

# 水煤膏压力泌水特性与可泵性分析

卢平<sup>1</sup>, 章名耀<sup>2</sup>

(1. 南京师范大学 动力工程学院, 江苏 南京 210042; 2. 东南大学 洁净煤燃烧与发电技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 通过实验研究了水煤膏的压力泌水特性, 分析了颗粒粒度分布、含水量等对水煤膏的泵送特性的影响, 并结合水煤膏塌落度指标, 提出了水煤膏可泵性的评价指标。结果表明: 水煤膏的可泵性可以用塌落度和压力泌水总量两个指标表征。可泵性好的水煤膏其塌落度范围为 8~24 cm, 相应的相对泌水率和泌水总量分别为  $S_{10} \leq 40\%$ ,  $V = 70 \sim 110 \text{ ml}$ 。

**关键词:** 水煤膏; 压力泌水; 可泵性

中图分类号: TQ022 文献标识码: A

## 1 引言

水煤膏泵送湿法加料技术具有系统简单、清洁、调节方便、压缩空气供应量小、煤在床内停留时间长和床内温度分布均匀等优点, 国外已有不少研究机构开展这方面的研究工作, 已成功的应用于商业示范电站<sup>[1]</sup>。水煤膏是由宽筛分的煤粉和水直接混合而成的高浓度液态燃料。从工业应用的角度出发, 水煤膏不仅要满足流化床燃烧的要求, 还要便于管道输送, 即要求所配制的水煤膏具有较好的可泵性。所谓可泵性是指膏(浆)体在泵压作用下, 在管道中流动能力的一项综合性指标, 即膏(浆)体在泵送过程中, 不离析、粘塑性良好、摩阻力小、不堵塞、能顺利沿管道输送的性能。目前对于水煤膏可泵性的研究较少, 有关可泵性的评价指标尚未形成。混凝土研究表明<sup>[2~3]</sup>, 可泵性应包括流动性、稳定性和管道阻力三方面内容。日本 Kure 实验室<sup>[4]</sup>采用实际泵送的可泵率(满负荷的流量与最大流量(1.5 t/h)之比)来衡量水煤膏可泵性, 但其实验方法不适应常规实验。东南大学<sup>[5]</sup>和浙江大学<sup>[6]</sup>采用塌落度和静置析水法对水煤膏的流动性稳定性作了初步的研究, 而对于水煤膏泵送过程中管内膏状体的稳定性没有涉及, 因此无法给出可泵性的评价指标。本文在分析水煤膏的管内泵送特性前提下, 运用压力泌水装

置, 研究了水煤膏的压力泌水特性, 提出了采用塌落度和压力泌水相结合的来评价水煤膏可泵性的新方法, 给出了水煤膏可泵性的评价指标。

## 2 试验装置和方法

水煤膏在泵送压力作用下必然有一部分水分(包括稀浆)被挤出, 从某种意义上说, 这正是水煤膏泵送的必要条件。水煤膏的压力泌水过程实际上也反映了水煤膏孔隙分布的情况及膏体的保水能力, 因此也就表明了水煤膏的稳定程度。同时, 研究水煤膏在压力作用下随时间发展的泌水量变化情况还将有利于对水煤膏润滑层形成的分析。为测定水煤膏的内阻力, 可以利用压力泌水试验。它是检验粗颗粒膏(浆)体在泵压作用下通过管道的局部区域受阻时能否保持稳定状态的一种方法。

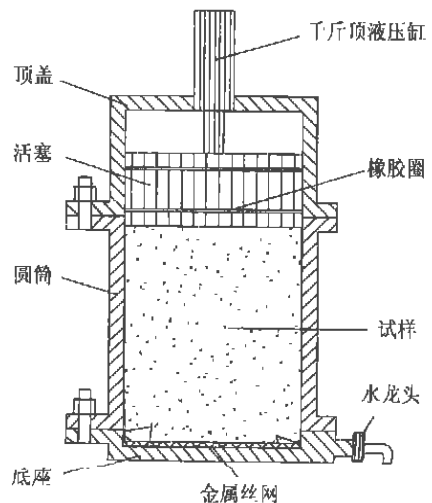


图 1 压力泌水装置

水煤膏压力泌水装置如图 1 所示。主体为  $\Phi 125$

收稿日期: 2002-04-20; 修订日期: 2002-07-22

作者简介: 卢平(1968-), 男, 江苏南京人, 东南大学讲师, 博士后。

mm 的圆筒,上下装有可装拆的顶盖和底座,上部装有活塞,为密封起见上下装有两块“○”形的橡胶圈环。活塞由手动的液压千斤顶驱动。圆筒底部的侧面有泌水孔,外部接有水龙头。泌水孔上部盖有 50 目的金属丝网,以防止细颗粒流下堵塞泌水孔和水龙头。试验时,将制备好的水煤膏,分两层装进圆筒,每装一层后略加捣实,然后关闭水龙头,启动手动液压千斤顶驱动活塞,以最快的加荷速度使压力升至 3.5 MPa。打开水龙头,并保持压力不变,按规定的间隔时间测定流出的水量。

根据压力泌水过程和泵送水煤膏的特点有以下三种表达试验结果的方法:

(1) 测定 0 ~ 140 s 泌水量,绘制压力泌水曲线,由此可知泌水速度的变化过程。

(2) 采用绝对泌水量  $V_{140-10}$

$$V_{140-10} = V_{140} - V_{10} \quad (1)$$

(3) 采用相对泌水率  $S_{10}$

$$S_{10} = \frac{V_{10}}{V_{140}} \times 100 \quad (2)$$

式中:  $V_{10}$ 、 $V_{140}$ —分别为膏体加压至 10 s 和 140 s 的泌水量, ml;

$S_{10}$ 、 $S_{140-10}$ —分别为膏体加压至 10 s 和 10 ~ 140 s 之间相对泌水率, %;

$$S_{140-10} = \frac{V_{140-10}}{V_{140}} \times 100 = 100 - S_{10} \quad (3)$$

分析以上三种处理方法可知,第一种方法可以较全面的反映水煤膏的压力泌水过程和泌水速度,但测试起来比较麻烦;后两种方法是为了简便表达而提出的,一般情况下,用  $V_{140-10}$  指标来评定泵送的稳定性比较合适,因为它一方面反映了泵送压力下的泌水速度,另一方面也反映了膏浆体在短时间内遇到局部障碍时能否保持饱和状态的能力。但单用  $V_{40-10}$  还是不够的,因为  $V_{140-10}$  本身受到了压力作用下总泌水量  $V_{140}$  的影响。相对泌水量  $S_{140-10}$  (或  $S_{10}$ ) 可以较好的反映膏浆体的稳定性情况。对混凝土研究认为,相对泌水率  $S_{10}$  不超过 40% 的混凝土拌合物是可以泵送的。

水煤膏的流动性采用国家标准规定的塌落度法<sup>[5]</sup>。测定时,将配制好的水煤膏填入圆锥筒,用铁棒捣实,并抹平上方,再迅速提起测筒,测量物料最高点与测筒上平面之间的距离  $Y$ ,即为塌落度。塌落度值越大,表明水煤膏的稠度稀,即粘度小流动性好。

试验煤种为徐州贾汪烟煤,粒度分布如表 1 所

示。实验时先将试验用煤制成 0 ~ 6 mm 的原煤,浓度不同,细粉(0 ~ 0.6 mm)与粗粉(0.6 ~ 6 mm)配比不同的水煤膏采用在原煤中加入(或筛出)细粉后,再与水直接混合的方法获得。

表 1 贾汪烟煤的粒度分布

| 粒径 / mm | < 0.075 | < 0.15 | < 0.30 | < 0.60 | < 1.25 | < 3.00 | < 5.00 | < 6.00 |
|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 煤质量 / % | 6.8     | 12.2   | 20.5   | 37.8   | 57.3   | 65.6   | 91.2   | 100.0  |

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 颗粒级配

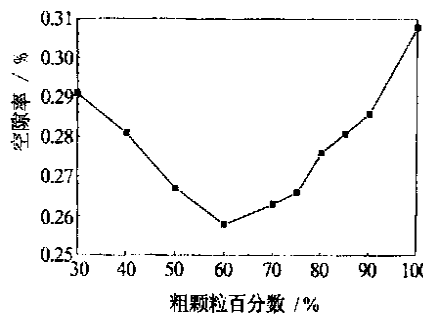


图 2 煤颗粒配比与空隙率的关系

大量的理论和试验研究均表明,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 2 为 0 ~ 6 mm 贾汪烟煤空隙率与粗细颗粒配比的关系。由图可知,随着粗颗粒含量从 30% 增至 100%,煤粉的空隙率存在一最小值,与此所对应的粗颗粒百分比被认为是煤粉颗粒粗细配比的最佳值,一般称此点为最佳配料点。当粗颗粒大于或小于此百分比时,都将使煤粉的空隙率增大。这是因为粗颗粒太多时,少量的细颗粒不足以充填大颗粒之间的空隙,因而粗细煤粉的混合得不到密实堆积;而当粗颗粒太少即细粉太多时,此时颗粒堆积体积由细颗粒的堆积方式决定,细颗粒比例越大,颗粒体系的粒度分布系数越小,堆积体积也就越较大,同样得不到密实的堆积<sup>[7]</sup>。对于 0 ~ 6 mm 的贾汪烟煤而言,其最佳粗细粉配比为 60 : 40。

#### 3.2 塌落度

图 3 为水煤膏的塌落度试验结果。由图可见,在相同粗细粉配比条件下,随着水分的增加,塌落度呈单调性增加,表明水煤膏的流动性随着水分的增加而增强。在相同塌落度条件下,不同粗细粉配比的水煤膏的可泵水分也不相同。对于试验煤种来说,粗细粉比例 60 : 40 时最低可泵水分可达 21%,而

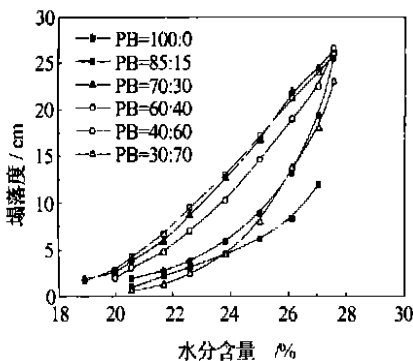


图 3 水煤膏塌落度与水分的关系

对于粗细颗粒配比在 70 :30 与 40 :60 之间的水煤膏,其最低可泵水分在 21% ~ 24% 之间。进一步研究表明,添加石灰石可以使得水煤膏的塌落度提高,

平均塌落度提高约 2 cm,这一点与文献[5]的结论相一致。这主要是因为石灰石添加改善了颗粒混合物的堆积结构,进一步降低颗粒堆积的空隙率,提高了堆积效率,进而改善了水煤膏的流动性能。

### 3.3 压力泌水

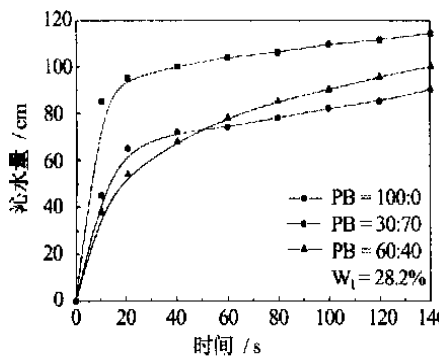


图 4 水煤膏压力泌水曲线

由图 4 可见,各种配比水煤膏压力泌水曲线形状基本一致。对于 PB=100 :0 的水煤膏,开始水煤膏就以很快的速度泌水,其 10 s 的泌水量已经达

到了 140 s 的泌水量的 70% 以上;而对于 PB=60 :40 的水煤膏在 10 s 的泌水量只有 140 s 泌水量的 40%。出现这种差异的原因主要在于它们的内部空隙的不同。当空隙较小时,水煤膏稳定性强,压力泌水慢,而空隙较大时,泌水很快,显然对泵送不利。

试验结果还表明,各种配比水煤膏的泌水量  $V_{140}$  随着含水量增加而增多,而相对泌水量  $S_{140-10}$  减少。图 5 为 PB=60 :40 水煤膏压力泌水的试验结果。这是因为:(1)随着水分的增加,浆体变稀,细颗粒的有效浓度和其体积分数降低<sup>[8]</sup>,细颗粒与水所形成的悬浮液的粘度降低,浆体的粘滞力下降,因而导致保水能力下降,在压力作用下,水分在较短的时间内快速析出;(2)由于水分的增加,水煤膏空隙水增多,细煤粉相对减少,不能有效地包围液相所致,在压力作用下泌水量增多,而且泌水速度较快。因此,在水煤膏配制中,不能片面的追求流动性而在水

煤膏中加入过多的水,以免引起稳定性的下降,给泵送带来不利影响。相反,可以采用适当降低加水量的办法提高水煤膏泵送的稳定性。

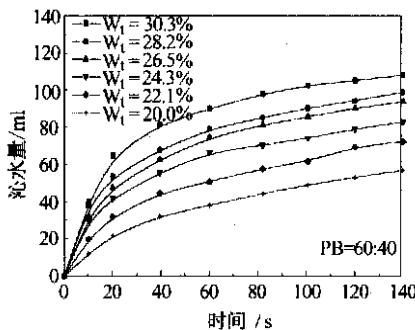


图 5 水煤膏压力泌水曲线

图 6 为改变颗粒粗细配比得到的一组曲线。由图 2 和图 6 可知,在粗粉比例为 60% 时,煤粉的空隙率最小,此时水煤膏压力泌水速度比其它配比的水煤膏泌水速度小,因而其 10 ~ 140 s 的相对泌水量  $S_{140-10}$  达到了最大值,水煤膏的稳定性比较好。当细粉量过少,膏体粗颗粒形成的空隙不能完全被细粉填充,

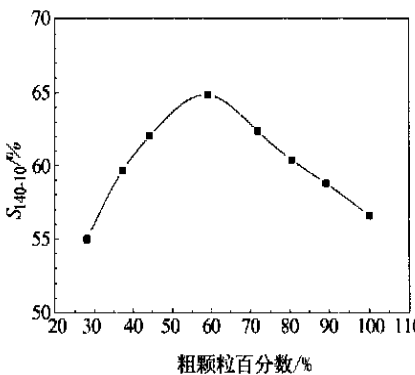


图 6 颗粒配比与相对泌水量的关系

存在较大的空隙,尤其是塌落度较大时,水煤膏的粘聚性差,很容易在加压时泌水,其稳定性不好;细粉含量过高,由于过多的细粉无法充填到粗颗粒形成的空隙中去,从而排开粗颗粒,使得混合物的空隙率上升,在压力作用下,膏体的稳定性也较差,较多水和稀浆被挤出,泌水量增加。水煤膏在压力作用下,部分水泌出,但本体中仍保留相当多水量,即使在 4.0 MPa 压力下,泌水量也只占总水量的 36%。研究表明,水煤膏的可泵性在很大程度上取决于细粉的用量。由于细粉的充填作用,不仅可以改善颗粒的堆积效率,形成较多的微小空隙,而且还可以增加煤粉的比表面积。我们知道,细粉含量越多,粒子的表面能越大,在水中絮凝能力越强,絮凝团中包含的自由水越多,因此它是水煤膏稳定性的重要保证。为保证水煤膏具有良好的稳定性,以利于管道泵送要求,小于 0.3 mm 的细粉含量不得小于 15% ~ 20%。

### 3.4 水煤膏的泵送试验

据以上试验,选取对几种配比的水煤膏,在水煤膏泵送试验台上,进行泵送试验,结果表明,在水煤膏稳定性良好条件下,泵压稳定且较低,泵送平稳。当泌水量超过一定值后,泵压不稳定,水煤膏的输送处于介稳状态,若停泵时间较长,很容易导致堵塞。此外,泌水量大的水煤膏,搅拌过程中还容易产生离析。

## 4 水煤膏可泵性分析与评价指标

可泵性能好的水煤膏应有较好的流动性、稳定性和较小的摩阻力。泵送水煤膏必须是饱和的水煤膏,即膏体中必须具有足够大的含浆量。对于饱和水煤膏,因其浆体丰厚,流动性好,摩阻力较小。对于不饱和水煤膏,其流动阻力较大,且与压力泌水有关,泌水过少,不易形成润滑层,泌水过多,水的快速流动使靠近管壁的细粉料流失,保水性下降,亦不易形成较厚的润滑层。只有在适当泌水条件下,方可形成良好的润滑层。

就水煤膏的流动性与稳定性而言,两者又有一定的关系。塌落度增加,一般来说压力泌水值也相应有所提高。塌落度大,固然流动性好,但泌水量多,超过一定限度时,摩阻力会上升,所以在保证必要塌落度的情况下,还需要用压力泌水值加以限制。因此,可以认为水煤膏在泵送过程的摩阻力是水煤膏的流动性(或塌落度)与稳定性(或压力泌水)的综合反映。

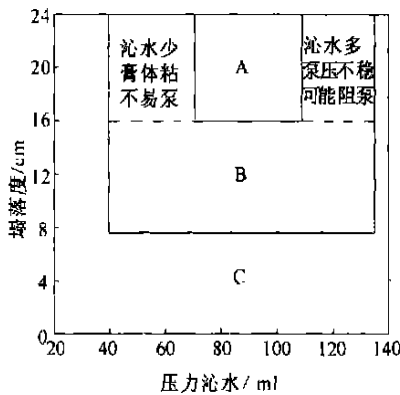


图 7 水煤膏可泵性评价图

由摩阻力、塌落度和压力泌水三者之间相互关系可知,水煤膏的可泵性可以而且必须同时用反映其流动性的塌落度值和反映其稳定性的压力泌水值两个指标来评价。根据水煤膏泵送试验和

实验室试验结果,水煤膏的可泵性可以用图 7 评价。图中 A 区内水煤膏可泵性最佳,塌落度大于 16 cm,

泌水量为 70~110 ml。C 区内水煤膏一般不适宜泵送。B 区内水煤膏可泵性一般,其塌落度低时水煤膏的流动性差,吸入效率低,泵送压力高;泌水过少,水煤膏稠,吸入效率低,不易泵送;泌水过多,易导致水煤膏泵压不稳定,若停机时间太长可能发生阻泵。由以上分析可知,改善水煤膏的可泵性的主要途径是:改善颗粒级配,提高塌落度,减少压力泌水量等。

## 5 结 论

(1) 在实验范围内,水煤膏的流动性随其水分的增加而增加,在相同水分含量下,粗细颗粒对比对水煤膏的流动性影响较大,具有良好流动性的粗细粉最佳配比为 60:40。

(2) 水煤膏压力泌水试验方法是可行的,通过对压力泌水总量、绝对泌水量和相对泌水量等指标的分析,可以找出影响水煤膏稳定性的因素。通过试验比较,从水煤膏泵送过程的稳定性出发,提出了水煤膏合理的浓度和粗细颗粒配比范围。

(3) 水煤膏的可泵性可以用塌落度和压力泌水量两个指标表征。可泵性好的水煤膏其塌落度范围为 8~24 cm,相应的压力泌水量为 70~110 ml。

### 参考文献:

- [1] ANDERSON J, TANSSON S A. Commissioning experience from three PFBC plants [A]. Anthony E J Proc of the 11th Inter Conf On FBCQ C. Montreal, Canada: ASME, 1991. 787-792.
- [2] 张晏清, 黄士元. 混凝土可泵性分析与评价指标[J]. 混凝土与水泥制品, 1989(3): 4-8.
- [3] 赵志缙. 混凝土泵送施工技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [4] 孟令杰. 煤水混合物(水煤膏)稳定性评价研究[J]. 洁净煤燃烧与发电技术, 1996(3): 5-8.
- [5] 蒋旭光. 粗颗粒煤水混合物的稠度与析水特性[J]. 增压流化床联合循环发电技术, 1993(2): 11-14.
- [6] TAKEZAKI H, OTANI Y. A method of stable feeding coal-water paste into PFBC [A]. Rubw L and Commonwealth G Proc of the 12th Inter Conf on FBCQ C. San Diego: ASME, 1993. 397-401.
- [7] 吴忆峰. 水煤浆浆度配比的研究及其对点火性能的影响[J]. 工程热物理学报, 1984 5(2): 192-198.
- [8] 赵惠林. 泥石流细颗粒浆体的有效浓度[J]. 泥沙研究, 1992(2): 20-25.

(辉 编辑)

is necessary to conduct a more thoroughgoing research on a reference environment model. **Key words:** exergy, environmental impact, pressurized fluidized bed combustion combined cycle (PFBC-CC), emissions

水煤膏压力泌水特性与可泵性分析 = **Coal-water Paste Water-seeping Properties under Pressure and Its Pumpability** [刊, 汉] / LU Ping (Power Engineering Institute under the Nanjing Normal University, Nanjing, China, Post Code: 210042), ZHANG Ming-yao (Thermal Energy Engineering Institute under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 78 ~ 81  
Water-seeping properties of coal-water paste (CWP) under pressure are studied experimentally with the influence of particle size distribution and water content, etc on the pumping properties of CWP being analyzed. In conjunction with a CWP slump index proposed is a pumpability evaluation index of the CWP. It is found that the pumpability of the CWP can be featured by two indexes, namely, the slump and the total quantity of water seeping under pressure. The CWP with a good pumpability has a slump in the range of 8 - 24cm. The corresponding relative water seeping rate and water seeping quantity are respectively  $S_{10} \leq 40\%$  and  $V = 70 - 110$  ml. **Key words:** coal-water paste, water seeping under pressure, pumpability

下降液膜流动模型及稳定性分析 = **Model of a Falling Liquid-film Flow and an Analysis of Its Stability** [刊, 汉] / QIAN Huan-qun, HU Zhi-hua, SUN He-dong, et al (National Key Laboratory of Multi-phase Flows under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 82 ~ 85

A sound mathematical model has been set up for the film flow of a free falling liquid. Boundary layer theory was used to analyze and simplify the model, securing a second-order boundary-layer model for the liquid-film flow. A stability analysis of this model was performed. Through calculations the wave growth rate of the falling liquid film and a neutral stability curve were obtained. The comparison of the calculation results with those of other models has confirmed that the second-order boundary model offers better prediction effectiveness and its form is more suited for performing further a nonlinear analysis. **Key words:** liquid film, boundary layer, wave, growth rate, neutral stability

后加载技术在极小展弦比叶栅中的应用 = **The Use of Rear-loading Technology in Ultra Low-aspect Ratio Cascades** [刊, 汉] / WANG Yu-zhang, WANG Yong-hong (Institute of Mechanical and Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030), ZHAO Ya-fang, FENG Zhen-ping (Turbomachine Research Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 86 ~ 88

Through the use of turbine blades with a rear-loaded load profile one can effectively control the formation of secondary flows in the blade passage, reducing secondary-flow losses. Meanwhile, this type of cascades is highly adaptive to a variety of incidence angles, thus significantly enhancing the flow efficiency in a cascade passage. An ultra low-aspect stator cascade with rear-loaded characteristics was designed by using the rear loading technology. The results of numerical analysis and test of the above-mentioned cascade indicate that the latter features a low three-dimensional cascade loss. Moreover, the cascade performance hardly changes with the change of aspect ratios, incidence angles and outlet Mach numbers. **Key words:** rear-loading technology, aspect ratio, secondary flow, cascade test

凝汽器铜管的联合保护研究 = **A Study of the Combined Protection of Steam Condenser Copper Tubes** [刊, 汉] / ZHU Zhi-ping, YANG Dao-wu (Chemistry Department, Changsha Institute of Electric Power, Changsha, China, Post Code: 410047) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 89 ~ 92, 96

The corrosion and protection of condenser copper tubes has always been a problem people are keenly concerned with but for which there still lacks a satisfactory solution. The complicated operating conditions of the copper tubes, variegated types of their fabrication material and the increasingly deteriorating quality of cooling water have led to a multitude of corrosion forms. In view of the above the authors have explored a combined protection method for condenser copper tubes.