(16)
82-87

高炉富氧条件下喷煤极限研究*

TF538.63

朱子宗　张丙怀　徐楚韶
（重庆大学材料科学与工程学院，重庆，400044）

摘　要　通过对攀钢 4 号高炉富氧条件下煤粉在风口回旋区内的燃烧率的数学模拟研究可知：在攀钢 4 号高炉入炉焦比 580 kg/t，风温 1 050℃ 等生产条件下，当喷煤量超过 155 kg/t，风中富氧率高于 2%，才能使高炉顺行。如果风中富氧低于 4%，吨铁最大喷煤量为 175 kg/t. 当喷煤量超过 210 kg/t，风中富氧率即使达到 10%，也不能满足高炉最佳热状态，将造成未燃煤粉量过高，导致高炉不顺。

关键词　高炉；喷煤；极限
中国图书资料分类法分类号　TF538

富氧条件，煤粉，燃烧率

向高炉内大量喷吹煤粉，可改善操作的稳定性，达到增产降焦的目的。喷吹的煤粉在风口回旋区尽可能多的燃烧是非常必要的，煤粉的燃烧率越高、以煤代焦的量也就越多，喷煤的效果也就越显著。

根据攀钢 4 号高炉的生产条件，按笔者以 Y. OHNO 模型[1]为基础，建立的考虑了采用氧煤枪，煤氧比较高和煤氧充分混合情况下的煤粉燃烧率数学模型[2]，探讨了攀钢高炉富氧大喷煤情况下的煤粉燃烧率，并借以确定未燃煤粉(UPC)量的范围，进而研究了 4 号高炉的最大喷煤量，以期为优化攀钢高炉生产提供理论依据。

1　回旋区内煤粉燃烧的理论基础

1.1　回旋区的大小和燃烧范围

风口前形成的回旋区空间(以下简称：回旋区空间)的概念和模型如图 1 示。在回旋区空间内，焦炭存在较少，煤粉优先燃烧。为了保持回旋区的稳定，煤粉尽量燃烧是最重要的。

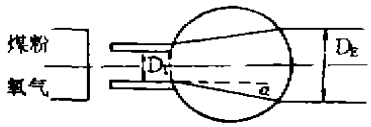

图 1　风口回旋区空间概念和模型图

回旋区的深度可使用下式表示

$$\frac{D_R}{D_T} = 0.521 \cdot \left(\sqrt{\frac{\rho_{gb}}{\rho_c}} \cdot \frac{U_{ab}}{\sqrt{g \cdot D_T}} \right)^{0.8} \qquad (1)$$

式中　D_R：回旋区的深度(m)；

D_T：风口直径 (m)；

* 收文日期　1998-05-26
第一作者：男，1966 年生，讲师，博士

U_{ub}：以炉腹煤气为基准的风口前端的煤气流速（m/s）；

D_c：焦炭粒径（m）；

ρ_c：焦炭粒子的密度（kg/m³）；

ρ_{ub}：以炉腹煤气为基准的气体密度（kg/m³）；

g：重力加速度（m/s²）.

风口回旋区的体积(考虑到风口前端气流的扩张角 α, $\alpha = 9 \sim 13.2°$) 采用下式计算：

$$V_f = \pi/12 \cdot D_R \cdot (D_f^2 + D_f \cdot D_E + D_E^2) \tag{2}$$

$$D_E = D_f + 2 \cdot \tan\alpha \cdot D_R$$

式中　V_f：回旋区空间体积(m³)；

D_E：回旋区空间前端的直径（m）.

1.2　回旋区内煤粉燃烧率数学模型

建立回旋区内煤粉燃烧率的数学模型时的若干假设：

1）回旋区被赤热的焦炭包围，气体温度及煤粉温度等于风口前端理论燃烧温度 T_f，气体压力稳定；

2）煤粉在燃烧过程中，煤粉粒径和密度保持不变；

3）煤粉比焦炭优先燃烧，可忽视焦炭的燃烧；

4）高温煤粉的燃烧，主要以 $C + 1/2O_2 = CO$ 为主；

5）煤粉燃烧后的气体总量近似等于煤气量。

燃烧空间内单位体积的煤粉燃烧速度可用下式表示：

$$R = \frac{W_S}{V_g} \cdot \frac{6}{\rho_P \cdot D_P} \cdot K \cdot c_{O_2} \tag{3}$$

式中　R：单位体积的煤粉燃烧速度(kmol/(m³ · s))；

W_S：喷入煤粉流量(kg/s)；

V_g：煤气流量(m³/s)；

ρ_P：煤粉的密度(kg/m³)；

D_P：煤粉直径(m)；

K：总括反应速度常数(m/s)；

c_{O_2}：燃烧空间内氧的摩尔浓度(kmol/m³).

假定煤气流量 V_g 一定，与燃烧速度相对应的单位时间内氧浓度的变化速度：

$$-\frac{dc_{O_2}}{d\tau} = R = A \cdot c_{O_2} \tag{4}$$

其中：$A = \frac{W_S}{V_g} \cdot \frac{6}{\rho_P \cdot D_P} \cdot K$，$\tau$ 为时间(s). 当 $\tau = 0$ 时，$c_{O_2} = (c_{O_2})_0$.

则：$c_{O_2}/(c_{O_2})_0 = \exp(-A \cdot \tau)$

由于 $-A \cdot \tau$ 范围较小，所以：$\exp(-A \cdot \tau) \cong 1 - A \cdot \tau$

因此

$$c_{O_2}/(c_{O_2})_0 = 1 - A \cdot \tau \tag{5}$$

在煤气量 V_g 一定的情况下，煤粉在回旋区停留的时间内，消耗的氧气量为：

$$V_g \cdot (c_{O_2} - (c_{O_2})_0) \qquad (\text{kmol/s})$$

假设煤粉中的 C 含量为 E_C，则进入回旋区的煤粉量(mol)：

$$W_S > E_C/12 \qquad (\text{kmol/s})$$

回旋区内煤粉的燃烧率可用下式表示：

$$\eta = \frac{2 \cdot V_g((c_{O_2})_0 - c_{O_2})}{W_s \cdot E_C/12} \tag{6}$$

假设煤粉在回旋区内停留的时间为 τ，综合(3)、(4) 式得：

$$\eta = \frac{24}{E_C} \cdot \frac{6}{D_p \cdot \rho_p} \cdot K \cdot \tau \cdot (c_{O_2})_0 \tag{7}$$

其中

$$\tau = V_f / V_g \tag{8}$$

根据氧量平衡，可导出下式：

$$V_g \cdot (c_{O_2})_0 = (V_g)_0 \cdot (c_{O_2})_{00} \tag{9}$$

式中 V_f：回旋区的体积(m^3)；

$(V_g)_0$：基准期的气体流量(风量) (m^3/s)；

$(c_{O_2})_{00}$：鼓风中的氧浓度 ($kmol/m^3$).

燃烧生成的气体量 V_g 与鼓风量$(V_g)_0$ 的关系：

考虑到1) 温度变化；2) 气体的摩尔数的变化。并已知风温 T_0(K)，煤氧比 X(kg/m^3)，煤粉的元素(C, H, N, O, S) 分析值分别为：E_c，E_H，E_N，E_o，E_s；假设生成的气体组成为：CO、H_2、N_2、H_2S. 则气体流量比$(V_g)_0/V_g$ 可表示为：

$$\frac{(V_g)_0}{V_g} = \frac{1}{1 + B \cdot (Y_{O_2})_0 \cdot X} \cdot \frac{T_0}{T} \tag{10}$$

式中 $B = 22.4 \cdot (W_O/32 + E_C/24 + E_H/2 + E_N/28)$

$(Y_{O_2})_0$：风中氧的摩尔分率；

T：回旋区温度 (K).

$$(c_{O_2})_{00} = \frac{p}{R_g \cdot T_0} \cdot (Y_{O_2})_0 \tag{11}$$

式中 p：回旋区空间的压力(Pa)；

R_g：气体常数。

综合以上(5)、(7)、(8)、(9) 式，回旋区内煤粉的燃烧率可按下式求解：

$$\eta = \frac{24}{E_C \cdot R_g} \cdot \frac{6}{D_p \rho_p} \cdot \frac{1}{1 + B \cdot (Y_{O_2})_0 \cdot X} \cdot (Y_{O_2})_0 \cdot \frac{p}{T} \cdot K \cdot \tau \tag{12}$$

2 煤粉燃烧率的数学模拟

2.1 计算依据和条件

在高炉富氧大喷煤生产条件下，煤粉燃烧率的数学模拟计算以 1989 年 9 月 25 日投产的攀钢 4 号高炉为例，其有效容积 1 350 m^3，炉顶压力 0.15 ~ 0.20 Mpa，风口 18 个，渣口 2 个，铁口 2 个，喷吹口 4 个。外燃式热风炉 4 座，最高设计风温 1 260℃. 攀钢 4 号高炉生产条件如

表1，喷吹煤粉的理化性能见表2.

表1　计算条件表

T/K	p/MPa	T_0/K	D_b/μm	D_k/m	D_f/mm
2 473	0.24	1 323	74	1.2	100

表2　煤粉成份表　　%

	工业分析					灰份分析				
	C	A	V	S	W	SiO_2	MgO	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3
攀钢煤粉	74.97	16.09	7.18	0.62	1.14	48.86	3.06	5.16	26.01	8.15
未燃煤粉	80.57	17.30	1.49	0.64		48.86	3.06	5.16	26.01	8.15

2.2　计算结果

表3　富氧喷煤条件下煤粉燃烧率　　%

喷煤量	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
90	78.9	82.6	86.3	90.0	94.0	97.6	100	100	100	100	100
120	61.0	64.0	67.4	70.3	73.2	76.2	79.0	82.0	85.1	87.9	91.0
150	50.2	53.1	55.0	57.7	60.0	62.5	64.9	67 3	69.7	72.0	74.5
180	42.8	45.3	47.2	49.0	50.9	53.0	55.0	57.1	59.0	61.2	63.2
210	37.3	39.0	41.0	42.6	44.3	46.1	48.0	49.6	51.5	53.0	55.0

表4　各种富氧喷煤条件下的UPC量　　kg/t

喷煤量	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
90	19.0	15.7	12.3	9.0	5.4	2.2	0	0	0	0	0
120	46.8	43.2	39.1	35.6	32.2	28.6	25.2	21.6	17.9	14.5	10.8
150	74.7	70.3	67.5	63.5	60.0	56.3	52.7	49.0	45.5	42.0	38.3
180	103.0	98.5	95.0	91.8	88.4	84.6	81.0	77.2	73.8	69.8	66.2
210	132.0	128.0	124.0	120.0	117.0	113.0	109.0	106.0	102.0	98.7	94 5

从表3、表4可以看出：在喷煤量相同的情况下，随着风中富氧量的提高，煤粉在回旋区的燃烧率提高，UPC量减少。风中富氧提高1%，燃烧率提高3%左右，UPC量减少4 kg左右。在富氧量相同的情况下，随着喷煤量的提高，煤粉燃烧率降低，UPC量增加。

3　高炉富氧大喷煤炉内UPC量的推定

3.1　理论基础

通过对攀钢4号高炉富氧大喷煤各种条件下煤粉燃烧率数学模拟研究表明，煤粉在风口前不可能全部燃尽。在实施喷煤工艺过程中，必须减少未被利用的煤粉量，尽可能地提高煤粉的有效利用。根据日本柴田、八木等人的研究[3]，若不考虑化学消耗，在高炉内最大积粉量 Q_l（即高炉料柱里可滞留的粉剂量）按吨铁计算约为36 kg/t；若超过该值将使高炉内压差急剧上升，导致悬料。考虑到炉料粉化等因素，认为高炉料柱可滞留的UPC量是 Q_l 的1/2，即18 kg/t.但是在稳定操作时此量为常数，对高炉能接受的UPC量没有直接影响。

3.2 UPC 与焦炭气化反应消耗量比较

为了比较UPC与焦炭气化反应消耗能力,在实验室进行了热态实验:实验采用攀钢高炉喷吹用煤和攀钢焦炭,按标准制UPC(成份见表2).

实验采用同轴双层刚玉坩埚,下层装 50 g 焦炭,上层装 50g 与干燥刚玉球混均的 UPC,在 1 150℃装入硅碳管电阻炉内,通入纯 N_2 恒温 10 min 后,再通入反应性气体(CO_2:N_2 = 2:3),反应 30 分钟后,停止实验,并通 N_2 冷却至室温,称量试样余重;实验结果见表 5.

表 5 UPC 与焦炭气化反应消耗量比较表

试样编号	名称	初重/g	余重/g	减重/g	百分比*/%
1	UPC	50.00	7.85	42.15	64.5
	焦 炭		26.80	23.20	
2	UPC	50.00	8.12	41.88	63.7
	焦 炭		26.14	23.86	
3	UPC	50.00	7.73	42.27	67.2
	焦 炭		29.39	20.61	

* 为UPC气化反应量与总气化反应量之比

从表 5 可以看出:UPC 参加气化反应消耗量占碳气化反应消耗量的 65.13%(三次平均值)。

高炉正常冶炼条件下,参加气化反应的焦炭量约为入炉总焦炭量的 17% ~21%[4],考虑到铁水渗碳等,高炉处于动态消耗的焦炭量约为总焦炭量的 20%。喷煤后,由于产生的 UPC 活性较大,气化反应的速度远大于焦炭,1 100℃条件下约是焦炭的 2 ~ 10 倍[5]。喷煤后,原来参加气化反应的焦炭至少有 2/3 被 UPC 代替[6];因此可推算出高炉冶炼过程中通过气化反应等动态消耗的 UPC 量 Q_2(即高炉内可接受的 UPC 量)为:

$$Q_2 = K_{焦} \times 20\% \times 2/3 \tag{13}$$

3.3 极限未燃煤粉量的推定

在攀钢焦比为 620 kg/t 的情况下,$Q_2 = K_{焦} \cdot 20\% \times 2/3 = 82.7$ kg/t;在攀钢焦比为 600 kg/t 情况下,$Q_2 = K_{焦} \times 20\% \times 2/3 = 80.0$ kg/t;在攀钢焦比为 580 kg/t 情况下,$Q_2 = K_{焦} \times 20\% \times 2/3 = 77.3$ kg/t;在攀钢焦比为 550 kg/t 情况下,$Q_2 = K_{焦} \cdot 20\% \cdot 2/3 = 73.3$ kg/t.

攀钢 4 号高炉富氧大喷煤各种条件下,其 UPC 量如图 2 所示。

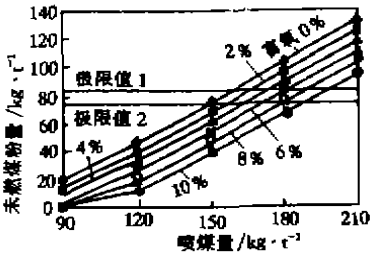

图 2 UPC 量与富氧喷煤量的关系

3.4 问题的分析与讨论

从图 2 看出:攀钢 4 号高炉各种富氧喷煤条件下,回旋区空间内 UPC 量随着喷煤量的增加基本呈直线增加,其 UPC 量与极限 UPC 量线均有交点。交汇点即为该种条件下的最高喷煤比。

在攀钢 4 号高炉入炉焦比 550 kg/t,风温 1 050℃条件下,当每吨铁的喷煤量超过 150 kg,风中富氧率高于 1%,才能使高炉顺行。如果风中富氧低于 4%,吨铁最大喷煤量为 165 kg.

而在入炉焦比为 580 kg/t、风温 1 050℃ 条件下，当吨铁喷煤量超过 155 kg，风中富氧率高于 2%，才能使高炉顺行。如果风中富氧低于 4%、吨铁最大喷煤量为 175 kg，当喷煤量超过 210 kg/t，风中富氧率即使达到 10%，也不能满足高炉最佳热状态，将造成 UPC 量过高，导致高炉不顺。

4 结　语

通过对攀钢 4 号高炉富氧大喷煤条件下煤粉在风口回旋区内的燃烧率数学模拟研究笔者认为：在攀钢 4 号高炉入炉焦比 580 kg/t，风温 1 050℃ 等生产条件下，当喷煤量超过 155 kg/t，风中富氧率高于 2%，才能使高炉顺行。如果风中富氧低于 4%，吨铁最大喷煤量为 175 kg/t，当喷煤量超过 210 kg/t，风中富氧率即使达到 10%，也不能满足高炉最佳热状态，将造成未燃煤粉量过高，导致高炉不顺。

参 考 文 献

1 Y. OHNO, T. FURUKAWA: Combustion behavior of pulverized coal in a raceway cavity of blast furnace and a large amount injection technology, Trans. ISIJ, 1992, 78: 50

2 朱子宗. 未燃煤粉对高炉冶炼钒钛磁铁矿过程的影响: [博士学位论文], 重庆: 重庆大学材料科学与工程学院, 1998

3 柴田耕一郎, 八木顺一郎. 高炉融着带近傍における粉体の2次元流动特性の解析, 铁と钢, 1991, 77. 1 267

4 成兰伯. 高炉炼铁工艺与计算. 北京: 冶金工业出版社, 1990. 430

5 张丙怀, 朱子宗, 邹德余 等. 未燃煤粉对焦炭性能的影响. 钢铁, 1994, 29(3), 22～26

6 王文忠, 沈峰满. 高炉喷煤若干问题的探讨. 华东冶金学院学报, 1997, (3), 240

Research on Limit of PCI with Oxygen Enriched into Blast furnace

Zhu zizong　　*Zhang binghuai*　　*Xu Chushao*

(College of materials science and engineering, Chongqing University)

ABSTRACT When a large amount of pulverized coal with oxygen enriched is injected into 4 # blast furnace of Panzhihua I & S CO., the combustion of pulverized coal in raceway cavity has been studied theoretically and showed: if the coal ratio exceeds 155 kg/t, the blast oxygen enriched has to exceed 2%, The upper limit of coal injection is 175 kg/t if the blast oxygen enriched under 4%, the 4th blast furnace produce smoothly under the coke rate (580 kg/t), the blast temperature 1050℃. When the coal ratio exceeds 210 kg/t, although enriched oxygen reaches to 10%, it can not meet the optimum hot state of B. F, then it will cause the unburned pulverized coal to be too higher and meet troubles.

KEYWORDS blast furnace; pulverized coal injection; limit

(责任编辑　吕赛英)