

純氧頂吹轉爐煉鋼的操作 控制和除塵等問題

(內部資料)

上海交通大學 周志宏

上海科學技術情報研究所

一九六五年六月

目 录

纯氧顶吹转炉炼钢的操作控制和自动化

一、操作控制的重要性.....	(1)
二、计算控制.....	(1)
三、炉外的检测技术.....	(10)
四、结语.....	(22)

纯氧顶吹转炉炉气的除尘与回收

一、氧气顶吹转炉炉气的性质.....	(24)
二、废气除尘——炉气燃烧后的除尘.....	(24)
三、未燃炉气的回收和除尘.....	(25)
四、结语.....	(30)

純氧頂吹轉爐煉鋼的操作控制和自動化

一、操作控制的重要性

純氧頂吹轉爐煉鋼是近年來大量生產優質鋼的一種有效方法，其生產速度遠非任何其他煉鋼方法所能比擬。以美國瓊斯·拉夫林公司(Jones and Laughlin)克利夫蘭廠(Cleveland)所設置的一個容量為200噸的純氧轉爐車間生產記錄為例：1963年5月每小時最高生產量達到491.6噸，同年7月在27分鐘內一爐鋼產量為239.4噸，也就是說，每小時生產量升高到532噸的高記錄；而大型鹼性平爐每小時最高產量只有30~40噸。可見用這一方法冶煉，時間短、而產量高。然而，對它必須有效地進行操作控制。

在底吹轉爐吹煉過程中，由於單憑操作者的經驗，用肉眼觀察爐內火焰的情況來確定所需的終點溫度，這往往是不準確的，溫度過高時須加料冷卻，過低又須用後吹來提高，總之要經過調整階段，這樣就延長了冶煉時間，影響了鋼的質量和產量。而純氧頂吹轉爐的容量一般遠較底吹轉爐大，並且是用純氧吹煉，如果採取同樣的調整步驟，則對鋼的質量和產量影響更大。例如，美國瓊斯·拉夫林公司的阿里奎巴廠，在未採用計算控制以前每爐鋼調節溫度所需要的平均時間為5.46分鐘，而在採用計算機後每爐溫度調節所需的時間可減少2.5分鐘。因此，有效地控制操作過程就成為純氧頂吹轉爐冶煉中一個十分重要的問題。

近年來，對於有效地控制純氧頂吹轉爐的操作過程方面，國外趨向於：(1)利用計算方法來預測鋼液的終點溫度與成份，逐步建立全面的計算控制系統。(2)在操作過程中通過各種檢測技術控制熔池內的反應，以提高計算控制系統的作用。茲簡述如下。

二、計 算 控 制

1. 應用熱化學原理推導計算方程式

在純氧轉爐吹煉過程中，終點溫度的有效控制首先引起了操作者們的注意，利用計算方法從事這方面的試驗與研究是從美國瓊斯·拉夫林公司阿里奎巴廠(Aliquippa)開始的。該廠物理研究員斯拉托斯基(Slatosky)應用熱化學原理：根據熱平衡、料平衡和化學平衡並對氧氣轉爐煉鋼中的一些變數分別作了假設推导出終點溫度的計算方程式如下：

$$T_F = [W_{HM}(87.35 + 0.255T_M + 131.4 Si_0 + 30.34 Mn_0) + 16.47 W_s + 29.57 W_{CaO} + (2.26 V. V. + 19.93)(10^6) - 3125T_M - (121.4 \times 10^6 - 1618 W_s)(-75 \times 10^{-5} L. H. + 0.153) - 1225(W_{MS} + W_P)] + [W_{HM}(0.211 + 0.0041 Si_0 + 0.00025 Mn_0 - 285 \times 10^{-8} T_M) + 0.214 W_s + 0.384 W_{CaO} + 140 V. V. + 0.19(W_{MS} + W_P) + 1225 - (7.500 - 0.10 W_s)(-75 \times 10^6 L. H. + 0.153)]$$

式中： T_F ——終點溫度(°F)；

W_{HM} ——鐵液重量(磅)；

T_M ——測出的鐵水溫度(°F)；

Si_0 ——測得的生鐵中的Si含量(%) (計量Fe、Si(%))；

Mn_0 ——測得的生鐵中的Mn含量(%) (計量Fe、Mn(%))；

W_s ——廢鋼的重量(磅)；

W_{CaO} ——石灰的重量(磅)；

V.V.——碱度(无因次量);

L.H.——喷枪离静液面高度(吋);

W_{MS} ——铁鳞重量(磅);

W_P ——矿球重量(磅)。

随之,根据这个公式设计出了一种专用计算尺,可供操作人员使用。操作者在熟悉计算方法后,根据自己决定的数据——铁鳞、废钢和石灰石的重量,喷枪在静液面的位置以及铁液的成份与温度(铁液的温度用双色高温计测定),可以在炉旁就近计算出预计的终点温度,并与实测温度比较,进行调整。阿里奎巴厂在323炉中进行的终点温度的计算结果表明:249炉(占77%)的计算温度落在实测温度 $\pm 20^\circ\text{F}$ 范围内;297炉(占92%)落在 $\pm 30^\circ\text{F}$ 范围内。可见利用计算方法来控制终点温度是可能的。

在上述基础上又进一步发展出一系列控制装料的计算方程式,如铁液、石灰、废钢等材料重量的计算方程式分别为:

铁液 $W_{HM} = W_C - W_S$

石灰 $W_{CaO} = \left(\frac{60.06}{28.06} \right) \left(\frac{1}{0.92} \right) (V.V.) \left(\frac{Si_0}{100} \right) (W_{HM})$
 $= 0.023265 (V.V.) (W_{HM}) (Si_0)$
 $= 0.0233 (V.V.) (W_{HM}) (Si_0)$

废钢 $W_S = \{ W_C [(117.93 - 25.3 V.V.) (Si_0) + 29.41 (Mn_0) + 0.257 (T_M) - 502.19]$
 $+ 1.8 \times 10^6 (V.V.) + 16.22 \times 10^6 - 3125 (T_M) - 96.3 \times 10^6 (-75 \times 10^{-5} L.H. + 0.153) - 1808 (W_{MS} + W_P) \} + \{ (117.93 - 25.3 V.V.) (Si_0) + 29.41 (Mn_0)$
 $+ 0.257 (T_M) + 93.82 - 1285 (-75 \times 10^{-5} L.H. + 0.153) - 67t_D \}$

式中: W_C ——装料重量(磅);

t_D ——前一炉出钢与后一炉装料的停顿时间(分)。

t_D 为增添的项目,用以抵消因停顿引起的炉衬热损失,在终点温度公式内未包括。上面公式中其余各项的意义同前文所述。

应该指出:铁液中的碳含量假定是饱和的,可作为铁液温度及含硅量的函数,因此不列入废钢控制的方程式中。但是如果遇有一炉铁水不足要由另一炉补充时,则不足铁水的重量、含硅量以及温度与其余铁水的温度和含硅量等数据可以同时进入计算系统内。两次装入不同铁液的平均成份与温度的计算方程式为:

平均含硅量 $Si_A = Si_B + \frac{(W_{DO})(Si_{DO} - Si_B)}{130,000}$

平均温度 $T_A = T_B + \frac{(W_{DO})(T_{DO} - T_B)}{130,000}$

平均含锰量 $Mn_A = Mn_B + \frac{(W_{DO})(Mn_{DO} - Mn_B)}{130,000}$

式中: A——平均数值;

B——另一个混铁罐倒出的铁水量;

DO ——混铁罐倒出的铁水量(已倒尽尚不足量)。

利用这些方程式,在给定的钢液温度与成份下,可使用计算尺计算出装料量。以阿里奎巴厂的试验为例:

固定钢成份 含碳0.05%, 供氧量6,500立方呎/分, 终点温度 $2880^\circ \sim 2920^\circ\text{F}$ 。吹炼终

了时,插入热电偶测量温度,发现在227炉中有148炉在预计的温度范围内,占65.1%;而单凭经验装料只可能达到46.3%。试验结果足以证明:在装料量得到控制的条件下,可使预计温度与实测温度相差不大,并减少了炉号的调整。根据热化学原理推导出一系列的数学方程式来计算装料,从而控制终点温度,可以说是计算控制用于纯氧顶吹转炉的一个开端。它为进一步扩大计算机的应用开拓了前景。

2. 模拟计算机的应用

模拟计算机的应用使计算控制前进了一步,它以电模拟计算代替了计算尺的手工操作。但在计算原理上,二者基本相同。

以终点温度为变数,废钢的控制方程式如下:

$$W_s = \{ (W_c [67.9 - 0.207T_r + 0.244T_m + 29.4Mn + (117.9 - 0.0091(T_r)(V.V.))(Si)] + 24.3 \times 10^6 - 97.9 \times 10^6(0.153 - 75 \times 10^{-5} L.H.) - 1803(W_{Ms} + W_P)) \div (138.3 + 29.4 Mn - 1305(0.153 - 75 \times 10^{-5} L.H.) + 0.244 T_m + (117.9 - 0.0091(T_r)(V.V.))(Si_0)) \} - 100t_d$$

式中: W_{HM} ——铁液重量(磅);

W_c ——加入料(包括废钢和铁液)的重量(磅);

W_s ——废钢的重量(磅);

$V.V.$ ——碱度 $\frac{CaO}{SiO_2}$ (无因次量);

Si ——生铁含 Si 量(%);

Mn ——生铁含 Mn 量(%);

T_r ——预期的出钢温度($^{\circ}F$);

T_m ——生铁温度($^{\circ}F$);

$L.H.$ ——喷枪离静液面的高度(吋);

W_{Ms} ——铁鳞的重量(磅);

W_P ——矿球的重量(磅);

t_d ——前一炉出钢到后一炉装料之间所延迟的时间(分)。

在模拟计算过程中,操作人员根据需要进行经验决定铁鳞及矿的含量、喷管高度、熔渣碱度以及给定的终点温度等数据,然后应用终点温度、装料量和废钢量三个控制方程式计算出铁液、废钢和熔剂的装入量。至于在应用不同炉次的铁水时,其计算方程式与使用计算尺时相同。

正常出钢温度要求在 $2,900^{\circ}F$ 。有时因为盛钢罐较冷或炼制特种牌号钢,出钢温度可能在 $2920^{\circ}F$ 或更高一些。使用模拟计算机,1,300 炉中的频率分布可有 67% 在合格范围内。而在设置模拟计算机以前,一千炉中的频率分布在合格范围内的只占 53% (见图 1)。

一具专用模拟计算机的计算系统包括多圈 (multi turn) 电位计和数字伏特计等组成部分。数据拨入电位计后,其计算结果通过数字伏特计迅速地显示出来。电位计刻度盘上的拨数也就是所需输入的数据。例如,铁水温度 $2,400^{\circ}F$ 等于电位计上的拨数 2,400,铁水含硅量 1.35% 等于电位计刻度盘上的拨数 135。

模拟计算机的整个计算系统如图 2 所示。

使用模拟计算机的优点是:

(1) 操作方便 操作中的变数可直接输入计算机,后者随时向操作人员提供数据。

(2) 计算迅速 计算按一定的排列次序进行。一炉钢的计算一般为 30 秒钟左右。

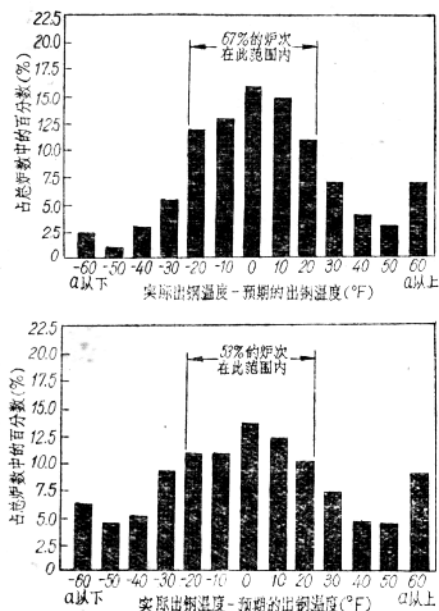


图 1 使用装料计算机前后终点温度频率范围的比较。

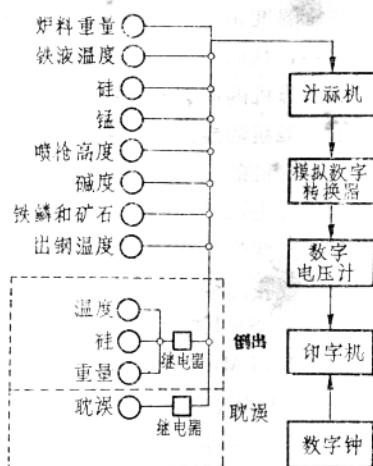


图 2a

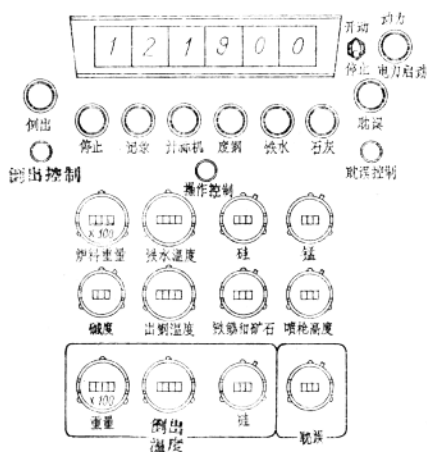


图 2b

00	103500
01	186000
02	245000
03	015500
04	003900
05	008400
06	030000
07	014000
08	290000
09	000000
10	000000
11	000000
12	000000
13	056100
14	129900
15	014100

顺序 读数

图 2c

(3) 数据准确 与使用数字计算机的结果比较, 专用模拟计算机计算给定方程式的误差 不超出 $\pm 0.5\%$ 。

毫无疑问, 由于模拟计算机使用方便、迅速和准确, 它已经成为操作人员的有力助手, 使用模拟计算机可使计算温度与终点所需温度趋于接近。图 3 表示美国阿里奎巴厂采用模拟计算机后在温度控制方面取得的进展, 需要调整的炉数减少了 15%。

但是,由于专用模拟计算机只能做到装料的控制,根据总的热平衡和物料平衡来计算预测的终点温度;同时也由于专用模拟计算机的计算系统简单,还不能在极短的时间内接纳和处理大量的数据,因而,它的使用范围有一定的局限性。

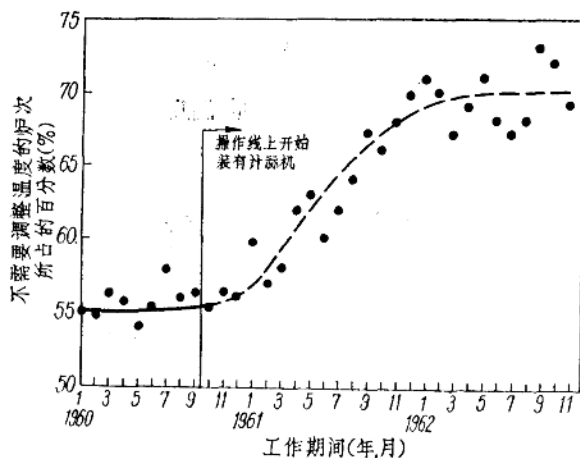


图3 安装模拟计算机前后碱性氧气转炉操作中温度控制的情况

3. 数字计算机的应用

当产品范围较广时,对终点温度、成份以及产品数量等都需要进行控制,这时数字计算机就成为氧气转炉不可缺少的附件了。它的优点是:可以接纳和处理大量输入的数据,在极短的时间(1秒钟)内同时解答若干个未知数。由于程序的自动化,可以通过程序的变换使很多变数得到有效控制。数字计算机还具有记忆(memory)作用,它能记住几千个数字。对于出炉后产品的数据也可输入,进行计算与控制。所有这些都不是专用模拟计算机所能比拟的。现在世界上很多国家的氧气转炉车间,如美国琼斯·拉夫林公司的阿里奎巴厂、克利夫兰厂,英国的莱萨特公司(Lysaght)斯公少普钢厂(Scunthorpe),法国USINOR公司的丹尼厂(Denain),日本的川崎工厂以及荷兰皇家钢铁公司都已装置了数字计算机,而美国威斯康星(Wisconsin)、阿斯兰(Asland)、斯蒂木维勒(Staubenville)、莱克华纳(Lackwanna)、华伦(Warren)、杜金(Duquesne)等厂最近新建的纯氧转炉车间也几乎都设置了数字计算机。这些数字计算机多数系由专业公司代为设计和装置,在使用上已达到成熟的程度。现在试以日本和美国的实例来作说明:

(1)数字计算机在日本方面的应用 1960年,日本钢管公司川崎厂,开始在两只容量为42吨的纯氧顶吹转炉上研究使用数字计算机,1963年为此项自制的HOC-500型数字计算机投入了转炉车间的生产线。它包括:控制吹炼终了时熔池及钢水罐内钢水成份、温度和装料量的若干方程式的数学模型,分析用的真空光谱仪(与计算机连接),自动控制氧气流量率与数量的设备。

日本在使用数字计算机控制氧气转炉炼钢的发展过程中积累了一定的经验。最初,以氧气转炉是成批吹炼的,不连续的,认为一个热平衡、料平衡以及化学平衡能适用于每一炉。但是根据这些假设推导出的数学模型所计算出的结果与实际终点温度有很大的差异,说明这些假设与实际操作情况不完全符合。以后,改进了原有的假设并做了相应的许多试验,但仍不能使计算温度与实测终点温度的差异减小,因此最后放弃了理论的基础,改用操作数据的统计方法来建立数学模型。根据这一方法,变数如铁液重量、烧石灰的数量、铁矿数量以及氧气消耗

量与操作结果(如终点温度、终点碳)之间的关系应用多元回归分析和生产试验统计地加以决定。终点温度最初按下列公式计算:

$$T_s = f(x_1) + f(x_2) + f(x_3) + \dots + f(x_n) + a$$

式中: T_s ——计算的终点温度;

$x_1, x_2, \dots, x_n$ ——变数;

a ——常数。

上述公式的不足处在于没有考虑到炉衬的影响和前后炉次的连续关系(只从一个炉次出发)。转炉炉衬的消耗对转炉内型的变动有很大的影响(见表1)。这一因素在过去使用的数学模型中往往不包括在内。

表1 爐衬消耗对轉炉内型变动的影响

尺 寸	开 始	終 了
爐 內 容 积 (米 ³)	33	55
爐 牆 厚 (毫米)	640	300
爐 口 直 徑 (毫米)	1,450	2,000
熔 池 表 面 积 (米 ²)	5.1	9.1
熔 池 深 度 (毫米)	1,800	1,200

由于炉型的变动往往影响到下列一些因素:

- 1) 炉渣中的 FeO 含量;
- 2) 脱磷;
- 3) 经过炉衬的热损失;
- 4) $CO \rightarrow CO_2$ 的燃烧对熔池的热幅射;
- 5) 飞溅。

由上所述,可见炉衬内型的变动对转炉的操作有着很大的影响。为了解决这一问题,利用前一炉的数据发展出一种控制方程式。在此方程式中,考虑到两个假设:①碱性转炉炼钢方法是连续的,②炉型的影响对前后两炉完全相同。用下列方程式表示这一关系:

$$y_0 = y_1 + f(x_0 - x_1)$$

式中: y_0 ——特定数的因素,需要在下一炉控制;

y_1 ——前一炉控制的结果;

x_0 ——下一炉的变数;

x_1 ——前一炉的变数。

值得指出,这一方程式比过去的数学模型前进了一步。因此,根据前一炉的数据估计下一炉终点温度可表示为:

$$T_{s,0} = T_{s,1} + \{f(x_{1,0}) - f(x_{1,1})\} + \{f(x_{2,0}) - f(x_{2,1})\} + \dots$$

选择矿石使用量作为温度控制的因索,并根据一定的假设推导出矿石使用量的控制方程式为:

$$\begin{aligned}
 W_{0,0} = & W_{0,1} + \frac{W_t}{a_t} (T_{s,1} - T_{s,0} - B_t) \\
 & + b_t (W_{P,0} - W_{P,1}) + d_t (W_{CP,0} - W_{CP,1}) \\
 & + e_t (W_{C,0} - W_{C,1}) + f_t (W_{Sc,0} - W_{Sc,1})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + g_i(W_{a,0} - W_{a,1}) + \{F_i(W_{d,0}) - F_i(W_{d,1})\} \\
& + \{F_i(W_{e,0}) - F_i(W_{e,1})\} \\
& + n_i([Si]_{P,0} - [Si]_{P,1}) + O_i(T_{P,0} - T_{P,1}) \\
& + p_i\{F_i([C]_{S,0}, P_{O_2,0}) - F_i([C]_{S,1}, P_{O_2,1})\} \\
& + q_i \cdot H_i + S_i + \text{Const} \dots
\end{aligned}$$

式中: W_0 ——铁矿石重量 (公斤);
 W_t ——钢的总重量 (吨);
 W_P ——铁液重量 (吨);
 W_{CPI} ——冷生铁的重量 (吨);
 W_C ——废钢重量 (吨);
 W_{scl} ——铁鳞重量 (吨);
 W_a ——石灰石重量 (公斤);
 W_d ——焙烧过的石灰的重量(公斤);
 W_e ——萤石重量 (公斤);
 $[Si]_P$ ——铁液的含 Si 量 (%);
 T_P ——铁液温度 ($^{\circ}\text{C}$);
 H_i ——喷枪高度 (厘米);
 B_i ——修正因数,对新炉衬(1,2,3炉)或前炉出钢到后炉装料出现延迟,炉衬保留的热量有变化,前一炉的结果必须用这一因数修正;
 S_i ——修正因数,前一炉的喷溅量影响到它的终点温度($T_{s,1}$) (随着严重的喷溅量,温度下降),因此在进行下一炉的计算时,需加修正;
 $F_i([C]_S, P_{O_2})$ ——终点含碳量和(在吹炼最后几分钟内的)氧气压力的函数,可用图解法求出。

终点碳是根据氧气消耗量来决定的,而氧气的消耗取决于以下几个因素:

- 1) 氧化装料中的碳、硅、锰和磷;
- 2) 渣中 FeO 以及烟尘的形成;
- 3) 由于铁矿和铁鳞的分解所节约的氧气量。

由这些因素并结合前一炉用氧的情况,经过一定的假设可以推导出用氧量控制方程式如下:

$$\begin{aligned}
\Sigma O_{2,0} = & \Sigma O_{2,1} + f(W_P) + f(W_{CPI}) \\
& + \{f(W_{0,0}) - f(W_{0,1})\} + \{f(W_{scl,0}) - f(W_{scl,1})\} \\
& + \{f(W_{e,0}) - f(W_{e,1})\} + \{f(W_{a,0}) - f(W_{a,1})\} \\
& + \{f(W_{d,0}) - f(W_{d,1})\} \\
& + \{F_C([C]_{S,0}, P_{O_2,0}) - F_C([C]_{S,1}, P_{O_2,1})\} \\
& + V_O \cdot H_i + D_O + S_O + \text{Const} \dots
\end{aligned}$$

式中: $\Sigma O_{2,0}$ ——后一炉所需要的氧气量(米³);
 $\Sigma O_{2,1}$ ——前一炉里测得的氧气消耗量(米³);
 D_O ——当新炉衬(1,2,3炉)或出钢到装料之间出现延迟时,对于氧气消耗量的修正项(米³);
 S_O ——前一炉的喷溅影响氧气消耗量的修正项。

按上述整个控制系统,在 200 炉中的使用结果如表 2 所示。

表 2 使用数字计算机控制前后误差情况

误差项目	未使用数字计算机控制	使用数字计算机后
终点温度	13°C	10°C(平均误差 8°C)
终点碳份	0.015%	0.011%

铁液温度用插入式热电偶测量,分析使用真空式分光光度计。在所有情报输入计算机系统后,计算机依次进行:

- 1) 烧石灰用量(根据最后含磷)的计算;
- 2) 根据石灰量计算出矿石量以及终点含锰量;
- 3) 根据矿石量计算消耗量以及钢的生产量;
- 4) 加碳剂如 Fe、Mn、FeP 的计算;

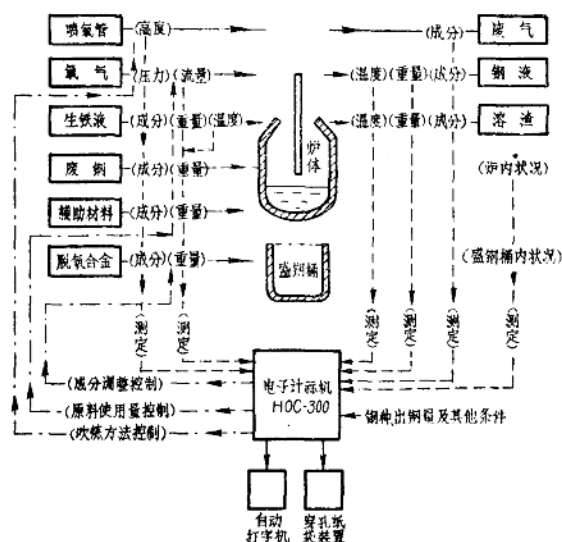


图 4 日本川崎厂使用的数字计算机控制系统图

铁公司。这家公司,在碱性氧气转炉操作控制自动化方面取得了一定的成就。

数字计算机的应用正朝着动态计算控制的方向发展。所谓动态计算控制,就是在应用以理论为基础推导出数学模型来计算终点温度和碳份的同时,结合炉外的各种检测数据来提供情报。这样,就使操作人员在整个吹炼期间有可能测定精炼的过程,从而同时达到所需要的温度与成份,保证了钢的质量。这比单凭控制方程式提供数据远为优越,因为它不能提供过程中可能发生的各种变化。尤其是当计算结果与熔池中的反应过程发生偏离时,运用炉外检测的数据可以及时调正参数,改变操作,有利于过程的有效控制。

炉外检测装置所提供的情报,既可用于直接观察,也可输入过程控制的计算机中作为过程控制的依据。目前这方面的工作主要集中在一氧化碳、二氧化碳和废气量的计量。美国琼斯·拉夫林公司已成功地运用炉外检测的计量数据来进行脱碳率、连续碳平衡和连续动态热平衡等方面的动态计算控制。举例说明如下:

脱碳率 利用小型试验炉来研究增加单位吹氧率的影响,得到的结果如图 5 所示。

但是,不同炉次的脱碳率曲线形状可能有很大的变动,其中,早期脱碳的迟延引起泡沫和喷溅的产生(如小型试验炉试验结果所表示的,在工厂实际操作中有时也会出现同一现象)。图6表示正常炉号与出现喷溅炉号的脱碳率曲线。

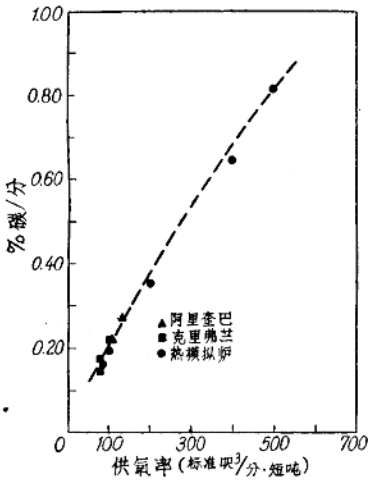


图5 单位吹氧率与平均脱碳率的关系

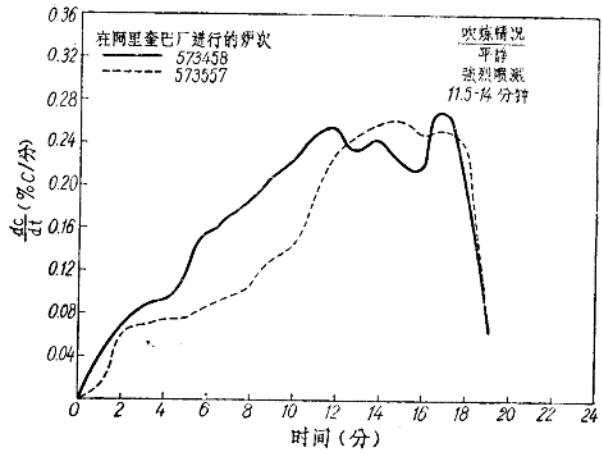


图6 正常炉号与出现喷溅炉号的脱碳率曲线

根据脱碳率曲线的形状可以看出:氧化铁早期过快的形成会引起以后的喷溅,为此可以及时采取措施,以便更易于准确地计算出碳的终点成份。这一点对于操作人员十分重要,因为如在发生喷溅以后再采取措施效果不大。

氧平衡 所有碱性氧气炼钢过程的热化学模型都具有氧平衡,但是在工厂实际操作中,理论上的氧平衡不能足够准确地控制过程中的化学反应(即终点碳)或温度,因为在实际操作结果中,有些炉次渣中含氧化铁很高,而有些却很低。看来,倾炉时的出钢温度往往与氧化铁生成量或渣中氧化铁含量不发生任何关系,一般静态控制模型都把氧化铁看作是变动的因素,因此预测的氧化铁量如有误差,对终点温度的控制就会产生很大的影响。根据H. W. 马耶(H. W. Meyer)等的推论,当氧气在形成氧化铁和二氧化碳的消耗量不相排斥、而是互为反比时,在实际操作中就可以成功地控制温度。由此推导出氧气平衡方程式,其中碳假设被氧化成为气体(90% CO 及5% CO₂)。应用工厂中的操作数据,此氧气平衡方程式可用以计算全氧消耗量(O_T),其中包括 FeO、SiO₂、MnO 等的形成。此外车间也为氧气实际消耗量(O_A)提供了数据。公式如下:

$$O_{XS} = O_A - O_T$$

这里 O_{XS} 表示氧气流计量的误差以及额外的氧气消耗于氧化碳到一个 CO:CO₂ 小于 95:5 的比例的误差的代数总和。假设假定量是正确的,那么就有一种明显的关系存在于 O_{XS}/Q_C (Q_C 是装料铁含量磅数)和 W_{FeO} (产生的 FeO 的重量)之间。图7表示这种关系是存在的。图中资料是依据于日常操作的数据。0.64这一相互关系的系数说明了它在统计工作中的重要性。其他,如连续碳平衡、料平衡以及动态热平衡等都是依据废气和一氧化碳流量的计算来决定的,因此不再分别说明。

可以说,一个动态的计算控制系统首先要求有一个装料控制模型,利用它计算最接近于热平衡的装料;其次是一个动态过程模型,用来跟踪吹炼的进程并测定过程在何时开始偏离预

期终点的进程。为了利用这一炼钢方法在脱碳率和发热量方面的灵活性，既要求有进行过程

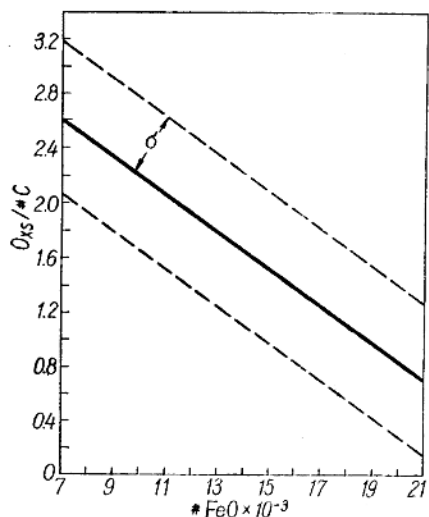


图7 每磅碳需用氧的额外消耗量与渣中氧化铁的关系

测试的设备，又需有使信息起控制作用的快速系统，所以现代碱性氧气转炉所具备的完整控制系统应该是包括一个数字过程控制的计算机。过程中的测试数据可直接输入数字计算机内，一些重要的因素如脱碳率、氧气分布以及熔池温度的上升率等的计算和显示滞后于实际生产过程往往尚有一个极短暂的时间间隔，因此计算机是按程序地使所有过程中输入的信息同步起来。这样，就有可能使计算本身及时地自动协调。

总的来说，数字计算机目前已成功地应用于氧气转炉炼钢的操作线上，用以进行炉料装入量、供氧率以及其他加入物数量等的计算和控制，但是还没有做到操作控制的全部自动化。随着计算和测试技术的不断发展，在积累数据和进一步分析与记录数据的基础上，其趋势必然是朝着闭路式的控制方向发展，逐步达到计算控制的全部自动化。

三、炉外的检测技术

从上面简要的叙述可以看出：为了有效地控制熔池内反应的进行，使操作控制自动化日趋完善，炉外的检测技术就显得十分重要。主要工作表现在连续定碳和连续测温两个方面。

1. 连续定碳

氧气炼钢过程中，熔池碳份的连续测定是一项重要的工作。它不仅给炼钢工作者以直接的帮助，提高中、高碳钢生产的合格率，而且有利于炼钢过程的自动化，大大减轻炼钢工人繁重的体力劳动。

(1) 废气中 CO 和 CO_2 的连续分析 连续而正确的控制炉膛内外炉气的数量和成份在冶炼过程中具有十分重要的意义，因为由此可以测定熔池成份和吹炼开始后已氧化的含碳量。

法国钢铁研究院(IRSID)，在小规模试验性工厂以及工业性 20 吨和 50 吨转炉上所进行的(炉气分析)连续测定熔池含碳量的工作取得了良好的效果。在冶炼过程中，熔于铁水内的碳份转化为气体逸出转炉是连续测定熔池内瞬时脱碳速度和含碳量的依据。因此转炉中的废气都需要除尘。转炉中碳的平衡可以通过下列数据测得，即：

- 1) 装入铁水中的含碳量；
- 2) 装入铁水的重量；
- 3) 炉气中 CO 及 CO_2 的成份；
- 4) 同一时间内炉气的流量。

由此可推导出用来连续测定脱碳率和熔池中瞬时的含碳量的两个方程式：

$$\frac{dC}{dt} = Q \times A_{\text{CO}+\text{CO}_2}$$

$$r = r_0 \frac{\int_0^t \frac{dC}{dt} \cdot dt}{M(t)}$$

式中: r_0 ——热铁水中原始含碳量;
 M ——热铁水的重量;
 A_{CO+CO_2} ——炉气中 CO 及 CO_2 的含量总和(%);
 Q ——炉气的瞬时流量。

但是,用上述方法连续测定熔池中的碳份不可能十分精确。这不仅是因为在测量1)~4)的项目时存在着应有的误差,而且还因在理论上没有考虑到以下的一些变化因素:

- 1) 熔池中的金属重量随时都在变化;
- 2) 由于仪表的滞后,使仪表的测量不能同步,因而产生了偏差(此偏差值视具体时间而定);
- 3) 寄生碳附加碳的来源,如转炉炉衬和未燃烧完的石灰。

因此对于吹炼含碳波动范围较窄的低碳钢应用这一方法是不适合的(其不精确程度随熔池碳份的降低而增大)。但在吹炼高碳钢时,如含碳量在 0.3~0.4% 范围内,则效果良好。

连续定碳这项新技术的首次试验是在法国钢铁研究院试验工厂的 OLP 转炉上进行的。该转炉设有一套废气回收装置。其流程示意图如图 8 所示。

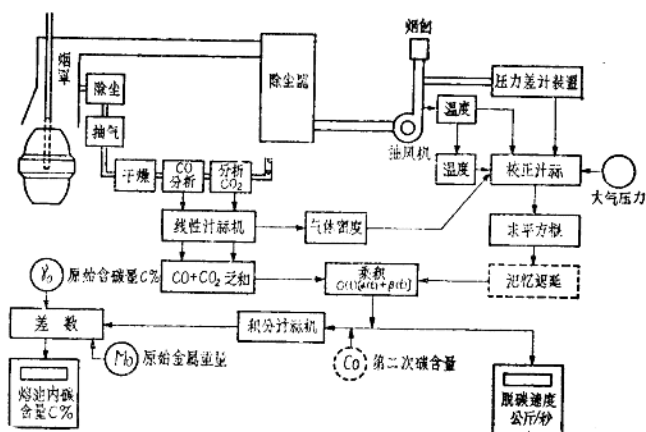


图 8 废气回收装置流程示意图

这一装置包括: 1) CO 和 CO_2 的计量系统; 2) 炉气流量测定系统; 3) 计算及自动记录系统。取样装置设在烟罩出口处, 取出气体试样连续进行 CO 和 CO_2 的分析。炉气由一个经过热处理的青铜制的过滤器除尘。此外还使用了抽气泵、汽水阀和两架分析器以及控制流量的转子流速计。设计这种计量系统仪表时, 为了尽可能地减少由于仪表的惯性所产生的延迟效应, 应采用最小的过滤容积, 并在连通管中采用最大的流速。炉气流量是用带有密度、湿度、温度和气体压力自动校正系统的文氏管测量。首先用一套电子装置进行校正, 并换算成标准流量为 Q_1 。然后, 将所求得的 Q_1 和 $(\alpha_1 + \beta_1)$ 在计算机上相乘, 得出脱碳率的近似值, 并连续记录在记录仪上。最后, 计算所得的铁水重量和原始成份以及 Q_1 、 $(\alpha_1 + \beta_1)$ 经过积分计算机后所得的数据同时进入减法器, 得出熔池内瞬时含碳量。

在一个吹炼周期内, 从仪器得到的熔池含碳量与化学分析推论得到的结果相比较, 高碳点群的偏差不大于 $\pm 5\%$ 。在工业性 50 吨转炉上试验时, 收集的是燃烧过的炉气。由于这种装置中燃烧过的炉气流量的平均值波动很小, 因此在一次测量之后就不再考虑炉气流量的变化, 脱碳率可用气体中的 CO_2 为代表, 只需测试 CO_2 量。以上述为基础而得到的结果, 在吹炼低碳钢时脱碳的偏差约为 $\pm 10\%$ 。

连续定碳装置现在已安装在 50 和 140 吨 OLP 转炉上有效地使用, 它与试验工厂的设备基本相同。图 9 和图 10 分别表示吹炼过程中炉气成份连续分析的曲线和脱碳率的变化。

此外, 为了进行吹炼高磷生铁工业性的研究, 已运用于两只容量为 60 吨的 OLP 转炉。新的发展计划是利用一个在操作线上的 RW-300 型计算机来更准确地测定熔池中的含碳量。

美国阿里奎巴厂于1960年开始对炉气进行间歇地取样和分析。1962年有了固定的连续测碳装置,用来记录炉气成份的变动。该设备由里兹·诺斯勒普(Leeds and Northrup)公司供给。其结构与法国钢铁研究院的大致相似。它包括:1)取样系统;2)二氧化碳分析仪(炉气已经燃烧,不需要进行一氧化碳的分析)。假定炉气流量是固定的,因此也不进行流量的测试。

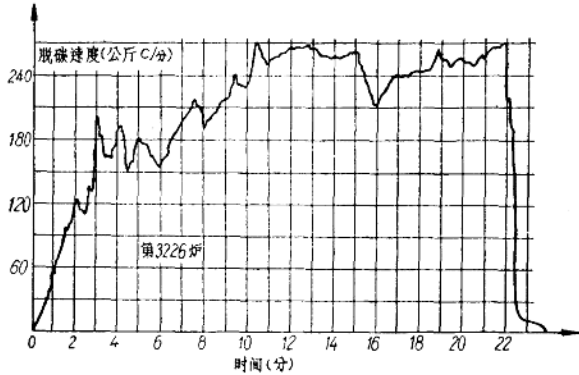


图9 法国140吨OLP转炉炉气成份连续分析曲线

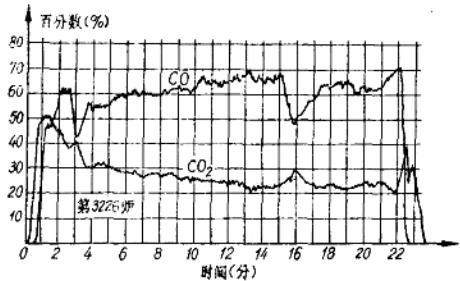


图10 法国140吨OLP转炉脱碳率的变化曲线

瞬时的熔池含碳量(%)用下列方程式求得:

$$C(t) = C_0 - \frac{K}{W_B} \int_0^t A_{CO_2} F dt$$

式中: C_0 ——最初熔池含碳量(%)

W_B ——熔池重量;

A_{CO_2} ——炉气中二氧化碳含量(%);

F ——风扇马力;

K ——常数(经过很多炉的观察,凭经验决定)。

计算时应使计算的和真正的熔池中的含碳量取得最大的贴合。 K 值还包括:如总收得率、风扇马力对流量的比例以及化学计算常数等因素。在正常情况下,风扇内的炉气流量是稳定的。但是在炉气的温度和湿度都特别高时,计算所得的结果可能引起较大的误差。

实验结果表明:吹炼低碳钢时,终点碳的误差较高,而在吹炼高碳钢时,碳份控制的准确度显著提高,如表3所示。两次

表3 从连续碳平衡求得的熔池含碳量

试 验 号	1	2	3	4	5	6
第一次倾炉						
实际含C(%)	1.12	0.51	1.02	0.89	0.34	0.58
计算含C(%)	1.06	0.48	1.05	0.85	0.15	0.39
最后出钢						
实际含C(%)	0.88	0.39	0.72	0.76	0.11	0.31
计算含C(%)	0.86	0.38	0.77	0.72	0.13*	0.31*
二次吹炼期						
实际含△C(%)	0.20	0.12	0.30	0.13	0.23	0.27
计算含△C(%)	0.24	0.10	0.28	0.13	0.21	0.27

* 二次吹炼前已将碳积分器调到熔池的分析碳量。

吹炼期间碳连续平衡的误差可以忽略不计。看来, 这种控制碳份的方法比用理论氧气平衡或“吹炼时间”因素都要优越。

按照计算过程的表示, 降低终点碳的误差可以采取两种办法: 1) 吹熔到一定碳份, 如1.0%左右的含碳量时, 可以停吹, 测定熔池的真实碳份, 则该炉其余吹炼时间的碳连续平衡误差可以大大减少; 2) 根据前一炉的动态碳平衡误差分析进行调整。

连续定碳已由实验阶段达到实际生产。这一测试方法不论对高、低磷的炉料以及燃烧或不燃烧的炉气的测定都能适用。现在, 美国将连续定碳并配合装料控制用来作为动态计算控制中炉外测试的重要依据。今后如能在测试系统和仪器灵敏度方面继续改进, 可使连续定碳的效果进一步提高。

(2) 废气中含氧量的连续测定 利用废气中一氧化碳和二氧化碳的连续分析计算熔池中的含碳量, 现在已经成为一种较成熟的方法。应当指出, 当熔池中含低碳时, 这一方法误差较大。除此法外, 还可以通过测定熔池中剩余的含氧量来达到连续定碳的目的。经过实验, 这种间接方法也获得了成功。它的基本原理是: 由于炉气中的CO量在冶炼的各个阶段不同, 因而燃烧时应用空气中的氧气量也有不同, 因此量出废气中剩余的含氧量就可以间接地测定终点碳。此法的优点是: 1) 不需计量废气流量; 2) 能有效地控制烟罩中抽入的空气量。

测定氧气量的设备主要为氧气分析器。取样管置于烟罩内, 其位置距炉口32呎, 并深入烟罩内4呎(如图11所示)。

取样管外部为水冷装置。有一股细的水流由样管的中心处喷出, 以阻止烟尘进入阻塞样管。这样, 经过喷水后的气体变成了含有水份的混合体, 再用泵将氧气抽入燃烧分析器内, 水份通过过滤器分开, 气体则通过触媒而燃烧。将燃烧后的气体与标准气体样品比较, 即得出氧气含量。

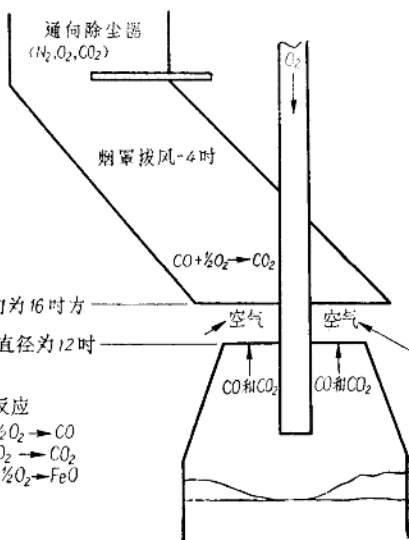


图11 取样位置示意图

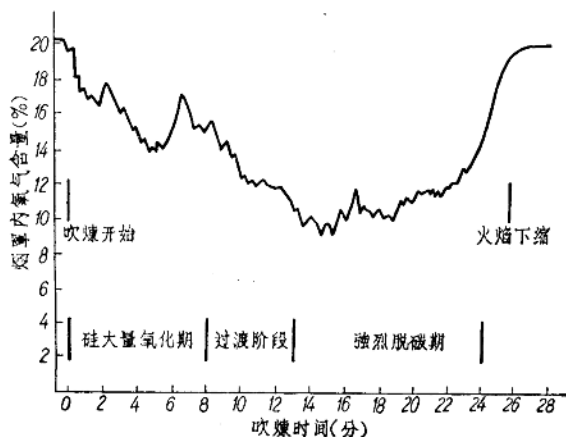


图12 烟罩内废气含氧量与时间关系的典型曲线图

吹炼开始后, 熔池中杂质被氧化, 主要是硅、锰的氧化和极少量的碳转变为了一氧化碳。此时气体中的含氧量是比较高的, 约为20%。以后含氧量逐渐降低。吹炼至最后几分钟, 熔池中碳份已较低, 逸出的一氧化碳和用于氧化的氧也都在减少, 因此气体中的含氧量又重新上升到20%。换言之, 即烟罩内气体中含氧量与熔池中的脱碳速率成反比关系(见图12)。

熔池内的含碳量是通过下列方程式的推导而求得的。假定熔池中脱碳速度是熔池中含碳量的函数,即:

$$\frac{dC(\text{熔池})}{dt} = f_1(\text{熔池中 } C\%)$$

而气体中二氧化碳成份为脱碳速度的函数,也就是说熔池中碳成份的函数可表示为:

$$\text{气体中 } CO_2\% = f_2 \frac{dC(\text{熔池})}{dt} = f_3(\text{熔池中 } C\%)$$

吹炼最后几分钟,由于一氧化碳决定了吸入烟罩中过剩的空气量,可以说气体中的含氧量是二氧化碳的函数:

$$\text{气体中 } O_2\% = f_4(\text{气体中 } CO_2\%) = F(\text{熔池中 } C\%)$$

假如上述关系作为接近线性,可得出:

$$\text{气体中 } O_2\% = A' + B'(\text{熔池中 } C\%)$$

A' 、 B' 为常数,重行排列得:

$$\text{熔池中 } C\% = A + B(\text{气体中 } O_2\%)$$

上述关系和最后得到的方程式只适用脱碳速率下降时的情况,而其中的常数为喷管高度和吹氧量的函数。

根据在一个容量为 220 吨的氧气转炉上(用固定的供氧率)所进行的 72 炉试验结果,证明了测定含氧量的方程式是正确的(见图13)。

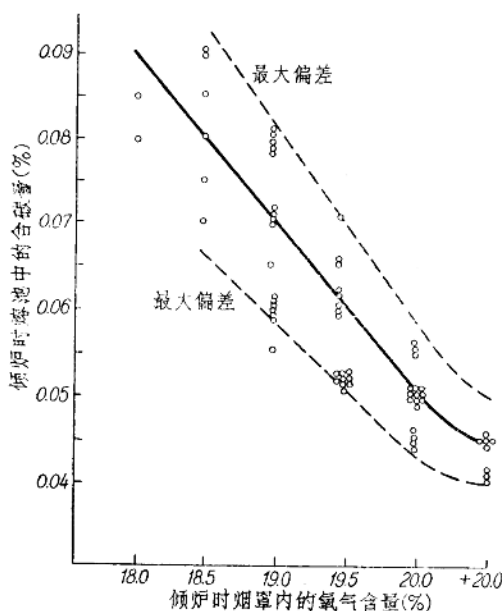
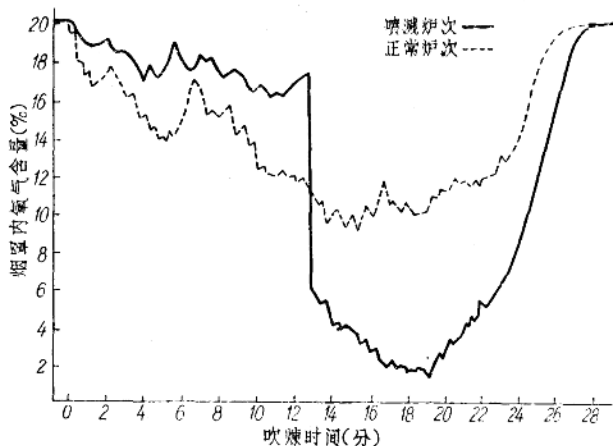


图13 烟罩内废气含氧量与熔池内含碳量的关系

由图中可以看出: 碳含量在 0.05% 以上, 为直线关系; 在 0.05% 以下, 曲线逐渐平坦, 表示脱碳速度减慢, 氧化铁形成加快。

在同一吹炼条件下, 一炉钢的脱碳速率如早期受到阻滞、但后来又迅速增大并超越正常情况时, 就会引起喷溅。图 14 为烟罩内的氧气含量, 可以预示喷溅, 从而能够采取预防措施。

使用氧气燃烧分析器不但指出了脱碳速率, 而且能同时保持烟罩内有吸入的最低而又足够完全燃烧的空气量, 以避免有过多的废气进入灰尘沉淀器中。当气体中含可燃的杂质达到



(两炉钢在同一吹炼条件下,一炉钢是正常的
——用虚线表示,一炉发生严重喷溅——用实线表示。)

图14 烟罩内废气含氧量的变动曲线——表示熔池反应的特征

一定程度时,系统中的安全装置能发出信号,以便重行调整。

(3) 利用火焰强度变化控制终点碳 底吹转炉在吹炼过程中炉口发出的火焰,经过几次显著变化,如去硅、去锰、去碳,终点时火焰的强度变小变弱。多年来,操作者往往就以这种火焰变化的情况作为操作控制的依据。显然,去除人为的偏差,增加结果的可靠性,寻求对目见的现象得出一种定量的计量,就成为一个必然的趋势。过去已有许多方法,例如辐射光电计法,即利用光电管和测量线路之类等,来测试火焰的特点。纯氧顶吹炼钢法(LD)和纯氧顶吹喷石灰粉炼钢法(LD-AC)的终点阶段与一般底吹转炉终点脱碳阶段基本相似,因此利用同一技术研究火焰辐射能量来作终点碳份的控制是完全可行的。英国埃波维利厂(Ebbw Vale)在这方面做了比较深入的工作。为了把吹炼中火焰辐射能量的变动和熔池成份联系起来,从而在留渣或不留渣的操作中得到固定的终点碳,该厂对能谱(Energyspectrum),包括可见光线及红外线作了深入的研究。分析了光谱的四个区域,并用各种光电管和光电倍增器分别对可见的以及红外的光辐射进行了检查。光电测试设备的位置如图15所示。

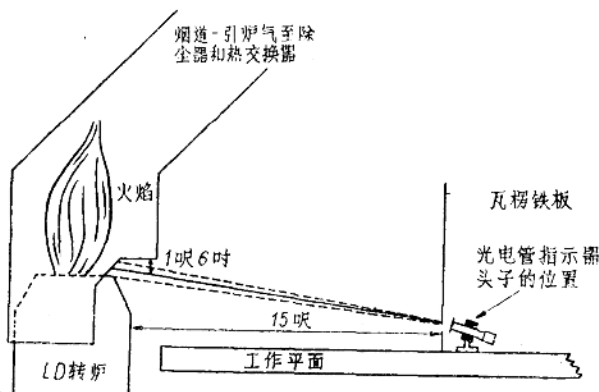


图15 光电指示器头子在观测时的位置

在光电测试设备的光学系统中,包括一对远距离镜头,它装在一个长观测管的端部。进入的光线用半面涂银的分光器分开。分开后的可见光线,经过绝缘过滤器激发电管产生电流,使光