

液-气喷射紊流混合装置的作用 及其在环境工程的应用*

郭金基¹, 陈海¹, 叶谋平¹, 谢旭时², 王金明²

(1. 中山大学应用力学与工程系, 广东 广州 510275; 2. 广东广源工程公司, 广东 广州 510080)

摘 要: 阐述喷射流体紊流混合装置的作用和应用, 建立两级紊流混合速的液-气喷射器的流体动力学方程组. 由于液-气紊流混合促进烟气含硫化合物与喷射脱硫剂的化学反应, 进一步研究它们对流体的动量及能量方程的影响. 讨论影响脱硫除尘的治理效果的主要因素. 最后给出液-气喷射装置在环境工程中的应用实例.

关键词: 两级紊流混合; 液-气喷射器; 脱硫剂; 化学反应; 动量方程

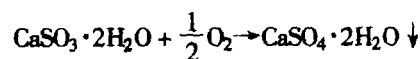
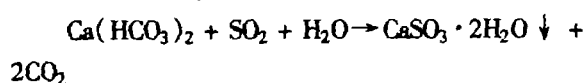
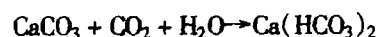
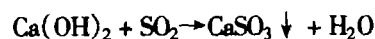
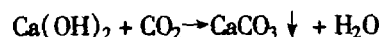
中图分类号: TH12 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2001) 04-0028-04

1 喷射流体紊流混合的研究概述

喷射流体紊流混合的研究时间较长, 由于问题本身的复杂性加上环境工程的应用不断提出新的要求, 仍引起人们的广泛重视. 喷射流体紊流混合装置早期研制成文丘里除尘器^[1]已在烟气除尘治理项目得到应用, 但由于单级紊流混合未能发挥流体动力学的作用, 影响治理效果. 文 [2] 研究液-气喷射紊流方程组, 采用单流体 $K-\epsilon$ 模型, 考虑相应方程属两相流体的紊流掺和. 喷射脱硫剂烟气粉尘脱硫属于液-气(固)两相紊流, 它既有湍流的特性又具有多相流的特性, 并要考虑脱硫剂与含硫化合物的化学反应过程, 在短期内从细观上建立较真实反映含化学反应过程在内的两相湍流机理的模型仍十分困难. 如果我们回避两相流界面的特性参数的突变及本构关系, 仅考虑相间质量、动量及能量的平衡关系和传递交换的规律, 可以建立双流体模型^[3], 这种模型认为液-气(固)有足够的浓度, 两种连续介质在同一时空内重叠、相互作用, 并且是高速、高紊流状态, 化学反应考虑紊动能能量耗散率的影响和质量流率的变化. 若烟气(固)及喷射液体速度及紊流度较低, 可忽略湍流载能运动及其相应的物理量, 用时均运动速度代替脉动速度, 把流体看作不可压缩的, 流体的密度为常量, 分别按液、气(固)建立流体动力学方程和液

-气(固)在紊流混合室的动(冲)量方程, 对研究液-气紊流混合装置的性能更有现实的指导意义.

本文研究两级紊流的液-气(固)喷射的流体动力学方程, 按一维不可压缩、定常流动建立模型, 其难点之一是考虑喷射脱硫剂(液体)与烟气含硫化合物的化学反应, 对流体动力学方程的影响. 事实上, 脱硫剂与烟气中 SO_2 产生化学反应, 现以 CaO 的饱和溶液 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 为脱硫剂, 设想与 SO_2 、 CO_2 的烟气反应过程如下:



化学反应是一种放热过程引起温度的改变, 喷射器接收管的传热引起的温度差产生了单位体积力的作用, 与文 [4] 研究的自然流动十分相似. 文 [4] 指出单独考虑当温度差所造成的密度差为引起运动的惟一原因时, 其每单位的体积力为 $\rho \cdot g \cdot \varphi \cdot \theta$ (式中 ρ 为流体密度, g 为重力加速度, $\varphi = 1/T_m$, T_m 为管内平均温度, θ 为管内、外温度差). 本文考虑脱硫剂与 SO_2 的化学反应释放的热量造成的温度的影响建立模型, 将在后面讨论.

* 基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (980343), 广东省环保科技研究开发资助项目 (粤环 1999-13)

收稿日期: 2000-10-19; 作者简介: 郭金基 (1938-), 男, 教授.

2 液-气(固)喷射器的流体动力学方程

两级紊流混合的液-气(固)喷射器如图1所示.图中1为喷嘴,2为喷嘴座,含脱硫剂的流体由喷头喷射,抽引从喷嘴座2-2截面进入的烟气,在接收管3进行紊流混合,由于喷射流体及烟气速度较低(小于90 m/s),可以假设流体是不可压缩和定常流动的.

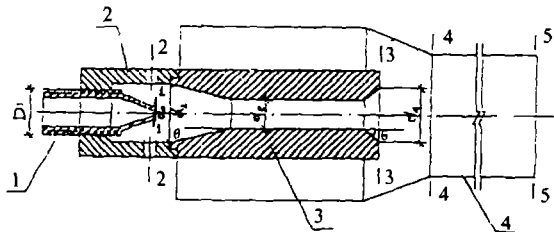


图1 两级紊流混合的液-气喷射器

Fig.1 Liquid-gas ejector with two stage turbulent mix

液体从入口至喷嘴出口1-1截面贝努里能量方程为

$$P_{10} = P_1 + \frac{1}{2} \rho_1 U_1^2 (1 + \zeta_1) \quad (1)$$

式中, P_{10} 为流体全压力(滞止点); P_1 为喷嘴出口压力, ρ_1 为喷射流体的密度, U_1 为喷嘴出口的速度, ζ_1 为局部阻力损失系数.

引射烟气进入2-2截面前的贝努里方程为

$$P_{a0} = P_2 + \frac{1}{2} \rho_a U_2^2 (1 + \zeta_2) \quad (2)$$

式中, P_{a0} 为烟气的全压力(滞止点); P_2 、 U_2 分别为烟气在2-2截面的压力和速度; ρ_a 为烟气(固)密度; ζ_2 为烟气流动过程中局部阻力系数.

引射烟气进入混合管4的4-4截面前的贝努里方程为:

$$P_{a0} = P_4 + \frac{1}{2} \rho_a U_4^2 (1 + \zeta_4) \quad (3)$$

式中, P_4 、 U_4 分别为烟气在4-4截面的压力和速度; ζ_4 为烟气流动过程的局部阻力系数.

设从喷嘴出口到3-3截面之前喷射流体、引射烟气及混合后的流体的质量流量依次记为 G_1 、 G_2 及 G_3 , 则

$$\begin{aligned} G_1 &= \rho_1 U_1 F_1, \quad G_2 = \rho_2 U_2 F_2, \\ G_3 &= \rho_3 U_3 F_3 \end{aligned} \quad (4)$$

由连续性方程可得

$$G_1 + G_2 = G_3 \quad (5)$$

式中, U_3 为混合后流体的速度; ρ_3 为混合后流体的密度; F_1 、 F_2 及 F_3 依次为喷嘴, 2-2截面及接收器的面积.

从2-2到3-3截面流体的动量方程为:

$$\begin{aligned} \rho_1 U_1^2 \cdot F_1 + \rho_a U_2^2 \cdot F_2 - \rho_3 U_3^2 \cdot F_3 = \\ P_3 F_3 - P_2 F_2 - P_1 F_1 - \rho_3 g \varphi_1 \theta_1 l_1 F_3 \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $\varphi_1 = 1/T_{m1}$, T_{m1} 为由脱硫剂与烟气内含硫化化合物的化学反应在接收管增加的温度平均值; θ_1 为接收管内、外温差; l_1 为接收管的长度; $\rho_3 \cdot g \cdot \varphi_1 \cdot \theta_1$ 为化学反应产生的单位体积力; $l_1 \cdot F_3$ 为接收管的体积.

引入记号:

$$\alpha = F_1/F_2,$$

$$\beta = F_1/F_3, \quad n_1 = G_2/G_1 \quad (7)$$

α 、 β 称为第1级抽吸截面比, n_1 称为喷射器第1级紊流混合的引射系数.

将(4)、(5)及(7)式联立, 可得:

$$\begin{aligned} U_2 &= \rho_1/\rho_a \cdot \alpha \cdot U_1 \cdot n_1, \\ U_3 &= \rho_1/\rho_3 \cdot \beta \cdot U_1 (1 + n_1) \end{aligned} \quad (8)$$

将(7)、(8)式代入(6)式, 得

$$\begin{aligned} P_3 = (P_1 + P_2/\alpha) \beta + \rho_3 g \varphi_1 \theta_1 l_1 + \\ \rho_1 U_1^2 (1 + (\rho_1/\rho_a) \alpha n_1^2) \beta - \\ \rho_1 U_1^2 (\rho_1/\rho_3) \beta^2 (1 + n_1)^2 \end{aligned} \quad (9)$$

混合流体在接收管扩压段出口, 仍是一股动量流体, 进入混合管4, 继续抽吸烟气进行第2级紊流混合, 设抽吸烟气的质量流量及混合管出口的质量流量依次记为 G_4 、 G_5 则:

$$G_4 = \rho_a \cdot U_4 \cdot F_4, \quad G_5 = \rho_5 \cdot U_5 \cdot F_5 \quad (10)$$

式中, U_4 、 F_4 依次为4-4截面的烟气速度及截面面积; U_5 、 F_5 依次为5-5截面的混合流体速度及截面面积.

由连续性方程可得:

$$G_3 + G_4 = G_5 \quad (11)$$

引入记号:

$$\begin{aligned} \lambda &= F_3/F_4, \quad \mu = F_3/F_5, \\ n_2 &= G_4/G_3 \end{aligned} \quad (12)$$

λ 、 μ 称为第2级抽吸截面比; n_2 称为喷射器第2级紊流混合的引射系数.

由(10)至(12)式联立可得:

$$\begin{aligned} U_4 &= \rho_3/\rho_a \cdot \lambda \cdot U_3 \cdot n_2, \\ U_5 &= \rho_3/\rho_5 \cdot \mu \cdot U_3 (1 + n_2) \end{aligned} \quad (13)$$

从4-4到5-5截面流体的动量方程为:

$$\rho_3 U_3^2 \cdot F_3 + \rho_a U_4^2 \cdot F_4 - \rho_5 U_5^2 \cdot F_5 = P_5 F_5 - P_3 F_3 - P_4 F_4 - \rho_5 g \varphi_2 \theta_2 l_2 F_5 \quad (14)$$

式中, $\rho_5 \cdot g \cdot \varphi_2 \cdot \theta_2$ 为化学反应在混合管内产生的单位体积; l_2 为混合管的长度, $l_2 \cdot F_5$ 为混合管的体积。

将(12)、(13)式代入(14)式化简后可得

$$P_5 = (P_3 + P_4/\lambda)\mu + \rho_5 g \varphi_2 \theta_2 l_2 F_5 + \rho_3 U_3^2 (1 + \rho_3/\rho_a \cdot \lambda u_2^2)\mu - \rho_3 U_3^2 (\rho_3/\rho_5)\mu^2 (1 + n_2)^2 \quad (15)$$

依据(5)、(7)、(11)及(12)式可得:

$$G_5/G_1 = (1 + n_1)(1 + n_2) \quad (16)$$

(9)、(15)及(16)式是决定两级紊流混合液-气喷射性能的重要公式。

3 讨论及应用

从以上两级紊流混合液-气喷射器的计算结果应用于烟气脱硫除尘项目中去,影响治理效果的主要因素讨论如下:

(1) 液-气喷射器的几何尺寸参数对喷射器的性能影响很大。第1级紊流混合后速度 U_3 (见(8)式)与 β 关系很大。 β 由喷出出口面积与接收管内喉管的面积比。若能选取最佳的 β 值,可以增大引射系数 n_1 同时提高 U_3 , 保证从接收管 d_3 出口的流体是动量流。第2级紊流混合后速度 U_5 从(8)、(13)式可看出,与 μ 、 β 关系很大, $\mu = F_3/F_5$ 所决定, μ 的选择决定了引射系数 n_2 , 加强混合流体的紊流掺和。从(16)式可看出,液-气喷射器输出的质量流量 G_5 比单级液-气喷射器的质量流量增大了 $(1 + n_2)$ 倍。

(2) 两级喷射器输出的压力 P_5 比单级喷射器输出的压力 P_3 明显不同。输出压力 P_5 与喷射器的几何尺寸参数 α 、 β 、 l_1 、 λ 、 μ 、 l_2 和流体的密度 ρ_1 、 ρ_a 及引射系数 n_1 、 n_2 有关;同时还应考虑到化学反应的释放能量过程的温度变化状况。

(3) 将脱硫剂通过入喷射流体,经喷射抽吸烟气在接收管的喉管及混合管进行紊流混合,由于考虑单流体一元流动的模型,未能考虑液、气之

间化学反应过程产生的密度,质量流率的变化,但考虑化学反应过程的热量变化引起流场中质量密度不均匀产生附加流动,计算单位体积力。具体做法:① 实测烟气 G_1 、 G_2 (n_1 , n_2) 和烟气含 SO_2 、 CO_2 的浓度,计算出处理烟气内 SO_2 、 CO_2 的含量,同时实测出脱硫剂饱和溶液 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的剂量 G_1 ,估算出喷射脱硫剂和烟气含硫化化合物的化学反应释放的热量,用体积(质量)流量加权分配的方法估算出单位体积(质量)热量的改变转化为温度变化,决定 φ_1 和 φ_2 值;② 实测烟气流量 G_2 、 G_4 及喷射脱硫剂的剂量 G_1 ,用高灵敏的温度计实测化学反应过程的温度的增量,算出单位体积(质量)温度的变化决定 φ_1 和 φ_2 值。从(6)、(14)式看出,还应测量出接收管及混合管的内外温度差 θ_1 和 θ_2 才能进行数值计算。

本文首次建立喷射流体两级紊流混合的流体动力学方程,研究脱硫剂与烟气含硫化化合物的化学反应对流体动力学方程的影响,研制液-气喷射两级紊流混合器,应用于烟气紊流混合滤清装置,该装置如图2所示,烟气由管道进入喷气喷射器,经两级紊流混合及喷雾流体混合进入旋流分离器分离和滤网吸附。已研制成功柴油汽化炉2炉头的火烟紊流混合滤清器,经环保监测部门用林格曼仪检测,烟气排入量 $800 \text{ m}^3/\text{h}$,处理前为4~5度(冒出黑烟),经本装置治理后为0~1度,达到良好的效果。本装置已申请国家专利,具有重要的应用价值。

参考文献:

- [1] 辛承梁.实用喷射技术[M].北京:科学出版社,1993.57-59.
- [2] 郭金基,张应元.污水处理系统紊流方程及其应用[J].中山大学学报(自然科学版),1992,31(3):1-7.
- [3] 郭金基,刘守圭,杨宗炼,等.管道粉尘气流的紊流方程组及其在环境治理中的应用[J].中山大学学报(自然科学版),1998,37(3):22-27.
- [4] L.普朗特.流体力学概论[M].郭永怀等译.北京:科学出版社,1974.

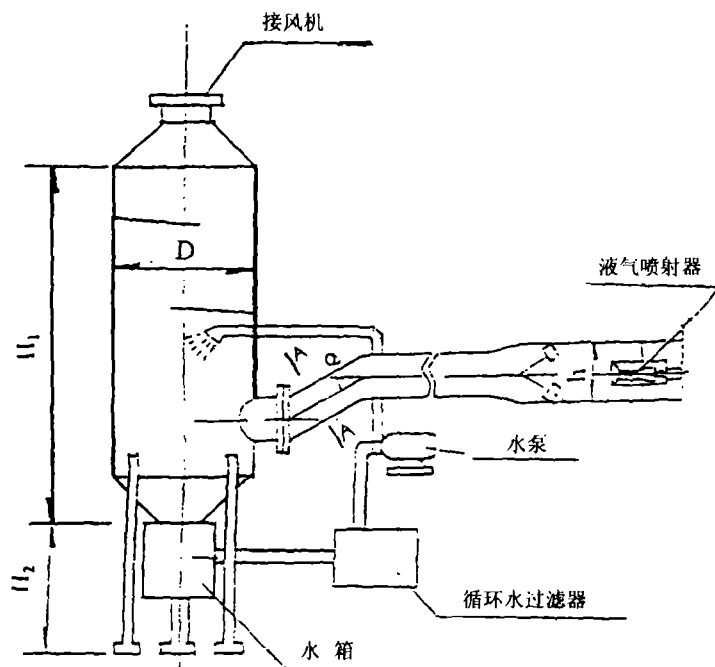


图 2 烟气紊流混合物滤清装置

Fig.2 The Signal figure of the gas filtering equipment with trubulent mix

The Function of the Turbulent Mixed Equipment of Liquid-gas Jet and Its Application to Environmental Engineering

GUO Jin-jī¹, CHEN Hai¹, YE Mou-ping¹, XIE Xu-shi², WANG Jin-ming²

(1. Department of Applied Mechanics and Engineering, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China

2. Guangdong Guangyuan Engineering Company, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The function and application of the turbulent mixed equipment of the jet fluid are presented. The fluid dynamics equations of the liquid-gas ejector with two stage turbulent mix are established. Because liquid-gas trubulent mix advances the chemical reaction of flue gas contained sulfide with jet separating sulfur agent, the change in the equations of the fluid momentum and energy is studied. The main factors related to the effect of separating sulfur and dust are discussed. Finally, examples are given of liquid-gas ejector's application in environmental engineering.

Keywords: two stage turbulent mix; liquid-gas ejector; separating sulfur agent; chemical reaction; momentum equation