

影响高炉喷吹煤粉燃烧率的因素及研究

陈川¹ 程树森¹ 潘宏伟¹ 张志宏²

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院 2 北京科技大学应用科学学院)

摘要 高炉喷煤可以有效的降低焦比, 喷煤量过大会导致未燃煤粉过多, 影响炉况顺行, 因此研究煤粉的燃烧率至关重要。前人大多数通过实验确定煤粉燃烧过程中的动力学参数。本文结合高炉喷煤过程, 依据煤粉工业分析值, 通过建立数学模型来计算煤粉燃烧反应动力学参数。模型能够计算煤粉的燃烧率, 同时可以预测不同的富氧量、不同的风温、不同的煤粉粒径对燃烧率的影响。

关键词 煤粉 燃烧率 风温

1 引言

高炉喷煤是节焦降耗, 降低炼铁成本的关键技术。喷煤量的大幅度提高, 配合高炉大型化、长寿化, 并结合高风温和富氧, 已成为高炉技术进步的主流^[1]。高炉喷煤的重点在于: 提高煤粉置换比, 改善高炉喷吹效果和保证高炉在大喷煤时长期稳定、顺行和高产^[2-5]。当高炉喷煤量增加到一定程度, 由于燃烧不完全; 炉尘中碳的质量分数也会增加, 有时会增加很快, 其中含有一些未消耗的煤粉。特别在大喷煤过程中, 提高高炉内煤粉的燃烧率, 对促进喷吹, 提高煤比, 保证大喷煤的条件下, 高炉的顺行具有不可忽视的作用^[6-7]。因此, 提高煤粉的燃烧率对高炉炼铁至关重要。

前人对煤粉燃烧过程中动力学参数的确定无法统一, 导致了动力学参数 E, k_0 无规律性。本文根据傅维德等提出的通用模型计算煤粉燃烧反应动力学参数^[8-9], 动力学参数与煤种之间的关系就呈现出了规律性。煤粉燃烧模型由煤粉运动方程、炭粒表面温度方程^[10]、挥发分析出速率方程^[11]、煤粉粒径变化方程等构成, 只需要知道煤粉的工业分析值, 就可以计算出煤质指数 Fz , 进而对煤粉的燃烧率进行预测。最后, 应用龙格库塔方法求解模型。模型中的各个参数在高炉喷煤过程中都很容易得到, 可以比较容易的计算出煤粉的燃烧率, 并对影响煤粉燃烧率的若干因素如煤粉粒径、鼓风温度、富氧量等进行了分析, 研究了不同状况下煤粉燃烧率的变化情况以及各个因素对煤粉燃烧率的影响程度。

2 燃烧率模型

煤粉燃烧模型主要由煤粉运动方程、煤粉温度方程、煤粉粒径变化方程等构成, 构建煤粉燃烧模型的目的是求出煤粉在不同位置的燃烧率、粒径、速度、温度等以及分析影响燃烧率的各个因素。模型可通过龙格库塔方法进行求解。

3 结果分析

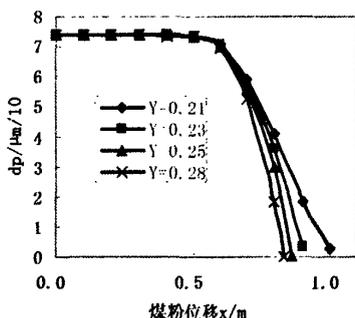


图 3-1 氧浓度对未燃烧煤粉粒径的影响

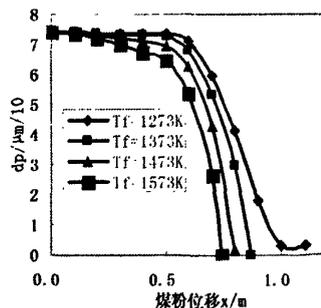


图 3-2 风温对未燃烧煤粉粒径的影响

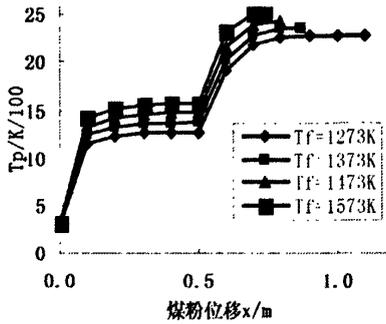


图 3-3 粒径对碳粒温度的影响

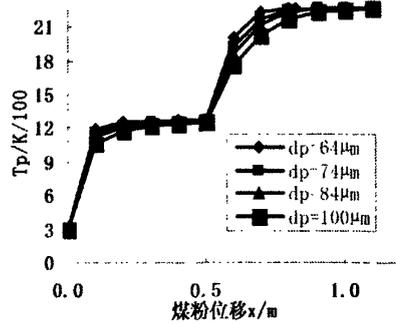


图 3-4 风温对碳粒温度的影响

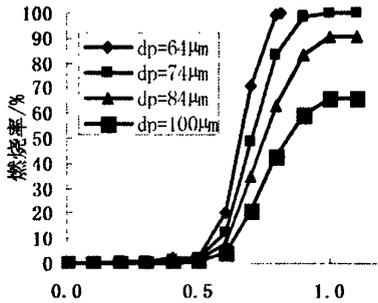


图 3-5 粒径与燃烧率的关系曲线

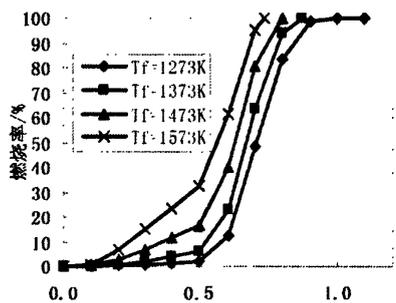


图 3-6 风温对燃烧率之间的关系曲线

图 3-1 说明了提高富氧量能够加速煤粉燃烧速率，由于在高炉风口条件下，固定碳的燃烧速率主要受氧在碳颗粒表面传质速度的限制，因此，鼓风含氧量的增加有助于固定碳燃烧速率的明显增加，改善煤粉在高炉风口区的燃烧过程。在 0-0.5m 处，煤粉处于之吹管中，温度比较低，因此粒径变化不大。

图 3-2 说明风温对煤粉粒径变化的影响也是很显著的。提高风温可以提高理论燃烧温度和碳粒的表面温度，因而有助于煤粉迅速燃烧。

图 3-3 和图 3-4 说明煤粉粒径和鼓风温度对煤粉温度都有影响。高炉喷煤过程中煤粉的升温速度非常快，大约为 $10^3 \sim 10^4 \text{K/s}$ ，因此煤粉温度能够很快的达到环境温度，理论燃烧温度一般在 2273K 左右，煤粉在燃烧过程中一般都能够达到这个温度，瞬间燃烧完，图 3-4 中，由于提高了风温，所以理论燃烧温度也有所提高。在 1.1m 处以后由于没有氧气，所以煤粉不再燃烧。

图 3-5 说明了煤粉粒径对燃烧率的影响也是很大的，在 0.8m 处，煤粉粒径减小 $10 \mu\text{m}$ ，燃烧速率增加将近 20%。一般说来，煤粉越细，则燃尽时间越短。考虑到磨煤的动力消耗，以及煤粉越细安全问题越大，选择合适的煤粉粒度既涉及燃烧过程，又涉及经济效益和安全等问题。从燃烧学角度考虑，煤粉颗粒的燃尽时间与煤粉粒径的平方成正比关系。粗颗粒的煤粉由于加热所需时间长，表面温度升高比较慢，固定碳的反应难以充分进行，从而导致煤粉燃烧速率比较低。

由图 3-6 可以看出，风温对煤粉燃烧率的影响非常大，风温升高每 100K，燃烧率提高 10% 左右。反应温度是煤粉燃烧反应动力学中最重要的因素之一，热风温度的提高可以快速加热煤粉和载气，提高煤粉热分解的吸热速率，促使煤粉提前着火和快速燃烧，从而有助于煤粉燃烧率的提高。

4 结论

(1) 煤粉粒径对碳粒的表面温度影响不大，随着煤粉粒径的减小，燃烧率明显提高，煤粉粒径减小 $10 \mu\text{m}$ ，燃烧速率增加将近 20%，因此减小喷吹煤粉的粒径是提高煤粉燃烧率的最有效的途径。

(2) 提高风温，可提高煤粉燃烧率，当风温提高到一定程度后，风温对煤粉燃烧率的影响逐渐下降，因此存在最佳风温值。

(3) 煤粉燃耗率随富氧量的增加而提高, 富氧率超过一定值之后, 煤粉燃烧率随着富氧量的增加, 提高幅度有所下降, 富氧促进煤粉喷吹效率降低。

5 参考文献

- [1] 杨天钧, 刘应书, 杨珉. 高炉富氧喷煤—煤氧混合与燃烧[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] 马政峰, 吴铿, 杨天钧. 安阳高炉喷吹瘦煤的安全控制[J]. 钢铁, 2003, 38(11):5~8.
- [3] 吴铿, 魏新, 张相国. 高炉喷吹交叉式双枪的基础研究[J], 北京科技大学学报, 2003, 25(6):515~519.
- [4] Khairil D, Kamihashira K, Nakayama K, et al. Fundamental Characteristics of Pulverized Coal at High Temperature. ISIJ International, 2001, 41(2): 136~141.
- [5] Velden B, Lindert M, Trouw J, et al. Results of Tuyere Coke Sampling With Regard to Coke Size and Coal Injection. 2001 Ironmaking Conference Proceedings, Washington, 2001.
- [6] Tamura, Kenji. Upper limits to combustibility of pulverized coal in blast furnace raceway and desirable injection position. Journal of the Iron and Steel Institute of Japan, 1991, 77: 775~782.
- [7] Yamaguchi, Kazuyoshi. Maximum injection rate of pulverized coal into blast furnace through tuyeres with consideration of unburnt char. ISIJ International, 1992, 32(6): 716~724.
- [8] 岑可法, 姚强等. 燃烧理论与污染控制[M]. 机械工业出版社, 2004.
- [9] 傅维镛. 煤燃烧理论及其宏观通用规律[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [10] Yangsong SHEN, Baoyu GUO, Aihing YU. Three-dimensional Modelling of Coal Combustion in Blast Furnace. ISIJ International, 2008, 48(6), 777~786.
- [11] 杨天钧, 苍大强, 丁玉龙. 高炉富氧煤粉喷吹[M]. 北京: 冶金出版社, 1996.

所用到的参数如下:

V —挥发分析出量; T_p —煤粉温度;

d_p —煤粉粒径; u_{px} —煤粉颗粒的横向速度;

u_{py} —煤粉颗粒的纵向速度; u_g —鼓风风速;

T_f —鼓风温度; Y —氧浓度;

T_∞ —理论燃烧温度; Vad —挥发分含量;

Mad —水分; Cad —固定碳含量; Aad —灰分;

δ —波尔兹曼常数; L —气体动粘性系数;

ε_p —黑度系数; ρ_p —煤粉密度; E —非氧化反应活化能;

H_{reac} —反应热; q_c —碳的热值;

PL —喷枪位置; D_x —扩散系数; R —气体常数;

导热系数 $\lambda_g = 0.027 + 4.95 \times 10^{-5} T_g$;