

## 顶底复吹转炉冶炼低碳钢的工艺研究

王海奇<sup>1,2</sup> 包燕平<sup>2</sup>

(1 湖南华菱涟源钢铁集团, 娄底 417009; 2 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

**摘要** 以实际生产数据为依据, 分析研究涟钢1座100 t顶底复吹转炉冶炼低碳钢(0.08C、0.17~0.37Si、0.25~0.65Mn、≤0.030P、≤0.030S、0.015~0.65Als)的工艺。发现其冶炼后期底吹强度足, 导致部分钢水过氧化, 实际终点碳氧浓度积与理论的平衡值有一定偏差; 转炉终渣碱度在4~5时, 磷、硫在渣-钢间的分配系数最大, 脱磷、脱硫效果最好, 其终点[C]高, (FeO)低, 炉渣氧化性低, 不利于脱磷但利于脱硫; 冶炼终点钢水温度越低, [C]越高, 钢水、炉渣氧化性越低, 钢水中残锰含量越高。

**关键词** 顶底复吹转炉 低碳钢 冶炼工艺

## A Study on Process for Melting Low Carbon Steel by Top and Bottom Combined Blown Converter

Wang Haiqi<sup>1,2</sup>, Bao Yanping<sup>2</sup>

(1 Hunan Valin Lianyuan Iron and Steel Co Ltd, Loudi 417009;

2 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

**Abstract** Based on real production data, the process for melting low carbon steel 08Al (0.08C, 0.17~0.37Si, 0.25~0.65Mn, ≤0.030P, ≤0.030S, 0.015~0.65Als) by an 100 t top and bottom combined blown converter at Lianyuan Steel has been analyzed and studied. It is found that its bottom blowing is intense in later period led to part liquid over-oxidation, and there is a definite deviation between the real end [C][O] and the theoretical equilibrium [C][O] product; as basicity of converter end slag is 4~5, the distribution coefficient of phosphorus and sulphur between liquid steel and slag is largest and the effect of dephosphorization and desulphurization is best, while higher end [C], lower (FeO) and lower oxidability of slag are unfavourable to dephosphorization but favourable to desulphurization; and the lower end temperature of melting liquid steel, higher [C] and lower oxidability of liquid and furnace slag, the higher the residual manganese content in liquid steel.

**Material Index** Top and Bottom Combined Blown Converter, Low Carbon Steel, Melting Process

因顶底复合吹炼增加了底部供气, 加强熔池的搅拌能力, 使熔池内成分和温度得到有效改善, 碳氧反应进一步接近平衡, 减少了钢水的过氧化, 提高了钢水及合金的收得率, 转炉脱P、脱S的能力以及终点残Mn含量。在冶炼过程中, 理论上存在碳氧平衡关系, 但在冶炼后期钢水中碳含量降低到一定值时, 碳氧平衡被破坏, 出现过氧化现象, 虽经后续脱氧合金化处理, 但有较多氧化夹杂物存于钢水中。

涟钢100 t顶底复吹转炉冶炼低碳钢, 经常出现钢水过氧化, 炉产量低, 护炉困难, 合金及造渣材料加入量偏高等现象, 严重影响了转炉的安全运行及生产成本降低。为此, 对100 t顶底复吹转炉冶炼低碳钢进行技术攻关, 综合分析其冶炼效果。

目前涟钢转炉顶吹供氧流量22 500 m<sup>3</sup>/h, 顶吹压力0.82 MPa, 低吹氩气流量380 m<sup>3</sup>/h, 底吹压力0.682 MPa。

### 1 试验方案

在100 t顶底复吹转炉(铁水成分见表1)进行

表1 原料铁水化学成分/%

Table 1 Chemical composition of charging hot metal / %

炉号	Si	Mn	P	S
06412	0.55	0.33	0.890	0.170
06413	0.16	0.72	0.078	0.046
06414	0.16	0.72	0.078	0.046
06416	0.64	0.32	0.087	0.019
06417	0.23	0.80	0.083	0.041
06418	0.23	0.80	0.083	0.041
06430	0.39	0.37	0.103	0.021
06432	0.39	0.38	0.112	0.021
06433	0.48	1.00	0.100	0.016
06435	0.39	0.37	0.097	0.019
07484	0.48	0.56	0.101	0.026
07485	0.38	0.84	0.098	0.032
07486	0.41	0.82	0.090	0.036
07490	0.54	0.85	0.096	0.024
07491	0.53	0.40	0.139	0.030
07554	0.71	0.37	0.165	0.015
07558	0.51	0.46	0.115	0.046
07559	0.58	0.44	0.115	0.031
07564	0.30	0.72	0.101	0.050

现场生产试验。生产试验所冶炼钢种为低碳钢08Al, 对冶炼铁水进行了预处理。按照试验安排, 要

求做好每一炉的生产操作记录,包括加料与枪位、倒炉、吹炼过程异常、底吹、装入量、溅渣护炉等情况。本次试验共统计 18 炉。生产现场试验大多数炉次都是取吹炼终点样。每次取样同时取一个钢样和两个渣样,并测定炉温。钢样和一个渣样分别用于测定钢水成分和炉渣组成;另一渣样则用于测定其熔点、流动性温度,并计算其过热度。08Al 的化学成分如表 2 所示。

表 2 08Al 钢化学成分/%

Table 2 Chemical composition of steel 08Al /%

C	Si	Mn	S	P	Als
≤0.08	0.17 ~ 0.37	0.25 ~ 0.65	≤0.030	≤0.030	0.015 ~ 0.065

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 C-O 反应平衡情况

根据文献[1]可知,无论底吹气体是氧气还是惰性气体,顶底复合吹炼时金属熔池内的[C]-[O]关系大致相同,而比起氧气顶吹来说,则碳氧乘积是低的。

图 1 中曲线为 C-O 平衡关系图。图 1 所示结果表明,目前涟钢顶底复吹转炉低碳钢吹炼终点钢水实际 C-O 积整体而言,与平衡 C-O 积有一定偏差,过氧化情况比较普遍。

转炉终点钢水氧含量与钢水中碳含量有非常直接的对应关系,碳含量降低,氧含量升高;反之,碳含量增加,氧含量降低<sup>[2]</sup>。

研究表明,炼钢平衡碳氧积  $M = [C] \cdot [O]$  在 0.002 ~ 0.003,实验所得数据的碳氧积在平衡线以上,有多余的氧未被去除。采用顶底复吹法炼钢的优点在于:从转炉底部吹入气体,增加了熔池的搅拌

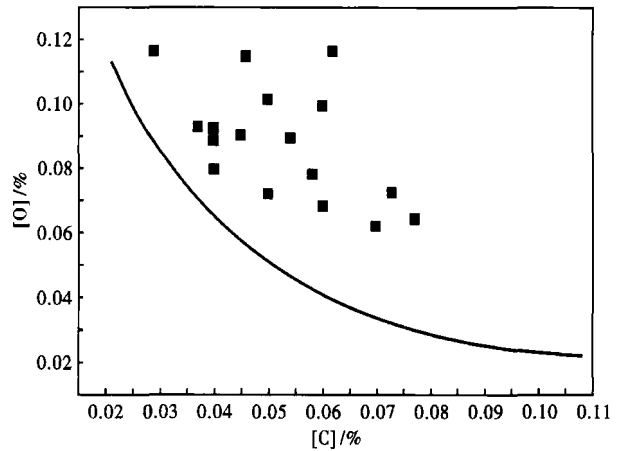


图 1 实际终点[C]、[O]和理论平衡[C][O]积曲线

Fig.1 Real end [C], [O] and theory equilibrium [C][O] product curve

能,从而有利于熔池内钢液成分和温度的均匀性,使吹炼平稳,C-O 反应接近或达到平衡,钢中残留氧下降<sup>[3]</sup>。底吹强度不够是碳氧积出现偏差的原因之一。因此,应适当增强底吹强度,进一步强化碳氧反应,达到降低钢中氧,防止过氧化的效果。

### 2.2 脱磷效果分析

#### 2.2.1 碱度对磷在渣-钢间的分配比影响

顶底复吹转炉冶炼末期炉渣碱度  $R$  对磷在渣-钢间的分配比  $L_p$  的影响见图 2(a)。

研究表明,其它条件不变时,适当提高碱度,能使磷在渣-钢间分配系数  $L_p$  提高,由于炉渣碱度高,表明在炉渣完全熔化条件下,渣中的 CaO 含量高。CaO 具有较强的脱磷能力,生成的磷酸钙在炼钢温度下亦比较稳定。但渣中 CaO 含量过多,将使炉渣黏度增加,CaO 颗粒不能完全熔入炉渣,导致炉渣流动性减弱,从而影响炉渣的脱磷效果。因此,为获得较好的炉渣脱磷效果,需保持一定的碱度。如图 2(a)所示, $R$ 在 4 ~ 5,  $L_p$  值最大,在此范围之外,无论是

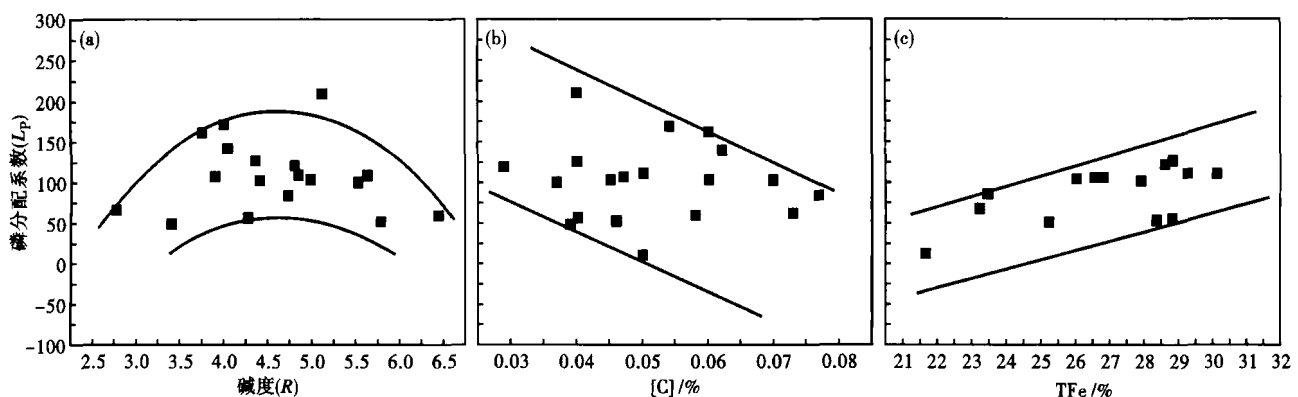


图 2 100 t 转炉炉渣碱度  $R$ (a);钢水终点碳含量- [C](b)和炉渣全铁含量- TFe(c)对磷的分配系数  $L_p$  的影响

Fig.2 Effect of furnace slag basicity  $R$  (a), end carbon content in liquid steel- [C] (b) and total ferro content in furnace slag- TFe (c) on distribution coefficient of phosphorus  $L_p$ , 100 t converter

提高还是降低碱度,都会使磷在渣-钢间分配比减小。因此,为保持较好的脱 P 效果,其碱度值  $R$  应控制在 4.5 左右。

### 2.2.2 钢水碳含量对渣-钢间磷分配比的影响

顶底复吹转炉低碳钢冶炼末期钢水  $[C]$  对磷在渣-钢间的分配比  $L_p$  的影响见图 2(b)。

当钢水终点  $[C]$  大时,由碳氧反应平衡可知,钢水终点  $[O]$  就小,炉渣氧化性随之降低。由图 2(b) 可知,在炼钢过程中,磷主要是被氧化去除。图 2(b) 正是表明这一点:随钢水终点  $[C]$  的增大,钢水终点  $[O]$  就小,炉渣氧化性随之降低,磷在渣-钢间的分配比  $L_p$  逐渐变小,不利于脱磷。

### 2.2.3 炉渣全铁对渣-钢间磷分配比的影响

顶底复吹转炉低碳钢冶炼末期炉渣全铁 TFe 对渣-钢间磷分配比  $L_p$  的影响见图 2(c)。

炉渣中全铁量多少反映了炉渣  $FeO$ 、 $Fe_2O_3$  等的总体含量。图 2(c) 中全铁量增加,则表明氧化剂

$FeO$  等含量增加,炉渣氧化性强有利于脱磷,因此,随着炉渣全铁 TFe 的增大,磷在渣-钢间的分配比  $L_p$  逐渐变大。

### 2.3 脱硫效果

#### 2.3.1 碱度对渣-钢间硫分配比的影响

顶底复吹转炉低碳钢冶炼末期炉渣碱度  $R$  对硫在渣-钢间的分配比  $L_s$  的影响见图 3(a)。

图 3(a) 表明,当炉渣碱度在 4~5, S 在渣-钢间的分配比较理想。与脱磷相似,在碱度  $R < 4$  时,提高碱度有利于脱硫,当炉渣碱度超过一定值时(该值与渣温有关),过高的碱度将使炉渣的熔化温度升高,使之在正常的炉缸温度条件下不能完全熔化,结果使炉渣黏度升高,影响脱硫反应中离子的扩散,反而使脱硫效果下降<sup>[4]</sup>。所以碱度在 4~5 时,脱硫效果好,而炉渣碱度由此范围无论是降低或是升高,脱硫效果都会变差。

#### 2.3.2 渣-钢间硫分配比和钢水碳含量的关系

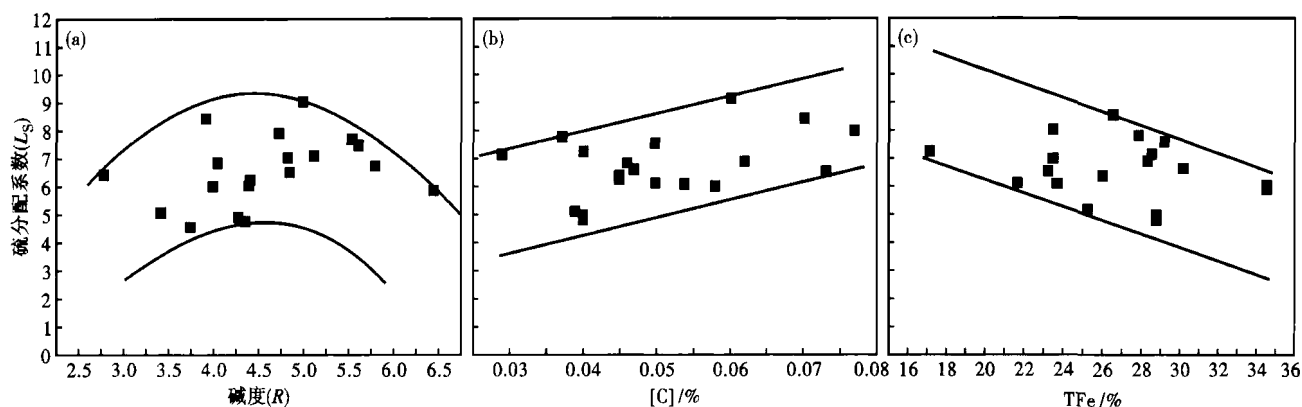


图 3 炉渣碱度  $R$ (a)、钢水终点碳含量-  $[C]$ (b)以及炉渣全铁- TFe(c)对硫的分配系数  $L_s$  的影响

Fig. 3 Effect of furnace slag  $R$  (a), end carbon content in liquid steel-  $[C]$  (b) and total ferro content in furnace slag- TFe (c) on distribution coefficient of sulphur  $L_s$

顶底复吹转炉低碳钢冶炼末期钢水  $[C]$  对硫在渣-钢间的分配比  $L_s$  的影响见图 3(b)。

对于脱硫反应  $[FeS] + [CaO] = (FeO) + CaS$

降低  $(FeO)$  有利于反应向右平衡,因此有利于脱硫。

图 3(b) 表明,随着钢水终点的  $[C]$  的增大,硫在渣-钢间的分配比  $L_s$  逐渐变大。这是由于当钢水终点  $[C]$  大时,钢水终点  $[O]$  就小,炉渣氧化性就低。而炉渣氧化性低有利于脱硫,有利于提高  $L_s$ 。

### 2.3.3 渣-钢间硫分配比和炉渣全铁量的关系

顶底复吹转炉低碳钢冶炼末期炉渣全铁 TFe 对硫在渣-钢间的分配比  $L_s$  的影响见图 3(c)。

图 3(c) 表明,随着炉渣全铁 TFe 增大,硫在渣-

钢间的分配比  $L_s$  逐渐变小。这是由于当炉渣全铁量 TFe 大时,炉渣氧化性高。而炉渣氧化性高不利于脱硫。

### 2.3.4 原料铁水硫含量对钢水终点硫含量的影响

顶底复吹转炉低碳钢冶炼原料铁水硫量  $[S]$  与吹炼终点钢水硫量  $[S]$  间的关系见图 4。

图 4 表明,随着原料铁水硫含量  $[S]_0$  的增大,钢水终点硫含量  $[S]$  逐渐增大,这是因为在大体相同的操作下,金属中硫的去除率基本相同,于是,原料铁水硫含量高,终点钢水硫含量也高。

若铁水含硫、磷量很高,可采用铁水预处理工艺,使硫、磷含量在炼钢之前降低。使钢水最终硫、磷含量低。

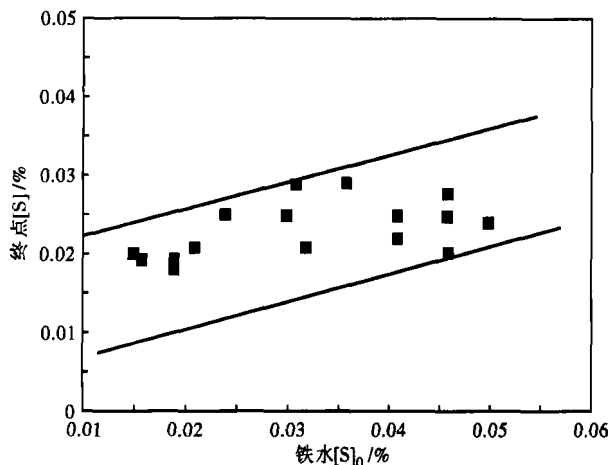
图4 钢水终点硫含量[S]和铁水硫含量[S]<sub>0</sub>的关系

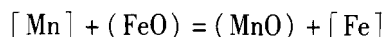
Fig. 4 Relation between end sulphur content in liquid steel [S] and sulphur content in hot metal [S]<sub>0</sub>.

## 2.4 钢水残锰量

### 2.4.1 钢水终点碳含量对钢水残锰量的影响

顶底复吹转炉低碳钢冶炼末期钢水[C]对钢水残锰含量[Mn]的影响见图5(a)。

从图5(a)可得出,随着钢水终点[C]的增大,钢水残锰量[Mn]逐渐变大。在碱性条件下,Mn的氧化为可逆反应,其反应式为:



钢水中[C]对钢水的氧化性、渣的氧化性有较大的影响,而这又直接影响到钢渣中[Mn]的分配。钢水终点[C]大时,钢水终点[O]就小,炉渣氧化性就低。而炉渣氧化性低有利于提高钢水残锰量[Mn]<sup>[5]</sup>。

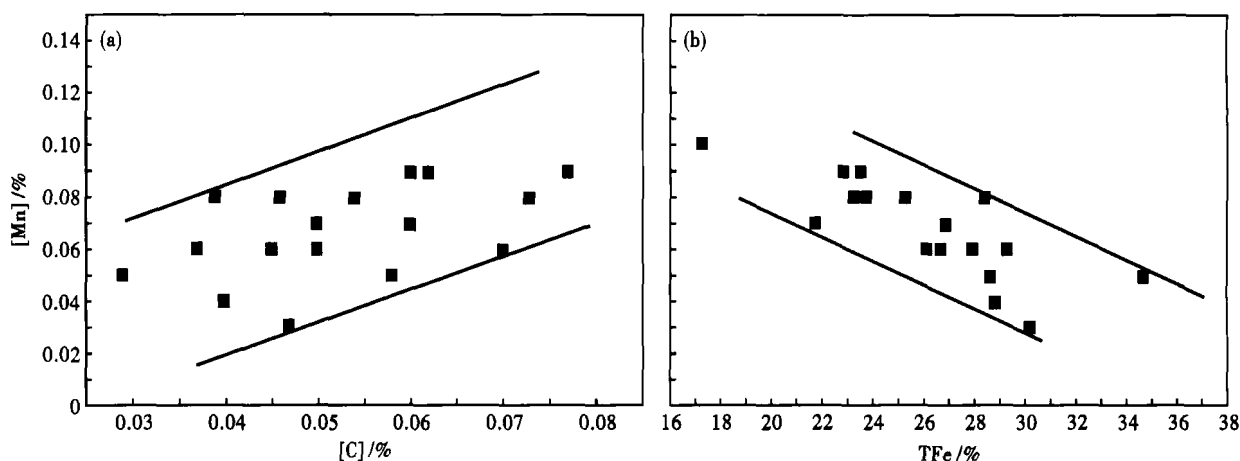


图5 钢水终点碳含量-[C](a)和炉渣全铁-TFe(b)对钢水残余锰含量的影响

Fig. 5 Effect of end carbon content in liquid steel- [C] (a) and total ferro content in furnace slag- TFe (b) on residual manganese content in liquid steel

### 2.4.2 终渣全铁量对钢水残锰量的影响

顶底复吹转炉低碳钢冶炼末期炉渣全铁 TFe 对钢水残锰量[Mn]的影响见图5(b)。

从图5(b)可看出,随着炉渣全铁 TFe 增大,钢水残锰量[Mn]逐渐变小。这是由于当炉渣全铁量 TFe 增大时,炉渣氧化性高。而炉渣氧化性高加强了对钢水残锰的氧化。

## 3 结论

(1) 100 t 顶底复吹转炉冶炼低碳钢 08Al 时,实际 C-O 积与平衡 C-O 积有一定偏差,过氧化情况比较普遍。底吹强度不够为主要原因。适当增大底吹强度,有利改善钢水过氧化情况。

(2) 终渣碱度在 4~5, 硫、磷在渣-钢间的分配比较理想,脱硫、磷效果较好。

(3) 硫在渣-钢间的分配比,随终点[C]的增大而增大,随终渣全铁 TFe 的增大而变小。

(4) 磷在渣-钢间的分配比,随终点[C]的增大而变小,随终渣全铁 TFe 的增大而增大。

(5) 钢中残锰随着终点[C]的增大而增大,随终渣全铁 TFe 的增大而变小。

## 参考文献

- 1 北京钢铁设计研究总院技术情报科. 氧气转炉炉顶复合吹炼法资料汇编(一). 1985
- 2 张庆国, 白连臣, 石玉良, 等. 转炉冶炼低碳低硅钢的生产实践. 炼钢, 2000, 16(5): 24
- 3 徐静波, 佟溥翹. 复吹转炉在溅渣下的长寿吹效果. 炼钢, 2002, 18(3): 6
- 4 王艺慈, 那树人. 提高包钢高炉渣脱硫能力的试验研究. 包头钢铁冶金学院报, 2001, 20(3): 253
- 5 向成礼. 锰矿渣对钢水残锰的影响. 攀钢技术, 1997(增刊): 36

王海奇(1970-), 男, 博士研究生, 炼钢和连铸的教学与科研。

收稿日期: 2010-05-15