

精炼渣组分对硫易切削钢夹杂物含量和形态的影响

戴永刚^{1,2}

(1 邢台钢铁有限责任公司, 邢台 054027; 2 河北省线材工程技术研究中心, 邢台 051027)

摘要 试验分析了 50 t LF 精炼渣(FeO)、(MnO)、 R 、 $(CaO)/[(Al_2O_3)(SiO_2)]$ 和(S)的控制对[O]指数、硫分配比和 Mn/S 的影响。结果表明,当(FeO + MnO) = 12%, 碱度 R 值 1.5 ~ 2.0, $(CaO)/[(Al_2O_3)(SiO_2)] = 1.5 \sim 2.0$, 平均硫分配比 L_s 为 4.6, Mn/S 值 4.3 ~ 4.7 时,铸态夹杂物为球形 I 类硫化物和部分沿晶界分布的球形硫化物,轧制钢材未发现 B、C 类夹杂,达到了较好的控制钢中氧化物夹杂和低脱硫率的冶金效果。

关键词 硫易切削钢 精炼渣 FeO MnO 夹杂物

Effect of Refining Slag Ingredient on Content and Morphology of Inclusions in Sulfur Free Cutting Steel

Dai Yonggang^{1,2}

(1 Xingtai Iron and Steel Corp Ltd, Xingtai 054027; 2 Hebei Wire Rod Engineering Technology Research Center, Xingtai 054027)

Abstract The effect of control of 50 t LF refining slag (FeO), (MnO), R , $(CaO)/[(Al_2O_3)(SiO_2)]$ and (S) on [O] index, sulfur partition ratio and Mn/S has been tested and analyzed. Results show that as (FeO + MnO) = 12%, basicity R 1.5 ~ 2.0, $(CaO)/[(Al_2O_3)(SiO_2)] = 1.5 \sim 2.0$, average sulfur partition ratio L_s 4.6, Mn/S = 4.3 ~ 4.7, the as-cast inclusions in steel is spheroid I series sulfide and partial along grain-boundary distributed spheroid sulfide, and the B and C series inclusions do not found in rolled products to get better control of oxides inclusions in steel and metallurgy effect of low desulfurization ratio.

Material Index Sulfur Free Cutting Steel, Refining Slag, FeO, MnO, Inclusions

低碳易切削钢因其优越的切削性能而广泛应用于机械加工行业。邢钢从 2009 年开始生产美标 1215 钢种,采用 50 t 转炉-50 t LF-R9 m 弧形连铸机工艺路线(断面 160 mm × 160 mm),已经开发成功 $\Phi 5.5 \sim 28$ mm 规格的 1215、1215MS-1 等系列钢种。

硫、磷元素对一般钢来说是有害的,但在易切削钢中的硫、磷是改善切削性能的主元素。邢钢 1215 钢种属于 P + S 复合低碳易切钢,需精确控制 S、P 等元素,并得到适宜的夹杂物形态;在精炼过程中要对钢中溶解氧进行合理控制,同时精炼渣碱度、氧化性等性能也直接影响钢中磷、硫含量及夹杂物控制的稳定性。为此,对易切削钢的精炼控制技术进行评价及研究。

1 易切削钢精炼工艺控制要求

低碳易切削钢具有低碳、高硫、高氧的特性,其精炼过程中不能采用常规高碱度白渣工艺。与传统工艺相比,易切削钢精炼渣要有以下冶金功能及特点:

(1) 满足钢种硫化锰夹杂物颗粒尺寸大、长宽比小的形态,钢中须保持一定含量的氧,精炼渣系保持相应比例的 FeO、MnO 与钢中的氧平衡。

(2) 磷、硫是改善切削性能的主元素,精炼渣系

要具备低脱硫率和脱磷率。按照传统热力学规律,精炼渣碱度应尽可能低,渣量要小。

(3) 钢中 Al_2O_3 、硅酸盐夹杂物不利于基体的切削性,精炼渣须充分吸附冶炼过程生产的 Al_2O_3 、硅酸盐夹杂物。

综合上述分析,易切削钢精炼工艺应控制渣系保持一定比例的 FeO、MnO,合适的碱度与渣量,以达到控氧、低脱硫率、低脱磷率,并能充分吸附钢中 Al_2O_3 、硅酸盐夹杂物等功能^[1]。

2 易切削钢精炼工艺分析

2.1 精炼脱氧

易切削钢中硫化物的形态、数量、大小及分布对钢的切削性能有较大的影响。最早 Sims 提出按铸钢硫化物的形态和分布的不同分为 3 类硫化物^[2]:

I 类:大颗粒球状,无规则分布,夹杂物为单相或两相,存在于不用铝脱氧的钢中。II 类:为片状或棒状硫化物,沿晶界分布或呈扇状分布,存在于用少量铝脱氧的钢中。III 类:尖角状、块状,无规则分布,存在于加铝量高且有残铝的钢中。

I 类硫化物常与氧化物复合成氧硫化物,其最显著的特征是氧质量分数要达到一定数量,因此在

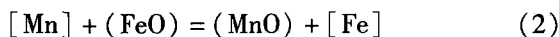
沸腾钢或硅锰脱氧的半镇静钢中产生大量Ⅰ类硫化物。Ⅱ类硫化物是在用铝脱氧但又无过多其他合金元素(C、Cr、Si)的镇静钢中出现。Ⅲ类硫化物是在过量铝脱氧钢中出现,或者在高硫、高硅、高锰铝钢中出现^[3]。

对于易切削钢,合适的氧含量可以促使钢中的MnS呈纺锤形或椭圆形,有利于改善切削性能。然而,易切削钢中氧含量并非越高越好,氧含量过高会影响铸坯表面质量,产生皮下气泡,并且氧化物夹杂含量高对磨损不利,最终也会影响成品性能。

一般认为如果铸锭中要得到利于机加工的纺锤状硫化物,氧含量应为 $200 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$ 。日本水岛钢厂认为^[4],如果想在连铸钢中得相似形状的硫化物,氧含量可控制在 100×10^{-6} 或稍多一点。这可能是连铸钢坯压缩比小、硫化物伸长机会小的缘故,因此减少钢中氧含量是可能的。

2.2 精炼渣系 FeO、MnO 控制

由于钢液中 Si、Al 等强脱氧剂含量较低,因此钢液中与氧相平衡的主要合金元素为 Mn,在精炼过程中,有如下反应:



因此通过反应平衡常数(假设 FeO、MnO 形成理想溶液),可得到:

$$\lg K_1 = \lg \left\{ \frac{[\text{O}]}{(\text{FeO})} \right\} = -6.320/T + 0.734 \quad (3)$$

$$\lg K_2 = \lg \left\{ \frac{(\text{MnO})}{([\text{Mn}](\text{FeO}))} \right\} = 6.440/T - 2.95 \quad (4)$$

由(3)、(4)式可见,渣中 FeO、MnO 含量与钢中自由氧密切相关,为控制钢中的氧含量,可以采用控制精炼渣中合理的 FeO、MnO 含量,以达到控制钢中氧含量的目的。

而且炉渣氧化性也是影响炉渣脱硫热力学的主要因素,渣中 FeO、MnO 含量提高,使氧离子浓度增加,从而降低脱硫率。有资料显示,当渣中不稳定氧化物为 $<1.5\%$ 时,可保证出钢脱硫率 40% 以上^[5],而当 $(\text{FeO} + \text{MnO})$ 大于 7% 后脱硫率大幅度降低。

因此,钢中要保证高 S 含量,渣中需控制较高的 $(\text{FeO} + \text{MnO})$ 水平。然而考虑到顶渣氧化性高会影响钢水氧含量,继而影响铸坯表面质量,因此还需要对 $(\text{FeO} + \text{MnO})$ 水平进行一定限制。

2.3 渣系碱度

一般来说随碱度增大,渣中有效 CaO 含量增加,脱硫率、脱磷率将逐步增加。

硫分配系数随着精炼渣碱度的增大而升高^[6]。若提高硫收得率,碱度应取小值,考虑顶渣还需具备吸附脱氧产物作用,因此易切削钢炉渣碱度范围控制在 $1.0 \sim 2.0$ 。

2.4 渣系曼内斯曼指数 MI

为评估钢中脱氧工艺对顶渣影响,一般引入曼内斯曼指数 MI,其表达式如式(5)所示。该指数反映了保证精炼渣控制碱度及流动性,同时也反应对炉渣脱硫能力和对吸收脱氧产物(Al_2O_3)的影响。

$$\text{MI} = \frac{(\text{CaO})}{(\text{Al}_2\text{O}_3)(\text{SiO}_2)} \quad (5)$$

一般来说随着 MI 值增加, L_s 上升^[7]。一般文献中推荐脱硫功能 MI 值为 $0.25 \sim 0.35$ ^[8]。当 MI 值小于 0.2 时,脱硫率急剧降低。

3 LF 工业实践结果与讨论

试验采集了2014年219炉易切削钢数据,对其精炼渣的实际应用情况进行了分析。邢钢易切削钢成分范围如表1,其精炼渣采用予熔渣快速成渣,配合脱氧剂形成具有一定氧含量的低碱度精炼渣系,具体组分如表2。

3.1 FeO、MnO 控制

为了保证钢坯表面质量良好,减少铸坯凝固前沿 C-O 浓度积,在冶炼中采取了控氧工艺。考虑熔渣与钢水氧传递作用,将 $(\text{FeO} + \text{MnO})$ 稳定控制在

表1 219 炉易切削钢成分 /%

Table 1 Chemical composition of free cutting steel, 219 heats /%

C	Si	Mn	P	S
≤ 0.09	≤ 0.05	1.28 ~ 1.50	0.04 ~ 0.09	0.26 ~ 0.36

表2 易切削钢精炼渣组分及碱度

Table 2 Ingredient of refining slag and basicity for free cutting steel

项目	组分 /%									碱度(R)
	FeO	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	S	P	MnO	TiO ₂	
控制	0.6 ~ 2.8	11.5 ~ 21.1	32.5 ~ 40.8	9.5 ~ 15.0	7.8 ~ 16.2	0.8 ~ 2.2	0.03 ~ 0.09	8.6 ~ 14.0	0.3 ~ 0.7	1.5 ~ 2.6
平均值	1.96	17.46	34.66	12.58	11.73	1.40	0.045	11.61	0.52	1.98

较低水平,保证钢水氧含量的稳定性。

图 1 反映将 FeO 控制在 2% 左右、MnO 控制在 10% 左右,可保证易切削钢稳定的溶解氧指数分布范围。图 1 中实际渣中 FeO、MnO 均比理论值偏高,这主要是由于试验选择了理想溶液的缘故(实际组元相互作用,降低其活度)。

3.2 S、P 成分及 MI 值控制情况

易切削钢精炼工艺需要保证 S、P 稳定,同时较低的合金消耗。一般降低渣碱度可提高钢水中 S、P 的收得率,如图 2、图 3 所示,用 L_S 表示渣中(S)与钢水[S]的比值,用 L_P 表示渣中(P)与钢水[P]的比值。

图 2 显示,实际生产中渣中磷分配系数 L_P 随碱度变化不明显,但随熔渣氧化性升高而增加。若控制钢中 P 元素稳定、合金消耗低,渣中(FeO + MnO)需要控制在 11% 左右。

图 3 显示,渣中 S 的分配系数随 R 升高而升高,控制 R 在 1.5 ~ 2.0 的水平,可使 L_S 值小于 5,有利于提高 S 元素收得率;同时 MI 值降低, L_S 降低,控制 MI 值到 0.17 以下,配合炉渣较高的(FeO + MnO)水平, L_S 值平均可控制在 5 左右。

3.3 钢中 Mn 元素及 Mn/S 控制趋势

易切削钢中较高的锰硫比有利于钢中锰与硫充分结合,防止低熔点 FeS 形成,改善钢材的热塑性^[9],同时随着 Mn/S 增大,铸态钢中硫化物的纺锤率增高,夹杂物总数下降。因此 Mn/S 是影响硫系易切削钢切削和加工性能的重要因素。

图 4 显示实际精炼渣中(S)平稳控制阶段所对应的 Mn/S 在 4.3 ~ 4.7,有研究表明,Mn/S 控制最

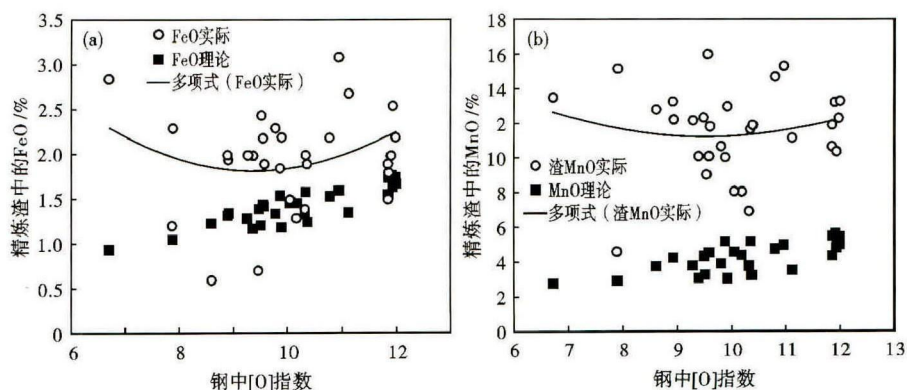


图 1 精炼渣(FeO)(a)和(MnO)(b)的理论值与实测值比较

Fig. 1 Comparison between theory value and measured value of refining slag (FeO) (a) and (MnO) (b)

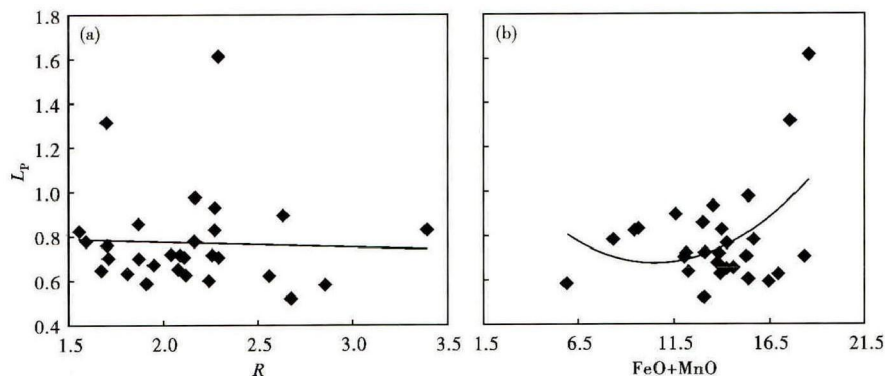


图 2 精炼渣碱度 R (a)和(FeO + MnO)(b)对渣-钢磷分配比 L_P 的影响

Fig. 2 Effect of refining slag basicity R (a) and (FeO + MnO) (b) on slag-steel phosphorus partition ratio L_P

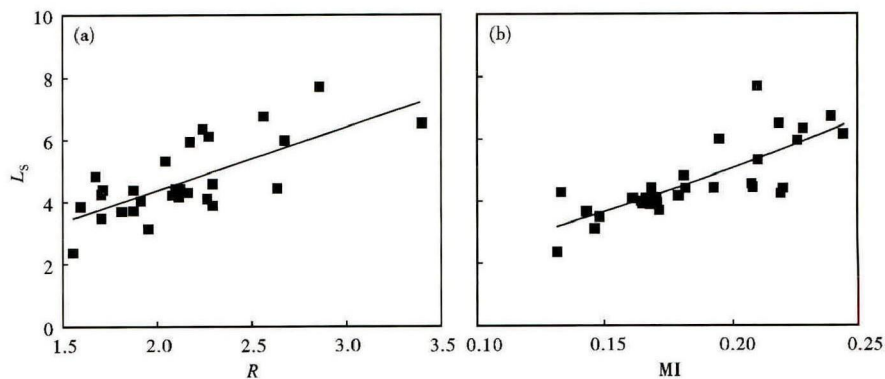


图 3 精炼渣碱度 R (a)和 MI 指数(b)对渣-钢硫分配比 L_S 的影响

Fig. 3 Effect of refining slag basicity R (a) and MI index (b) on slag-steel sulfur partition ratio L_S

佳范围在 3.0 ~ 5.0^[10],这与有关文献的观点是一致的。

同时图 4 显示,钢中 Mn 元素控制在 1.34% ~ 1.36%时,精炼渣控制 MnO 含量的在 11% 的较低水平,也可降低合金化工艺中 Mn 元素的消耗。

3.4 渣吸收夹杂物能力

采用适当的 Al 脱氧工艺,控制钢水溶解氧指数在 8 ~ 10,实际生产可保证钢坯表面质量较好。根据赵东伟等人的研究^[11],当 $MI = 0.1 \sim 0.2$ 时最有利于渣系吸附 Al_2O_3 夹杂,保证钢中夹杂物构成,邢钢实际控制 MI 平均在 0.18 左右。

图 5 是在光学显微镜下观察到铸态、轧态夹杂物的照片。通过照片可看到,铸态下形成了球形 I 类硫化物和部分沿晶界分布的球状硫化物,轧态不存在 B、C 类夹杂,说明生产中脱氧产物上浮并被精炼渣吸收的情况较好,达到了易切削钢精炼冶金效果。

4 结语

精炼工序通过控制不稳定氧化物含量、较低的碱度,使得平均 L_s 在 4.6,平均 L_p 在 0.77 左右;铸态夹杂物也满足 II 类夹杂物以上级别需要,在金相检验中未发现明显 B、C 类夹杂;达到了较好的控氧、控夹杂、低脱硫率的冶金效果。

邢钢易切削钢自开发以来,经过试制、小批量生产、批量生产 3 个阶段,已经开发出了 1215、1215MS-1

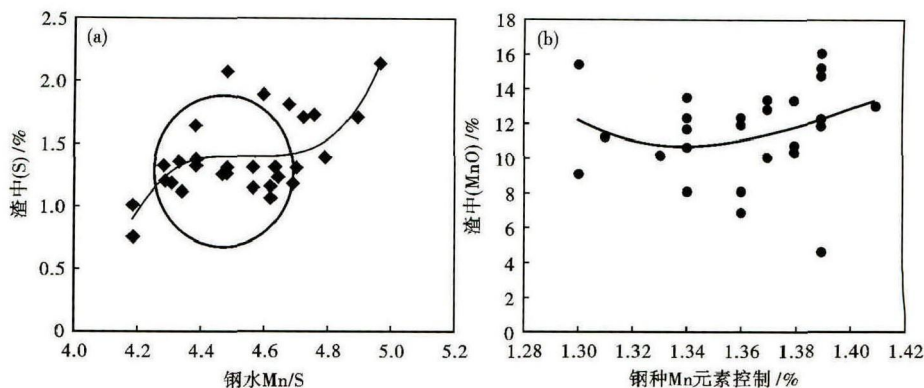


图 4 (a) 渣中(S)与钢中 Mn/S 的关系;(b)渣中(MnO)与钢中[Mn]的关系

Fig.4 (a) Relation between slag (S) and steel [Mn/S]; (b) relation between slag (MnO) and steel [Mn]

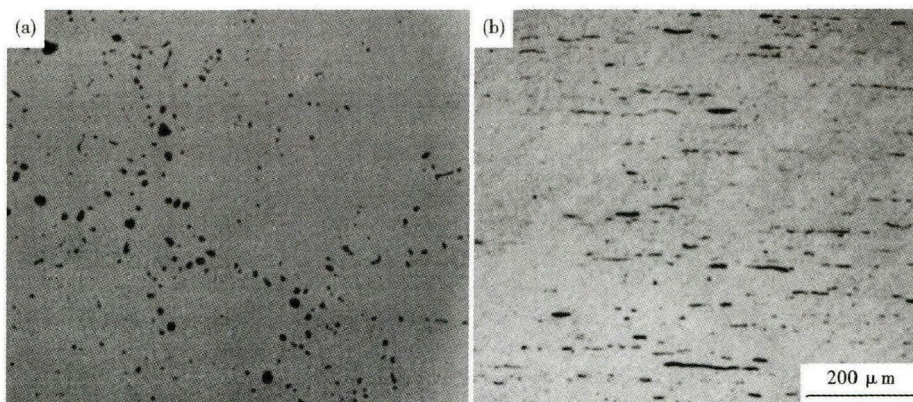


图 5 易切削钢硫化物形貌:(a)铸态;(b)轧态

Fig.5 Morphology of sulfide in free cutting steel: (a) as-casting; (b) rolled

等系列钢种,从硫系易切削钢整体情况来看,生产工艺成熟,各工序控制稳定。该钢种切削性能可满足一般长轴类用户需求,在上海及广东珠三角地区用户需求不断扩大。

参考文献

- [1] 余国松,成国光. 低碳易切削钢 LF 炉精炼渣控制工艺[J]. 钢铁,2010,45(9):40-43.
- [2] Bigelow L K, Flemings M C. Sulfide Inclusions in Steel[J]. Metallurgical Transactions B,1975,6(2):275-283.
- [3] 董履仁,刘新华. 钢中大型非金属夹杂物[M]. 北京:冶金工业出版社,1999:249-250.
- [4] Takashi-Nishimura, Soh-Ichi-Koishi. Development of a Low-Carbon Resulfurized Free Cutting Steel by Continuous Casting, and Its Properties[J]. Kawasaki Steel Technical Report,1983,9(8):77-85.
- [5] 李晶. LF 精炼技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2009:57-58.
- [6] 陈家祥. 炼钢常用图表数据手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2010:818-819.
- [7] 王维,胡尚雨. LF 冷态渣用于脱硫的研究[J]. 炼钢,2011,27(2):48-51.
- [8] 林纲,徐匡迪. 喷粉精炼超低硫钢工艺的试验研究[J]. 化工冶金,1990,11(4):289-294.
- [9] 夏云进,王福明,王世俊,等. 国内外含硫易切削非调质钢成分及显微组织分析[J]. 炼钢,2013,29(3):58-61.
- [10] 田树生,周小丽,徐瑞军. 硫系易切削钢的研发[J]. 金属材料与冶金工程,2008,36(6):17-20.
- [11] 赵东伟,包燕平,王敏,等. 高洁净度铝镇静钢 LF 精炼渣成分优化[J]. 炼钢,2013,29(2):9-13.

戴永刚(1976-),男,硕士(2009年北京科技大学),高级工程师,1998年北京科技大学(本科)毕业,特殊钢品种开发。
E-mail:daiygc@163.com

收稿日期:2015-08-22