

水煤膏喷嘴雾化机理及影响因素分析

卢平¹, 章名耀²

(1. 南京师范大学动力工程学院, 210042, 南京;

2. 东南大学洁净煤燃烧与发电技术教育部重点实验室, 210096, 南京)

[摘要] 通过对气力式雾化喷嘴特性的分析, 提出了水煤膏喷嘴雾化机理, 分析了诸因素对水煤膏雾化性能的影响, 确定了影响其雾化性能的主要因素, 提出了可供工程应用参考的数据。

[关键词] 水煤膏, 雾化机理, 颗粒图像速度仪

[中图分类号] TK16; [文献标识码] A; [文章编号] 1672-1292(2002)02-0061-05

0 引言

水煤膏是由宽筛分的煤粉(通常为 0~6 mm)和水直接混合而成的高浓度(质量浓度大于 70%)液态燃料。水煤膏的雾化分散性能直接决定其在流化床内的着火、混合、燃烧和燃尽。世界范围内都将水煤膏的雾化性能的研究作为水煤膏湿法给料技术研究的重要内容。日本 Kure 实验室^[1]建立了一套水煤膏冷态雾化试验装置, 采用滴落度(即未经雾化滴落下来的水煤膏与进入喷嘴水煤膏总量的比值)作为评价 CWP 不稳定喷注雾化性能的指标, 对水煤膏的冷态雾化性能进行了研究, 由于试验装置和测试条件的限制, 关于雾化粒度分布和雾化机理等未做进一步的研究。东南大学^[2]在 1MWt SEU-PFBC 试验装置上成功地实现了向 PFBC 连续添加水煤膏的 48 h 燃烧试验。结果表明: 在合适雾化空气流量的条件下, 床内温度均匀, 床内各点处温度波动幅度只有 15℃, 最大温差为 30℃。

长期以来, 科学工作者对液体燃料雾化机理进行了大量的研究, 得到了一些重要的研究成果^[3,4]。由于实际雾化过程的复杂性和现有测试手段的局限, 目前对于非牛顿流体, 特别是悬浮体的雾化机理的研究还不够充分和完善^[5,6]。而有关水煤膏的雾化颗粒分布特性及其喷嘴雾化机理的研究还未见报道。本文根据水煤膏雾化的特点, 建立了一套垂直式雾化试验装置, 首次采用 PIV 技术及二次开发的数字图像处理软件, 测量了水煤膏喷嘴雾化性能, 提出了水煤膏的喷嘴雾化机理, 研究了各种因素对水煤膏雾化的影响及规律。

1 实验装置与方法

水煤膏雾化颗粒较粗, 为避免重力对雾炬特性的影响, 本文设计了垂直式水煤膏雾化冷态试验装置(见图 1)。该装置主要由水煤膏制备与输送系统、雾化空气系统、引风除尘系统、水清洗系统和测量系统等 5 个系统组成。实验时, 根据需要将 0~6 mm 的煤粉与水直接混合配制浓度不同、粗细颗粒配比(PB)不同的水煤膏, 采用螺杆泵输送水煤膏, 水煤膏的流量通过电磁流量计测量。雾化空气由空气压缩机提供, 其流量由浮子流量计测定。雾化粒径大小与分布的测量采用 PIV 系统及二次开发的数字图像处理软件来处理^[7], 测量系统如图 2 所示。PIV 仪是由丹麦 Dantec 公司制造的 Flow Map 型 PIV 仪

收稿日期: 2002-08-10

基金项目: 江苏省自然科学基金资助(BK2002026)

作者简介: 卢平, 1968-, 博士, 南京师范大学动力工程学院讲师, 主要从事燃烧及其污染物控制等方面的研究。

(Particle Imaging Velocimetry, 粒子成像速度仪). 该测量仪由示踪粒子发生系统、激光发射系统、图像记录系统和数据处理系统组成. 激光发射系统包括大功率激光器、控制器、透镜组和光路等; 图像记录系统包括 CCD 摄像机和存储体; 数据处理系统一般包括一台高速计算机数据采集处理模块和相应数据处理软件^[8].

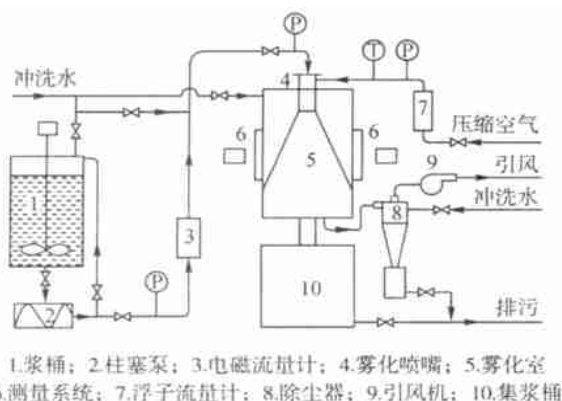


图 1 水煤膏喷雾性能试验装置

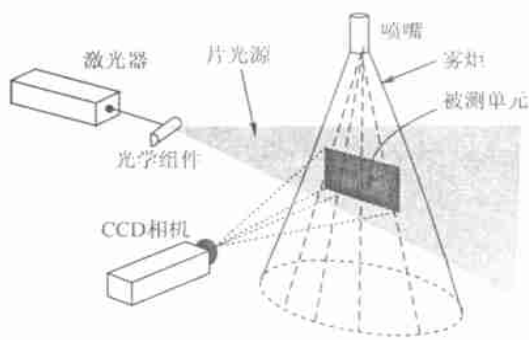


图 2 PIV 测量原理示意图

2 水煤膏喷嘴的雾化机理

由于水煤膏内部的复杂性, 影响水煤膏的雾化因素很多, 诸如水煤膏的粘度、密度、表面张力、流速以及雾化气的流速、气膏比和煤粉的粒度分布等. 为便于分析诸因素对水煤膏喷嘴雾化的影响, 本文在实验研究的基础上, 应用悬浮体(如水煤浆)的研究成果, 提出水煤膏两次雾化机理.

2.1 一次雾化

该阶段是水煤膏在高速气流作用下破碎成煤浆(膏)滴的过程. 水煤膏首先受到对称分布的高速雾化气的冲击作用, 水煤膏被部分撕裂, 在出口边缘出现一些丝状分裂现象, 出口中心形成高密度不稳定的多相流浆束. 随着雾炬沿轴向方向的不断扩展, 雾化气与膏浆体动量交换的不断深入, 使得出口边缘的丝状浆束变细并在轴线相垂直的方向上产生振动, 在浆束的末端或最细处断裂, 成为许多小的浆滴, 形成初始雾化液滴. 这个过程主要取决于水煤膏固-液交界面上的表面张力、水煤膏的粘度、煤颗粒的粒度分布以及气流的穿透深度等. 水煤膏的表面张力越小、粘度越低以及气流穿透深度越大, 则水煤膏喷嘴边缘所形成的薄膜越薄, 气膏多相流束的动量交换越彻底, 颗粒雾化的阻力也就越小, 因而其雾化效果就越好.

2.2 二次雾化

该阶段是煤浆(膏)滴在高速气流作用下被破碎成更小的浆滴的过程. 由一次雾化生成的水煤膏浆滴进入射流浓喷雾段, 由于浆滴与空气间存在相对速度, 受到空气的作用, 浆滴还会进一步破碎, 雾化成粒径更小的浆滴. 一次雾化后的浆滴是否继续破碎, 取决于韦伯数 We 和一次雾化后的浆滴组成. 若 We 大于某一临界韦伯数 We_{cr} , 且该浆滴是由小颗粒煤粒与液体水组成的, 则浆滴继续破碎, 否则不破碎. 大的浆滴破碎成小浆滴后, 直径变小, 速度变慢. 小浆滴是否继续破碎, 同样由韦伯数 We 和浆滴本身特性来判断^[9].

根据上述机理分析, 水煤膏雾化过程是非常复杂的, 要在如此复杂的关系中, 归纳出水煤膏雾化特性方程, 并完全依靠特性方程计算雾化粒径的大小是不现实的. 这不仅需要以大量的试验研究为基础, 而且还要深入了解高浓度悬浮体中固相颗粒的作用机理. 对于气力式水煤膏雾化喷嘴, 雾化平均粒径 MMD 由下列函数表示:

$$MMD = f(u_l, u_g, \rho_l, \rho_g, \mu_l, M_l, M_g, d_p, \text{喷嘴结构}, \dots) = f(We, On, \frac{M_g}{M_l} d_p, \text{喷嘴结构}, \text{气体动量}, \dots) \quad (1)$$

其中: $We = \frac{\rho_l (u_l - u_g)^2 D_0}{\sigma}$; $On = \frac{We^{0.5}}{Re} = \frac{1}{\sqrt{\rho_l \mu_l D_0}}$; $Re = \frac{D_0 (u_g - u_l)}{\mu_l}$; u_l 为膏体速度; u_g 为气体速度; ρ_l 为液体密度; ρ_g 为气体密度; D_0 为喷口直径; μ_l 为液体粘度; σ 为液体表面张力; M_l 为液体质量流量; M_g 为气体质量流量; d_p 为颗粒粒径.

3 雾化性能影响因素的分析

3.1 韦伯数 We 的影响

韦伯数作为气力雾化的液滴破碎准则被广泛采用,它表示气动力和表面张力的比值.根据气力式喷嘴的具体情况,气流的速度取气孔出口速度在轴线上的分速度,膏体速度取喷嘴出口速度.图3为韦伯数与雾化平均粒径 MMD 的关系,其中 W_t 表示水煤膏含水量的质量分数, PB 为水煤膏中煤颗粒的粗细配比.由图可知,雾化粒径随韦伯数的增加而下降.

3.2 水煤膏粘度的影响

水煤膏具有明显的非牛顿流体特性,对于一定配比水煤膏,其流变性能主要受水煤膏浓度的影响,随着浓度的增加,其粘度增加,非牛顿性增强^[10].图4给出了 $PB = 60:40$ 不同粘度的水煤膏的雾化特性,其中 η_a 为剪切速率为 100 s^{-1} 时的表观粘度.由图可知,随着粘度的增加,雾化颗粒平均粒径增加,水煤膏的雾化质量下降.这是因为在整个气力雾化过程中,粘度始终对膏浆体的形成和破碎起主要的阻碍作用,随着液滴粘度增加,液滴的稳定作用增强,液滴的尺寸变大,雾化质量变差.

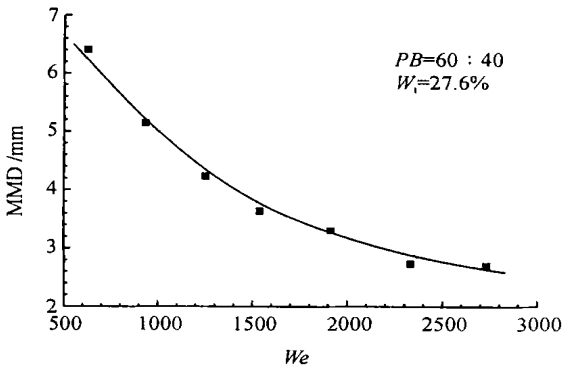


图3 韦伯数 We 对雾化性能的影响

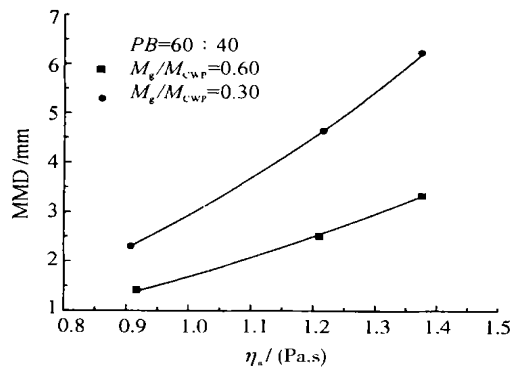


图4 水煤膏粘度对雾化特性的影响

3.3 气膏比的影响

气膏比 (Gas to CWP Ratio) 的确定对于喷嘴的设计和实际应用具有重要的工程价值.图5为气膏比与雾化平均粒径的关系.由图可以看出,随着气膏比的增加,水煤膏的平均粒径减小,气膏比越低,降低幅度越大,当气膏比 (M_g / M_{CWP}) > 0.6 时, MMD 降低的幅度很小.

图6为气膏比与雾化颗粒累积粒径分布的关系.由图可知,水煤膏雾化粒度比原煤的粒径更粗,分布更宽.对于同一粒径 d_p ,水煤膏的雾化滴径的累积分布小于原煤颗粒的累积分布.随着气膏比的增加,粒径分布范围变窄.这一方面说明在雾化浆滴形成过程中细小颗粒存在团聚现象,从而造成雾化颗粒中粗颗粒比例增加,这对于水煤膏的流化床燃烧而言是有利的,适当的颗粒团聚,可以减少飞灰,提高燃烧效率;另一方面表明气耗率对水煤膏雾化的影响是巨大的,它不仅可以减小雾化粒径,而且还影响雾化颗粒的粒径分布.因此,为了防止雾化不良的水煤膏在喷嘴处的滴落,减小雾化颗粒粒径,在低气膏

比时,可以采用提高气膏比的方法,如果气膏比已经足够高时,则应从提高喷嘴动能的角度另外考虑.

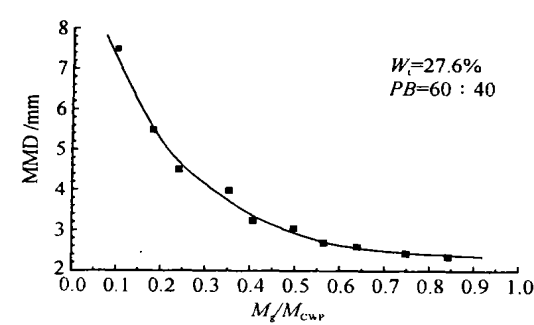


图 5 气膏比对雾化特性的影响

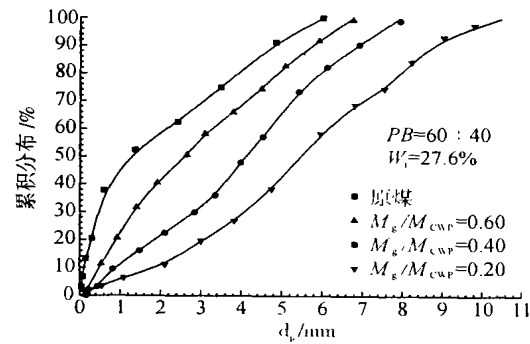


图 6 不同条件下雾化粒子累积分布

3.4 雾化气动量的影响

雾化气动量反映了雾化气对水煤膏的冲击能力,它对雾化性能的影响较大. 气动量越大,冲击能力越强,水煤膏越容易破碎,雾化性能越好. 图 7 给出了雾化气动量与 MMD 的关系. 由图可知,雾化粒径与雾化气动量之间可以用一条曲线表示,随着雾化气动量的增加,雾化粒径下降,当 $M_g u_g / M_{CWP} > 6$ 时,粒径降低幅度很小,据此可以得到计算雾化的方法.

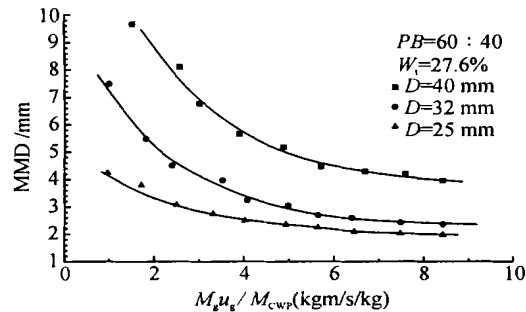


图 7 雾化气动量对雾化特性的影响

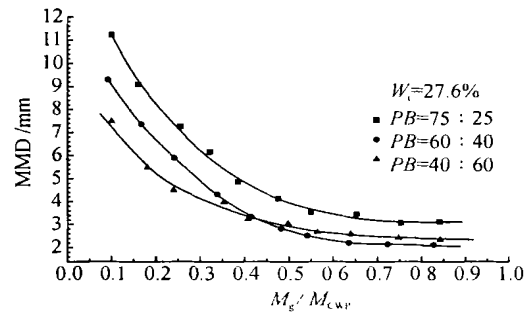


图 8 煤颗粒分布对雾化特性的影响

3.5 煤颗粒粒径分布的影响

煤的粒度分布不仅影响水煤膏的粘度,而且还直接影响水煤膏的雾化粒径分布. 从水煤膏的雾化分散角度出发,要使雾化后粒度分布达到原煤的粒度分布,显然是不可能的,也是没有必要的. 由于细颗粒的团聚作用必然有一部分细小的颗粒与其它颗粒团聚,无法得到雾化,使得最终的雾化粒径大于煤粉颗粒粒径. 大量的研究表明,颗粒配比的不同,颗粒堆积情况差异很大;颗粒堆积越密实,粗细颗粒所形成的空隙越小,液相对颗粒的表面张力越强,颗粒的团聚作用的影响也越大,雾化也越困难,形成的细颗粒可能性就越小^[10].

图 8 给出了不同配比的水煤膏雾化性能的实验结果. 由图可知,不同配比的水煤膏雾化粒径均随气膏比的增加而降低, $PB = 75 : 25$ 的水煤膏雾化粒径最大. 这主要是因为相同浓度条件下,该配比的水煤膏粗颗粒比例最大,颗粒堆积最差,粘度最大. 三种配比的水煤膏对比研究表明:在较低气膏比时,雾化粒径主要受膏体粘度控制,粘度越低,雾化粒径越小;而在高气膏比时,雾化粒径则主要受膏体中煤颗粒粒度分布的制约,粗颗粒越多,雾化粒径越大.

4 结论

(1) 在雾化基本理论的指导下,根据水煤膏的具体特点,提出了水煤膏的喷嘴雾化机理,并具体描述

了水煤膏雾化的一次雾化和二次雾化过程。

(2) 雾化颗粒平均粒度随着水煤膏的粘度的降低而提高,改善水煤膏的配比(粒度分布)不仅可以降低粘度,而且可以提高水煤膏的雾化质量。

(3) 水煤膏雾化质量取决于膏体性质、气膏比、雾化气动量以及煤颗粒分布。气膏比和雾化气动量是影响雾化质量的主要因素,增大气膏比和雾化气动量,雾化平均粒径明显降低。

(4) 分析了诸因素对水煤膏雾化性能的影响,确定了改善雾化质量的方法和最佳设计和操作参数。结果表明:水煤膏喷嘴的最佳设计和操作参数为 $M_g/M_{CWP} > 0.6$ 和 $M_{gu_g}/M_{CWP} > 6$ 。

[参考文献]

- [1] H Takezaki. A method of state feeding coal-water paste into pressurized fluidized bed combustor[C]. Proceeding of 12th International Conference on FBC[A]. 1993: 397~ 401
- [2] 刘前鑫等. 向加压流化床添加水煤膏的试验研究[J]. 燃烧科学与技术, 1997, 3(4): 385~ 387.
- [3] Tsai S C, *et al*, Airblast atomization of micronized coal slurries using a twin-fluid jet atomizer[J]. Fuel, 1991, 70(4): 483~ 490.
- [4] Tsai S C. Airblast atomization of micronized coal slurries using a twin-fluid jet atomizer[J]. Fuel, 1991, 70(4): 483~ 490.
- [5] 吴文林. 假塑性流体的雾化研究 1. 雾化特性的实验研究[J]. 化工机械, 1994, 21: 193~ 197.
- [6] 黄沐辉. 非牛顿流体雾化力学机理研究[J]. 力学学报, 1991, 23(5): 626~ 633.
- [7] 陆勇, 吴树志. 应用 PTV 技术测量脱硫塔内流场颗粒总数及颗粒粒径分布的研究[J]. 石油工业技术监督, 2001, 17(8): 5~ 7.
- [8] Dantec Inc. FlowMap Installation & User's Guide, 1994.
- [9] Pileh M, and Etdman C A. Use of breakup time data and velocity history data predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of a liquid drop[J]. Int. J. Multiphase Flow, 1987, 13(6): 741~ 757.
- [10] 卢平, 章名耀. 增压流化床燃烧用的煤水混合物流变特性研究[J]. 热能动力工程, 2001, 16(5): 488~ 490.

Analysis of Atomizing Mechanism and Contributing Factors of Coal-water Paste Nozzle

Lu Ping¹, Zhang Mingyao²

(1. College of Power Engineering, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC;

2. Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology, Southeast University, 210096, Nanjing, PRC)

Abstract: With the atomizing properties of two-fluid atomizer analysed, the atomizing mechanism of CWP (coal-water paste) nozzle is described in this paper. The effects of every factor on the atomizing properties are analyzed, with the main effects of the CWP atomization summarized and the data for engineering use contributed.

Key words: coal-water paste, atomizing mechanism, PIV

[责任编辑: 刘健]