

增压流化床燃烧用的煤水混合物流变特性研究

卢平, 章名耀, 徐跃年

(东南大学热能工程研究所, 江苏南京 210096)

摘要: 通过试验研究, 系统分析了水分、配比、添加石灰石及管径变化等对水煤膏流变特性的影响。试验结果表明, 通过适当的配制, 水煤膏在很低的水分下 ($W_f=22.16\%$) 能够获得良好的流动性能, 石灰石的添加可以明显地降低水煤膏的管内阻力, 改善水煤膏的输送性能。试验得到的流变参数表明, 水煤膏的流变特性近似为宾汉体。

关键词: 增压流化床; 水煤膏; 流变特性; 试验研究

中图分类号: TQ534

文献标识码: A

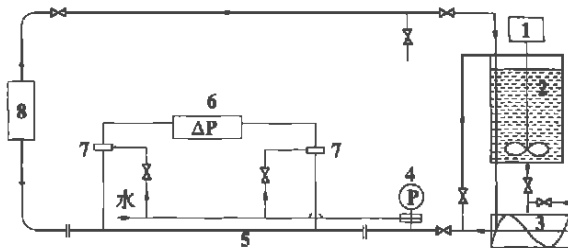
1 前言

增压流化床燃烧(PFBC)湿法加料是将煤破碎, 筛选后按一定级配和一定比例的水直接混合, 制成煤水混合物(由于其在颗粒粒度、浓度及添加剂等方面与传统的水煤浆不同, 也被称作水煤膏 coal-water paste), 在泵压下经管道输送, 并经雾化器喷撒入炉。与干法加料比较, 湿法加料采用成熟的泵送技术使供料系统大大简化, 运行和维护方便可靠。由于水煤膏煤颗粒的宽筛分(一般为几毫米, 最大可达12 mm)及低水分(煤浓度大于70%)的要求, 使得其本身特性变得相当复杂。因此, 深入研究各因素对水煤膏流变特性的影响及规律, 是实现PFBC湿法加料商业应用的重要手段。水煤膏的流变特性是水煤膏制备、输送、雾化和燃烧的基本特性。Byam^[1]和Takezaki^[2]分别对水煤膏的流变特性进行了研究, 由于前者所研究的煤颗粒粒度范围较窄(0~3 mm), 后者煤制备过程复杂, 缺乏工程应用的实用性, 从而影响其商业应用的范围。本研究根据增压流化床燃烧的要求, 通过实验系统研究了煤浓度、颗粒配比、添加石灰石和管径变化等对水煤膏流变特性的影响及规律, 旨在为PFBC提供一种高浓、低粘、低流动阻力、颗粒级配较宽, 且对煤破碎没有过分要求的液态燃料。

2 试验装置和方法

水煤膏的流变特性在自制的泵送试验台(图1)

进行, 整个系统分为水煤膏制备和流动回路两个部分。采用螺杆泵输送水煤膏, 试验时通过改变泵的转速来调节流量, 流量 Q 采用电磁流量计测量, 试验段两端的压差 ΔP 由隔膜差压计直接测量, 测试段管长 $L=3.3$ m, 管径 D 可以调节, 分别为25, 32, 40 mm。试验煤种为徐州贾汪烟煤, 粒度为0~6 mm, 试验时用振动筛分成粗粉(0.6~6 mm)和细粉(0~0.6 mm)两组, 不同粒度分布的水煤膏采用在原煤中加入粗粉或细粉的方法获得。



1—搅拌电机; 2—浆桶; 3—螺杆泵; 4—隔膜压力表; 5—测试段; 6—差压计; 7—隔膜法兰; 8—电磁流量计

图1 水煤膏流动特性试验装置图

3 试验结果与分析

3.1 数据处理

试验结果表明, 高浓度的水煤膏不易发生固液分离, 可以作为一种均匀与时间无关的非牛顿流体处理, 在充分发展的管流中, 其管壁剪切应力 τ_w :

$$\tau_w = \frac{D \cdot \Delta P}{4L} \quad (1)$$

其中, D 为试验段管径, L 为测试段长度, ΔP 为测试管长 L 上相应的压降。

流体管壁剪切速度 v_w 由 Robinowitsch-Mooney 方程确定^[3]:

$$v_w = \frac{32Q_c}{\pi D^3} \left[\frac{1+3n'}{4n'} \right] = \left[\frac{1+3n'}{4n'} \right] \frac{8V}{D} \quad (2)$$

$$n' = \frac{d \ln \tau_w}{d \ln (32Q_c / \pi D^3)} = \frac{d \ln \tau_w}{d \ln (8V/D)} \quad (3)$$

式中, Q_c 为水煤膏体积流量, V 为水煤膏流速。从式 (3) 可知, n' 为管壁切应力与虚剪切速率在对数坐标上的斜率。一般来说, 各处的斜率不会相等, 可采用非线性拟合的方法求得 n' , 再由式 (2) 求得 v_w , 通过拟合 τ_w, v_w 即可得到水煤膏的流变模型。

3.2 试验结果及影响因素分析

3.2.1 浓度的影响

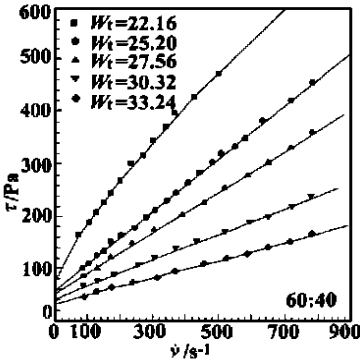


图 2 浓度对水煤膏流变特性的影响

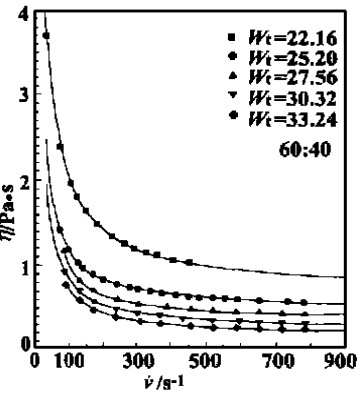


图 3 浓度对水煤膏表观粘度的影响

高浓度是 PFBC 湿法加料的前提条件。试验表明, 水煤膏可以在极低的水分 ($W_t = 22.16\%$) 条件下顺利流动。图 2 和图 3 为贾汪烟煤不同浓度下的试验结果。由图可见: (1) 水煤膏为剪切稀化流体, 其表观粘度 η 随着剪切速率的增加而减小, 在相同的剪切速率下, 水煤膏的表观粘度和剪切应力均随着浓度的增加而增加, 在水分超过 25% 时, 增加明显。这主要是由于随着膏体浓度的增加, 颗粒间的空隙率进一步下降, 颗粒更接近, 引起膏体内的内聚力和动摩擦力增加, 颗粒流动不仅要克服流体与颗粒间产生较大的摩擦, 而且要克服

粒子间的强烈的相互作用, 从而导致流动阻力和表观粘度的增加。(2) 在实验水分范围内, 水煤膏均存在屈服应力, 且随浓度的增加而增加。由于水煤膏浓度的增加, 鉴于膏体内聚力和静摩擦力的作用, 颗粒在空间形成网状结构的, 已不能自由流动, 必须使以足够的剪切应力以破坏这种结构, 膏体才能流动。

3.2.2 颗粒配比的影响

大量的理论和试验均表明, 适当的颗粒度配比可以使宽筛分颗粒达到或接近最密堆积, 在此条件下配制的悬浮体具有较高的含固量和较低的粘度。

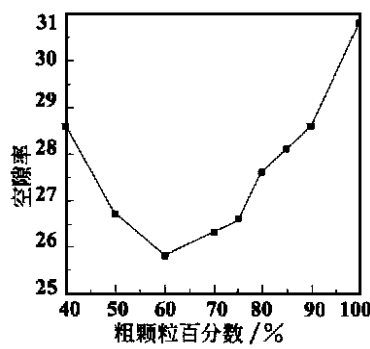


图 4 颗粒配比与空隙率的关系

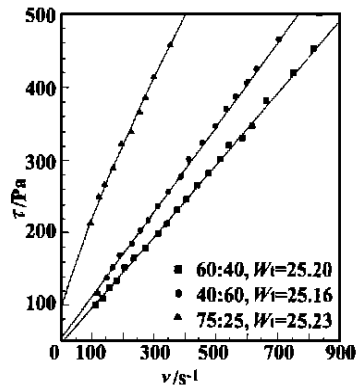


图 5 配比对水煤膏流变特性的影响

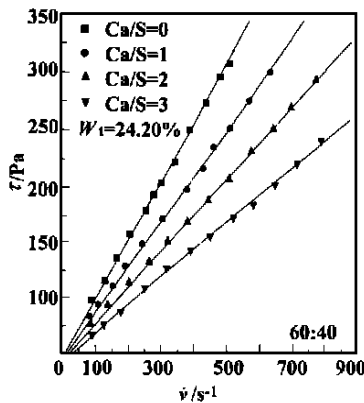


图 6 添加石灰石对水煤膏流变特性

图 4 为贾汪烟煤空隙率与粗 / 细颗粒配比的关系。由图可知, 颗粒比对空隙率的影响较大, 当粗 / 细颗粒配比 60 : 40 时, 煤粉的空隙率最低。图 5 为水煤膏在几种不同配比下得到流动曲线。由图可以看出, 在水分相同的情况下, 配比不同流变曲线不同, 随着细粉比例的降低, 其流变特性恶化明显, 在粗细颗粒配比为 60 : 40 时的流动性能最好, 这正是颗粒达密实堆积的配比。研究表明, 膏体中细粉含量对水煤膏的流变特性影响较大, 细粉的含量过高或过低均对流动不利, 细粉含量过低时, 空隙率增加较快, 细颗粒不足以填补大颗粒间的间隙, 膏体的保水性能降低, 水分快速析出、流失, 润滑水分减少, 从而形成不饱和的膏体芯柱, 造成堵塞; 当细颗粒含量过高时, 起润滑作用的细颗粒浆体浓度增加, 从而使膏体的粘度增加, 同样导致水煤膏流

动阻力的增加。因此, 在实际应用中, 确保一定的细粉比例, 特别是颗粒细度小于 0.3 mm 的细粉比例。

3.2.3 添加石灰石的影响

添加石灰石是 PFBC 脱硫的需要。图 6 给出了一种配比条件下, 石灰石的添加对水煤膏流动性能的影响。

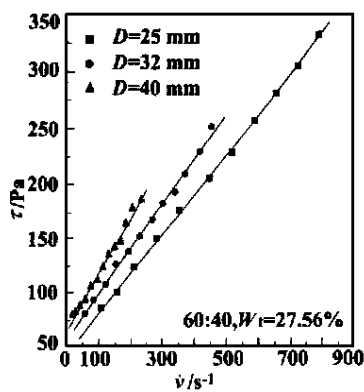


图 7 管径变化对水煤膏流变特性的影响

响。由图可知,在同样浓度和配比下,随着石灰石含量的增加,流动阻力明显下降。这主要是由于所添加的石灰石与煤混合后改善了煤粒原有的粒径分布,使颗粒间的空隙进一步减小,空隙内的保水能力加强,泌水量和泌水速率均减小,从而相应增加了膏

体流动的润滑水量,同时,由于石灰石较强的抗渗性能,使得颗粒间的润滑水增多,因而流动性显著提高。

3.2.4 管径的影响

研究表明,对于悬浮体内非牛顿流体在管道中流动时,都存在滑移,即同一种类的悬浮体在不同管道所测得的流变曲线不一致^[4~9]。图 7 为同一配比、同一浓度的水煤膏管径中流变曲线。由图可知,不同管径所测得的流变曲线不同,对于同一壁面剪切应力,随着管径的减小,剪切速率反而增大,说明水煤膏在管道流动存在壁面滑移现象。一般认为,壁滑移是由管壁处很薄的“滑移层”控制的。关于滑移层形成的机理可以从热力学上得到解释。Busse^[6]认为,非牛顿流体在管道内流动,流体中的固体颗粒(或大分子物质)微团在切应力作用下发生变形,而管壁处的切应力较高,为降低体系的自由能,这些微团将自发地向内部迁移,从而在管壁形成稀薄的溶剂层——“滑移层”。壁面滑移能降低实际能耗,因此在实际应用中应引起足够重视。

3.3 水煤膏的流变模型

研究表明,水煤膏的流变模型符合屈服—幂律模型流体特征,其本构方程为:

$$\tau = \tau_y + K\dot{\gamma}^n \quad (4)$$

- 式中 τ —— 剪切应力, Pa
- τ_y —— 屈服应力, Pa
- K —— 稠度系数, Pa · sⁿ
- $\dot{\gamma}$ —— 剪切速率, s⁻¹
- n —— 流变指数

表 1 给出了不同条件下的水煤膏测量结果,由表可知,在实验范围内,水煤膏的流变指数在 0.725 ~ 1.023 之间,对于浓度小于 75%,且级配合理的水煤

膏, n 值接近于 1,即可近似视为宾汉流体。

表 1 水煤膏流变模型参数

配比	$W_t/\%$	Ca: S	τ_y	K	n
60: 40	22.16	0	54.96	2.153	0.852
60: 40	25.20	0	43.90	0.517	0.996
60: 40	27.56	0	38.80	0.414	0.986
60: 40	30.32	0	28.74	0.281	0.981
60: 40	33.20	0	12.37	0.180	0.996
40: 60	23.81	0	55.33	4.135	0.725
40: 60	25.16	0	50.43	0.677	0.977
40: 60	29.12	0	36.85	0.295	0.986
40: 60	33.34	0	14.37	0.174	0.992
75: 25	25.23	0	83.35	3.537	0.797
75: 25	27.89	0	48.69	0.304	1.023
60: 40	24.20	0	45.12	0.567	0.989
60: 40	24.20	1	43.86	0.486	0.987
60: 40	24.20	2	41.75	0.456	0.966
60: 40	24.20	3	39.46	0.416	0.856

4 结 论

- (1) 在实验水分范围内,水煤膏接近宾汉体特征,在高浓度下则呈屈服幂律体特征。
- (2) 在 $W_t = 22.16\% \sim 33.34\%$ 范围内,水煤膏流动性能良好,其屈服应力和表观粘度随浓度的增加而增加。
- (3) 细颗粒配比是水煤膏稳定流动的关键因素,40%左右细颗粒(0.3 mm 细粉比例 20%)配制的水煤膏在极低(22.16%)水分下顺利流动。
- (4) 石灰石的添加可以明显降低流动阻力和表观粘度。
- (5) 水煤膏管道流动存在滑移流动现象,在流量相同的条件下,滑移明显降低管道流动阻力。

参考文献:

- [1] BYAM J W, WRIGHT S J. Coal water mixture testing in the grimthorpe PFB test facility[A]. Mustonen J. Proc. Of the 9th inter conf. On FBC[C]. Bosto: ASME, 1987. 191—199.
- [2] TAKEZAKI H, OTANI Y. A method of stable feeding coal-water paste into pressurized fluidized bed combustor[A]. Rubw L and Commonwealth G. Proc of the 12th Inter. Conf. On FBC[C]. San diego: ASME, 1993. 397—401.
- [3] 沈崇棠,刘鹤年. 非牛顿流体力学及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [4] JASTRZEBSKI Z D. Entrance effects and wall effects in an extrusion rheometer during the flow of concentrated suspensions[J]. I E C Fund, 1967, 6(3): 445—454.
- [5] 孟令杰,章名耀. 高浓度水煤浆流动的滑移现象及其对管内流动特性的影响[J]. 热能动力工程, 1996, 11(2): 85—88.
- [6] BUSSE W F. Mechanical structures in polymer melts. II Roles of entanglements in viscosity and elastic turbulence[J]. Poly Sci, 1967, A2(5): 1261—1281.

(挥 编辑)

基于面向对象的透平级设计优化专家系统的研究 = **A Study of the Expert System for Turbine Stage Design Optimization Based on an Object-oriented Approach** [刊, 汉] / TONG Tong (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), FENG Zhen-ping (Energy and Power Engineering Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049), LUO Guo-xi (Taiyuan Fengxi Machinery Works, Taiyuan, China, Post Code: 030027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 481 ~ 483

With the help of a design method based on an object-oriented approach an expert system for turbine stage design optimization has been studied and developed. The expert system enjoys such merits as a high modularization level and favorable man-machine interface, etc. Representing a new design philosophy and approach for conducting turbine stage design the recommended system can play a significant role in promoting the further application of artificial intelligence technology in the field of turbomachinery design. **Key words:** object-oriented approach, turbine stage, optimization, expert system

两段燃烧流化床锅炉的设计方法 = **The Design method for a Fluidized Bed Boiler with Two-stage Combustion** [刊, 汉] / HU Guo-xin, LI Ya-hong, FAN Hao-jie and LIU Yan-qin (Energy and Power Engineering Institute under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 484 ~ 487

A new type of fluidized bed boiler with two-stage combustion is designed for use in a gas and steam cogeneration plant, featuring low emissions of harmful gases. Because of this it is especially suited for gasification units and central heating plants of small and medium-sized enterprises in economically developed rural districts. The authors present the operating principles and design requirements of a two-stage combustion system as well as the thermodynamic calculation method of the relevant gasification section. A gasification equilibrium model was set up to predict the gas components with related calculations being performed. The calculation results have been found to be in fairly good agreement with industrial measurement and test data. On the basis of the calculation results and a theoretical analysis effective measures are proposed to rationally organize the two-stage combustion. **Key words:** two-stage combustion method, gasification, gas and steam cogeneration plant, fluidized bed

增压流化床燃烧用的煤水混合物流变特性研究 = **A Study on the Rheological Properties of Coal-water Paste Fired in a Pressurized Fluidized Bed Combustor** [刊, 汉] / LU Ping, ZHANG Ming-yao, XU Yue-nian (Thermal Energy Engineering Research Institute under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 488 ~ 490

By way of experimental research a systematic analysis was conducted of the influence on the rheological properties of coal-water paste (CWP) of such a variety of factors as moisture content, particle distribution, addition of limestone and pipe diameter change, etc. The results of the experimental investigation indicate that the CWP will have good flowing properties at a very low moisture content ($W_t = 22.16\%$) if a proper particle distribution has been selected. The addition of limestone can markedly decrease the flow resistance of CWP in pipeline and improve its transport characteristics. The data obtained from experiments show that the rheological properties of the CWP approximate those of a Bingham fluid. **Key words:** pressurized fluidized bed combustor, coal-water paste, rheological properties, experimental study

增湿活化脱硫试验研究 = **Experimental Investigation of Humidification Activated Desulfurization** [刊, 汉] / WU Shu-zhi, ZHAO Chang-sui, LIU Xian-zhuo (Thermal Energy Engineering Research Institute under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 491 ~ 493

Spray water activated and steam activated desulfurization tests were conducted on a hot-state desulfurization test stand. Also investigated were the desulfurization performance under different values of Ca/S ratio, saturation approach temperature, SO_2 concentration and gas speed. The results of the investigation indicate that as compared with a pure absorbent