

对喷流除尘性能影响因素的正交实验研究

张明星, 陈海焱, 颜翠平, 陈国平

(西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010)

摘 要: 为了避免由于水平式对喷流结构造成的部分粉尘颗粒粘附在喷嘴对面的器壁上而引起的除尘效率降低的问题, 采用倾斜式对喷流除尘技术收集硫酸铵和硝酸铵混合物粉尘, 并用正交表 $L_4(4^5)$ 安排实验。对喷嘴速度、含尘浓度、喷嘴水平间距、倾斜角度和雾化水润湿含尘气流的耗水量这五个影响除尘性能的主要参数各作了 4 个水平的考察, 得到了该条件下的最优方案: 喷嘴速度 25~27 m/s、含尘浓度 0.55~0.65 kg/m³、喷嘴间距 0.2~0.25 m、倾斜角度 40~60°、耗水量 0.21~0.25 kg/kg(粉尘)。实验证明: 该条件下的除尘效率最高可达 98.6%, 而且雾化水润湿含尘气流对除尘效率影响最大, 并观察得出倾斜式对喷流能有效避免粉尘颗粒粘附在器壁上。

关 键 词: 对喷流除尘; 除尘效率; 影响因素; 正交实验; 倾斜式

中图分类号: X701.2 文献标识码: A

1 引 言

对喷流理论 (Impinging Stream) 是 Elperin 于 20 世纪 60 年代初提出并进行实验的^[1~3], 但直到 1975 年才由俄罗斯的 Lainer 将其用于除尘^[4]。现有的研究主要是针对氧化铝粉尘和磷酸盐粉尘的特性而得出的结论^[4~8], 而对特性不同的其它粉尘, 国内外均尚未见报道, 这就限制了对喷流除尘技术的推广应用。因为对喷流除尘技术对粉尘特性的依赖很强^[4,6], 不同粘附性粉尘的最优除尘条件很可能不一样。同时, 作者用水平式对喷流除尘技术收集硫酸铵和硝酸铵混合物粉尘并在雾化水润湿含尘气流的条件下观察到^[9]: 有相当一部分粉尘颗粒由于自身的粘附性而粘附在喷嘴对面的除尘器内壁上, 而且对其润湿程度越高, 粉尘在除尘器内壁上的沉积就越多。这主要是因为气流对粉尘颗粒诱导的影响而导致粉尘颗粒未在对喷腔内形成有效地来回振荡, 这与喷嘴的形式和风速有关, 因此本文采用倾斜式对喷流结构进行实

验, 结果表明能有效避免这类问题。

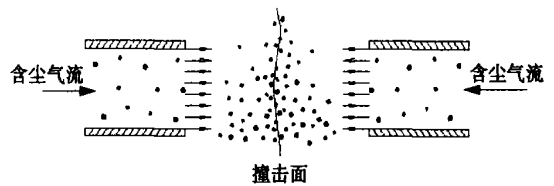


图 1 对喷流原理

为进一步拓展对喷流除尘技术的应用领域和优化其结构来避免水平式对喷流结构所造成的问题, 本文用倾斜式对喷流除尘技术硫酸铵和硝酸铵的混合物粉尘, 并用正交实验方法对影响除尘效率的 5 个因素: 喷嘴速度、含尘浓度、喷嘴间距、倾斜角度和润湿含尘气流的耗水量各作了 4 个水平的考察, 分析得出了最优除尘条件和该条件下的除尘效率以及对除尘效率影响最大的因素, 并通过实验观察倾斜式对喷流结构对避免上述问题的有效性。

2 实验部分

2.1 材料、仪器及装置

实验采用电子束脱硫脱硝的副产物硫酸铵和硝酸铵的混合物, 经堆积放置后粒径有所增大, 粒径分布为 65% 在 10~60 μm 之间, 30% 在 60~100 μm 之间, 5% 是大于 100 μm 或小于 10 μm 。选择这样的粒径分布主要是因为对喷流除尘器的收集粒径范围为大于 10 μm 的粉尘。

实验仪器主要有: 自行设计的微型螺杆加料机 (采用步进电机驱动, 带变频器调节加料量, 精度 $\pm 0.2 \text{ kg/h}$); HTD-12-1 型风机 (风量 12 m³/min, 压头 6 860 Pa, 配变频器调节喷嘴风速); 自行设计的雾化喷嘴; ESC 型 P-5 烟尘监测仪 (最低粉尘浓

收稿日期: 2006-01-15; 修订日期: 2006-06-13

基金资助: 国家“863”计划基金资助项目 (2001AA 642010)

作者简介: 张明星 (1982-) 男, 四川渠县人, 西南科技大学在读硕士, 第二作者为西南科技大学土木工程建筑学院教授

度限制 0.5 mg/m^3); LGW 型标准文丘里管流量计 (DN=200 mm 和 DN=100 mm, 压力 0.25 MPa)。

实验流程图见图 2, 参数为: 对喷腔 $800 \text{ mm} \times$

$800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$, 喷嘴 $\phi=80 \text{ mm}$, 出风口 $\phi=200 \text{ mm}$, 卸灰口 $\phi=80 \text{ mm}$, 雾化水喷嘴 $\phi=2 \text{ mm}$, 加料口 $\phi=60 \text{ mm}$ 。

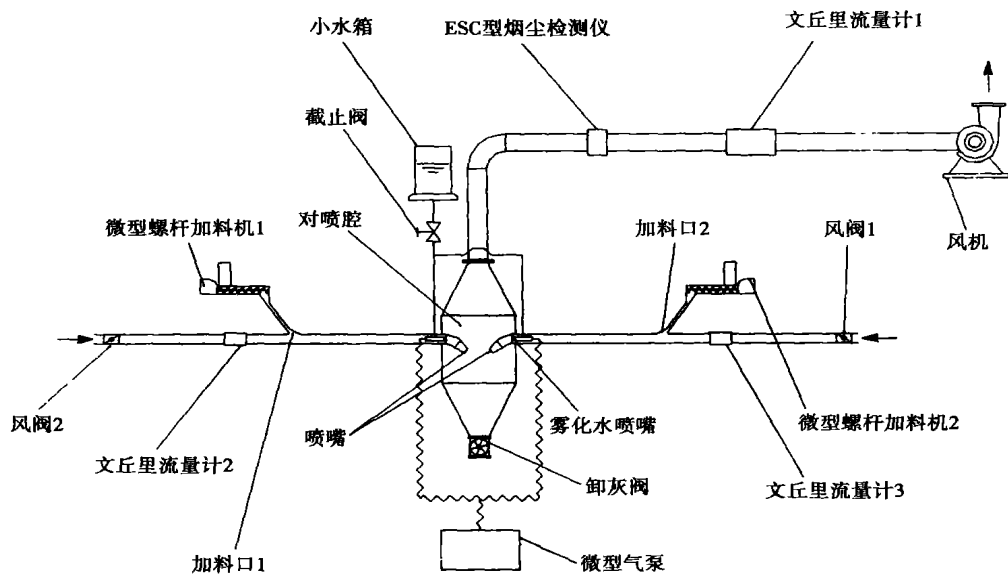


图 2 实验流程图

2.2 实验原理与方法

由于安装误差, 实验前须标定两进口管的加料量和风量。加料量通过调节微型螺杆加料机的步进电机转速来标定; 风量根据文丘里流量计 2、3 所测得的风量来调节两风管进口处的风阀, 使两者的不平衡率小于 5%。

实验条件的调节方法: 喷嘴风速通过风机所配变频器调节风机电机的转速来调节风机的风量, 从而调节喷嘴风速; 含尘浓度通过调节微型螺杆加料机的步进电机转速来调节; 喷嘴间距联接喷嘴的螺纹调节; 倾斜角度通过更换已做好的相应角度的喷嘴来调节; 耗水量由水箱出口处的截止阀调节。润湿含尘气流采用微型气泵压缩空气通过雾化水喷嘴形成高速气流, 诱导水箱中的水进行雾化。

实验数据的采集方法: 喷嘴风速以文丘里流量计 1 所测流量均到两喷嘴后计算得出的喷嘴风速为

准, 因为加料和喷雾化水都有可能增加流经喷嘴的流量; 含尘浓度由固定时间内的加料量除以流经喷嘴的风量而得; 耗水量由对水箱的称重而得; 除尘效率则采取在固定时间内收集到的粉尘除以这段时间内的加料量并与烟尘监测仪所测结果相比较, 保证两个值的误差小于 5%。实验过程中采用单因素调节法操作并分析各参数对除尘效率的影响。

3 结果与讨论

3.1 正交实验设计

根据倾斜式对喷流除尘技术收集硫酸铵和硝酸铵混合物粉尘的实验条件, 采用正交表 $L_{16}(4^5)$ 安排实验^[10], 实验选取影响除尘效率的 5 个主要因素: 喷嘴速度、含尘浓度、喷嘴间距、倾斜角度和喷雾化水润湿含尘气流的耗水量, 对每个因素各作了 4 个水平, 如表 1 所示。

表 1 5 个影响因素及相应的水平

	喷嘴速度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	含尘浓度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	喷嘴间距 / m	倾斜角度 / $^\circ$	耗水量 / $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (粉尘)
水平 1	20	0.2	0.1	0	0
水平 2	26	0.4	0.2	20	0.1
水平 3	34	0.6	0.3	30	0.21
水平 4	40	0.8	0.4	40	0.3

根据正交实验相关原理,用正交表 $L_{16}(4^5)$ 安排实验,实验次数、实验条件、除尘效率及数据分析见表 2。

表 2 对喷流除尘效率影响因素的正交实验及分析 $L_{16}(4^5)$

实验编号	喷嘴速度 $/m \cdot s^{-1}$	含尘浓度 $/kg \cdot m^{-3}$	喷嘴间距 $/m$	倾斜角度 $/^\circ$	耗水量 $/kg \cdot kg^{-1}$ (粉尘)	除尘效率 $/\%$
1	1(20)	1(0.2)	1(0.1)	1(0)	1(0)	48.65
2	1(20)	2(0.4)	2(0.2)	2(20)	2(0.1)	80.17
3	1(20)	3(0.6)	3(0.3)	3(30)	3(0.21)	88.46
4	1(20)	4(0.8)	4(0.4)	4(40)	4(0.3)	85.20
5	2(26)	1(0.2)	2(0.2)	3(30)	4(0.3)	86.13
6	2(26)	2(0.4)	1(0.1)	4(40)	3(0.21)	89.37
7	2(26)	3(0.6)	4(0.4)	1(0)	2(0.1)	79.43
8	2(26)	4(0.8)	3(0.3)	2(20)	1(0)	74.61
9	3(34)	1(0.2)	3(0.3)	4(40)	2(0.1)	78.60
10	3(34)	2(0.4)	4(0.4)	3(30)	1(0)	72.86
11	3(34)	3(0.6)	1(0.1)	2(20)	4(0.3)	84.25
12	3(34)	4(0.8)	2(0.2)	1(0)	3(0.21)	80.36
13	4(40)	1(0.2)	4(0.4)	2(20)	3(0.21)	76.76
14	4(40)	2(0.4)	3(0.3)	1(0)	4(0.3)	78.37
15	4(40)	3(0.6)	2(0.2)	4(40)	1(0)	78.18
16	4(40)	4(0.8)	1(0.1)	3(30)	2(0.1)	76.54
K_1	3.024 8	2.901 4	2.988 5	2.868 1	2.743 0	Σ 1258
K_2	3.295 4	3.207 7	3.248 4	3.157 9	3.147 8	
K_3	3.160 7	3.303 2	3.200 4	3.240 3	3.349 5	
K_4	3.098 9	3.167 5	3.142 5	3.313 5	3.339 5	
k_1	0.756 2	0.725 4	0.747 1	0.717 0	0.685 8	
k_2	0.823 9	0.801 9	0.812 1	0.789 5	0.787 0	
k_3	0.790 2	0.825 8	0.800 1	0.810 1	0.837 4	
k_4	0.774 7	0.791 9	0.785 6	0.828 4	0.834 9	
极差	0.067 7	0.100 5	0.065 0	0.111 4	0.151 6	
最优方案	$A_2(26 m/s)$	$B_3(0.6 kg/m^3)$	$C_2(0.2 m)$	$D_4(40^\circ)$	$E_3(0.21 kg/kg(粉尘))$	98.6

3.2 结果与讨论

为了更清楚地考察各因素对除尘效率的影响,我们将除尘效率的平均值(k_1, k_2, k_3, k_4)随各因素 4 个水平的变化情况用图 3 表示出来。从图 3 中可以看出除尘效率与各因素的关系。

除尘效率随喷嘴风速的增加而增大,但当喷嘴风速超过 $25 \sim 27 m/s$ 后,由于粉尘颗粒在相互碰撞之后还未来得及团聚就已被气流带走而使除尘效率降低;随含尘浓度的增加而增大,但超过 $0.55 \sim 0.65 kg/m^3$ 后,会由于对喷腔分离能力不足而使部分粉尘颗粒并未在撞击区形成来回振荡就已被气流带出而导致效率下降;随喷嘴间距的增加而增大,当间距为 $0.2 \sim 0.25 m$ 时的除尘效率最高,大于或小于该值

会减弱粉尘颗粒在撞击区的来回振荡和团聚效应,从而导致除尘效率的降低;随倾斜角度的增加而增大,是因为倾斜式喷嘴增加了粉尘颗粒在撞击区的停留时间,有利于粉尘颗粒之间的相互碰撞和团聚;随雾化水润湿含尘气流耗水量的增加而增大,但超过 $0.2 \sim 0.25 kg/kg(粉尘)$ 后除尘效率并没有显著变化,主要是由于粉尘颗粒的吸水能力是一定的,超过最优水量后再增加水量对除尘效率并不会太大影响;

由各因素的总趋势可以看出,最优实验条件:喷嘴风速 $25 \sim 27 m/s$ 、喷嘴间距 $0.2 \sim 0.25 m$ 、含尘浓度 $0.55 \sim 0.65 kg/m^3$ 、倾斜角度 $40 \sim 60^\circ$ 、润湿含尘气流耗水量 $0.21 \sim 0.25 kg/kg(粉尘)$ 。

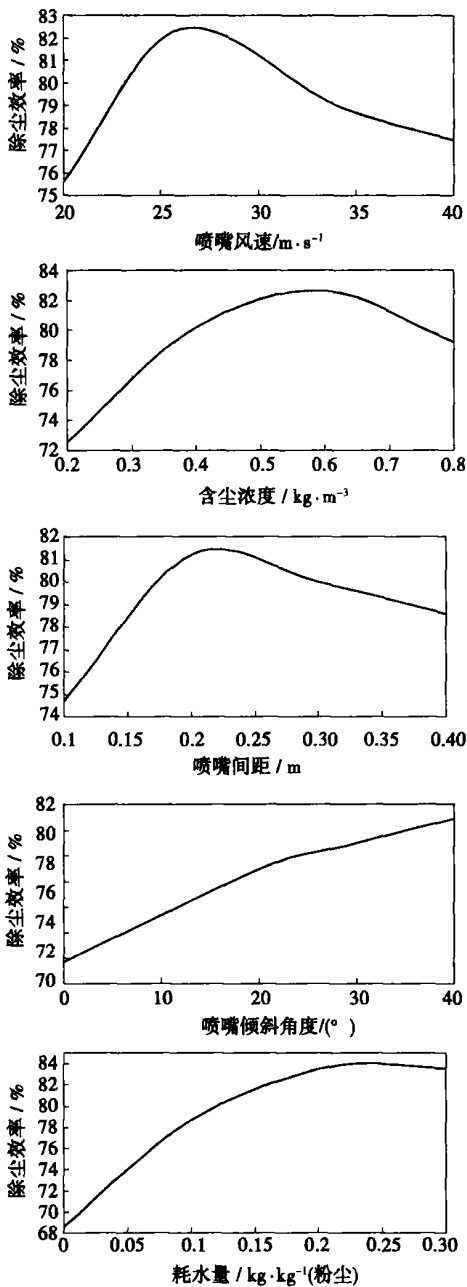


图3 各因素水平变化对实验结果影响的趋势

从表2中还可以看出,最优实验条件为: A_2 、 B_3 、 C_2 、 D_4 、 E_3 ,其中A、B、C、D、E分别代表表头的5个因素,角标数字表示第几水平,与上面理论讨论的结果一致。从表2中的极差分析可以看出,因素E润湿含尘气流的数值最大,根据正交实验法原理可知它对实验的影响最大,是除尘效率最主要的影响因素。该因素在取第三水平(0.21 kg/kg(粉尘))时除尘效率最高;其次是因素D含尘浓度和B含尘浓度,分别取第四水平(40°)和第三水平时除尘效率最高,第三是因素A喷嘴风速,取第二水平(26 m/s)。

时除尘效率最高;对除尘效率影响最小的是因素C喷嘴间距,取第二水平(0.2 m)时除尘效率最高。但由于该方案不在已做过的16个实验中,为此我们按此方案进行了实验,结果表明:该条件下的除尘效率最高可达98.6%,比前面已做的任一组的除尘效率都高,说明该方案的确是最佳除尘条件。

由于最优方案中的喷嘴倾斜角度是最高的,为考察喷嘴在更大倾斜角度情况下的除尘效率,又做了两次实验(倾斜角度分别为50°和60°),喷嘴风速、喷嘴间距、含尘浓度和润湿含尘气流耗水量分别为26 m/s、0.3 m、0.5 kg/m³和0.21 kg/kg(粉尘),实验所得的除尘效率分别为98.3%和98.8%,与最优方案下的除尘效率并没有显著的变化。这主要是因为倾斜式对喷流结构增大了粉尘颗粒在撞击区的停留时间,有利于粉尘颗粒在撞击区来回振荡和相互团聚,但对喷腔的分离能力有限,当喷嘴倾斜角度大于极限值时,对喷腔并不能再增加两股含尘气流中粉尘颗粒的碰撞和团聚效应,因而除尘效率并不会会有显著的变化。这也更进一步证实了上面所得的最优方案是最佳除尘条件,用正交实验法来确定最佳除尘条件是可行的。

4 结论

(1) 倾斜式结构能有效避免由于水平式对喷流而结构造成的粉尘颗粒粘附在喷嘴对面器壁上的问题。

(2) 实验证明用正交实验方法确定最佳除尘条件是可行的,实验确定的最佳除尘条件为:喷嘴风速25~27 m/s、含尘浓度0.55~0.65 kg/m³、喷嘴间距0.2~0.25 m、倾斜角度40~60°、润湿含尘气流耗水量0.21~0.25 kg/kg(粉尘),该最佳除尘条件下的除尘效率最高可达98.6%。

(3) 实验还证明对除尘效率影响最大的因素是雾化水润湿含尘气流和倾斜角度,能使除尘效率增加10%~15%,可利用此特性进一步拓展对喷流除尘技术的应用领域。

参考文献:

- [1] TAMIR A. 撞击流反应器—原理和应用[M]. 伍沅,译. 北京: 化学工业出版社, 1996.
- [2] ELPERIN I T. Heat and mass transfer in opposing currents[J]. *Energy Physics* 1961, 6: 62-68.
- [3] ELPERIN I T. Transport process in opposing jets[M]. Minsk: Naykai Tekhnica, 1972.

- [4] LAINER A I, ISRAFILOV T D, ELPERIN I T, *et al.* Study of counter-flow trapping of alunite dust[J]. *The Soviet Jour of Non-Ferrous*, 1975, **48**: 43-45.
- [5] LAINER A I, LAINER YU A, ELPERIN I T, *et al.* Investigation of the process of trapping of roasted and reduced aluminium-oxide dust in impinging jets[J]. *Izvestia Vyshich Uchebnich Zavedeni Non-Ferrous Metallurgy*, 1975, **6**: 51-53.
- [6] BERMAN YULI, TAMIR ABRAHAM. Experimental investigation of phosphate dust collection in impinging stream[J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1996, **74**(6): 817-821.
- [7] BERMAN YULI, TAMIR ABRAHAM. Coalescence model of particles in coaxial impinging stream[J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1996, **74**(6): 822-833.
- [8] BERMAN YULI, TAMIR ABRAHAM. Kinetics of droplets' sedimentation in a continuous gravity settler[J]. *Chemical Engineering Science*, 2003, **58**(10): 2089-2102.
- [9] 张明星, 陈海焱, 王永强. 对喷流除尘技术在收集硫酸铵和硝酸铵粉尘中的应用研究[J]. *安全与环境学报*, 2006, **74**(6): 61-63.
- [10] 茆诗松, 周纪芴, 陈颖. 实验设计[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004.

(何静芳 编辑)

新技术 新产品

过度铝化的 MCrAlY 涂层的机械性能分析

《ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power》2005 年 10 月号比较了过度铝化的 MCrAlY 热障涂层的机械性能, 该涂层是为了防止在燃气轮机部件范围内的高温腐蚀和氧化利用真空等离子喷涂过程涂敷的。

最近, 使用过度铝化的 MCrAlY 涂层来进一步改进高温抗氧化性, 但铝化的 MCrAlY 涂层的机械性能尚未完全弄清楚。

从厚的真空等离子喷涂的涂层机械切削下五种独立的 MCrAlY 试样 (CoCrAlY, CoNiCrAlY, CoNiCrAlY+Ta, NiCrAlY, NiCoCrAlY), 也使用了经过热处理的 MCrAlY 试样和热处理后过度铝化的试样 (Al-Cr-Al₂O₃-NH₄Cl 组合装箱, 1 173~1 273 K, 10 h)。

试验结果表明, 在真空等离子喷涂 (VPS) 的 MCrAlY 涂层中沉淀的铝化合物的体积份额和由过度铝化处理引起的残余应力对机械性能有重要的影响。与 VPS MCrAlY 涂层比较, 过度铝化的 MCrAlY 涂层的维氏硬度和杨氏模数表明有更高的值。由铝化处理的过度铝化的 VPS MCrAlY 涂层的弯曲强度有减小的倾向, 并且在 VPS MCrAlY 涂层中沉淀的铝化合物的体积份额有增加的倾向。

也已经证实, 铝化层本身的弯曲强度随在 VPS MCrAlY 涂层内沉淀的铝化合物体积份额的增加而减小。这些倾向是由脆性沉淀物 (如 NiAl 和/或 CoAl 金属互化物) 引起的。

(吉桂明 供稿)

对喷流除尘性能影响因素的正交实验研究 = An Orthogonal Experimental Study of Factors Affecting Dust Removal Performance by Counter Jet Flows [刊, 汉] / ZHANG Ming-xing, CHEN Hai-yan, YAN Cui-ping, et al (Environment and Resource College under the Southwest University of Science and Technology, Mianyang, China, Post Code: 621010) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(5). — 500 ~ 504

A decrease in dust removal efficiency may be caused by the use of a horizontal type counter jet-flow structure, resulting in a portion of dust particles being adhered to equipment walls opposite to spray nozzles. To cope with the above problem, an inclined-type counter jet flow-based dust removal technique was adopted to collect dust particles of the ammonium sulfate and ammonium nitrate mixture with an orthogonal table $L_{16}(4^5)$ being utilized to optimize experimental parameters. Investigations were performed at four levels of magnitude respectively for the five main parameters affecting the dust removal performance, namely, nozzle velocity, dust-laden concentration, horizontal spacing of nozzles, inclination angle and water consumption of atomized water spray for moistening dust-laden gas flows. As a result, an optimum scheme was identified as follows: nozzle velocity 25 ~ 27 m/s, dust-laden concentration 0.55 ~ 0.65 kg/m³, spacing of spray nozzles 0.2 ~ 0.25 m, inclination angle 40 ~ 60 degrees and water consumption 0.21 ~ 0.25 kg for each kilogram of dust. The experiments have proved that the dust removal efficiency under the above condition can attain a maximum of 98.6% and the moistening of dust-laden gas flow by spraying atomized water has the greatest impact on the dust removal efficiency. Through observations, it has been found that the inclined-type counter jet flow can effectively avoid the adhesion of dust particles on the equipment wall surfaces. **Key words:** counter jet flow for dust removal, dust removal efficiency, influencing factors, orthogonal experiment, inclination type

压力式螺旋型喷嘴雾化特性实验研究 = An Experimental Study of Pressure-type Spiral Nozzle Atomization Characteristics [刊, 汉] / LIU Nai-ling (Thermal Energy Engineering College under the Shandong Architectural Engineering University, Jinan, China, Post Code: 250014), ZHANG Xu (Mechanical Engineering College under the Tongji University, Shanghai, China, Post Code: 200092) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(5). — 505 ~ 507

Liquid atomization represents a most important scientific issue playing a key role in the study of two-phase flows. Being widely used in energy and power supply units as well as in environmental engineering projects, it is of major significance to conduct a systematic study of the liquid atomization. A kind of pressure type nozzles, the spiral nozzles can provide a fine and dense liquid mist and have found relatively widespread applications. A criterion relationship featuring the liquid droplet diameters of spiral nozzles has been established by using a dimensional analytic method. An empirical formula applicable to several kinds of diameters (D_{32} , $D_{0.1}$, $D_{0.5}$, $D_{0.9}$) of TF-type nozzle atomized particles were regressed by utilizing a least square method. The results show that the empirical formula thus regressed is characterized by a comparatively good correlation. Through the formula one can predict the diameters of particles at the nozzle outlet, thus providing a theoretical basis for the design and application of spiral type nozzles. **Key words:** spiral type nozzle, atomization characteristics, atomization similarity criterion, empirical formula

脉冲流光电晕放电反应器中二次流光能量的研究 = A Study of the Secondary Streamer Energy in a Pulse-streamer Corona-discharge Reactor [刊, 汉] / DONG Bing-yan, XIE Wen-juan, ZHANG Da-chao (Environmental and Architectural Engineering College under the Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, China, Post Code: 341000), WU Yan (Electrostatic and Special Power Source Research Institute under the Dalian University of Science and Technology, Dalian, China, Post Code: 116024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(5). — 508 ~ 511

An experimental study was conducted of the impact of the wire-wire spacing, wire-plate spacing, pulse-formation capacitance and primary voltage of a wire-plate type pulse-streamer corona-discharge reactor on secondary streamer energy and