

燃 烧 科 学 与 技 术

第 三 辑(1984.1)

《燃烧科学与技术》编辑部 编

燃烧科学与技术 (第三辑)

《燃烧科学与技术》编辑部编

能源出版社出版 能源出版社发行部发行

妙峰山印刷厂印制

787×1092 1/16开本 7.5印张 180千字

1984年10月第一版 1984年10月第一次印刷

印数 1—1500

书号:15277·46

定价: 1.55元

目 录

JS-2燃煤MHD燃烧室流场试验研究及煤粉颗粒运动轨迹的分析计算

.....赵长遂 章名耀等 (1)

单颗粒水煤浆的蒸发、着火与燃烧规律的研究 第一部分——实验研究

.....傅维标 卫景彬等 (12)

液化石油气和焦炉煤气点燃煤粉试验研究.....孙文超 詹焕青等 (21)

柴油机无旋流喷雾贯穿度计算模型的研究.....徐 勇 孙济美 (30)

气流速度和预燃流量比对预燃式稳定器贫油熄火极限的影响

.....张许南 蒋雷勇 (40)

钝体火焰稳定器回流区流场初步计算.....曾求凡 周 谦等 (48)

圆管内离心喷嘴逆向喷射的液雾两相流数值计算.....周力行 林文漪等 (56)

超临界压力下燃料单滴燃烧的数值分析.....范维澄 (65)

多元气体系统扩散通量的计算方法.....李汝辉 董耀德 (72)

燃气分析法测燃油浓度分布.....王华芳 (78)

译 文

利用桉油、米糠油、花生油、大豆油作为内燃机代用燃料的研究

.....祝玉文 许斯都译 (84)

涡流和紊流对气缸内燃烧速度的影响 (第1部分:用热线风速仪测缸内气流

速度).....王树奎译 (85)

专 题 讲 座

国外火灾燃烧产物毒性研究概况.....刘国田 (94)

流动显示技术在内燃机空气运动研究中的应用.....龚允怡 刘书亮 (102)

消 息 与 动 态

工程热物理年会简讯..... (112)

《计算燃烧学》讨论班简讯..... (洪茂玲) (112)

《粉煤燃烧与气化》讲学活动简讯..... (卫景彬) (112)

第十五届国际内燃机会议 (CIMAC) 简况..... (傅茂林) (113)

《燃烧科学与技术》写稿要求..... (114)

JS-2燃煤MHD燃烧室流场试验研究 及煤粉颗粒运动轨迹的分析计算

赵长遂 章名耀 林中焰 陈祥荣 唐惠芬

(南京工学院)

摘 要

本文采用模型试验和理论分析相结合的方法,计算了燃煤MHD燃烧室中煤粉颗粒的运动轨迹。

根据相似理论设计并建立了模拟JS-2燃煤MHD燃烧室的冷态试验模型。在模型上测试了三维旋转气流流场,提出了表征速度分布的逼近函数。在实测流场基础上建立了单个煤粉颗粒的运动微分方程组,针对不同的粒径、阻力系数计算公式以及考虑与不考虑重力等几种情况,用电子计算机进行了数值求解,得到了煤粒在燃烧室中的运动轨迹。结果表明,煤粒的运动轨迹跟粒径大小和阻力系数公式的选取关系很大。根据试验及计算结果,考虑燃煤MHD机组对燃烧效率、排渣率等性能的要求,对现有燃烧室的结构提出了改进建议。

AN INVESTIGATION ON THE FLOW FIELD AND THE CALCULATION OF THE TRAJECTORY OF COAL PARTICLES IN JS-2 MHD COMBUSTOR.

Zhao Chang-sui Zhang Ming-yao Lin Zhong-yan Chen
Xiang-rong and Tang Hui-fen

(Nanjing Institute of Technology)

Abstract

In this paper the trajectory of coal particles in JS-2 MHD combustor was computed, by combining simulating experiment and theoretic analysis.

According to the analogue theory, a cold experimental model for simulating JS-2 MHD combustor was designed and established. The 3-D vortex flow field in the model was measured and the approximate functions for showing the velocity distributions were given. On the basis of the measured flow field, a set of differential equations describing the motion of a coal particle was numerically solved for different particle diameters, different formulae for calculating the re-

sistance coefficient, etc. The trajectory of coal particles in the combustor was obtained. The computed results indicated that (the particle diameter and the kind of formula chosen in calculating the resistance coefficient have an important bearing on) the trajectory of coal particles. recommendations were proposed for improving the present combustor construction.

一、前 言

磁流体发电装置 (MHD) 燃烧室的功能是为发电机提供2700K以上的低温等离子体流, 它必须满足燃烧稳定、燃烧效率高、燃烧强度大、热损失及压力损失小等要求[1]。对燃煤MHD来说, 从燃烧室中排出尽可能多的煤渣、减少电离添加剂(种子)损失, 以保证MHD发电机组特有的经济性, 是当前一个重要的研究课题。为了解决排渣问题, 我研究室研制的JS-2燃煤MHD机组将燃烧室设计成两级, 其结构如图1所示。在第一级中, 一半以上的氧化剂从轴向分两股送入, 一股经旋流器(见图2)旋转喷入, 另一股经旋流器和外壁之间的环形通道直流喷入, 煤粉从旋流器中心喷入。煤粒在氧化剂不足的条件气化并获得部分燃烧, 排出70~80%的液态煤渣。为了加强混合及增强排渣效应, 第一级出口处装设了挡渣的

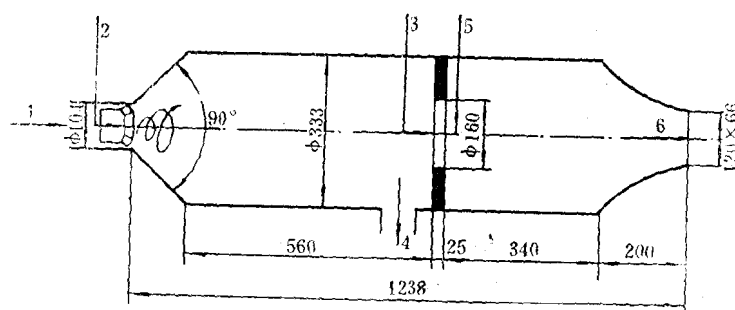


图 1 JS-2燃煤MHD燃烧室示意图

1——氧化剂; 2——煤粉; 3——种子; 4——渣; 5——氧化剂; 6——等离子体去通道

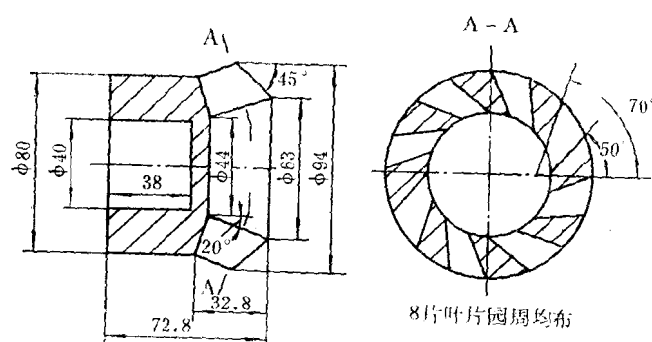


图 2 旋流器结构图

要求和掌握由实验室规模试验装置向实用化放大的规律, 本文研究第一级燃烧室中的三维旋转气流, 分析煤粉颗粒在其中的运动轨迹。

由于旋转气流和旋流燃烧十分复杂, 人们对它们的认识至今还很不深刻。考虑到直接求

扰流板。燃气经扰流板进入第二级, 再注入种子, 补充其余氧化剂, 使燃烧完全、电离充分。在燃烧室中组织这样的气流流场, 目的是使粗颗粒在分离到壁面前有较长的燃烧时间, 细颗粒则尽可能多地分离在第一级燃烧室中。为了探明燃烧室气流流场组织得是否理想, 燃烧效率和排渣率等主要性能指标能否达到设计

解湍流通量（雷诺）方程、对燃烧体系中各物理参数作出理论预言很困难〔2, 3〕, 本文先确定气流流场, 然后分析煤粒在该流场中的运动〔4〕。为了确定JS-2燃煤MHD这种几何结构和进风方式都较复杂的燃烧室内流场, 采用解析法显然不行; 若进行近似分析解, 由于必须作出较多简化假设, 所得结果失真严重〔5, 6〕; 因提出切合实际的边界条件有困难, 进行数值求解也不易行。如引用类似结构燃烧室的已知流场, 也会因结构上的差异而引起较大误差。综合权衡后决定采用模型试验和理论分析相结合的研究方法。

二、气流流场

1. 试验装置

燃烧室中的流动可视为稳定的不可压缩的湍流流动, 其基本方程由连续方程和动量方程组成。根据相似原理〔6, 7〕, 对流体动力问题在建立试验模型时, 模型和实物间应满足下列相似条件:

- (1) 流动被同一完整方程组所描述;
- (2) 几何相似;
- (3) 流体物性相似;
- (4) 边界条件相似;
- (5) 初始条件相似;
- (6) 定性相似准则 R_e 、 F_r 相等;
- (7) 气流马赫数 M 相等;
- (8) 对不等温射流, 满足动量比相等。

实际上, 要同时满足这些条件是很困难的, 有时甚至是不可能的。为此, 作如下简化假设:

- (1) 燃烧室内温度均匀, 取其平均温度;
- (2) 忽略固体颗粒对气流流动的影响;
- (3) 压力水平对宏观流动无影响, 决定因素是压差;
- (4) 不计重力和浮力的影响。

这样, 实际应予以保证的相似条件为:

- (1) 几何相似、取模型与实物的尺寸比为0.6;
- (2) 模型中流动处于第二自模化区;
- (3) 按动量比相等原则对不等温射流作如下修正:

$$d_* = d_o \left(\frac{\rho_o}{\rho_*} \right)^{\frac{1}{2}}$$

式中, ρ_o ——流进燃烧室的介质密度;

ρ_* ——燃烧室中等温介质的密度;

d_o ——燃烧室入口处直径;

d_* ——当量直径。

按上述考虑设计而成的试验模型如图3所示, 其上沿轴向开有11个测孔, 整个试验装置见图4。

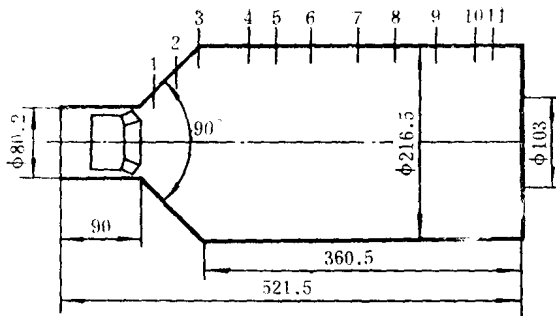


图 3 燃烧室试验模型的主要尺寸及测孔位置



图 4 试验装置及测量系统

2. 试验方法

流经模型的风量用双重孔板流量计测量, 用直径为 5 毫米的球形五孔探针在 11 个测孔中进行多点测量, 得到各测量断面上的速度及静压分布曲线。试验前先测定了试验装置的 $E_s = f(R_s)$ 曲线, 发现当 $R_s \geq 3 \times 10^4$ 后 E_s 数保持定值, 表明流动已进入第二自模化区。由于实物中流动处于第二自模化区内, 故可根据这一临界雷诺数来控制试验风量。试验在 $w_D = 11.75$ 、7.60 和 6.03 米/秒三种风量下进行, 结果表明在不同风量下同一断面上的速度及静压分布相似, 不随风量变化而变化。

3. 试验结果

对轴对称流, 流函数可表示为:

$$\psi = \int_0^r w_x r dr \quad (1)$$

和

$$\psi_0 = \int_0^{R_0} w_x r dr \quad (2)$$

由实测轴向速度分布, 按下式计算 ψ :

$$\psi = \sum_{i=1}^n w_{xi} r_i \Delta r_i \quad (3)$$

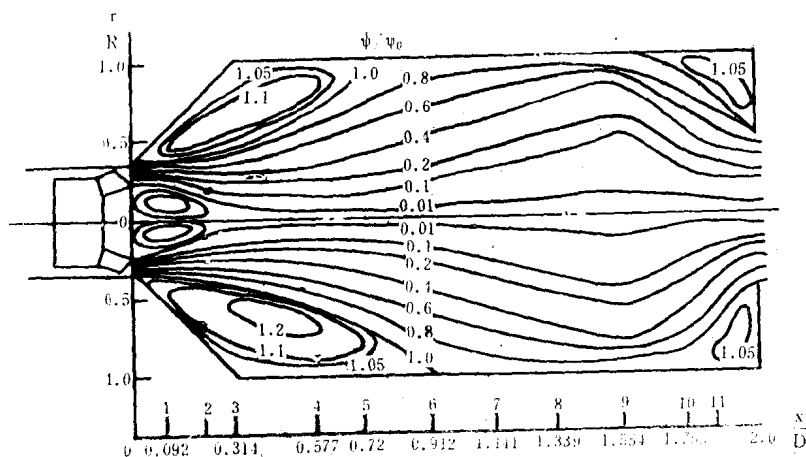


图 5 燃烧室中气流流线图 ($w_D = 11.75$ 米/秒)

将具有相同 ψ/ψ_0 值的点连起来就形成流线，由此得到整个燃烧室内的流线图。如图5。由图可见：在旋流器出口处产生了中心回流区，其外侧为主流顺流区，靠近壁面处有一较大的外回流区。中心回流区的最大直径与旋流器端部非流通部分的直径相当，长度为其直径的1.5倍。由于气流旋转，在靠扰流板近壁面处的涡流区不大。将各断面上轴向、切向和径向速度分别除以该断面上最大轴向、切向和径向速度，并采用无因次坐标 $\frac{r}{R}$ ，就得到三个无因次速度的径向分布图。为了计算煤粒

的运动轨迹，将流场用函数表达式表示出来。由于三维旋转流场十分复杂，为保证函数逼近具有足够的精度，将燃烧室分成初始段、基本段和出口段共三个区段来考虑。

(1) 最大轴向速度分布

将各测量断面上的最大轴向速度 w_{xm} 除以第1断面上的最大轴向速度 w_{xm}^* 进行无因次化，试验结果经整理示于图6。由回归分析得到：

$$\frac{w_{xm}}{w_{xm}^*} = \frac{0.34}{\frac{x}{D} + 0.21} \quad (4)$$

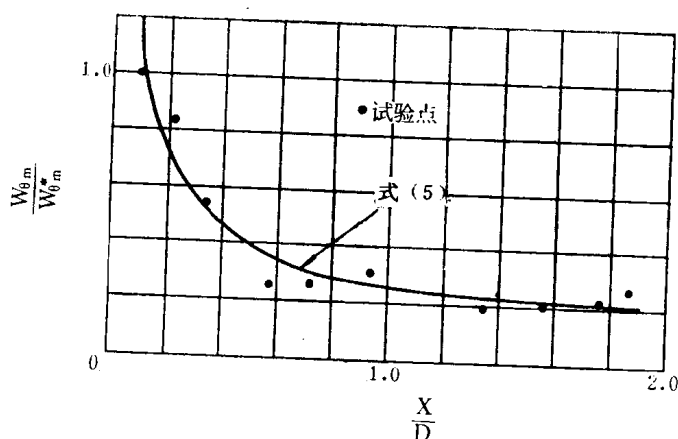


图7 最大切向速度沿轴线的衰减情况

(2) 最大切向速度分布

将各断面上测得的最大切向速度 $w_{\theta m}$ 除以第1断面上的最大切向速度 $w_{\theta m}^*$ 进行无因次化，试验结果经整理示于图7。由回归分析得到：

$$\frac{w_{\theta m}}{w_{\theta m}^*} = \frac{0.135}{\left(\frac{x}{D} + 0.3\right)^2} + 0.182 \quad (5)$$

(3) 轴向速度的径向分布

图8表示了8个测量断面上无因次的轴向速度径向分布曲线。综观各断面上的分布规律，发现用指数函数逼近颇为合适，其中系数 C_1 、 C_2 在三个区段中各不相同，是无因次轴向坐标的函数。

$$\frac{w_x}{w_{xm}} = C_1 e^{C_2 \left(\frac{r}{D}\right)^2} \quad (6)$$

式中,

$$C_1 = \begin{cases} 1.386 \frac{x}{D} + 0.2 & 0 \leq \frac{x}{D} \leq 0.577 \\ 1 & 0.577 < \frac{x}{D} \leq 1.141 \\ 7\left(\frac{x}{D} - 1.5\right)^2 + 0.1 & 1.141 < \frac{x}{D} \leq 2.0 \end{cases} \quad (7)$$

和

$$C_2 = \begin{cases} 30 - 72.05 \frac{x}{D} & 0 \leq \frac{x}{D} \leq 0.577 \\ 20.5 \frac{x}{D} - 23.4 & 0.577 < \frac{x}{D} \leq 1.141 \\ 10.2 - 100\left(\frac{x}{D} - 1.46\right)^2 & 1.141 < \frac{x}{D} \leq 2.0 \end{cases} \quad (8)$$

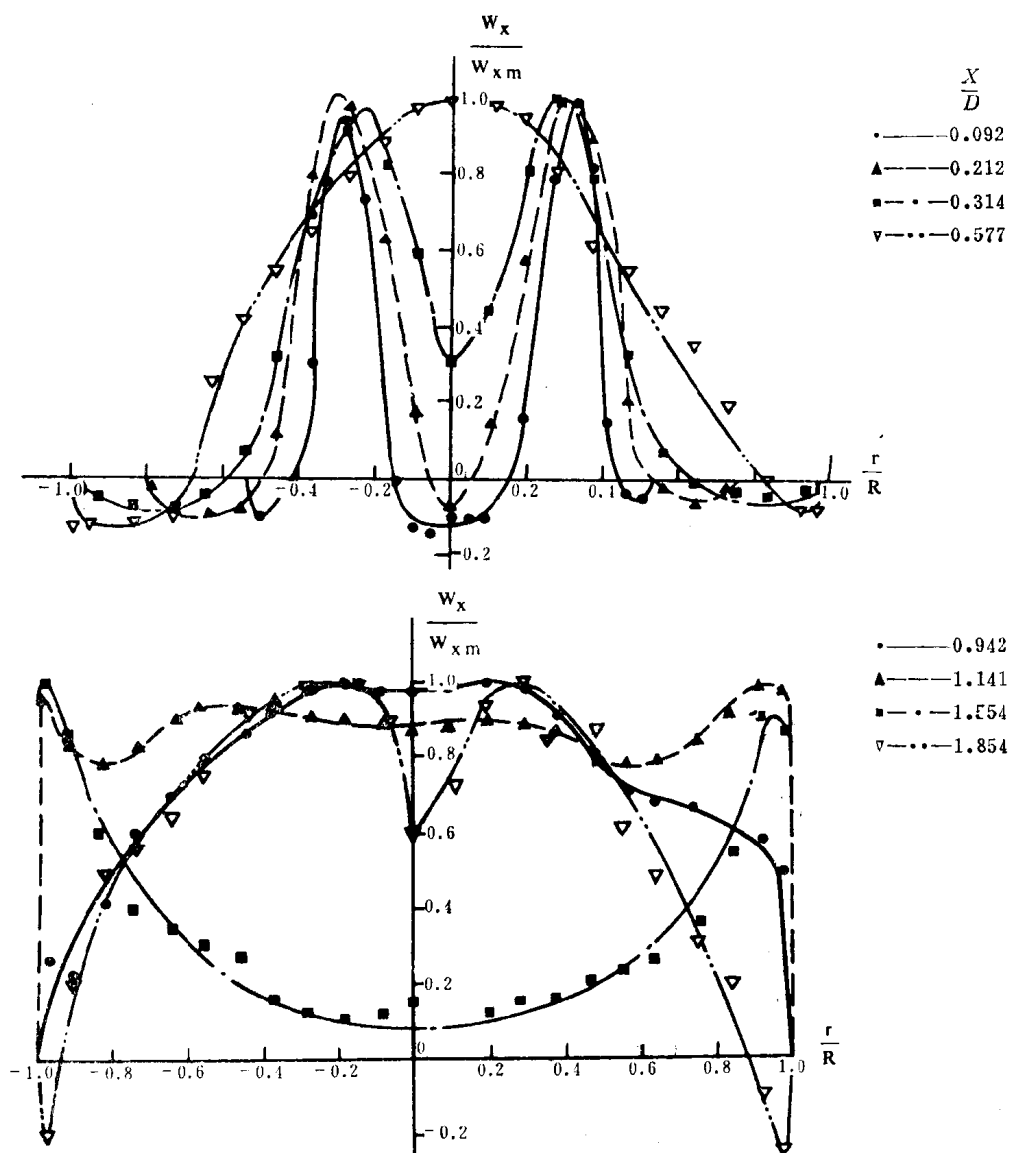


图 8 轴向速度的径向分布图

(4) 切向速度的径向分布

图9表示了8个测量断面上无因次切向速度的径向分布曲线。综合考虑各断面的分布规律,用幂函数来逼近是适宜的:

$$\frac{w_{\theta}}{w_{\theta m}} = \begin{cases} 0.55 & 0 \leq \frac{x}{D} \leq 0.577 \\ \left(\frac{2r}{D}\right)^{4.12 - 2.04\frac{x}{D}} & 0.577 < \frac{x}{D} \leq 2.0 \end{cases} \quad (9)$$

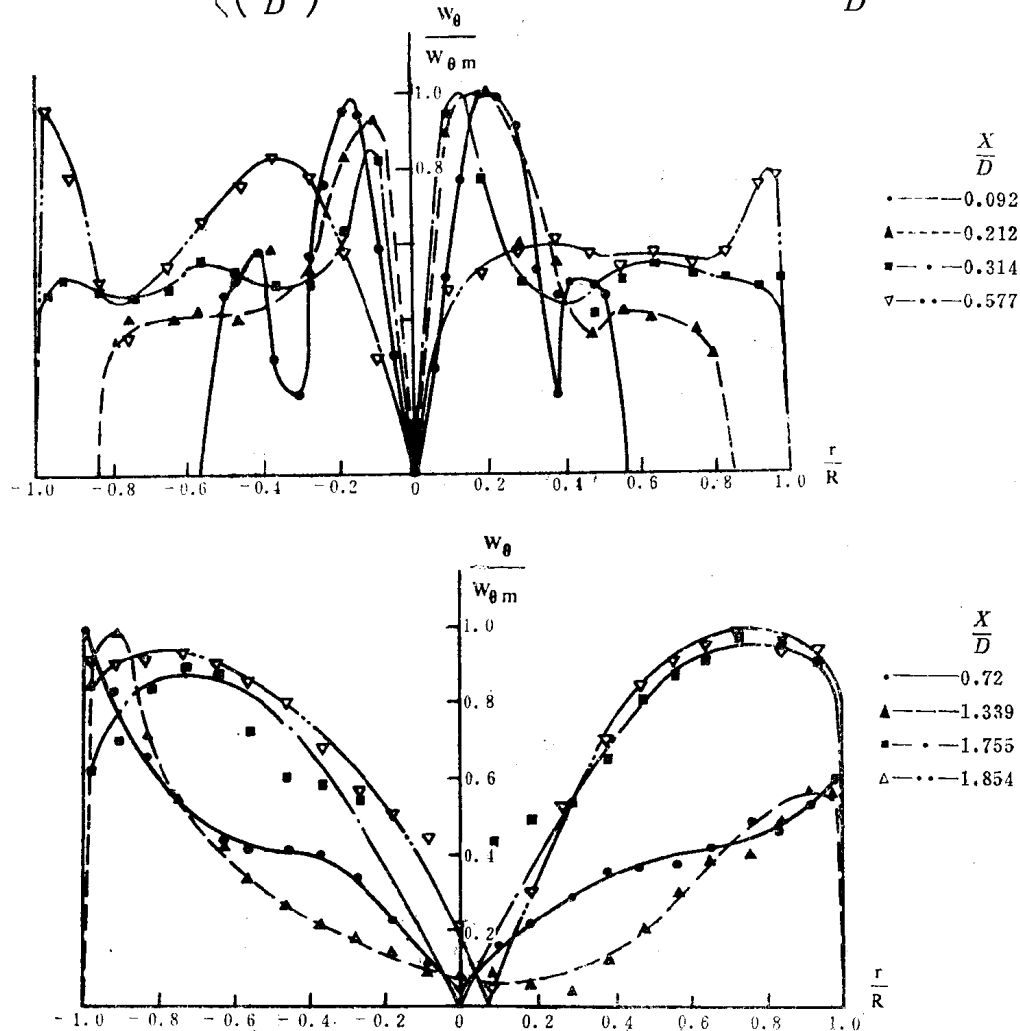


图9 切向速度的径向分布图

(5) 径向速度数值普遍偏小,且规律性不强。

三、煤粒运动轨迹

1. 数学模型及计算方法

煤粒在燃烧室中的实际燃烧工况是极其复杂的。在探寻煤粒运动的基本规律时,为简化起见,做如下假设:

(1) 煤粒为球形均质颗粒;

(2) 煤粒的直径和质量在运动中不变化,

(3) 不计煤粒间的相互影响,

(4) 忽略气流的径向速度。

将测得的流场转换到实际燃烧室中, 采用拉格朗日法分析单个煤粒的受力和运动, 得到如下运动微分方程组〔8〕

$$\begin{aligned} m \left[\frac{d^2 r}{dt^2} - r \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 \right] &= -\frac{C\rho_g f}{2} u \frac{dr}{dt} - mg \cos \theta \\ m \left(r \frac{d^2 \theta}{dt^2} + 2 \frac{dr}{dt} \frac{d\theta}{dt} \right) &= -\frac{C\rho_g f}{2} u \left(r \frac{d\theta}{dt} - w_\theta \right) + mg \sin \theta \\ m \frac{d^2 x}{dt^2} &= -\frac{C\rho_g f}{2} u \left(\frac{dx}{dt} - w_x \right) \end{aligned} \quad (10)$$

阻力系数 C 取决于相对雷诺数 R_{re} , 当 $R_{re} < 1$ 时可用Stokes公式计算:

$$C = \frac{24}{R_{re}} \quad (11)$$

当 $R_{re} < 400$ 时, 采用Клячко公式计算, 结果相当精确:

$$C = \frac{24}{R_{re}} \left(1 + \frac{R_{re}^{\frac{2}{3}}}{6} \right) \quad (12)$$

JS-2MHD燃烧室中 R_{re} 在50以内, 故将(12)代入(10), 并设:

$$K_1 = 18 \frac{\rho_g}{\rho_p} \frac{\nu}{d_p^2} \text{ 和 } K_2 = 3 \frac{\rho_g}{\rho_p} \frac{D^{\frac{2}{3}} \nu^{\frac{1}{3}}}{d_p^{\frac{4}{3}}}$$

采用无因次坐标:

$$\begin{cases} \bar{r} = \frac{r}{D} \\ \bar{\theta} = \theta \\ \bar{x} = \frac{x}{D} \end{cases} \quad (13)$$

得到煤粒的运动微分方程为:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \bar{r}}{dt^2} &= \bar{r} \left(\frac{d\bar{\theta}}{dt} \right)^2 - \frac{d\bar{r}}{dt} \left\{ K_1 + K_2 \left[\left(\frac{d\bar{r}}{dt} \right)^2 + \left(\bar{r} \frac{d\bar{\theta}}{dt} - \frac{w_\theta}{D} \right)^2 + \left(\frac{d\bar{x}}{dt} - \frac{w_x}{D} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} \right\} - \frac{g}{D} \cos \bar{\theta} \\ \frac{d^2 \bar{\theta}}{dt^2} &= -\frac{2}{\bar{r}} \frac{d\bar{r}}{dt} \frac{d\bar{\theta}}{dt} = \left(\frac{d\bar{\theta}}{dt} - \frac{w_\theta}{D\bar{r}} \right) \left\{ K_1 + K_2 \left[\left(\frac{d\bar{r}}{dt} \right)^2 + \left(\bar{r} \frac{d\bar{\theta}}{dt} - \frac{w_\theta}{D} \right)^2 + \left(\frac{d\bar{x}}{dt} - \frac{w_x}{D} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} \right\} + \frac{g}{D\bar{r}} \sin \bar{\theta} \\ \frac{d^2 \bar{x}}{dt^2} &= -\left(\frac{d\bar{x}}{dt} - \frac{w_x}{D} \right) \left\{ K_1 + K_2 \left[\left(\frac{d\bar{r}}{dt} \right)^2 + \left(\bar{r} \frac{d\bar{\theta}}{dt} - \frac{w_\theta}{D} \right)^2 + \left(\frac{d\bar{x}}{dt} - \frac{w_x}{D} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

给出初始条件:

$$\left. \begin{aligned} \bar{r} \Big|_{t=0} &= 0.01 \\ \frac{d\bar{r}}{dt} \Big|_{t=0} &= 0 \\ \bar{\theta} \Big|_{t=0} &= \frac{\pi}{2} \\ \frac{d\bar{\theta}}{dt} \Big|_{t=0} &= 0 \\ \bar{x} \Big|_{t=0} &= 0 \\ \frac{d\bar{x}}{dt} \Big|_{t=0} &= 2 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

具有初始条件 (15) 的微分方程组 (14) 即为描述燃烧室内球形煤粒运动轨迹的数学模型。

对式 (14) 所示的二阶常微分方程组, 首先实行降阶, 将其化为一阶常微分方程组, 再采用自动变步长的四阶龙格-库塔法在计算机上积分该方程组, 解出一阶常微分方程组的初值。

在下列条件下进行了具体计算:

- (1) 改变粒径, $d_p = 200, 150, 125, 100, 75, 50, 25$ 和 $10\mu\text{m}$;
- (2) 采用式 (11) 和 (12) 两种阻力系数计算公式;
- (3) 考虑与不考虑重力。

2. 计算结果

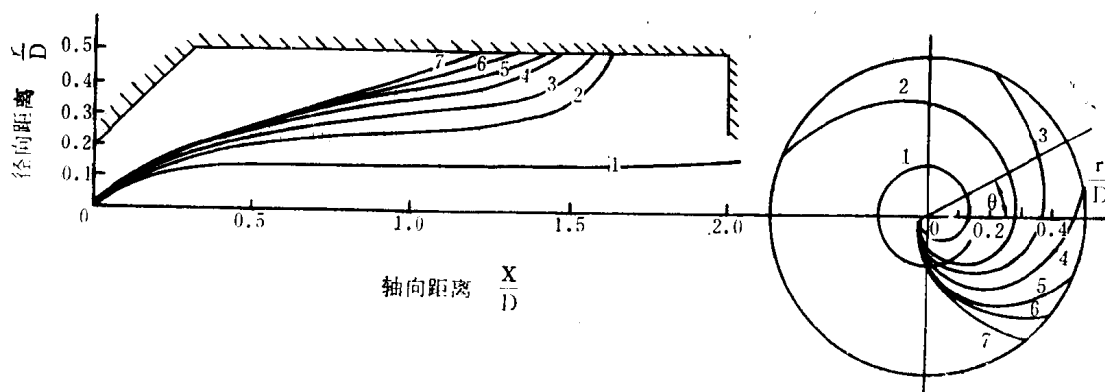


图 10 煤粉颗粒在燃烧室中的运动轨迹

1— $10\mu\text{m}$; 2— $50\mu\text{m}$; 3— $75\mu\text{m}$; 4— $100\mu\text{m}$; 5— $125\mu\text{m}$; 6— $150\mu\text{m}$; 7— $200\mu\text{m}$

计算得到 7 种直径颗粒的运动轨迹示于图 10。由图可见粗颗粒惯性大, 易于分离。细微颗粒惯性小, 难于分离。而小于 $25\mu\text{m}$ 的细微颗粒只能在平衡圈内作旋转运动, 不能在燃烧室中得到分离。对 d_p 为 200 和 $50\mu\text{m}$ 的颗粒采用两种阻力系数计算公式, 所得轨迹的差别相当显著。结果还表明, 重力的影响甚微, 完全可以忽略不计。

四、结论与分析

1. JS-2燃煤MHD燃烧室第一级的冷模试验表明, 燃烧室气流流场基本对称, 总的充满度较好, 室内扰动比较强烈, 基本能适应高强度高效率的燃烧要求。

2. 由于旋流器等多种因素影响, 在旋流器出口处产生了不大的中心回流区。在氧化剂预热温度高、着火稳定性不是主要矛盾的情况下, 它对提高燃烧室容积的有效利用率, 减小散热损失是有利的。

3. 燃烧室入口处扩张锥附近出现了较大的回流区, 是由于扩张锥张角过大造成的。建议将半张角由目前的 45° 减小为 35° , 以提高燃烧室容积的有效利用率。

4. 在出口处装设扰流板, 不仅增大了气流轴向和切向速度在径向的速度梯度, 加强了扰动混合, 而且使得出口处气流出现外侧轴向速度小而切向速度大的现象, 从而增强了煤渣的分离效应, 有利于提高排渣率。

5. 沿燃烧室轴线方向, 气流的最大轴向速度按 $(\frac{x}{D})^{-1}$ 规律衰减, 最大切向速度按 $(\frac{x}{D})^{-2}$ 规律衰减; 轴向速度和切向速度沿径向的分布规律分别用指数函数和幂函数逼近, 径向速度数值普遍较小, 且规律性不强。

6. 粒径大小对煤粉颗粒的分离特性影响显著, 粗颗粒惯性大易于分离, 小于25微米的细微颗粒不能被分离, 进入第二级燃烧室。颗粒在燃烧室空间的停留时间随粒径增大而缩短。

7. 冷模试验发现气流切向速度不够大, 气流旋转不够强烈, 计算得到可分离煤粒的下限直径较大, 说明分离情况不够理想。有必要改变旋转流与直流风量之比, 适当增大旋流数, 以提高燃烧室中的排渣率。

8. 回流区的存在是气流结构的重要特性。考虑回流区计算得到的煤粒运动轨迹表明, 它对煤粒的初期运动影响较大, 对它应给予足够的重视。某些作者不考虑流场中的回流区来研究MHD燃烧室中煤粒运动轨迹, 必然会带来较大误差[4]。

9. 计算表明, 气流和颗粒间的相对轴向和切向速度都比较大, 在计算煤粒运动轨迹时不能被忽略。按两种阻力系数公式计算得到的运动轨迹差别显著, 根据实际相对雷诺数数值范围, 应采用Клячко公式。某些作者忽略气流和颗粒间的相对轴向速度和切向速度, 并用Stokes公式计算粘滞阻力, 精确度不高[4]。

主要符号

x, r, θ	轴向、径向和切向坐标
t	时间
w_x, w_r, w_θ	气流的轴向、径向和切向分速
$w_{xm}, w_{\theta m}$	某断面上最大轴向和切向分速
$w_{x1}, w_{\theta 1}$	第1断面上最大轴向和切向分速
w_D	燃烧室圆柱段平均轴向速度
u	煤粒和气流间的相对速度

D	燃烧室圆柱段直径
R_0	燃烧室某断面半径
ρ_t, ρ_p	气流和煤粒的密度
ν	气流介质的运动粘度
d_p	球形颗粒的直径
m	煤粒的质量
f	煤粒的迎流面积

参 考 文 献

- [1] Heywood, J.B. and Womack, G.J., Open-cycle MHD Power Genaration. Pergamon Press, Oxford, 1969
- [2] J.M.比埃尔, N.A.切给尔:《燃烧空气动力学》, 科学出版社, 1979
- [3] Lilley, D.G., AIAA Journal, 15, 8, 1063~1078.1977
- [4] TRW Defense and Space System Group, Concept Design and Development of MHD Combustor. 1977
- [5] Л.А.Вулис и Б.Л., Устименко Теплоэнергетика, 9, 3—10, 1954
- [6] 郑洽余、鲁钟琪主编:《流体力学》机械工业出版社, 1979
- [7] 李之光:《热力设备模型试验研究基础》国防工业出版社, 1973
- [8] Kuts, P. S. and Grinchik, N. N., Heat Transfer, Soviet Research, 9, 75—83, 1977

单颗粒水煤浆的蒸发、着火与燃烧规律的研究

第一部分——实验研究

傅维标 卫景彬 张燕屏 李东 韩洪樵

(清华大学)

摘 要

本文对单颗粒水煤浆的蒸发、着火及燃烬过程进行了实验研究。对不同滴径、不同环境温度、不同氧浓度下的烟煤、贫煤及无烟煤浆滴的上述过程进行了测定。实验表明,煤浆滴的燃烧过程与干煤粒相比,有很大的不同。它经历了加热、蒸发、挥发分析出、挥发分着火与燃烬、剩余碳的燃烬等过程。实验表明,水煤浆滴的燃烬时间小于同直径的干煤粒的燃烬时间。

A study of the evaporation, ignition and burning of a single CWS droplet. Part I—Experimental investigation

Fu wei-Biao Wei Jing-Bin, Han Hong-qiao

(Tsinghua University)

Abstract

The results of a experimental investigation of the evaporation, ignition and burning of a single CWS droplet are reported in this paper. The parameters of the combustion processes of bituminous, carbonaceous and anthracite CWS are measured for different droplet-diameters, surrounding temperature and oxygen concentrations.

The experimental results show that the combustion processes of a single CWS droplet are significantly different from those of a dry single coal particle. It undergoes several different stages, i. e. heating, evaporating, volatilizing, burning of the volatile matter and burnout of residual carbon.

On the other hand, the burn-out time required for the CWS droplet is longer than that of the dry particle of the same diameter.

一、前言

在我国,煤是能源的主要来源,如何加强煤的利用研究是当前能源研究中的重要课题。煤的气化、液化无疑是煤的合理利用中的理想方案,但其经济性尚未解决,因此推广应用受到很大限制。特别是煤的液化,投资很大,成本高,离开工业应用还较遥远。目前我国的重点放在煤的气化上。除此以外,煤的燃烧,尤其是水煤浆的利用也开始引起了重视。其原因之一是由于利用水煤浆输送煤从综合经济效果的角度来看是有利的;另一方面从燃烧角度来看,由于它的燃烧温度较低,因此可减少对空气的污染;同时可能将原有烧油的炉子改成烧水煤浆,这样,实现了以煤代油,对大量节油是一个有吸引力的方案。当然,烧水煤浆也存在问题。例如,由于燃烧温度低,将使锅炉的负荷下降。此外,由于水蒸发需要吸收蒸发潜热,排出烟道时,使排烟损失大为增加,这样,锅炉热效率较低。但如果将煤预处理,尽可能减少灰分的含量,提高煤的热值,则可能使锅炉负荷降低不大。因此,对低灰分水煤浆的研究有着重要意义。国外把这种水煤浆看成是未来的新型燃料,是煤的合理利用的重要而有现实意义的途径。

由于煤中掺了水,其燃烧过程将会与干煤粒有很大的不同,弄清其燃烧规律,对水煤浆的合理利用是很重要的。国外[1][2]对水煤浆的燃烧机理已有所研究,但也仅仅是开始。根据我国的情况,我们对水煤浆的蒸发、着火、燃尽规律进行了研究,得出了一些有实用价值的结果。本文着重于实验研究,其定量分析将在另一篇文章中专门讨论。实验结果表明,煤中掺水对燃烧过程有不利的一面,即增加了煤浆滴的总燃烧时间。但也带来了有利的一面,即由于水分的蒸发,使碳的孔隙度增加,这样大大增加碳的反应表面,从而使碳的燃烧速率加快。本文对环境温度、氧浓度、滴径对水煤浆燃烧速率的影响作了广泛的试验,得出了有用的定量结果。

二、实验装置

我们采用非转移弧等离子体发生器作为氧化剂的加热器,利用氩气作为工质(以氩代氮这仅仅是为了改善工作条件,因为氮等离子体的噪声和污染太大,无法长期工作),在氩等离子体射流中加入氧作为氧化剂,氩-氧混合气之平均温度可在 $600\sim 2000^{\circ}\text{C}$ 范围内变动。温度的调节只需改变等离子体电流即可。氧浓度可在 $0\sim 0.7$ 之间变化。氧化剂的流速控制在 2 m/s 以下,以保证雷诺数较小,使火焰包围浆滴。系统及加热器灯口的结构如图1

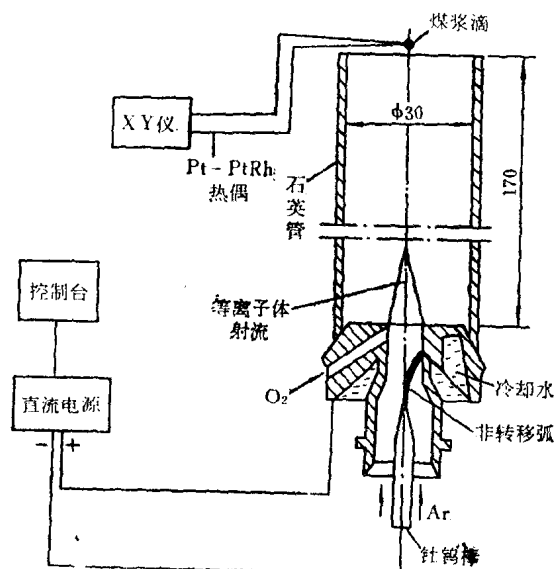


图1 试验系统图

所示。这种加热方式与国内某些兄弟单位所用的马弗炉加热相比具有独特的优点，其温度调节很快、很灵，调节范围又很广。其次，可以消除壁面辐射的影响，基本上保证煤浆颗粒在对流中进行加热、着火、燃烧。而一般马弗炉则主要靠高温壁面辐射加热，这对理论分析增加困难。这种加热器还可以做到在温度不变的条件下，研究对流对燃烧的影响，而马弗炉就达不到此目的。

煤浆颗粒悬挂在50μm的铂-铂铑热偶丝上，由于热电偶丝很细接点的直径小于270μm，因此其导热影响较小。热电偶经补偿导线接至函数记录仪。

灯口出口处氧的浓度经标定表明，它的浓度值可由氩及氧的浮子流量计的读数换算而得。其实验结果见表1。

表 1

由Ar和O ₂ 流量计给定的氧浓度	用气体分析仪在灯口测得的氧浓度
0.1	0.102
0.25	0.25
0.36	0.365

这样，只要在两流量计中给定氩和氧气的不同流量比，便可算出灯口处的氧浓度。换算公式如下：

$$\frac{0.95V_{O_2}}{0.85V_{Ar} + 0.95V_{O_2}} = A\%$$

其中A为灯口出口处所需的氧浓度值。它是事先给定的。 V_{Ar} 为氩流量计中氩气体积流量。 V_{O_2} 为氧流量计中氧气体积流量。系数0.95、0.85分别为将空气流量计用于测定氧和氩时的密度修正系数。氩流量 V_{Ar} 可在0.2~1.5M³/h之间选择。 V_{Ar} 确定后便可从上式中算得所需的 V_{O_2} 。

滴径测量采用读数显微镜读出。

本实验中参数变化范围如下：氧浓度0.1~0.36；滴径1~3mm；环境温度700~1400°C。煤种包括烟煤、贫煤、无烟煤，其工业分析如表2所示。水含量采用30%和40%。

表 2

成分 煤种	W _f %	V _f %	A _f %	C _f %	V _f %	Q _低 (千卡/公斤)
烟煤(淮南电厂)	1.5	25.4	28.9	44.2	36.5	5399
贫煤(合肥电厂)	1.0	14.7	30.0	54.3	21.3	5359

三、实验结果及分析

通过实验，观察到如下一些现象：

- a. 对于烟煤和贫煤滴来说，在加热、燃烧过程中滴径基本上保持不变，煤浆滴烧完后留下