

煤粉粒燃烧模糊孔模型

陈 鸿 孙学信 张小可 韩才元

(华中理工大学煤燃烧国家重点实验室)

I. W. Smith

(CSIRO Division of Coal and
Energy Technology, Australia)

〔摘要〕 本文利用压汞仪研究了8种原煤及其不同燃尽度的焦样中的孔隙结构,发现大孔的孔容积构成了煤的孔容积的绝大部分,小孔的孔面积构成了煤的孔面积的绝大部分。基于试验结果和理论推导,作者提出了一种新的孔结构模型——模糊孔模型。模糊大孔和模糊小孔分别控制孔内的传质和化学燃烧过程。文中给出了煤粒燃烧过程的控制方程,并对单颗煤粒内部的燃烧过程进行了数值求解,研究了孔隙率、比表面积,颗粒尺寸等结构参数对煤焦反应性的影响,而且与Smith的试验结果进行了比较。

关键词 煤粉燃烧 孔隙结构及变化 孔模型 煤焦反应性

分类号 TQ534

1 引言

多孔性固体的气固两相反应是许多工艺过程中的基本现象。如:炼焦,金属的冶炼,石灰石的培烧,石油的催化裂炼,固体垃圾的焚烧等等。孔隙结构对多孔物质的反应具有较大的影响。煤是一种结合比较松散的多孔物质。无论是煤的热解、气化、燃烧,在一定的条件下这些物理化学反应大多是在孔隙中进行的。燃烧过程极大地改变煤粉颗粒中孔隙的结构,孔隙结构的改变又极大地影响燃烧过程的进行。研究孔隙结构在燃烧过程中的变化及其作用非常重要。

定量地描述煤的燃烧速率与煤粉颗粒孔隙结构之间的关系,需要建立相应的孔隙模型。在过去的三十年中,先后出现了多种煤的孔隙结构模型^[1-5]。但过去的模型有些过于

简化,与实际的孔结构相去甚远,有很大的局限性,难于描述复杂的燃烧现象;有些又比较复杂,考虑了孔径的分布、孔与孔之间的联结方式、孔结构的动态变化等,但这些模型普遍采用了过多的经验和统计参数,不确定性较大,存在很多人为因素,而且计算中需求解复杂的微分方程组,极大地限制了模型的使用范围。

本文提出的模糊孔模型将孔隙结构中控制传质的因素和控制化学反应的因素区别开来,孔长度定义为无限小,避开了定义孔径分布和孔与孔的联结方式等难题。既简单明了,又反映了孔隙的真实结构,同时求解过程简单易行。

2 煤粉孔隙结构的试验研究

① 本文由“攀登计划”和机电部“八五”项目资助

② 收稿日期 1993-06-11 修改定稿 1993-10-11

③ 本文联系人 张小可 女 24 博士 430074 武汉市华中理工大学煤燃烧国家重点实验室

作者研究了八种不同的煤及其不同燃尽度的焦样,包括灰样中的孔隙结构。八种煤的工业分析数据见表1。原煤筛分范围为200—250目(68 μm)。其中燃尽度不同的焦样是采用切换工业分析仪中气氛的方法得到的。燃

尽度以完全热解后得到的焦样为基准计算得到。灰样即为原煤完全燃烧后得到的残渣。孔隙结构的测定方法有很多种。本文采用压汞法进行测定。

表1 煤的分析数据

煤种	工业分析(Wt%)				元素分析(daf, Wt%)		
	Mad	Ad	Vdaf	Cad	C	H	N
义马煤 YM	10.35	17.61	37.91	45.86	77.61	2.49	1.26
潞安煤 LA	0.93	21.91	18.54	63.02	88.25	4.29	1.43
鲤鱼江煤 L	1.12	64.23	37.40	22.14	75.74	5.05	1.58
莱阳煤 LY	1.81	29.49	7.83	63.81	91.94	2.01	0.91
潮州煤 CZ	1.21	39.69	13.63	51.46	87.71	3.90	1.63
黄石煤 HS	0.91	33.42	20.95	52.15	84.17	7.18	1.12
平遥煤 PY	1.19	23.37	12.37	66.35	89.84	3.72	1.16
焦作煤 JZ	0.66	17.71	13.03	71.09	90.68	3.76	1.46

图1为用压汞仪测得的典型试验结果:义马煤不同燃尽度的焦及灰样中孔容积的分布。孔径1 μm 以下的孔的孔容积(cc/g)构成了煤粒孔容积的大部分,而且10 μm 以上的孔的孔容积占总的孔容积的比例也很小。孔容积沿孔径的分布呈台阶状,其上升沿在1 μm 和10 μm 之间,而且这一趋势在煤粒的整个燃尽过程中基本不变。

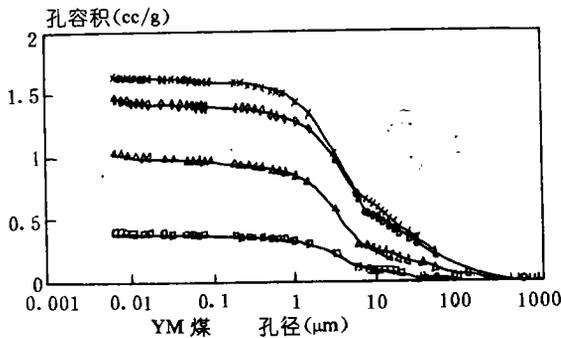


图1 不同燃尽度焦样中孔容积的分析
 ① 燃尽度 100% ③ 燃尽度 67%
 ② 燃尽度 80% ④ 燃尽度 0

图2给出的是用压汞仪测得的煤焦燃尽过程中,内孔面积沿孔径的分布曲线。可以看

到在整个燃尽过程中内孔面积的分布具有不变性,呈双曲型分布。即孔径越小对孔面积的贡献就越大。孔径在0.01 μm 以上的孔对孔面积的贡献可以忽略不计。

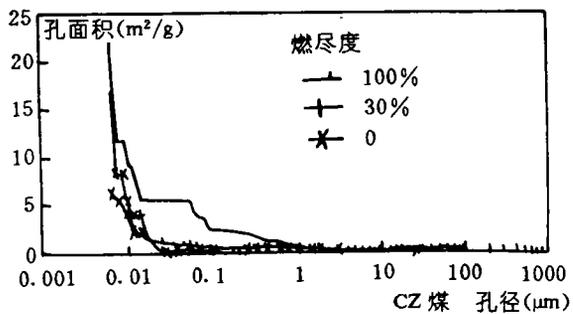


图2 不同燃尽度焦样中孔面积的分析

3 模糊孔模型的提出

原煤粉粒的形状是极不规则的,但在高温下煤粒逐渐软化,甚至熔化^[6],由于表面张力的作用,煤粒外观易趋于球形化,尤其是无烟煤和烟煤煤粒,因此本文假定煤粉为球形。

3.1 模糊大孔和模糊小孔

煤粉颗粒中孔隙的截面形状是十分复杂与不规则的,但为了处理上的方便,惯常把煤粒中的孔用圆柱体来表示,圆柱的直径即定义为孔的直径。

实际火焰中,氧分子在煤粉颗粒中的孔隙内的扩散,有的属于努森扩散,有的属于分子扩散。定量确定氧分子在煤粉颗粒中的扩散通量,需要确定煤粒中的孔径的分布。根据前述试验结果,可以计算出 1673K 时煤粒中氧分子的分子扩散通量与努森扩散通量之比约为 280。可见煤粒内部的传质过程主要是由大孔中的分子扩散构成。

与孔容积的分布曲线相反,孔隙的内表面积主要由孔径在 $0.01\mu\text{m}$ 以下的细孔的内表面积构成,而在这些孔内,氧分子的扩散属于努森扩散,可以忽略其中的氧分子的扩散通量对燃烧过程的影响。同时,大孔的内表面积只占总的内表面积的很小一部分,基本上可以忽略不计,那么大孔对煤粒燃烧反应的有效表面积的影响就可以忽略不计。

综上所述,本文假定煤粒中的孔只有两种:大孔和小孔,即模糊大孔和模糊小孔。

模糊大孔孔径足够大,孔内氧分子的扩散属于分子扩散。孔容积全部由模糊大孔构成,扩散过程只与孔容积,即孔隙率有关。忽略模糊大孔内壁表面积,即模糊大孔内表面积不参与反应。这与文献[7]的结论相一致。文献[7]发现:大孔的分布规律及最大孔径在煤粒的燃烧过程中基本上是不变的。

模糊小孔孔径足够小,孔内氧分子的扩散属于努森扩散,其扩散通量可以忽略不计。小孔的多少由试验测得的内孔表面积来衡量,燃烧仅发生在小孔的内部。

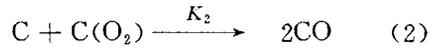
3.2 模糊孔的长度

本文假定煤粉颗粒内部厚度 d_r 为无限小的球壳中的孔隙的长度无限小。层与层之间的孔在物理意义上是贯通的,即氧分子可以从外层孔隙中输运到下一层孔隙中。但层与层之间的孔各自长度无限小,在几何上是无

法相联的,没有几何意义上的“贯通”的概念。

4 煤焦多相燃烧动力学

为了便于计算,煤焦中的可燃质不妨都看作固体炭。氧与残焦中的炭的两相反应肯定与吸附、表面扩散、脱附等过程有关,但对这一过程的基元反应步骤目前仍存在较大的争端。燃烧界普遍采用的是一种相对简单的反应机理,即:



其中,式(1)表示一可逆的吸附过程,式(2)表示一脱附过程。 $\text{C}(\text{O}_2)$ 表示 O_2 分子被一个炭原子所吸附。根据这一机理,可以导出 C 的燃烧速率可按式计算:

$$K = \frac{K_1 K_2 P_{\text{O}_2}}{K_2 + K'_1 + K_1 P_{\text{O}_2}} \quad (3)$$

煤焦是一种多孔物质,其有效比表面积是未知数,因此动力学 K_1 、 K'_1 、 K_2 的确定是非常困难的。Lewis 和 Simons^[8] 作了大量的实验数据对比和理论分析工作,得出

$$K_1 = 900 \exp(-19000/T(\text{K})) \text{ gc}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{atm}) \quad (4)$$

$$K_2 = 90 \exp(-19000/T(\text{K})) \text{ gc}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}) \quad (5)$$

$$K'_1 = 200 K_1 \cdot K_2 \exp \times (-3500/T(\text{K})) \text{ gc}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}) \quad (6)$$

上式适用于 2500 K 以下,因为当温度高于 2500 K 时,C 的蒸发非常显著,K 已经无法用上式描述。

5 煤焦燃烧的物理模型

5.1 孔隙中的传质过程

煤粒燃烧初期,挥发分的析出会在颗粒内部造成很显著的流动,同时 Stefan 流的作用也不可忽视,忽略着火这一暂态过程,在半

径为 r 的球面处,如果考虑宏观流动的影响,那么组分的守恒方程满足:

$$\frac{\delta}{\delta t}(S_d \rho_g C_i) + \frac{\delta}{\delta r}[S_d(-\rho_g D_{ci} \frac{\delta}{\delta r} + u C_i)] = R_{1i} \quad (7)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, m$, 分别代表氧化剂 O_2 、氧化产物 CO 、 CO_2 、 H_2O 、 NO_x 、 SO_x 、挥发分或其组分等。源项 R_{1i} 按下式计算:

$$R_{1i} = S_{re} \cdot \beta_i \cdot K \quad (8)$$

K 为热解或燃烧速率系数, β 为比例系数, 在焦炭氧化过程中分别为:

$$\beta_{CO} = 1 - w, \quad \beta_{CO_2} = w, \\ \beta_{O_2} = 4/3(1 + w)$$

式(7)的初始条件为:

$$t = 0 \text{ 时}, 0 < r < R \text{ 处}, C_i = C_{oi} \quad (9)$$

边界条件为

$$r = 0 \text{ 处} \quad \frac{dC_i}{dr} = 0 \quad (10)$$

$$r = R \text{ 处} \quad \frac{dC_i}{dr} = \frac{D_i(C_{oi} - C_{Ri})}{D_{oi}R} \quad (11)$$

模糊小孔的长度是无限小的, 远远小于氧分子的平均自由程, 那么可以假定所有小孔的内表面积对氧分子来讲都是有效的, 模糊小孔内表面积之和就是燃烧反应的有效表面积, 可以按下式计算:

$$S_r = 4\pi r^2 A_g \rho_g (1 - \theta_o) \quad (12)$$

其中 A_g 为煤粒的比表面积。当燃尽度为 u 时, 燃烧的有效反应表面积为:

$$S_{re} = S_r(1 - A_o)(1 - u) \quad (13)$$

其中假定 A_g 在灰及可燃质中分布均匀。 A_o 为原煤灰含量。

根据模糊孔的定义, 扩散过程主要由模糊大孔来完成, 扩散的通流面积为所有模糊大孔截面面积之和, 煤粒某截面处的孔隙率为 θ , 所以 S_d 按下式计算:

$$S_d = \theta \cdot 4\pi r^2 \quad (14)$$

5.2 模糊孔内的流动

在煤粉粒的燃烧过程中, 在颗粒内部会形成一定的宏观流动, 煤粒内部的流动是沿颗粒径向的一维流动, 满足下述方程:

连续性方程:

$$\frac{\delta}{\delta t}(S_d \rho) + \frac{\delta}{\delta r}(S_d \rho u) = S_{re} \sum_{i=1}^3 K \beta_i \quad (15)$$

动量方程

$$\frac{\delta}{\delta t}(S_d \rho u) + \frac{\delta}{\delta r}(S_d \rho u^2) \\ = \frac{\delta}{\delta r}(\mu \frac{\delta u}{\delta r} S_d) - \frac{\delta(S_d B)}{\delta r} \quad (16)$$

5.3 煤粒中的传热过程

本文以管式沉降炉一维匀速流动中极稀相悬浮燃烧的煤粉颗粒的燃烧过程作为背景。沉降炉的结构, 操作过程等详见文献[9]。炉内煤粒的燃烧过程可以看作单颗煤粒的燃烧过程。可知煤粒内部的传热满足:

$$\frac{\delta}{\delta t}(S_c \rho_c C T) + \frac{\delta}{\delta r}(-S_c \lambda \frac{\delta}{\delta r}) \\ = \sum_{i=1}^n Q_i C_i T_q R_i \quad (17)$$

对于 O_2 、 CO 、 CO_2 分别有:

$$Q_i = \beta_i R_i \quad (18)$$

R_i 为焦燃尽速率, S_c 表示有效导热截面积。

$$S_c = 4\pi r^2 (1 - \theta) \quad (19)$$

在煤粒从着火到燃尽的整个燃烧过程中, 煤粒的温度从室温变化到较高的温度, 温度变化范围较大, 因此煤粒燃烧的一次产物可以按照 Arther^[10] 的方法计算并且一次反应的产物完全被煤粒自身所吸收^[11], 二次反应在主气流中进行, 产物为 CO_2 , 燃烧放热被气流吸收。

式(17)的初始条件为:

$$t = 0 \text{ 时}, 0 \leq r \leq R \text{ 处}, T = T_o \quad (20)$$

边界条件为:

$$r = 0 \text{ 时}, \quad \frac{\delta T}{\delta r} = 0 \\ r = R \text{ 时}, \quad \frac{\delta T}{\delta r} = \frac{1}{(1 - \theta)\lambda} [\alpha(T - T_g) \\ + \epsilon\sigma(T^4 - T_w^4)] \quad (22)$$

6 计算结果及其与他人结果的比较

根据前述理论模型, 采用显式差分方法, 可以求得煤焦粒在任一时刻的燃烧速率。

图3~6给出了采用模糊孔模型计算得到的结果。其中取燃尽率 $u = 0.1\%$ 的燃烧速率。图中纵坐标取煤焦燃烧速率与当时可燃质的质量的比,即焦燃烧速率系数,也即所谓煤焦反应性。其中假定煤焦的燃烧过程为一级反应。

图3给出了煤粒粒径对煤焦反应性的影响。随着粒径的减小,煤焦的反应性迅速增加。由图中可以看出,粒径越小,反应性曲线越接近一条直线,而且当粒径小于一定值($1\mu\text{m}$)以后,反应性曲线已与粒径无关,可见小颗粒反应性将受化学反应速率控制,扩散

度与粒径的关系不大。

图4给出了孔隙率对煤焦反应性的影响。随着孔隙率的增大,煤焦反应性显著增大。表明煤粉焦反应性与扩散过程有很大关系。孔隙率增大,氧分子的输运特性得到改善,颗粒内部氧浓度水平提高,燃烧速率增大。同时,不同孔隙率的煤焦的反应性曲线在较低温度下是重合的。这是因为在较低温度下,反应性曲线只与化学过程有关,而与扩散过程无关,所以反应曲线与孔隙率无关。

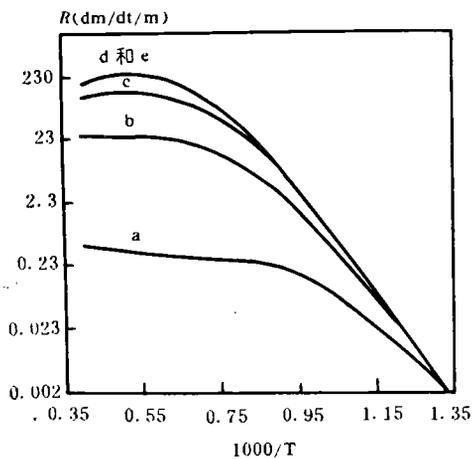


图3 颗粒尺寸对煤焦燃烧速率的影响

a: $1000\mu\text{m}$ b: $100\mu\text{m}$ c: $10\mu\text{m}$ d: $1\mu\text{m}$ e: $<1\mu\text{m}$

的阻力很小,氧分子可以渗透到整个煤粒内部,燃烧反应发生在整个煤粒内部,属于区域I。温度越高,曲线越平坦,表明扩散对于燃尽速率的影响越大;温度相等时,大颗粒更趋于扩散过程控制,小颗粒更趋于化学动力学控制。当温度较低时煤焦反应性将与粒径无关,且反应性曲线趋于直线,表明温度较低时,煤焦反应性只与化学过程有关,燃烧也发生在整个煤粒的内部。

由图中还可以看出,在实际火焰中(温度 1600K 左右)粉煤的燃烧处于区域II,既与孔内扩散有关,又与化学过程有关。但在温度相对较低的着火期,氧化只与化学过程有关,与粒径无关,即可以得到这样的推论,着火温

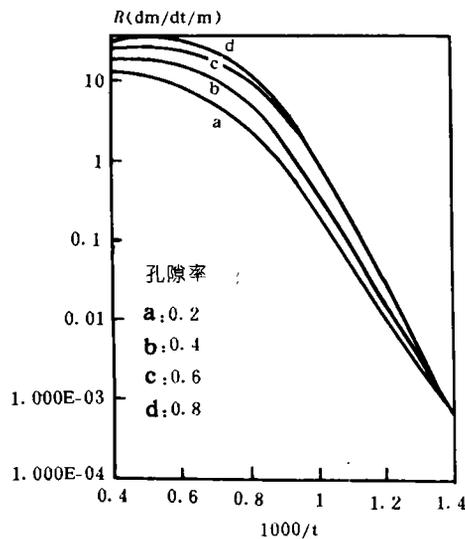


图4 孔隙率对煤焦燃烧速率的影响

孔隙率 a: 0.2 b: 0.4 c: 0.6 d: 0.8

图5给出了比表面积对煤焦燃烧反应性的影响。可以看出,温度较高时, 1mm 煤粒的燃烧受孔内扩散过程的控制,比表面积不同两条反应性曲线逐渐重合,即比表面积对燃烧过程将没有影响,但对于 $100\mu\text{m}$ 的煤粒,即使在较高的温度条件下,比表面积不同的两条反应性曲线也不重合,燃烧既与扩散过程有关也与化学过程有关,当温度降低时,比表面积的作用明显增大。大约 $500\sim 600\text{K}$ 左右,氧化过程完全受化学动力学过程的控制,比表面积相等的反应性曲线完全重合,氧化速度与粒径无关,反应性与比表面积的大小成正比关系。

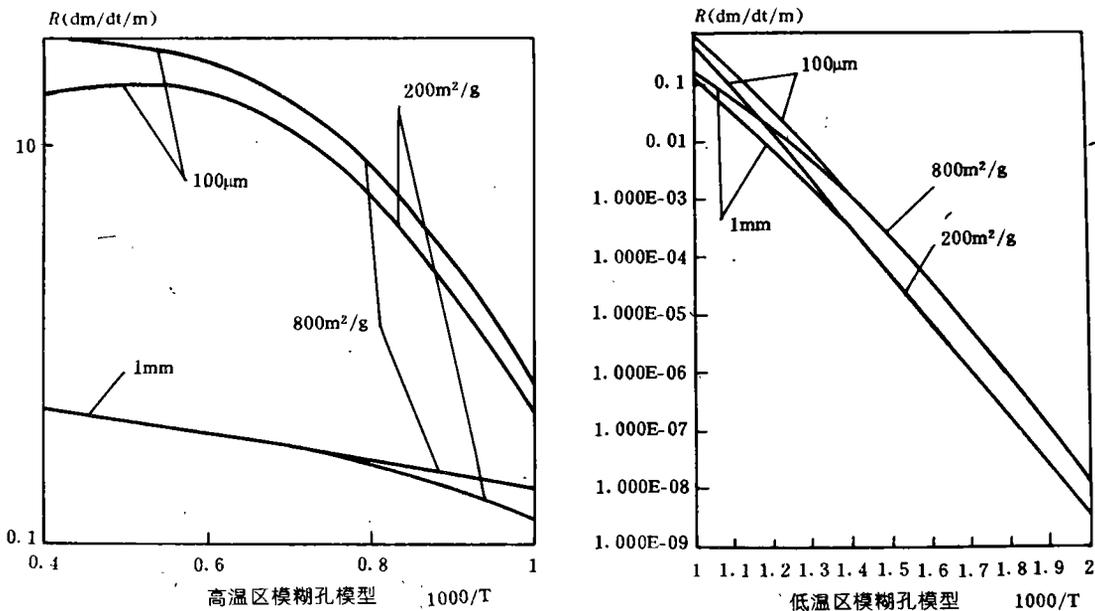


图 5 比表面积对煤焦燃烧速率的影响

可见在实际火焰中,是煤粒的粒径和孔隙率等对燃尽过程起更大的作用,而比表面积的作用相对来讲要小一些。同时可以推论,既然在低温下比表面积对氧化速率有较大的影响,那么比表面积将对着火过程有较大的影响,在着火指标中不考虑比表面积的影响是不太合理的。清华大学付维标^[12]在定义着火指数时,考虑了孔隙结构的影响,就取得了较大的成功,解释了一些原来不能解释的现象。相反可以推论孔隙率对着火过程的影响是相对较小的。

图 6 中的数据点是 Smith 的试验结果^[13]。煤焦反应性显然既与温度有关,而且与燃尽度有关。由于 Smith 并没有给出各数据点的燃尽度,所以图中用不同燃尽度的曲线进行了比较。可见试验点基本上完全落入了燃尽度从 0.1 ~ 0.9 的反应曲线内,表明模型的计算结果是可靠的,试验用煤种为无烟煤。图 7 给出了无烟煤的试验结果^[13]与计算结果的比较。上述试验结果虽然来自煤质差别较大的无烟煤和烟煤,但计算结果都与

试验结果较吻合,表明模糊孔模型的计算结果是可靠的。

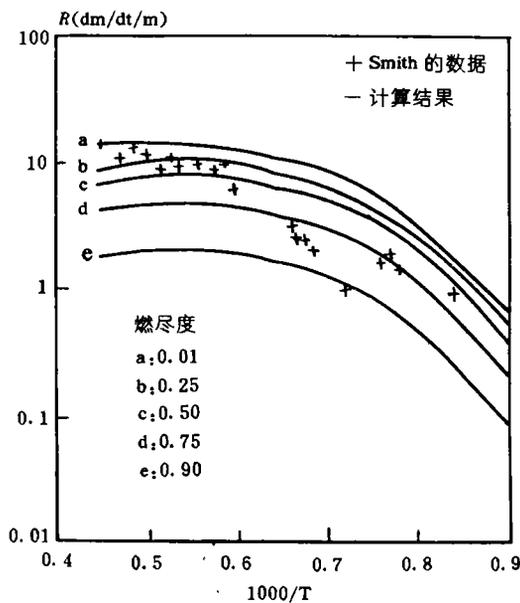


图 6 计算结果与试验结果的比较

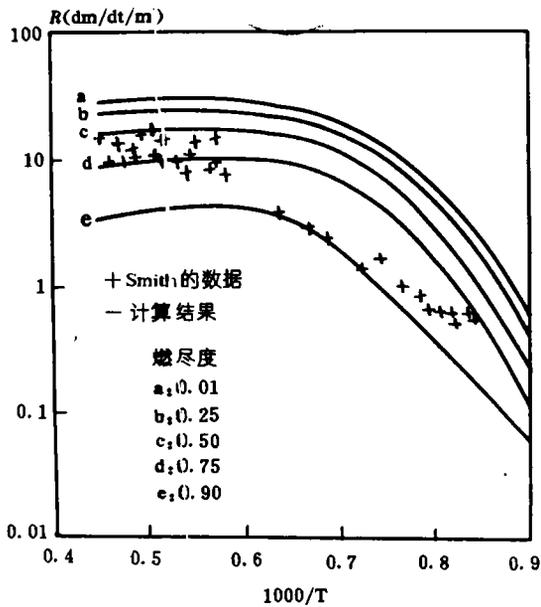


图7 计算结果与试验结果的比较

7 结 论

本文采用压汞法,试验研究了原煤孔隙结构及其在燃烧过程中的变化,发现:(1)随着燃尽度增大,孔容积增大;孔容积分布呈阶梯状,1~10 μm 的孔构成了孔容积的绝大部分;(2)孔面积的分布呈双曲型,小孔内表面积构成了孔内表面积的绝大部分;

基于上述试验结果,作者提出了一个新的孔结构模型——模糊孔模型:(1)煤中的孔由模糊大孔和模糊小孔组成。两者直径没有具体大小,孔的长度无限小。(2)全部模糊大孔的容积之和即为煤粒孔容积,忽略模糊小孔对孔容积的贡献;全部模糊小孔的内表面积之和即为煤粒总的内表面积,忽略模糊大孔对内表面积的贡献。(3)煤粒中氧分子的扩散只与大孔有关,即大孔承担运输任务。化学反应发生在小孔内表面上,即小孔担负

化学反应的任务。也就是说,氧分子的扩散与孔隙率有关,化学反应与总的内表面积有关。

基于上述模糊孔模型,作者建立了求解煤焦粒内部燃烧过程的物理化学控制方程,探讨了孔隙率;比表面积,颗粒尺寸等物理因素对煤焦反应性的影响,发现着火与孔隙率,煤粒尺寸等关系不大,但与比表面积有关。与Smith等人得到的无烟煤,烟煤的试验结果的比较表明,模糊孔模型简单、明了,比前人模型的计算结果更合理、可靠,并能预测差别较大的不同煤种的反应性,对于研究孔隙结构对多孔物质的两相反应的作用具有一定的利用价值。

参 考 文 献

- 1 Thiele E W, *Ind. Eng. Chem.* 1939, 31: 916
- 2 Hartmen M, et. al. *Ind. Eng. Chem. Procees Des. Devel* 1974, 13: 248
- 3 Hashimoto K, Silveston P L. *AIChEJ.*, 1973, 19: 268
- 4 Simons G A. 19th Symp. (Int.) on Combustion, 1982: 1067-1076, 1982
- 5 Gavalab G A. *Comb. Sci. Tech.*, 1981, 24: 197-210
- 6 Seekler W R. 18th Symp. (Int.) on Combustion, 1981
- 7 顾 潘. 西安交通大学博士学位论文, 1993
- 8 Lewis P F and Simons G A. *Combustion Science and Tech.* 1979, 20: 117
- 9 Chen H, Sun X, Han C, Smith I W. The effects of residual volatile on combustion rates of chars, 7th International Conference on Coal Science, Banff, Canada, Sept., 1993
- 10 Arthur J R. *Trans. Faraday Soc.* 1951, 47: 164
- 11 Ayling A B and Smith I W. Measured temperature of burning pulverised fuel particles, and the nature of the primary reaction products. *Comb. and Flame*, 1972, 18: 171-184
- 12 付维标等. 中国工程热物理学会第八届年会, 北京, 1992
- 13 Smith I W. Kinetics of combustion of size-graded pulverised fuels in the temperature range 1200—2270K. *Comb. and Flame*, 1971, 17: 303

JOURNAL OF ENGINEERING FOR THERMAL ENERGY AND POWER

1994 Vol. 9 No. 6

CONTENTS

- (313) **The Numerical Simulation of Two Planar-Intersecting Jets in a Finite Space**.....Zhang Xuan, Xu Tongmu, Guo Hongsheng, Hui Shi'en (*Xi'an Jiaotong University*)

Through the use of a SIMPLE algorithm a numerical simulation has been conducted of the isothermal flow field of two planar-intersecting jets in a finite space. The difference scheme is of an involution one. The authors have calculated and analysed the included angle, the spacing between the two jets and the influence of a section sudden expansion ratio on the flow field and the convergence of the jets. The calculation results have been found to be qualitatively rational.

Key words: *planar-intersecting jets, isothermal flow, flow field simulation, mathematical model*

- (317) **An Experimental Investigation of the Flow Field in a Large-sized Boiler Furnace**.....Guo Hongsheng, Xu Tongmu, Hui Shi'en, Che Defu, Chen Tie (*Xi'an Jiaotong University*)

This paper presents the cold-state aerodynamic field simulation test results for a WG 300 MW boiler furnace. The test results have shown that the different dynamic pressure ratio of the primary air and secondary air, the feeding mode of the primary air and the layout format of the burners will all exercise a certain influence on the in-furnace aerodynamic field. The said results can be employed to guide the furnace design and operation of the home-made 300 MW boiler units and other tangentially fired boilers. **Key words:** *boiler, model, aerodynamic test*

- (324) **The Fatigue Life Analysis of the Drums of Three 65 t/h Boilers Installed in a Factory**.....Jiang Jialing, Lin Xinghua, et al. (*Zhejiang University*)

This paper deals with the low-cycle fatigue life analysis of the drums of three medium-pressure 65t/h boilers. **Key words:** *boiler drum, low-cycle fatigue, service life*

- (329) **A Fuzzy Pore Model for Pulverized Coal Particle Combustion**.....chen Hong, Sun Xuexin, et al. (*National Key Laboratory for Coal Combustion under the Central China Polytechnical University*)

I. W. Smith (*CSIRO Division of coal and Energy Technology, Australia*)

With the help of a mercury injection device the authors have studied the pore structure of 8 types of raw coals and their coking samples with different burn-out rates. It has been found that the pore volume of large holes constitutes the absolute majority of the coal pore volume while the pore area of small holes the absolute majority of coal pore area. Based on the test results and theoretical deduction the authors have come up with a new type of pore structure model, the so-called fuzzy pore model. The fuzzy large pores and fuzzy small pores control respectively the mass transfer and chemical combustion process in the pores. In this paper is given the control equation of coal particle combustion process and a numerical solution of the coal single particle internal combustion process. Also studied is the effect on coal coking reactivity of such

structural parameters as porosity, specific surface area, particle size, etc, which has been compared with that obtained on the basis of the test results supplied by Mr. Smith. **Key words:** *Pulverized coal combustion, pore structure and variation, pore model, coal coking reactivity*

(336) **A Study on the Combustion Characteristics of Typical Chinese Anthracite Coals.** Du Meifang (Harbin Teachers University)

This paper presents the basic characteristics of Chinese anthracite coal and some study results concerning their ignition and burn-out conditions, which can serve reference data and materials for relevant design and operational departments. **Key words:** *anthracite coal, ignition characteristics, burn-out characteristics*

(341) **An Experimental Study on a Barchan Dune Vortex Pulverized Coal Burner**……Wu Jin, Yang Shuichun, Hu Jangen (Zhejiang Electrical Power Engineering Institute)

This paper deals with the experimental study of the air flow field and combustion mechanism of a Barchan Dune (BD) vortex pulverized coal burner. Under the special action of the BD vortex generator there emerged at burner outlet a high-temperature nucleus and high-concentration pulverized coal region, which promotes the ignition and combustion of the pulverized coal, resulting in a speedy ignition of the pulverized coal and significant enhancement of its combustion stability. Practical applications have shown that the BD pulverized coal burner plays a key role in reducing start-up oil consumption during boiler ignition and enhancing the boiler low-load combustion stability, etc. **Key words:** *Pulverized coal combustion, Barchan Dune vortex*

(345) **A Technical Analysis of Crude Oil or Residual Oil-fired Heavy-duty Gas Turbines**……Luo Sid-ing (Electrical Power Company of Shengli Oil Field Management Bureau)

The author discusses and makes an analysis of the following issues: the adaptability of heavy-duty gas turbines to burn such low-grade fuels as crude oil, residual oil, etc, the damage mechanism of harmful elements in low-grade fuels with respect to gas turbines operating on such fuels, and special measures to be taken for crude oil and residual oil-fired gas turbines. **Key words:** *heavy-duty gas turbine, combustion, low-grade fuel*

(351) **A New Starting Point for Heavy-duty Industrial Gas Turbines**……Hou Yuhui, Zhou Shunjun (Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute)

The present paper development tendency of heavy-duty gas turbine technology with a description of the design features and performance of GT24 and GT26 gas turbines. A special mention should be made of the use of continuous combustion system, which enables the turbines to attain the contradictory aim of high efficiency and low emissions. High power output, good efficiency and low emissions specific to the above-cited two types of turbines have made them to be listed among the ideal candidates destined for simple cycle and combined cycle utility gas turbines. **Key words:** *gas turbine, design, power generating set*

(356) **The Real-time simulation of a Three-shaft Gas Turbine by Using a Parallel Digital Computer**……Zhang Bainian, Weng Shilie (Shanghai Jiaotong University)