

# 顶、底吹氧及天然气复吹转炉 熔池搅拌能的分析

## AN ANALYSIS OF STIRRING ENERGY OF BOTTOM-BLOWN O<sub>2</sub> AND CH<sub>4</sub> IN THE COMBINED-BLOWN CONVERTER

文 光 华      唐 萍      颜 广 庭  
Wen Ganghua    Tang Ping    Yan Guangting  
(重庆大学冶金及材料工程系)

**摘 要** 针对底吹氧气和天然气的复吹转炉,建立了适合该气源的熔池搅拌能计算式;同时还探讨了影响搅拌能大小的主要因素和搅拌强度随吹炼过程的变化规律。

**关键词** 氧气 / 天然气; 熔池; 复吹转炉; 搅拌能

中国图书资料分类法分类号 TF729

**ABSTRACT** A calculation formula of stirring energy in liquid steel is set up for bottom-blown O<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in the combined blown converter, and the main factors which have an effect on stirring energy and the variation law of stirring energy in steel-making process are discussed.

**KEY WORDS** oxygen / natural gas; melting bath; combined blown converter; stirring energy

### 0 前 言

熔池搅拌强度是衡量冶金反应动力学条件好坏的重要参数之一。复吹转炉由于底部供入气体,加强了熔池搅拌,显著地改善了冶金特性。因此,顶底复吹吹炼炼钢法目前正逐步成为主要的炼钢法。业已查明,在底部喷咀设计和炉型结构参数一定条件下,影响熔池搅拌强度的因素有底吹气体种类、方法、流量以及熔池深度等。在众多底吹气体中,氧气是最方便而又经济的气源。结合西南地区具有丰富的天然气资源的特点,开展采用底吹氧气并用天然气保护底枪的复吹方法,将是这一地区复吹转炉因地制宜解决底吹气源的有效途径。因此,本文针对底吹氧气和天然气的复吹转炉,通过理论分析建立了适合该气源的熔池搅拌能计算式;同时还探讨了影响搅拌能大小的主要因素和搅拌强度随吹炼过程的变化规律。

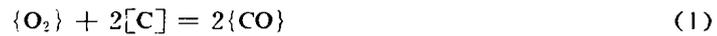
### 1 底吹氧气、天然气条件下熔池搅拌能的计算

底吹情况下的熔池钢液搅拌能受许多因素的影响。底吹气体流量、熔池温度和深度等参

数对搅拌能的影响,前人已作了详尽的研究,但在底吹气体与钢液作用对熔池搅拌能产生的影响方面报道甚少,尤其是针对底吹气体为氧气,用天然气作保护剂的具体情况。在底吹过程中,由于甲烷的热分解、碳氧反应而引起的体积膨胀,加剧了熔池的搅拌。这样,熔池搅拌能的计算如果仍采用底吹惰性气体的公式来估算将会有很大差别。因此,建立考虑了底吹  $O_2$  和  $CH_4$  与熔池作用因素的搅拌能计算公式就显得格外重要。

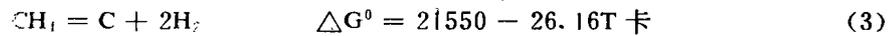
### 1.1 底吹 $O_2$ 和 $CH_4$ 与钢液的作用

当用  $O_2$  作为底吹气体时,进入熔池中的氧将与熔池中的碳和铁进行如下反应:



在强烈脱碳的高碳区 ( $[\%C] > 0.2$ ),底吹入的  $O_2$  几乎全部与 C 作用,即脱碳反应按公式(1)进行,因此对于起搅拌作用的气体量最好的效果是达到吹入  $O_2$  气体量的2倍容量。在低碳区,由于一部分  $O_2$  与 Fe 反应生成 FeO,使气态产物 CO 减少,则氧气的搅拌能下降。如果把脱碳氧效率作为  $\eta_{O_2}$ ,搅拌气体容量就是底吹氧气量的  $2\eta_{O_2}$  ( $\eta_{O_2} < 1$ ) 倍。

底吹氧时,作为保护冷却介质  $CH_4$  对熔池搅拌也有影响。 $CH_4$  在熔池中有如下反应



$t > 660^\circ$ , (3)式  $\Delta G^0 < 0$ , 因此,在炼钢温度条件下从热力学上可以认为  $CH_4$  全部热解。热解的碳又与氧反应生成一氧化碳,氢一部分溶解在钢液中,绝大部分以气体状排出。CO 和  $H_2$  在上升过程中,加强了熔池的搅拌。

### 1.2 底吹 $O_2$ 、 $CH_4$ 气体的溶池搅拌能计算公式推导

综合考虑底吹气体和在溶池中的化学反应对钢液的作用,则底吹  $O_2$  和  $CH_4$  时,钢液搅拌能应为以下几项之和:

- (1) 底枪喷口处喷入气体带入熔池的动能  $E_1$ ;
- (2) 喷入的气体从室温热膨胀到钢液温度作的膨胀功  $E_2$ ;
- (3) 甲烷热解以及热解碳与氧反应产物,CO,体积膨胀对熔池做的膨胀功  $E_3$ ;
- (4) 氧气与钢液中的碳反应产物,CO,体积膨胀对熔池作的膨胀功  $E_4$ ;
- (5) 混合气体( $CO+H_2$ ) 在熔池中上浮时浮力所做的功  $E_5$ ;
- (6) 混合气体上浮过程中静压减小而产生的体积膨胀功  $E_6$ 。即:

$$E_{O_2+CH_4} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6 \quad (5)$$

其中

$$E_1 = \frac{1}{2} \rho_{O_2} V_{O_2} U_{O_2}^2 + \frac{1}{2} \rho_{CH_4} V_{CH_4} U_{CH_4}^2$$

$$= \frac{Q_{O_2}}{2} (\rho_{O_2}^0 U_{O_2}^2 + a \cdot \rho_{CH_4}^0 \cdot U_{CH_4}^2)$$

$$E_2 = \int_{V_1}^{V_2} P_1 dV = \dot{P}_1 \cdot (V_2 - V_1) = n_{O_2+CH_4} R(T_2 - T_1)$$

$$= (1 + a)n_{O_2} R(T_2 - T_1)$$

$$E_3 = \int_{V_3}^{V_1} P_1 dV = P_1 (V_1 - V_3) = RT_2 (n_{CO+H_2} - n_{CH_4})$$

$$= 1.5aRT_2 \eta_{O_2}$$

$$\begin{aligned}
 E_4 &= \int_{V_5}^{V_6} P_1 dv = P_1(V_6 - V_5) = RT_2(n_{CO} - n_{O_2}) \\
 &= (2\eta_{O_2} - 1)RT_2n_{O_2} \\
 E_5 &= \int_0^H r\rho_m g dz = - \int_{r_1}^{r_0} r dP \\
 &= - \int_{r_1}^{r_0} \frac{n_{CO+H_2}}{P} RT_2 dP = (2\eta_{O_2} + 3\alpha)n_{O_2} RT_2 \ln \frac{P_1}{P_0} \\
 E_6 &= \int_{V_4+V_6}^{V_7} P dv = - \int_{r_1}^{r_0} \frac{n_{CO+H_2}}{P} RT_2 dP \\
 &= (2\eta_{O_2} + 3\alpha)n_{O_2} RT_2 \ln \frac{P_1}{P_0}
 \end{aligned}$$

故  $E_{O_2+CH_4} = Q_{O_2} \left\{ \frac{1}{2} (\rho_{O_2}^0 U_{O_2}^2 + \alpha \rho_{CH_4}^0 U_{CH_4}^2) + \frac{RT_2}{22.4 \times 10^{-3}} [2\eta_{O_2} + 2.5\alpha - (1+\alpha)T_1/T_2 + 2(2\eta_{O_2} + 3\alpha) \ln \frac{P_1}{P_0}] \right\}$

单位重要的钢液搅拌能(即溶池搅拌能量密度)为:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{O_2+CH_4} &= E_{O_2+CH_4}/W \\
 &= \frac{Q_{O_2}}{W} \left\{ \frac{1}{2} (\rho_{O_2}^0 u_{O_2}^2 + \alpha \rho_{CH_4}^0 U_{CH_4}^2) + \frac{RT_2}{22.4 \times 10^{-3}} [2\eta_{O_2} + 2.5\alpha - (1+\alpha)T_1/T_2 + 4(\eta_{O_2} + 1.5\alpha) \ln(1 + \frac{H}{1.48})] \right\} \quad (6)
 \end{aligned}$$

当只考虑  $E_2$ 、 $E_3$ 、 $E_4$  和  $E_5$  四项在  $\varepsilon_{O_2+CH_4}$  中的作用时,由式(6)可简化出与文献[4]提出的  $\varepsilon_{Ar}$  计算式相类似的形式,即

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{O_2+CH_4} &= \frac{Q_{O_2} RT_2}{22.4 \times 10^{-3} W} [2\eta_{O_2} + 2.5\alpha - (1+\alpha)T_1/T_2 \\
 &\quad + 2(\eta_{O_2} + 1.5\alpha) \ln(1 + \frac{H}{1.48})] \quad (7)
 \end{aligned}$$

当只考虑  $E_3$ 、 $E_4$ 、 $E_5$  和  $E_6$  在  $\varepsilon_{O_2+CH_4}$  中的作用时,式(6)就简化为与文献[5]提出的  $\varepsilon$  计算式相类似的形式,即

$$\varepsilon_{O_2+CH_4} = \frac{Q_{O_2} RT_2}{22.4 \times 10^{-3} W} [2\eta_{O_2} + 1.5\alpha - 1 + 4(\eta_{O_2} + 1.5\alpha) \ln(1 + \frac{H}{1.48})] \quad (8)$$

由此可知,(6)式综合了文献提出的两种搅拌能计算方法,这在理论上分析采用底吹氧气和天然气对熔池的搅拌能是有效的。

为了便于比较,同理也可得出采用底吹  $Ar$  的钢液搅拌能公式:

$$\varepsilon_{Ar} = \frac{Q_{Ar}}{W} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \rho_{Ar}^0 u_{Ar}^2 + \frac{RT_2}{22.4 \times 10^{-3}} [1 - T_1/T_2 + 2 \ln(1 + \frac{H}{1.48})] \right\} \quad (9)$$

## 2 底吹 $O_2$ 、 $CH_4$ 下熔池搅拌能力的讨论

从(6)式可以看出,  $\eta_{O_2}$ 、 $\alpha$ 、 $Q_{O_2}$ 、 $H$ 、 $T_2$  以及底枪喷口速度的大小对  $\varepsilon_{O_2+CH_4}$  都有影响。与(9)式比较,两式的主要区别在于  $\varepsilon_{O_2+CH_4}$  与  $\eta_{O_2}$  和  $\alpha$  有关,而  $\varepsilon_{Ar}$  与  $\eta_{O_2}$  和  $\alpha$  无关。

2.1  $\eta_{O_2}$ 、 $Q_{O_2}$  和  $\alpha$  对  $\dot{\epsilon}_{O_2+CH_4}$  的影响

图1和图2为  $\dot{\epsilon}_{O_2+CH_4}$  与  $\eta_{O_2}$  的关系图。由图可知， $\dot{\epsilon}_{O_2+CH_4}$  随着底吹流量、天然气比和脱碳氧效率的增加而加大，其中  $\eta_{O_2}$  对  $\dot{\epsilon}_{O_2+CH_4}$  的影响最大。在底吹流量  $Q_{O_2} = 1.05 \text{Nm}^3/\text{h}$ ，即  $0.29 \text{Nm}^3/(\text{t}\cdot\text{min.})$ ，底吹天然气比  $\alpha$  为  $0.18$  时，当脱碳用氧效率  $\eta_{O_2}$  为  $1$ ，熔池搅拌能为  $10.4 \text{Kw}/\text{t}$ ，而在相同流量下吹惰性气体的搅拌能为  $4.1 \text{Kw}/\text{t}$ ，它们之比  $\frac{\dot{\epsilon}_{O_2+CH_4}}{\dot{\epsilon}_{Ar}} = 2.53$ 。因此，采用底吹  $O_2$  及  $CH_4$  熔池搅拌能最大可达相同流量下底吹惰性气体的  $2.53$  倍。

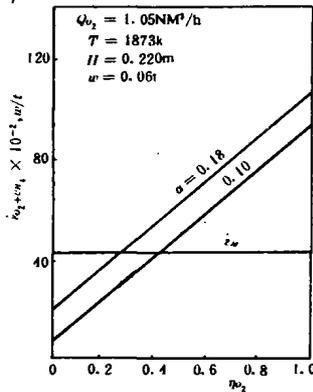


图1 底氧脱碳效率对搅拌能影响

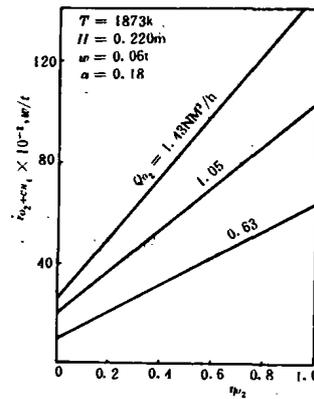


图2 底氧脱碳效率对搅拌能影响

作为保护介质天然气其主要作用是保护底枪，但提高底吹天然气比，也增强了对熔池的搅拌。

从式(6)和图2可以看出，底气流量对熔池搅拌能影响较大。但由于底部吹入气体主要作用是为了强化熔池搅拌，因此在满足熔池搅拌的条件下，没有必要再加大底部吹入气体量，即底气量不宜过大。

2.2 吹炼过程熔池搅拌能的变化

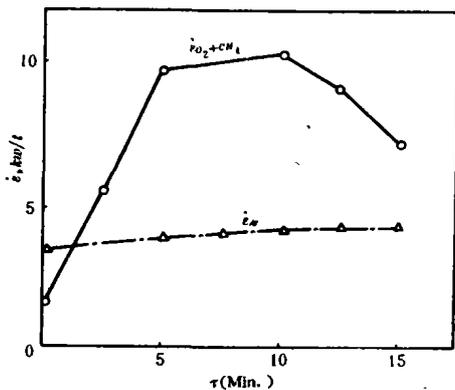


图3 搅拌能随吹炼过程的变化

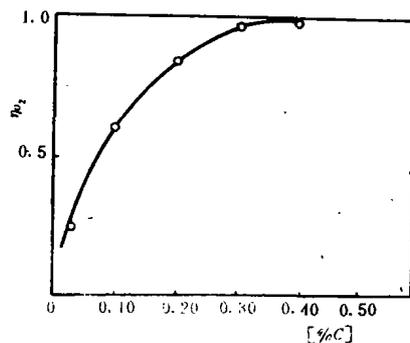


图4 脱碳氧利用率与碳含量的关系

吹炼过程中，由于炉内熔体成份和温度不断变化，表现在熔池搅拌能上也在发生变化。图3是底吹氧量为  $0.29 \text{Nm}^3/\text{t}\cdot\text{Min.}$  下，熔池搅拌能随吹炼过程的变化关系。底氧脱碳利用率  $\eta_{O_2}$  与钢液中  $C, Si, Mn$  等元素含量有关。在吹炼初期，由于  $Si, Mn, Fe$  等元素的氧化物不是气

态产物,脱碳氧的利用率很低,因而仅靠天然气热解和底吹气流的动能对熔池的搅拌力不大。随着熔体中 Si、Mn 元素含量的降低,熔池温度升高,碳氧反应发生,氧的利用率提高,熔池搅拌能也相应增大。到脱硅末期,底氧几乎全部用来脱碳,氧的利用率接近于1,这时底吹氧气对熔池搅拌能达到最大。到吹炼末期,由于熔池中碳很低,碳的扩散成为脱碳反应的限制性环节,使得部分底吹氧与 Fe 反应生成 FeO,氧气对熔池搅拌能下降。当然影响氧气利用率  $\eta_{O_2}$  因素是多方面的,如炉容量、渣量、喷枪结构、底枪布置、供氧制度等,但熔体 [%C] 对脱碳氧利用率  $\eta_{O_2}$  的影响规律性是一致的,如图4所示<sup>[1]</sup>。根据甲斐干等人的计算结果,当 [%C]=0.04~0.06时,氧与氩的作用基本相同,而在 [%C] 更低的情况下,氧对熔池的搅拌将小于氩。对于冶炼含碳在0.10~0.20%的低碳钢,到冶炼末期底氧的利用率仍有0.6~0.8,对熔池的搅拌能大大高于相同底吹流量的惰性气体的搅拌能,如图3所示。另外通过试验和文献[6]报到结果,底吹氧气的熔池临界含碳量是小于吹惰性气体的临界含碳量的,同样也说明了底吹氧气对熔池的搅拌大于惰性气体对熔池的作用。

### 3 顶底复吹熔池搅拌能的计算

至于顶吹,其  $\epsilon$  顶的理论表达式为<sup>[1]</sup>:

$$\epsilon_{顶} = 0.0453Q_r D U^2 \cos^2 \theta / W / X \quad (10)$$

顶吹时熔池内 CO 气泡的上浮显示了对熔池有很大的流体力学作用,促使熔池搅拌。如果假定,大量的 CO 是在凹坑周围放出,则可由下式近似地计算吹氧时 CO 气泡等温膨胀形成的搅拌功率<sup>[2]</sup>:

$$\epsilon_{顶CO} = 0.267V_r T_2 \lg \frac{1.05 + 0.69\bar{H}_r}{1.05} \quad kw/t \quad (11)$$

因此,通过(11)式对(10)式的补充,得到顶吹时熔池搅拌能的计算式:

$$\epsilon_{顶} = 0.0453Q_r D U^2 \cos^2 \theta / W / X + 267V_r T_2 \lg \frac{1.05 + 0.69\bar{H}_r}{1.05} \quad (12)$$

图5表示在复吹过程中,底吹搅拌能和顶吹搅拌能的变化关系。由图可知,对熔池的搅拌主要是靠底气而不是顶气,尤其是在吹炼初期和末期,采用底吹氧气和天然气弥补了顶吹对熔池搅拌不力的缺点,大大地改善了初期和末期熔池内冶金反应的动力学条件。同时对顶枪枪位的控制,也可以比纯顶吹转炉高,无需进行硬吹。因此,顶吹氧底吹氧及天然气复吹转炉熔池搅拌能可表达为下列两项之和,即:

$$\epsilon = \epsilon_{O_2+CH_4} + \epsilon_{顶} \quad (13)$$

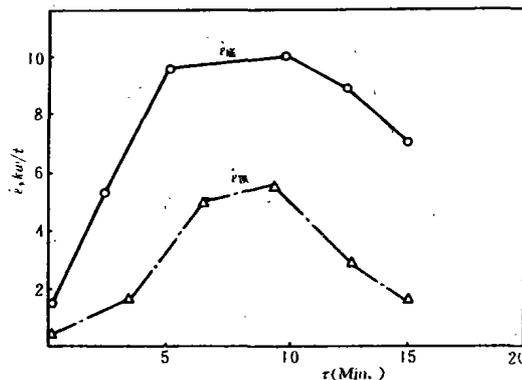


图5 顶、底搅拌能在吹炼过程中变化关系

## 4 结 论

(1) 本文针对底吹氧气和天然气,建立了适合该气源的熔池搅拌能计算公式,有效地解决了底吹  $O_2$  和  $CH_4$  对熔池的搅拌能估算问题。

(2) 采用底吹氧气和用天然气作冷却介质,在吹炼过程中,始终对熔池具有较强的搅拌作用。在相同底吹流量下与吹惰性气体相比,除初期极短时间外,  $\epsilon_{O_2+CH_4}$  一直大于  $\epsilon_{Ar}$ ,最大可达2.53倍。

(3) 在顶底复吹转炉中起主要搅拌作用的是底气而不是顶气。在吹炼初期和末期底气对熔池的搅拌起主导作用更为明显。

### 符 号 说 明

$\eta_{O_2}$ : 底氧脱碳利用率

$\alpha$ : 底吹天然气与氧气量之比

$W$ : 钢液重量  $T$

$E_{O_2+CH_4}$ : 底吹  $O_2$ 、 $CH_4$  熔池搅拌能  $W$

$\rho_{O_2}$ 、 $\rho_{CH_4}$ : 底吹  $O_2$ 、 $CH_4$  喷口处氧和天然气密度  $kg/m^3$

$\rho_{O_2}^0$ 、 $\rho_{CH_4}^0$ : 标态下  $O_2$  和  $CH_4$  的密度  $kg/m^3$

$U_{O_2}$ 、 $U_{CH_4}$ : 喷口处  $O_2$ 、 $CH_4$  的速度  $m/s$

$Q_{O_2}$ : 底吹氧换成标态下的体积流量  $Nm^3/h$

$T_1$ 、 $T_2$ : 室温和炉温  $K$

$R$ : 气体常数  $8.314J/k \cdot mol$

$H$ : 熔池深度  $m$

$D_r$ : 顶吹流量  $Nm^3/h$

$P_0$ : 钢液面处的气体压强  $0.1013MN/m^2$

$P_1$ : 炉底压强  $N/m^2$

$\bar{H}_0$ :  $CO$  气泡上升平均深度  $m$

$V_c$ : 脱碳速度  $\%/min$

$\rho_m$ : 钢液密度  $kg/m^3$

$X$ : 顶枪枪位  $m$

$U$ : 顶枪喷口处速度  $m/s$

$\theta$ : 喷咀倾角,度

$\epsilon$ : 搅拌能量密度  $w/t$

### 参 考 文 献

- 1 徐文派. 转炉炼钢学. 北京:冶金工业出版社,1988
- 2 黄希祜编译. 炼钢过程动力学. 重庆大学内部资料
- 3 何平等. 钢铁,1989,24(6):21~28
- 4 森一美 et al. 铁と钢,1981,67(6):672~675
- 5 Nakanishi et al. Ironmaking and steelmaking,1975,3(3):193~197
- 6 孔维等. 复吹转炉搅拌强度对冶金反应的影响,中国金属学会第五届炼钢学会论文,重庆,1988,4