩散脱氧来降低钢中氧含量,避免大量采用铝脱氧来减少钢中氧含量。

2.2 精炼工艺对钢中硫含量的影响

由表4可以看出,在A精炼工艺下,精炼炉中S的收得率只有35%,而在B精炼工艺下,精炼炉中S的收得率达到75%。

钢中S的收得率采用式(1)计算:

$$\eta = \frac{W1 - W2}{l \times m \times T \times 1000} \times 100\% \quad (1)$$

式中: η -钢中S的收得率/%;W1-S加入量/%;W2-钢中S成分增加量/%;T-精炼炉钢水量/t。

由表2可以看出,B工艺中精炼渣系SiO₂含量较A工艺高,而Al₂O₃含量较A工艺低,因而碱度也较A工艺低。由硫的分配比可知,在钢液成分确定的条件下,精炼过程中硫收得率主要受精炼渣性质的影响。随着精炼渣碱度的升高,硫的分配比和平衡常数随之增高,其原因是碱度提高,可使 $\alpha_{\text{O}^{2-}}$ 增大以及 $\gamma_{\text{S}^{2-}}$ 降低,从而提高 L_{S} 。又因 S^{2-} 半径比 O^{2-} 半径大,精炼渣中带入的 Ca^{2+} 大部分聚集在 S^{2-} 周围,造成 $\gamma_{\text{S}^{2-}}$ 降低。根据这种解释,随着碱度的提高,精炼渣中所能提供的 O^{2-} 和 Ca^{2+} 增多,使得 $\gamma_{\text{S}^{2-}}$ 降低,最终提高 L_{S} 。

2.3 精炼工艺对钢中夹杂物的影响

图2和图3为A、B两种精炼工艺下含硫非调质热轧圆钢中夹杂物的分布、形貌和成分。由图2和图3可知,两种精炼工艺下钢中的夹杂物分布、形

表4 A和B精炼工艺下S线的喂入量和收得率

Table 4 Feeding amount of S wire and yield of S refining by A and B slag series

工艺	S线加入量 (W1)/kg	钢中S增加量 (W2)/%	钢水量 (T)/t	收得率 (η)/%
A	100	0.058	60	35
B	64	0.064	75	75

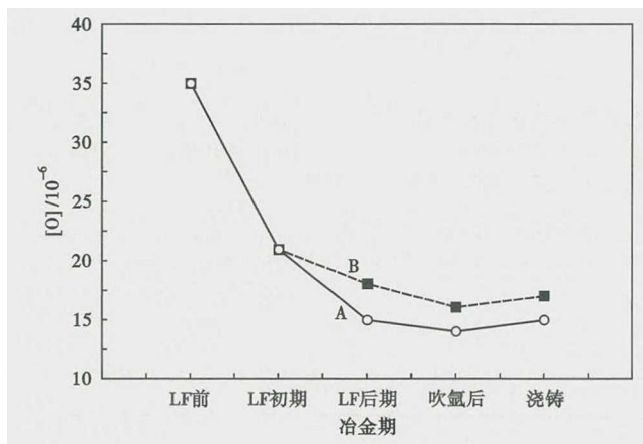


图1 A和B精炼渣系对钢中氧含量的影响

Fig. 1 Effect of A and B refining slag series on oxygen content in steel

貌和组成基本相同,都是由硫化物夹杂、氧化物夹杂组成。其中氧化物夹杂包括 $MgO-Al_2O_3$ 、 $MgO-Al_2O_3-MnO$ 等夹杂物,直径 $5 \sim 10 \mu m$;还有氧化物周围包裹硫化物夹杂;而大量存在于钢中的是长条状的 MnS 夹杂物,它有利于改善试验钢的切削加工性能。从夹杂物的数量来看(图 2a,图 3a),A 精炼工艺下的夹杂物数量较 B 精炼工艺下少,这主要是因为 A 精炼工艺下的高碱度精炼渣系有利于夹杂物的吸收、上浮而去除。

硫化物夹杂对微合金钢来说,一方面它为铁素体析出提供核心,从而增加了铁素体形成数量,细化了铁素体-珠光体组织;另一方面它与钢中氧化物形成复合型夹杂物,使硫化物包裹在氧化物外面而形成硫化物的包裹体,这种包裹体不仅可减少氧化物的危害,而且可以减少硫化物的危害。

两种精炼工艺下氧化物夹杂均以复合夹杂物为主(图 2a,图 3a),这主要是在 LF 钢包精炼期喂硅钙线后,进行了夹杂物变性。Ca 处理能改变钢中非金属夹杂物的成分和形貌。当 Ca 或 CaO 添加入钢中后,Ca 和 CaO 都可以将长条状 MnS 夹杂转变为球状复合夹杂。

另一方面,钢液喂入硅钙分解而产生的金属 Ca 气泡在向钢液表面运动过程中吸附在氧化铝和硫化锰夹杂上产生一系列复杂化学反应,形成复合夹杂。随着钙的加入,钢中存在的单一氧化物夹杂逐渐转变为铝酸钙类型夹杂,铝酸钙夹杂物呈多种多样的外形,其 $CaO \cdot 6Al_2O_3$ 和 $CaO \cdot 2Al_2O_3$ 呈板条状,有些则为单独或集聚颗粒。当 Al_2O_3 高时,它就常在液体铝酸钙基体上呈板条状结晶,板条状或自行结晶即表明这些相的熔点高于炼钢温度,而 $CaO \cdot Al_2O_3$ 、 $12CaO \cdot 7Al_2O_3$ 和 $3CaO \cdot Al_2O_3$ 的熔点都低于炼钢温度,所以呈球形夹杂物。

3 结论

(1)LF 精炼渣系用高碱度白渣渣系有利于钢中氧含量的降低,但不利于钢中硫含量的稳定。

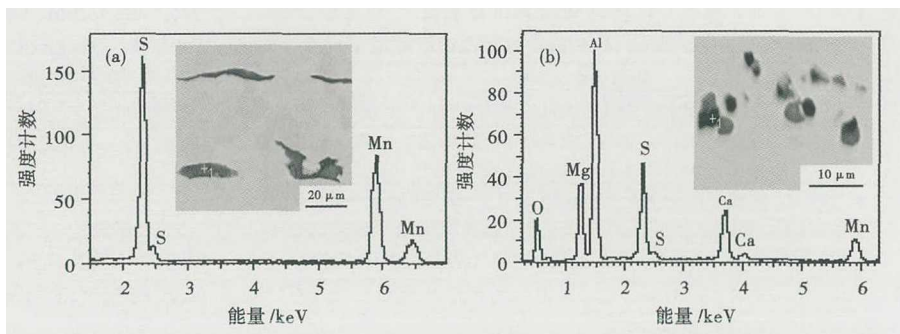


图 2 A 精炼工艺下的夹杂物分布、形貌与组成

Fig. 2 Distribution, morphology and ingredient of inclusions in steel refining by A refining slag

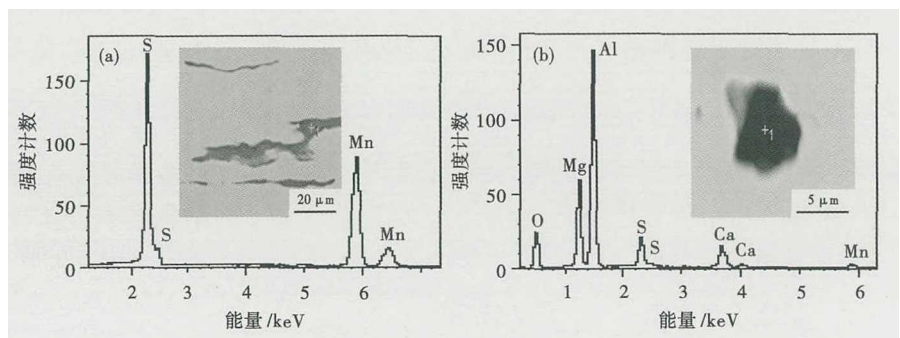


图 3 B 精炼工艺下的夹杂物分布、形貌与组成

Fig. 3 Distribution, morphology and ingredient of inclusions refining by B refining slag

(2)LF 精炼工艺采用低碱度渣系,其钢中氧含量能达到 0.0016%,硫的回收率达到 75%。

(3)两种精炼工艺下钢中的夹杂物分布、形貌和组成基本相同,都是由硫化物夹杂、氧化物夹杂组成。通过钢包钙处理,可以将长条状 MnS 夹杂转变为球状复合夹杂物。

参考文献

- [1] 吴 玮. 汽车零部件用非调质钢的应用和发展[J]. 世界钢铁, 2009(4):62-68.
- [2] 卓晓军,杨成威,吕迺冰,等. 汽车用高品质非调质钢生产过程中的非金属夹杂物研究[J]. 钢铁,2008,43(6):30-34.
- [3] 常开地,赵焕春,张慧峰,等. 含硫非调质钢轧后硫化物夹杂形貌的观察[J]. 金属热处理,2006,31(9):60-64.
- [4] Brimacombe J K, Nakanishi K and Anagbo P E, et al. Proceedings of the Elliot Symposium on Chemical Process Metallurgy[C]. Iron and Steel Society Inc, Warrendale, 1991:342-412.
- [5] Kawawa T and Okubo M. Kinetic Studies on Deoxidation of Steel [J]. Tetsu-to-hagane, 1967, 53(14):1569-1589.
- [6] Sakagami R and Kawasaki C. On the Deoxidation of Liquid Iron with Silicon[J]. Tetsu-to-hagane, 1969, 55(7):550-590.
- [7] Suzuki K and Banya S. Deoxidation with Silicon in Liquid Iron Alloys [J]. Tetsu-to-hagane, 1970, 56(1):20-109.

熊玉彰(1963-),男,高级工程师,1985年武汉大学(本科)毕业,金属材料与新产品研发。

E-mail:xiangyuzhang2006@126.com

收稿日期:2018-03-08