

非流线型体的滞止浓缩与弥散过程

(清华大学 热能工程系, 北京 100084) 金燕 韦勇华 熊凡凡 张海霞 郑洽余 闫德中

摘要: 提出了颗粒的滞止浓缩过程与弥散过程是浓缩煤粉燃烧技术的基础这一新概念, 并分析了滞止浓缩过程与弥散过程的原理。以挡板作为非流线型体, 利用粒子动态分析仪(PDA)在冷态试验台上研究了非流线型体的滞止浓缩过程与弥散过程, 首次证明了滞止浓缩过程的存在。试验结果表明, 利用非流线型体可以达到浓缩煤粉的目的。

关键词: 浓缩煤粉燃烧技术; 煤粉燃烧器; 滞止浓缩过程; 弥散过程; 非流线型体

中图分类号: TK223.21 文献标识码: A

1 前言

浓缩煤粉燃烧技术作为一种稳定燃烧的手段, 以其良好的效果和广阔的开发前景, 在国内外得到了广泛的研究和应用^[1]。大量的理论分析和运行数据证明了煤粉燃烧器出口附近的煤粉浓度对煤粉的着火和燃烧存在着重大影响^[2]; 当煤粉浓度提高时, 煤粉燃烧所需要的着火热减少、着火时间缩短、着火点提前和煤粉燃烧所形成的NO_x减少。因此, 发展浓缩煤粉燃烧技术, 无论对提高火焰稳定性, 还是对降低NO_x排放造成的环境污染都是很好的解决手段。近年来, 许多科研工作者针对煤粉稳燃问题, 运用浓缩煤粉燃烧技术研制成功了多种新型煤粉燃烧器, 如船形燃烧器、钝体燃烧器、径向浓淡旋流燃烧器等。剖析这些燃烧器的稳燃机理可以发现, 为了在适当的位置达到高浓度煤粉, 它们都利用了在一次风口内或一次风出口附近装设非流线型体(船体、钝体等)而产生的气固两相分离流滞止浓缩过程和弥散过程。由此可见, 滞止浓缩过程和弥散过程是浓缩煤粉燃烧技术的基础。为研究方便起见, 本文将以挡板为非流线型体, 以颗粒碰撞挡板时达到局部空间增浓为例, 对滞止浓缩过程和弥散过程进行理论分析, 以期为进一步开发新的煤粉燃烧器和发展煤的高效低污染燃烧技术提供更好的理论依据。

2 滞止浓缩过程与弥散过程

滞止浓缩过程是指气固两相流中的固体颗粒由于受阻(气相阻力或机械阻力)滞止减速, 从而在局部空间内颗粒质量浓度增加的过程。在一维稳态条件下, 假设颗粒沿 x 轴方向运动(如图1所示)。根据质量守恒原理, 沿 x 轴方向质量流率 G_s ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) 不变, 即

$$G_s = vC = \text{constant}$$

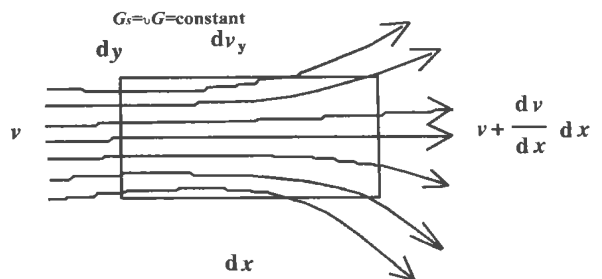


图1 滞止浓缩过程与弥散过程

其中, v 为颗粒的速度 (m/s), C 为颗粒空间质量浓度 (kg/m^3)。这里颗粒空间质量浓度可以用下式表示:

$$C = \rho_p(1 - \epsilon)$$

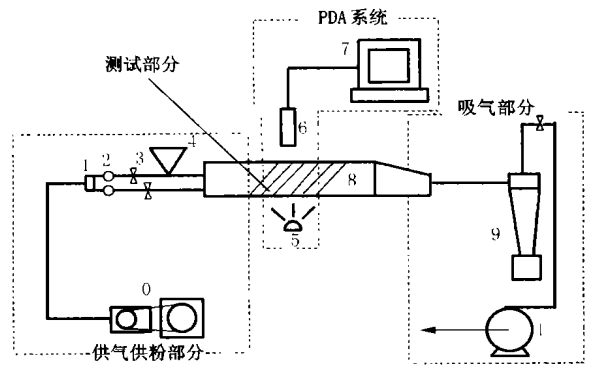
式中, ρ_p 为颗粒密度 (kg/m^3), ϵ 为气固两相流的空隙率。当颗粒由于某种原因速度减小, 即 $dv/dx < 0$ 时, 颗粒空间浓度就会增加, 这就是滞止浓缩过程。

弥散过程是指由于颗粒存在与固相平均速度 v 垂直的速度 v_y , 使颗粒从控制体两侧飞离控制体的过程。

通常, 在煤粉的实际燃烧过程中, 最理想的煤粉浓度组织应当是: 在燃烧前期, 需要增强滞止浓缩过程, 使煤粉浓度增加, 并与高温回流区配合形成稳燃区; 在燃烧后期, 需要增强弥散过程, 使煤粉与空气充分混合, 以有利于煤粉的燃尽。因此, 组织好滞止浓缩过程与弥散过程对改进煤粉燃烧技术很有意义。

3 试验系统

图 2 为试验系统示意图^[3], 主要由供气供粉部分、测试部分和吸气部分组成。其中, 供气供粉部分由送风的罗茨风机和送粉的螺旋给粉器组成, 吸气部分包括旋风分离器和引风机, 测试部分由测试对象与 PDA (粒子动态分析仪) 测试系统组成。在试验测试对象(如图 3 所示)中, 测试段是高 100 mm, 宽 100 mm, 长 500 mm 的长方体, 除上表面采用氯化玻璃作为 PDA 测试窗口外, 其余材料均为有机玻璃。一次风口为 100 mm×10 mm 的长方形, 其风速为 30 m/s。为了易于观察, 将宽为 20 mm、高为 40 mm 的矩形挡板(非流线型体)放置在距一次风口 120 mm 处。试验时, 在一次风中加入 0~200 μm 的球形玻璃珠, 以测量挡板附近的流场和浓度场。为了减小气固两相流的脉动随机误差, 在每个空间点上测量 3000 个颗粒的速度矢量, 然后求出其平均值。对于颗粒浓度较稀的区域, 取 120 秒内所测得的颗粒速度来进行计算。



0—罗茨风机; 1—联接箱; 2—笛形管测速装置; 3—阀门;
4—螺旋给粉器; 5—激光发射器; 6—激光接收器; 7—数据采集器;
8—试验测试段; 9—旋风分离器; 10—引风机

图 2 试验系统图

4 试验结果及讨论

挡板对颗粒平均速度分布的影响如图 3 所示(箭头的末端位置表示测点的位置, 箭头所指的方向表示颗粒速度的方向, 箭头的长度表示颗粒速度的大小)。从图中可以看出, 在一次风口轴线上 10 mm 处, 颗粒在挡板附近急剧减速。到达挡板近壁时, 颗粒速度几乎为零, 也就是说颗粒有一个滞止减速的过程。在一次风口轴线上 20 mm 且距挡板较近处, 颗粒存在绕流现象, 即颗粒改变了原有的前进

方向, 沿挡板边缘向外飞出。

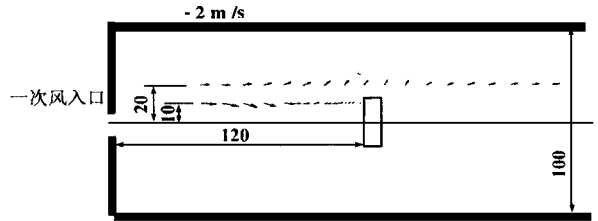


图 3 挡板对颗粒速度场的影响

图 4 表示的颗粒浓度场表明(图中圆的中心位置表示测点的位置, 圆直径的大小表示所在测点颗粒浓度的大小), 颗粒的浓度场与速度场是相互对应的。此时一次风口轴线上 10 mm 处, 在挡板附近颗粒浓度急剧增加, 可以达到一次风口处的 3 倍。在一次风口轴线上 20 mm 处, 挡板边缘存在很浓的颗粒流, 约为一次风口处的 2.5 倍。从图 4 还可以看出, 由于弥散过程的影响, 在挡板后颗粒浓度逐渐降低, 并在挡板后约 100 mm 处颗粒浓度基本上恢复到一次风口处的水平。

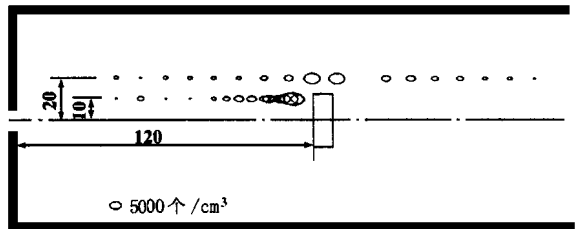


图 4 挡板对颗粒浓度场的影响

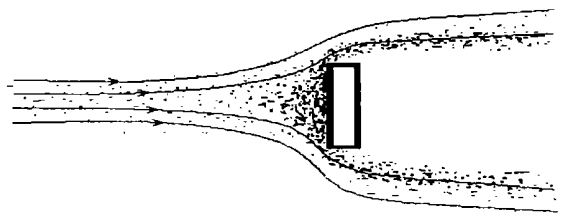


图 5 挡板的滞止浓缩过程与弥散过程机理

上述结果可以用图 5 所示的机理作如下解释。当气固两相流与挡板碰撞时, 气相绕过挡板形成绕流, 颗粒相由于惯性较大而不能跟随气相绕过挡板。在与气相分离后, 颗粒撞击挡板而滞止, 且堆积在挡板表面。后来的颗粒受气相阻力和滞止在挡板表面颗粒的缓冲作用, 在挡板近壁处滞止而浓缩。当颗粒堆积到一定程度时, 被气相从挡板的边缘携带走, 并在绕过挡板边缘时形成一股很浓的颗粒带, 这就是说煤粉燃烧器利用非流线型体可以达到浓缩煤粉

的目的。船体、钝体等都是滞止浓缩过程和弥散过程在实践中的典型应用。

值得指出的是,由于一部分颗粒积聚在挡板表面上,使得后来的颗粒不是直接撞击到挡板上,而是通过与这层颗粒垫进行碰撞而滞止,降低了挡板受到的磨损和冲击,延长了挡板的使用寿命。目前国外已投运的用挡板作非流线型体的煤粉燃烧器的运行实践表明^[4],挡板在受到连续 20 000 小时的颗粒撞击后,几何尺寸改变很小。

5 结论

(1) 颗粒的滞止浓缩过程和弥散过程是浓缩煤粉燃烧技术的基础。

(2) 挡板可以使颗粒在其表面及边缘附近颗粒浓度急剧增加。

(3) 挡板滞止浓缩效应所能维持的距离通常可以满足煤粉稳定燃烧的要求。

参考文献

- [1] 秦裕琨. 浓缩煤粉燃烧技术的发展. 燃烧科学与技术, 1995, 1(1): 43~48.
- [2] 陈刚. 煤粉浓度对火焰温度影响的试验研究. 热能动力工程, 1994, 9(2): 70~72.
- [3] 韦勇华. 气固两相分离流滞止浓缩与弥散过程研究 [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 1997.
- [4] Tigges K D. Experience with the highly developed DS burner for the entire range of bituminous coals. Deutsche Babcock, 1997.

(渠 源 编辑)

(上接 216 页)

4.2.4 比较工况 1 和 2 中 Z 向作用力产生的响应,有减振器时反而比无减振器时要大。这说明减振器没有削弱发动机 Z 向振动,反而加强了其 Z 向振动;而工艺基架的 Z 向振动,有的被削弱,有的被加强。但是,对于 Y 向激励产生的振动,发动机和工艺基架各结构的振动都被减振器减弱了。

4.2.5 比较工况 2 与 3 的响应。同样都有减振器,但工况 2 无阻尼,工况 3 有阻尼,各结构的最大响应比无阻尼时要小,但是响应下降幅度不大。从响应的时间历程看,有阻尼时,响应衰减得很快。

4.2.6 对于第 4 工况,即同时作用着水力测功器激励和发动机激励,且又是 Z 向与 Y 向组合,这是一种最不利的振动状态,用来考察工艺基架及发动机的响应是否过大。表 3 数据表明,工艺基架各结构的响应不大,只是发动机响应较大。比如,测功器底架最大速度响应仅为 4.2 mm/s,而发动机最大速度响应为 14.6 mm/s,但此点(208 号节点)位于机组罩壳上,并非位于发动机的机匣,不会影响发动机正常工作。

5 结论

(1) 工艺基架各结构本身的固有频率都在 110 Hz 以上,当承载设备质量后,频率降至 35 Hz 以下,都避开了机组的工作频率。从整个结构系统来

看,第一阶频率为 8 Hz,第 20 阶频率为 36 Hz,远低于机组的共振频率。可见,工艺基架结构的设计是合理的。

(2) 从系统的振型上看,低阶频率显示的是减振器和地基支撑弹簧的振型,工艺基架各结构的振型出现在高阶,且减振器、地基弹簧及工艺基架三者之间并无明显的耦合振动。

(3) 减振器减弱了发动机传递给工艺基架的振动能量。或者说,减振器降低了基架振动对发动机正常工作的影响。但是,发动机自身的振动,减振器可能加强其振动(如 Z 向振动),也可能是减弱其振动(如 Y 向振动)。

(4) 阻尼的存在(小阻尼),并不能明显降低动态响应的幅值,但从响应时程曲线看,加快了振动衰减的速度。

参考文献

- [1] 盛惠渝. 燃气轮机箱装体底架结构分析. 热能动力工程, 1988, (3): 10~17.
- [2] 尤国英. 船用燃气轮机抗冲击非线性研究. 第四届全国海事技术研讨会文集, 北京: 海洋出版社, 1998.
- [3] 袁明武编. SAP84 微机结构分析通用程序. 北京: 北京大学出版社, 1992.
- [4] 王文亮. 结构振动与动态子结构方法. 上海: 复旦大学出版社, 1985.
- [5] 唐照千. 振动与冲击手册. 北京: 国防工业出版社, 1988.

(复 编辑)

—215~216, 222

Through the use of a finite element method and a substructure technology a dynamic model of technological base-frame system is set up for a GT25000 gas turbine test. Calculated in detail are the natural characteristics and the dynamic response of the above-cited system. Also discussed is the effect on the system vibrations of a damper and damping action. The results of an analysis show that the technological base-frame possesses relatively good dynamic characteristics and features a rational design. **Key words:** gas turbine test, technological base-frame, substructure, natural frequency, dynamic response

两相流动对流化床燃烧行为的影响 = **The Effect of a Two-phase Gas-solid Flow on the Combustion Behavior of a Fluidized Bed** [刊, 汉] / Lu Junfu, Jin Xiaozhong, Zhang Jiansheng, *et al* (Department of Thermal Engineering, Qinghua University, Beijing, China, Post Code 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(3). — 217~219, 238

The measurement along a circulating fluidized-bed boiler height of the gas concentration and the combustion fraction distribution has demonstrated that the major difference between a bubbling fluidized bed and a circulating fluidized one consists in their radically different combustion behavior in a dense-phase zone. Due to a relatively low average particle diameter of the bed material the dense-phase zone flow of the circulating fluidized bed is different from that of the bubbling bed. This will lead to an increase in mass transfer resistance between the gas and solid phase, thus affecting the combustion reaction. The combustion behavior in the dense-phase zone is characterized by a shortage or lack of oxygen. The combustion reaction exists along the height of the circulating fluidized bed boiler and even in a cyclone separator. A combustion model for the fluidized bed dense-phase zone is set up, which takes into account the mass transfer resistance between the gas and solid phase. A comparison with the measured data obtained on an actual circulating fluidized bed boiler indicate that the calculated results are in relatively good agreement with the measured ones. **Key words:** circulating fluidized bed, bubbling bed, dense-phase zone, combustion behavior

非流线型体的滞止浓缩与弥散过程 = **Stagnation Concentration Process and Diffusion Process of a Bluff Body** [刊, 汉] / Jin Yan, Wei Yonghua, Xiong Fanfan (Department of Thermal Engineering, Qinghua University, Beijing, China, Post Code 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(3). — 220~222

The authors have come up with a new concept, proposing that both a stagnation concentration process and a diffusion process of particles constitute a basis for the concentrated pulverized-coal combustion technology. An analysis of the mechanism of the above-mentioned two processes is given in the present paper. With the help of a particle dynamic analyzer a study has been conducted of both the concentration process and the diffusion process of a bluff body which assumes the form of a damper, demonstrating for the first time the existence of the stagnant concentration process. The experimental test results show that through the use of the bluff body a concentration or enrichment of the pulverized coal can be readily attained. **Key words:** concentrated pulverized-coal combustion technology, pulverized coal burner, stagnation concentration process, diffusion process, bluff body

采用优化算法分析燃烧火焰辐射光谱求取火焰温度 = **Determination of a Flame Temperature from the Analysis of a Combustion Flame Radiation Spectrum through the Use of an Optimized Algorithm** [刊, 汉] / Zhou Jie (Institute of Thermal Power Engineering under the Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang, China, Post Code 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(3). — 223~225

A flame temperature can be determined from an analysis of the radiation spectrum emitted by a gas-burning flame in conjunction with the use of an optimized algorithm. This approach simplifies the calibration of the absolute radiation intensity of a flame as demanded by the conventional two-color method. Meanwhile, it is conducive to a better understanding of the variation relationship of the flame radiation emissivity versus wavelength. The measured temperature values are in good agreement with those obtained by a thermocouple, demonstrating the fairly high precision of the method. Moreover, this also makes it possible to conduct the on-line monitoring of a combustion flame temperature. **Key words:** flame temperature, optimization, radiation intensity

蒸汽动力系统可调节性分析 = **An Analysis of the Regulation Possibility of Steam Power Systems** [刊, 汉] / He