煤粉燃烧动力学在高炉喷吹和烧结上的应用

贺友多

（包头钢铁学院）

从煤粉燃烧动力学的观点看，烧结料中碳粒直径从3 mm缩小到2 mm，可使燃尽时间缩短一半，能更充分利用燃料的化学能。高炉喷煤粉的粒度为200目时，燃尽时间在0.015～0.004秒之间，能保证煤气在循环区停留时间内燃烧完毕。不宜集中于几个风口喷吹煤粉，而应均匀分布。

碳素燃烧在能量利用上占很重要的位置，煤粉的燃烧动力学可应用于烧结过程，也可以应用于高炉喷煤过程。

一、煤粉燃烧动力学简介

关于碳氧反应，目前较公认的一次反应机理是形成中间络合物C_3O_4[1]，在温度低于1300℃时，按下式反应：

$$3C+2O_2=C_3O_4 \quad (1)$$

$$C_3O_4+C+O_2=2CO+2CO_2 \quad (2)$$

最终产物$CO/CO_2=1$。此反应机理包括溶入、吸附、络合和氧分子撞击等步骤。在温度高于1600℃时，则按下式反应：

$$3C+2O_2=C_3O_4$$

$$C_3O_4=2CO+CO_2 \quad (3)$$

此时最终产物$CO/CO_2=2$。反应（3）是热分解反应。当温度处于1300～1600℃之间时，$CO/CO_2=1\sim2$。除一次反应外，尚有下列辅助反应：

$$2CO+O_2=2CO_2 \quad (4)$$

$$C+CO_2=2CO \quad (5)$$

如烧结料层中最高燃烧温度约1200～1400℃，且过剩空气系数1.1～1.3时，反应（4）有较大发展，最终废气中$CO_2/CO=9\sim2.5$。由于生成CO_2比燃烧生成CO多放热2.4倍，因此，如何保证烧结料中的碳素燃烧完全，减少烧结矿中的残碳，是值得注意的问题。在高炉喷吹煤粉时，由于温度高，则反应（5）起决定性的作用。

单颗粒煤粉燃烧的速度反应式可表示为：

$$K_b^c=\frac{\beta\cdot C_\infty}{\frac{1}{\alpha_{ZL}}+\frac{1}{k_C}}\ [g/cm^2\cdot s] \quad (6)$$

式中，k_C——化学反应速度常数，cm/min

$$k_C=3.918\times10^9\sqrt{t}\cdot\exp\left(-\frac{44000}{Rt}\right)^{[2]} \quad (7)$$

α_{ZL}——质量交换系数，由N_u准数求得，

$N_u=\frac{\alpha_{ZL}\cdot L}{D}$，当不考虑气流流动时，取$N_u=2$

β——化学计量系数，在烧结温度下，β=0.375；在高炉喷煤条件下，β=0.75[1]。

C_∞——空气中氧的浓度，一般为0.21%（体积）或0.0003g/cm³。

由于扩散系数D，气体的粘度μ，气体的密度ρ_g均为温度的函数，它们各自的函数式是[3]：

$$\mu=\mu_0\frac{1+\frac{C}{273}}{1+\frac{C}{T}}\sqrt{\frac{T}{273}}\qquad(8)$$

$$D=D_0\left(\frac{T}{273}\right)^n\qquad(9)$$

$n=1.5\sim2.0$，本文取$n=1.7$

$$\rho=\rho_0\frac{P\times273}{T\times P_0}\qquad(10)$$

从（7）、（8）、（9）、（10）式可以看出，k_C与温度成指数关系，影响最大，而D与温度是幂关系，影响较弱。当应用于散料体时，用修正雷诺数，此时，水力学直径$d=\frac{2}{3}\cdot\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}d_T$，但根据H.Brauer指出[4]，在散料体时采用$d=\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}d_T$更好，本文采用此式。修正雷诺数$R_e'=\frac{Re}{1-\varepsilon}$，同理修正Nu数

$N_u'=\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}Nu$，（式中，ε—为散料空隙度）

碳素燃尽时间符合平方律，即燃尽时间τ_r与煤粉粒径的平方成正比。

$$d^2=d_0^2-K\tau_r\qquad(11)$$

式中，d_0、d——为煤粉原始直径和燃至τ_r时刻的直径，cm。

K——系数，$K=\frac{8\beta DC_\infty}{\rho_c}$

τ_r——燃至d时所需时间，当d=0时，则为煤粉燃尽时间。

ρ_c——碳粒的密度，本文取0.9g/cm³。

当考虑供氧不足时，（11）式要作如下修正[1]：

$$\tau_r=\frac{\rho_c\,d_0^2}{8\beta C_0\cdot D}\times\left(1+\frac{2D}{k_cr_0}\cdot\frac{\phi_1(\alpha)}{\phi_2(\alpha)}\right)\phi_2(\alpha)\qquad(12)$$

式中，$\phi_1(\alpha)=\int_0^1\frac{\alpha\cdot dy}{(\alpha-1)+y^3}$　(13)

$$\phi_2(\alpha)=\int_0^1\frac{2\cdot\alpha\cdot y\,dy}{(\alpha-1)+y^3}\qquad(14)$$

在高温下，$k_c>>D$，又$\phi_2(\alpha)\to1$，当过剩空气系数$\alpha\to\infty$时，则（12）式变为（11）式。

当考虑气流流动的影响时，可采用下式[1]，

$$Nu=\frac{0.70\sqrt{Re}}{1-\exp(-0.35\sqrt{Re})}\qquad(15)$$

考虑结烧到具体条件，其修正$R_c'=5.11$（条件见后），故可不考虑气流流动的影响。在高炉喷煤粉时，煤粉悬浮在热风流中，相对速度也很小，也可不考虑其影响。其它如煤粉灰分和煤粉气孔率对燃烧速度的影响也均忽略。

二、烧结料层中煤粉的燃烧

烧结过程的数学模型常以温度曲线随时间和随层高的变化来进行描述。因为

层内温度分布代表烧结过程，高温区停留时间的长短则与相对的液相量，烧结矿的成品率有关[2]。烧燃带是热波曲线之源，对整个温度曲线有举足轻重的影响。

对烧结过程的具体计算条件如下。

100公斤烧结矿的配料比：

配料比	精矿	石灰石	无烟煤	返矿	$\Sigma_{干料}$	水分	$\Sigma_{湿料}$
kg	81.2	32.4	8.0	52.11	173.7	13.9	187.6
%	46.74	18.65	4.61	30.00	100.00	8.0	

料层中碳素燃烧生成$CO_2/CO = 7/3$，空气过剩系数平均$\alpha = 1.3$，则通过烧结料层的废气成分如下：

	CO	CO_2	N_2	O_2	$\Sigma V_{干}$	H_2O
%	2.53	22.75	70.40	4.32	100.00	26.9
m^3	1.63	14.63	45.28	2.78	64.32	17.30

空气过滤速度$\overline{W}_o = 0.276 m^3/m^2 \cdot s$，烧结料的$\varepsilon = 0.35$，无烟煤的直径$d_o = 3mm$。计算得D、μ、ρ如表1[5]。

扩散系数、气体粘度和密度计算结果 表 1

温度，K	273	973	1073	1173	1273	1373	1473	1573
$\mu \times 10^4$，g/cm·s	1.50	4.08	4.36	4.63	4.88	5.12	5.36	5.59
D，cm/s *	0.219	1.900	2.244	2.611	3.000	3.412	3.845	4.299
$\rho \times 10^4$，g/cm^3	11.6	3.2	2.95	2.70	2.50	2.31	2.15	2.02

* D采用空气中氧的扩散系数，μ、ρ为废气按成分平均值

计算得k_C和α_{ZL}值如表2。

化学反应速度常数和质量交换系数计算结果 表 2

温度，℃	700	800	900	1000	1100	1200	1300
α_{ZL}，cm/s	8.82	10.42	12.12	13.93	15.84	17.85	19.96
k_c，cm/s	0.25	2.32	14.15	65.0	239.53	741.6	1992.9

从表2可以看出，当$t < 800℃$，碳素燃烧处于化学反应动力学范围；当$t > 1100℃$时，碳素燃烧处于扩散动力学范围。而800—1100℃处于过渡范围。

当供氧充分，平均燃烧温度为1200℃时，求得$K = 3.845 \times 10^{-3}$，$1/K = 260$，所以3mm煤粒燃尽时间要23.4秒。

当考虑烧结料层中供应的空气是有限的，上层α较大，下层由于空气通过含有残碳的烧结矿层及进行再氧化反应，所以α值较小。计算所得不同条件下的$\phi_1(\alpha)$和$\phi_2(\alpha)$、τ_r值如表3及图1。

目前国内烧结机尾红层约占料层高度的1/2，而日本为1/3[2]，二者差别的原因在于燃料粒径不同，当然也是为了追求较高的生产率[2]。当粒径$d_o = 3mm$，在$\alpha = 1.2 \sim 1.3$时，平均燃尽时间波动于1～2分钟之间。当配碳量大时，很容易

计算所得的$\phi_1(\alpha)$、$\phi_2(\alpha)$和τ_r值　　表3

过剩空气系数,α	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.5	2.0	3.0
$\phi_1(\alpha)$	8.840	6.402	4.382	3.686	3.238	2.924	2.690	2.508	2.245	1.671	1.353
$\phi_2(\alpha)$	4.818	3.584	3.266	2.670	2.436	2.264	2.131	2.025	1.866	1.494	1.269
碳粒直径3 mm的燃尽时间τ_r, s	127.08	94.25	82.37	68.46	62.26	57.72	54.23	51.45	47.31	37.67	31.89
碳粒直径2 mm的燃尽时间τ_r, s	59.66	44.19	38.18	31.75	28.83	26.71	25.08	23.77	21.83	17.35	41.66

注：燃尽时间按t=1200℃计算

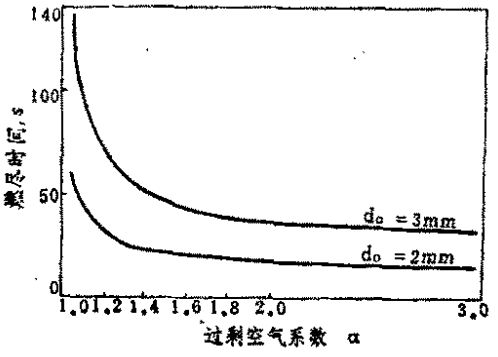

图1　烧结时过剩空气系数α与燃尽时间的关系

使下层供氧不足，而使红层变厚。作者建议把燃料粒径从3 mm降至2 mm，这样碳粒个数可增加2.375倍，使碳粒更加均匀地分布在烧结料层中，避免在大碳粒四周α值很小，而在远离碳粒的地方，α值又太大，致使产生氧气不能充分利用的弊病。由于碳粒直径缩小，燃尽时间可缩短一半左右。反应（4）进行充分，能提高废气中CO_2/CO的比例，使化学能利用更充分。

此外，在碳粒烧燃时，往燃烧空气中加入少量的水蒸汽，对加速燃烧是有利的。这时化学反应会转入链式反应机构，产生初生的活化中心，如H、O、OH等。其附带优点是提高了空气含氧量，有助于去硫、去氟等反应。

三、高炉喷吹煤粉的燃烧

高炉风口的理论燃烧温度波动于2100～2300℃之间，在此高温下，$k_c >> D$，公式（12）可简化成

$$\tau_r = \frac{\rho_c \cdot d_0^2}{8 \cdot \beta \cdot C_0 \cdot D} \phi_2(\alpha) \qquad (16)$$

式中，$\beta = 0.75$

氧的扩散系数D为下值：

t〔℃〕	2100	2200	2300
D〔cm/s〕	8.649	9.278	9.925

计算得燃尽时间如表4及图2。

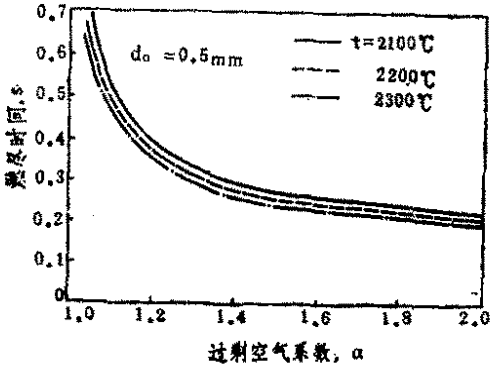

图2　喷煤时过剩空气系数与燃尽时间的关系

从图2可以看出，理论燃烧温度对燃尽时间的影响是不明显的，这是由于扩散与温度关系不紧密，而此时燃烧处于扩散动力学范围。相反，气相中氧的浓度与空气过剩系数起了较大的作用。

大中型高炉每个风口每秒钟产生的煤气实际体积变动在6～12m^3/s之间。如风口前循环区体积以近似球形来计算，则得煤气在循环区的停留时间如表5。

比较表4与表5可以看出，如果要求

在不同条件下计算所得的烧尽时间τ_f值 表 4

理论燃烧温度℃	τ_f, s / α / d, mm	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.50	2.0
2100	0.50	0.697	0.518	0.465	0.386	0.352	0.327	0.308	0.293	0.269	0.216
	0.10	0.0278	0.0207	0.0186	0.0155	0.0141	0.0131	0.0123	0.0117	0.0108	0.00865
	0.074	0.0153	0.0114	0.0102	0.00845	0.0077	0.0072	0.00675	0.0064	0.0059	0.00473
	0.050	0.00645	0.0052	0.00465	0.00386	0.00352	0.00327	0.00308	0.00293	0.00269	0.00216
2200	0.50	0.649	0.483	0.434	0.360	0.328	0.305	0.287	0.273	0.252	0.202
	0.10	0.0259	0.0193	0.0176	0.0144	0.0132	0.0122	0.0115	0.0109	0.0101	0.00805
	0.074	0.0142	0.0106	0.0095	0.0078	0.0072	0.0067	0.0063	0.0060	0.0055	0.0044
	0.050	0.0065	0.00483	0.00434	0.00360	0.00328	0.00305	0.00287	0.00273	0.00252	0.00202
2300	0.50	0.607	0.452	0.405	0.337	0.307	0.285	0.269	0.255	0.235	0.188
	0.10	0.0243	0.0181	0.0162	0.0135	0.0123	0.0114	0.0108	0.0102	0.0094	0.0075
	0.074	0.0133	0.0099	0.0089	0.0074	0.0067	0.0063	0.0059	0.0056	0.0052	0.0041
	0.050	0.0061	0.0045	0.0041	0.00338	0.00307	0.00285	0.00268	0.00255	0.00235	0.00188

煤气在风口循环区的停留时间（秒） 表 5

循环区长度, m \ 煤气量, m^3/s	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0
0.8	0.0447	0.0383	0.0335	0.0298	0.0268	0.0244	0.0223
1.0	0.0873	0.0748	0.0654	0.0582	0.0523	0.0476	0.0436
1.2	0.151	0.0129	0.113	0.101	0.0905	0.0823	0.0754
1.5	0.295	0.252	0.221	0.196	0.176	0.161	0.147

煤粉在风口循环区内一次循环即告燃尽，那么，可以认为煤粉燃尽时间允许在0.02～0.3秒之间，粒径0.5mm的煤粉肯定是太粗了。考虑到循环区内空气的氧浓度不足21%（体积），根据公式（16）可以推断，实际燃烧的时间将比表4计算的值为大。但一般200目的细度，它的燃尽时间波动于0.015～0.004秒之间，应能满足需要。为了不降低循环区内氧浓度至过低，喷煤应广喷，均匀喷吹，不宜只集中于少数几个风口，而且要讲究煤氧比例。

四、结　论

1.在烧结过程中，为了提高CO_2/CO比，减少烧结残碳，把红层由1/2缩小到1/3，似应把燃料粒度从3mm缩小到2mm，这样，燃烧时间可缩短一半，而碳颗粒数可增加2.375倍，使烧结料层内燃烧更均匀、更充分。

2.当温度t＞1100℃，燃烧反应处于扩散动力学范围，而空气过剩系数对燃尽

时间有较大的影响。如何保证α是值得注意的课题。

3.高炉喷吹煤粉条件下，允许燃尽时间波动于0.02～0.3秒之间，200目细度的煤粉是能满足要求的。但高炉喷煤的粒度不能大于0.5mm。

参 考 文 献

〔1〕许晋源等，燃烧学，机械工业出版社，1980年.
〔2〕鞭岩等，冶金反应工程学，科学出版社，1981年.
〔3〕黄希祜，钢铁冶金原理，冶金工业出版社，1981年.
〔4〕Oeters, F.，炼铁学（内部讲义），董一诚等译，北京钢铁学院翻印.
〔5〕吉林大学等，物理化学，人民教育出版社，1979年.
〔6〕Beer, J.M.and Chigier, N.A., Combustion Aerodynamics, 1972, Applied Science Publisher's Ltd, London.

（上接第8页）

普通矿渣罐涨罐显著。

2.配用白马矿后，生铁含钒提高，焦比略有升高，产量略有下降，综合经济效果初步估算每年约可增收289万元。

3.用白马矿代替普通矿冶炼在1#高炉条件下（渣中TiO_2平均24.78%，配加9.5%白马块矿）是可以为高炉所接受的，冶炼工艺方面无特殊技术困难，炉况稳定，各项技术经济指标保持较好的水平。但炉前劳动量增大，炉内操作难度也有所增加。

2#高炉7月份试验当渣中TiO_2升高到平均25.71%时，生产出现困难，炉前不能维持正常出渣出铁，导致炉况顺行受到影响。

4.鉴于现场生产中炉料的波动经常可能出现，当原料品位或TiO_2升高时，渣中TiO_2含量可能超过适宜的界限，而目前尚无可靠措施和技术手段保证，故若长期以白马矿取代全部普通块矿会给生产带来困难。建议以部分采用为宜，例如配加3～4%白马块矿，取代普通块矿的50%。

参 考 文 献

（1）曹质，探讨攀钢高炉"消泡增钒"途径，攀钢钢研所（内部资料）.
（2）攀钢高炉配加白马块矿代替普通富矿的冶炼试验技术鉴定证书冶金工业部..