

# 空气滤清器性能试验台气溶胶特性

林忠平, 吴昌甫, 李 钊

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 利用 Welas-2000 气溶胶粒径谱仪, 通过雾化效果对比实验分别探讨了气液比、喷雾溶液的动力粘度、表面张力等物理性质以及压缩空气的压力、速度、密度等参数对发生气溶胶浓度、粒径分布及其分散度的影响, 通过理论分析计算, 验证了实验得到的雾化液滴 Sauter 平均直径及其粒径分布的经验公式。

**关键词:** 气溶胶特性; Sauter 平均直径; 粒径分布; 气液比; 动力粘度; 表面张力

**中图分类号:** O 351.2

**文献标识码:** A

## Aerosol Characteristics in Test Rig for Air Cleaner Performance

LIN Zhongping, WU Changfu, LI Zhao

(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** A series of experiments based on aerosol spectrometer Welas-2000 were carried out to study the aerosol characteristics. An investigation was made into the influence of the factors such as gas-liquid mass flow rate, dynamic viscosity, surface tension of spray solution and the pressure, velocity, and density of compressed air on the aerosol concentration, size distribution and its dispersion. The empirical formulae for calculating the Sauter mean diameter and size distribution of atomization droplet were developed and validated.

**Key words:** aerosol characteristics; Sauter mean diameter; size distribution; gas-liquid mass flow rate; dynamic viscosity; surface tension

多分散相气溶胶发生器对于空气滤清器性能试验装置是不可或缺的, 为了测试空气滤清器的计数效率, 需要均匀、稳定、浓度及粒径分布可控的多分散相气溶胶, 因而有必要分析气溶胶的制备及其影

响因素。本文根据《道路车辆-乘驾室用空气滤清器》(QC/T795—2007)<sup>[1]</sup>的相关要求, 针对一种新型多分散相气溶胶发生喷嘴, 采用粒径测量范围宽、通道多、浓度上限高的 Welas-2000 气溶胶粒径谱仪, 通过雾化效果对比实验, 分别探讨压缩空气与喷雾溶液之间的气液比、喷雾溶液的动力粘度、表面张力等物理性质以及压缩空气的压力、速度、密度等参数对发生气溶胶浓度、粒径分布及其分散度的影响。

## 1 气溶胶发生器

为了对空气滤清器的过滤性能进行深入研究, 2010 年同济大学与相关合作单位联合研制了“空气滤清器性能试验装置”及相应的多分散相气溶胶发生装置, 采用的气溶胶发生喷嘴是一种气-液二流外混式喷嘴, 即外管走气体, 内管走液体, 气体与液体在喷嘴出口处掺混, 如图 1 所示。压缩空气从环隙中高速喷出, 产生的强大气动力作用和伯努利效应使喷嘴出口区域形成负压或者较低压力场, 从而卷吸 KCl 喷雾溶液。同时, KCl 溶液在自身的位置势能作用下以一定的速度流下, 但该速度与气流速度相差 70 倍以上, 如此大的相对速度使得气液之间产生较强的摩擦力和剪切力, 液体在瞬间被拉成一条条细长的液束, 并在其较细处很快断裂而形成微小的雾滴<sup>[2-3]</sup>。同时经干燥的压缩空气迅速吸收蒸发 KCl 溶液中的水分, 产生具有一定粒径分布的 KCl 晶体颗粒, 与测试主管道中的实验气流形成气固两相流。

## 2 气溶胶特性实验

对于气流式雾化器, 雾滴的平均直径  $D$  是衡量雾化性能的重要指标。雾滴平均直径是多个因素综合作用的结果<sup>[4]</sup>。本实验中, 气体和液体喷嘴出口在

收稿日期: 2011-07-14

第一作者: 林忠平(1968—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为空气洁净技术, 室内热环境与热舒适。E-mail: zplin99@tongji.edu.cn  
通讯作者: 吴昌甫(1985—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为空气洁净技术。E-mail: freshchang@163.com

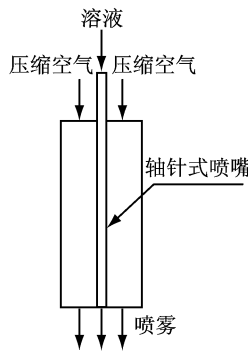


图 1 多分散相气溶胶发生喷嘴结构示意图

Fig.1 Schematic of the nozzle for poly-disperse aerosol generator

同一平面上,液孔壁厚很小,可以忽略.另一方面,由于液体流速很慢,气液流速相差 70 倍以上,可用气体速度近似代替气液相对速度,故雾滴平均直径的影响因素为

$$D = f(D_L, A_G, A_L, \mu_L, \rho_L, \rho_G, \sigma_L, M_L, M_G) \quad (1)$$

式中: $D_L$  为液孔内径, m;  $A_G$  为气体环形出口面积,  $m^2$ ;  $A_L$  为液体出口面积,  $m^2$ ;  $\mu_L$  为液体动力粘度, Pa · s;  $\rho_L$  为液体密度,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $\rho_G$  为气体密度,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $\sigma_L$  为液体表面张力,  $N \cdot m^{-1}$ ;  $M_L$  为液体质量流量,  $kg \cdot s^{-1}$ ;  $M_G$  为气体质量流量,  $kg \cdot s^{-1}$ .

由式(1)中的参数可组合为以下 4 个量纲一数<sup>[4]</sup>:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{D_s}{A_G^{0.5}}, \Pi_2 = \frac{M_G}{A_L^{0.5} \rho_L \sigma_L} = We', \\ \Pi_3 &= \frac{M_G}{A_L^{0.5} \mu_L} = Re', \Pi_4 = \frac{M_G}{M_L} \end{aligned} \quad (2)$$

式中的  $D_s$  为 Sauter 平均直径,  $We'$  和  $Re'$  分别表示修正韦伯数和修正雷诺数. 以下通过一系列气溶胶特性实验来探讨各参数和量纲一数对发生气溶胶浓度、粒径分布及其分散度的影响.

### 2.1 气液比的影响

根据《道路车辆-乘驾室用空气滤清器》标准对实验风量  $Q_{Test}$  的要求 ( $150 \sim 680 m^3 \cdot h^{-1}$ ), 选取一般空气滤清器额定风量  $300 m^3 \cdot h^{-1}$  为实验风量. 配置质量分数为 3.0% 的 KCl 溶液, 并保持在同一液体流量开度. 调节压缩空气的输出压力  $\Delta P_{out}$ , 可得到不同的气液比. 图 2~图 3 分别为不同气液比条件下的粒径分布和 Sauter 平均直径. 从图 2~3 可知, 随着气液比的增加, 粒子数量浓度总量会显著增加, 粒径几何标准差也逐渐增大, 且位于  $0.295 \sim 1.244 \mu m$  粒径段的粒子数最为集中, 占到总量的 88.4%~93.1%. 同时, Sauter 平均直径在气液比 65~109 范围内逐渐增加, 当气液比超过 136 后雾滴 Sauter 平均直径明显变小, 因此气液比 109~136 是平均雾滴粒度变化趋势发生改变的范围. 从图 3 可知, 随着气液比  $M_G/M_L$  的增大, 粒径几何标准差也从 3.30 增加到

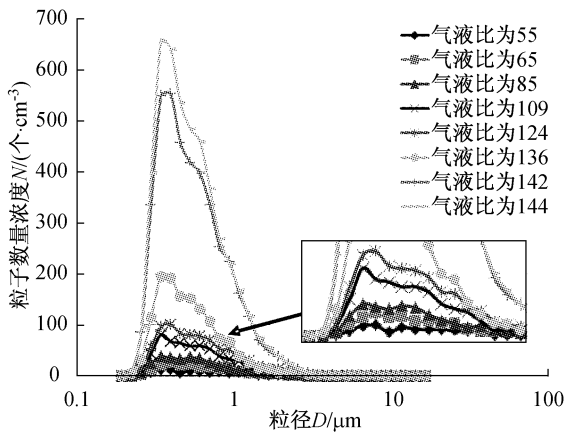


图 2 不同气液比条件下的粒径分布

Fig.2 Aerosol concentration-diameter distribution at different gas-liquid mass flow rate

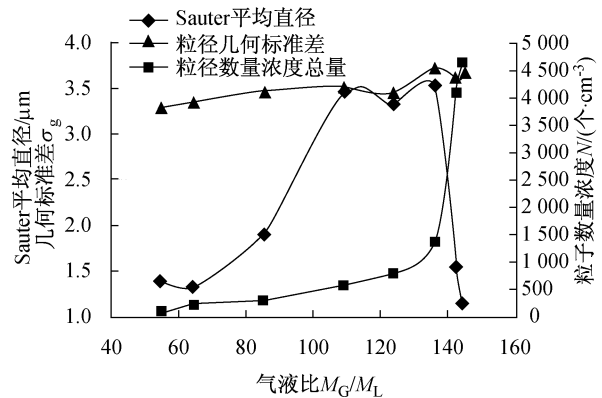


图 3 不同气液比条件下的雾化特性曲线

Fig.3 The effect of gas-liquid mass flow rate on atomization performance

3.72, 均大于 1.5, 故为多分散相.

### 2.2 液体物理性质的影响

喷雾使连续的液体碎裂成为细小的液滴, 液滴的稳定取决于液体的表面张力, 它阻止液滴表面的变形, 雾化所需的最小能量就等于表面张力乘以

液体表面积的增加量<sup>[5]</sup>. 在大多数情况下, 粘性是最重要的液体性质. 虽然它对喷雾影响的敏感程度不如表面张力, 但是它的影响不仅体现在雾化液滴的粒径分布, 而且还有液体在喷嘴内部的流动速率和雾化的模式<sup>[5]</sup>.

将 KCl 白色结晶粉末与不同量的水混合,分别配置 1.0%,5.0%,10.0%,15.0%,20.0%等 5 种质量分数的 KCl 溶液;利用甘油、乙醇与水可以相互溶解的性质,分别将它们按照与水 4:1 和 1:4 的体积

比进行混合;并结合甘油、DEHS(癸二酸二辛酯)液体的高粘性,来研究液体的动力粘度、表面张力等物理性质对喷雾效果的影响.各液体的物性参数见表 1.

表 1 实验溶液的物性参数<sup>[6-7]</sup>及实测 Sauter 平均直径与公式(4)计算值对比

Tab.1 Properties of the aerosol<sup>[6-7]</sup> and the experimental  $D_s$  compared with theoretical predictions using the equation (4)

编号	喷雾溶液	质量分数/%	密度 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	动力粘度 ( $10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ )	表面张力 /( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	实测值 $D_{50}/\mu\text{m}$	按式(4)计算值 $D_s/\mu\text{m}$	误差/%
1	KCl 溶液	1.0	1 005.0	0.880 3	0.074 5	1.194	1.294	8.394
2		5.0	1 025.4	0.888 6	0.075 9	1.275	1.315	3.188
3		10.0	1 052.2	0.889 4	0.076 9	1.309	1.343	2.610
4		15.0	1 080.4	0.895 9	0.078 0	1.349	1.371	1.622
5		20.0	1 110.1	0.906 3	0.079 3	1.343	1.401	4.290
6	乙醇+水	75.9	831.4	1.000	0.046 9	0.933	0.502	-46.179
7		16.5	957.9	1.000	0.046 9	0.618	0.417	-32.548
8	甘油+水	83.5	1 210.6	92.015	0.067 0	1.499	0.041	-97.280
9		24.0	1 052.7	6.000	0.067 0	1.544	0.598	-61.280
10	DEHS/DOS	100.0	912.0	22.0~24.0	0.033 2	1.532	0.164	-89.279

图 4~图 5 为 5 组不同质量分数的 KCl 溶液经多分散相喷嘴雾化后的 Sauter 平均直径、粒子数量浓度总量分别与液体动力粘度、表面张力的关系曲线(其中的实验风量  $Q_{\text{test}}$ 、压缩空气的输出压力  $\Delta P_{\text{out}}$  及其流量  $Q_G$  等实验条件分别如图所示).由图 4 可知,随着 KCl 溶质的增多,KCl 溶液的动力粘度和表面张力均有所增加,Sauter 平均直径和粒子数

量浓度总量也随之增大,几何标准差由 3.57 逐渐降低至 3.39.图 6~图 7 为甘油、DEHS 等高粘性液体的雾化特性曲线.此时,Sauter 平均直径随着粘性的增加先增大而后趋近于一恒定值,随着表面张力的增加先减小而后增大;粒子数量浓度总量随着粘性的增加先增大而后降低,随着表面张力的增加先减少而后变化趋缓.

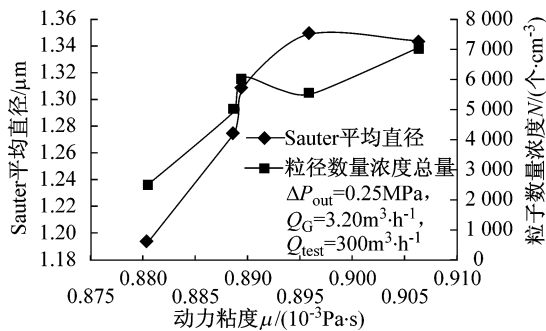


图 4 低粘度液体动力粘度对雾化效果的影响

Fig. 4 The effect of dynamic viscosity on the atomization performance for spray solution with low dynamic viscosity

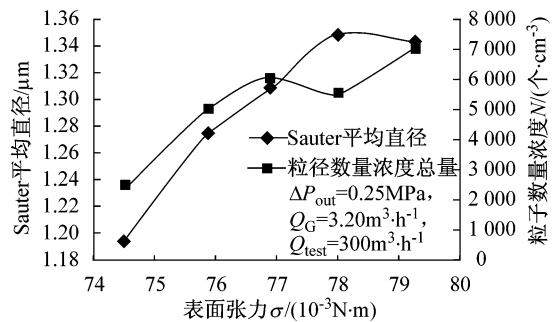


图 5 低粘度液体表面张力对雾化效果的影响

Fig.5 The effect of surface tension on the atomization performance for spray solution with low dynamic viscosity

综合图 4~图 7 的实验结果可知,对于低粘度液体(如 KCl 溶液、乙醇),粘度的减小会使 Re 增大,加快湍流的发展,促进喷雾液膜射流的碎裂,使雾化液滴的尺寸减小.对于高粘度液体(如 DEHS、甘油),流动速率和体积流量通常会随着液体粘度的增大而减小.实验发现,因乙醇的表面张力较小,每滴乙醇液滴体积相对较小,而滴速相似,故乙醇溶液在雾化过程中形成的低粘度液膜射流容易碎裂成液片,导

致其 Sauter 平均直径小于其他液体工质的平均粒径.当喷雾工质选为粘度较大的甘油和 DEHS 时,随着粘度的增加滴速迅速降低,促使高粘度液膜射流更易碎裂成液线,Sauter 平均直径也更大,但由于流量的减小幅度较大使得粒子数量浓度总量减少.从图 8~图 9 的雾化粒径分布知,0.255~1.077  $\mu\text{m}$  范围内的粒子数最为集中,占到总数的 85.5%~99.6%,几何标准差为 3.16~4.24.

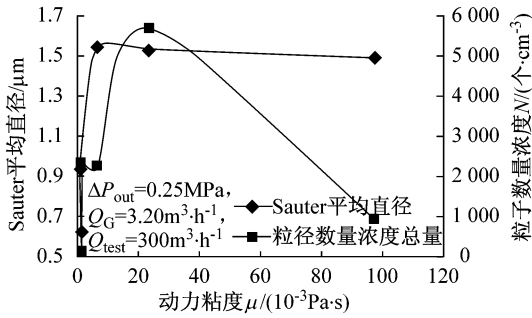


图 6 高粘度液体动力粘度对雾化效果的影响

Fig. 6 The effect of dynamic viscosity on the atomization performance for spray solution with high dynamic viscosity

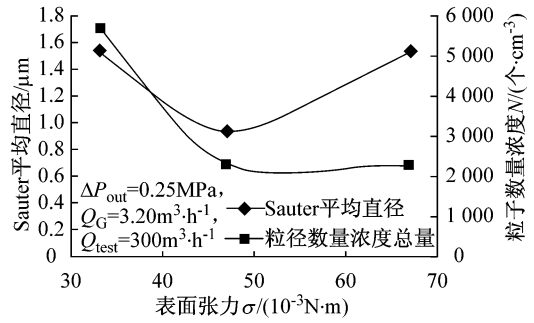


图 7 高粘度液体表面张力对雾化效果的影响

Fig. 7 The effect of surface tension on the atomization performance for spray solution with high dynamic viscosity

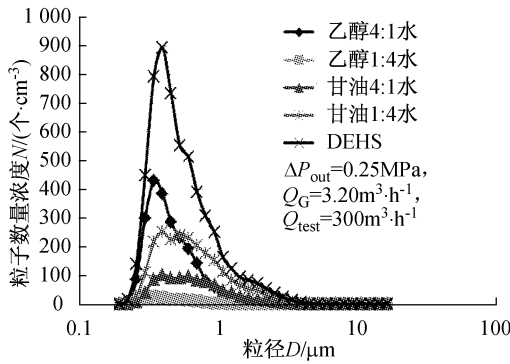


图 8 不同质量分数的 KCl 溶液雾化粒径分布

Fig. 8 Aerosol concentration-diameter distribution with different concentration of KCl

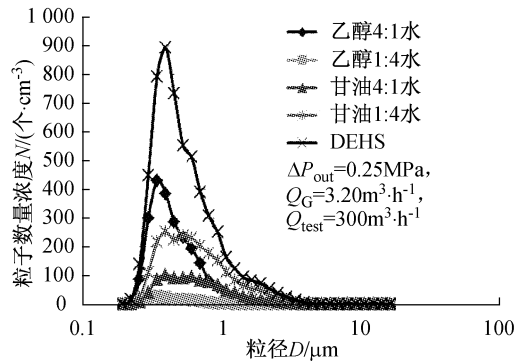


图 9 不同液体工质的雾化粒径分布

Fig. 9 Aerosol concentration-diameter distribution with different spray solutions

### 2.3 相对速度和气体密度的影响

由于本实验的压缩空气经过干燥装置脱除水蒸气,故可当作干空气处理,其密度可用下式计算<sup>[8]</sup>:

$$\rho_G = 0.003484 \cdot (B + P_G) / (273.15 + t_G) \quad (3)$$

式中:  $\rho_G$  为喷嘴入口处压缩空气的密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $B$  为实验室环境大气压力, Pa;  $P_G$  为喷嘴入口处压缩空气静压力, Pa;  $t_G$  为喷嘴入口处压缩空气干球温度,  $^{\circ}\text{C}$ .

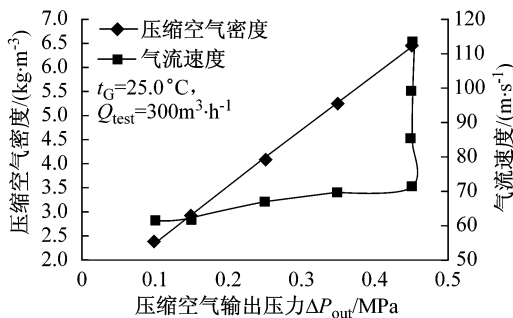


图 10 压缩空气密度、气流速度与输出压力的关系曲线

Fig. 10 The curves of the relationship between the pressure and the density & velocity of compressed air

图 2~图 5 中有关压缩空气流量的数值均按照式(3)进行密度修正. 通过调节压缩空气的输出压力与流量可改变其密度和气流速度. 当压缩空气流量高于  $2.44 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  时, 输出压力保持为  $0.45 \text{ MPa}$ , 通过调节压缩空气管的阀门开度将气流量增大至  $2.93, 3.42, 3.91 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , 对应的压缩空气密度不变, 而气流速度依次增大, 如图 10 所示. 由图 11 可知, 当气流速度较小 ( $66.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下) 时, 气液比

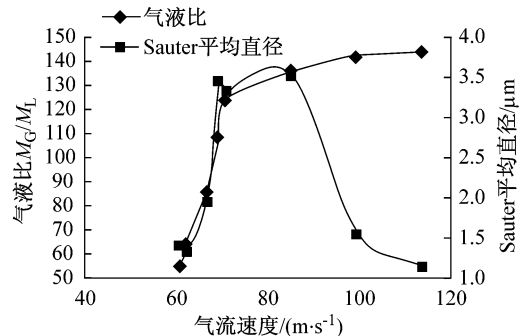


图 11 气液比、Sauter 平均直径与气流速度的关系曲线

Fig. 11 The curves of the relationship between the velocity of the compressed air and gas-liquid mass flow rate & Sauter mean diameter

也相对较小,逐渐增大气流速度会使液束趋于稳定, Sauter 平均直径也随之增加;当气流速度提高至  $99.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时气液比逐渐趋近于恒定,但是 Sauter 平均直径会因气流速度的增加导致喷雾能量的显著增强、加速液束的碎裂而降低. 由于液体流速均在  $1.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下,故压缩空气的速度可看作气液相对速度. 从空气动力角度来看,压缩空气的密度与气流速度的增大意味着增加了空气动能,让更多的能量用于雾化,平均雾滴粒度也会随之减小. 文献[2]提出雾滴的平均粒径与空气动力的 0.57 次方成反比.

从压缩空气用量、气液相对速度以及雾化效果综合考虑,可以通过图 11 确定最佳的喷雾方案. 比如根据滤清器效率测试对人工气溶胶 Sauter 平均直径的要求,可根据图 11 确定相应的气流速度和气液比,并选择合适的压缩空气输出压力.

### 3 分析与讨论

根据式(2)中的  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4$  等 4 个量纲一数,可以组合出以下公式<sup>[4]</sup>:

$$D_s/A_G^{0.5} = 16\ 000(\text{Re}'/\text{We}')^{0.05} (M_L/M_G)^{0.73} \cdot (D_L/A_G^{0.5})^{0.4} \quad (4)$$

将实验数据代入式(4)中,计算出不同喷雾溶液的 Sauter 平均直径,并与实测值进行对比分析,如表 1 所示. 对于不同质量分数的 KCl 溶液,实测值  $D_{s0}$  与计算值  $D_{s1}$  均吻合得很好,如图 12 所示. 而对于其

他溶液,特别是粘度较大的甘油和 DEHS,偏差则相对较大,因此公式(4)对于粘度较大的溶液需要进行必要的修正,其适用性需要更多的后续研究工作进行探讨.

Nukiyama 和 Tanasawa 提出液体喷雾的液滴粒径分布<sup>[5,9]</sup>,有如下实验关系式:

$$dN/dD = aD^m \exp[-(bD)^n] \quad (5)$$

式中:  $N$  为粒子数量浓度,个;  $D$  为粒径,  $\mu\text{m}$ ;  $a, b, m, n$  分别为 4 个相互独立的常数,由于本文实验中气液体积比  $Q_G/Q_L$  均大于 5 000,故可取  $m=2, n=1$ <sup>[9]</sup>.

将式(5)等号两边同除以  $D^2$  并取对数,则

$$\ln(D^{-2} \cdot dN/dD) = \ln a - bD \quad (6)$$

将不同液体工质的实验数据代入式(6)中,并作粒径分布趋势线,如图 13 所示. 可以看出,不同质量

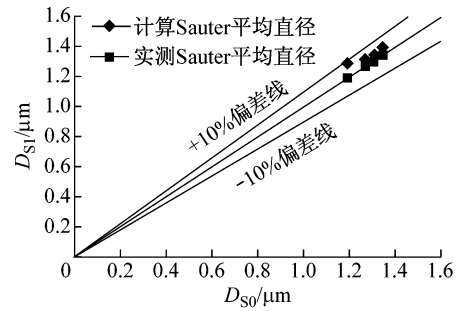


图 12 部分实测 Sauter 平均直径与公式(4)计算值对比图  
Fig. 12 Comparison of the experimental  $D_s$  values with theoretical predictions using equation (4) for KCl

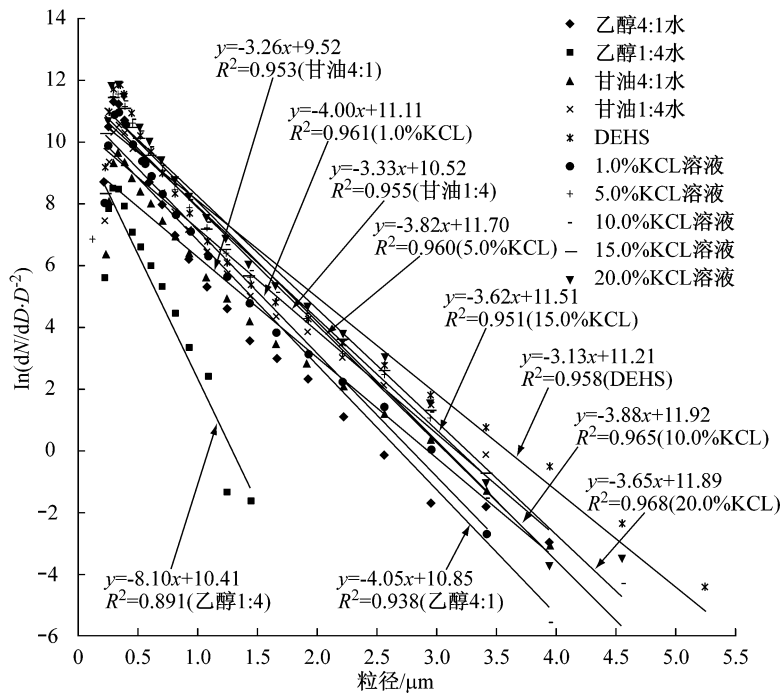


图 13 不同液体工质的雾化粒径分布趋势线

Fig. 13 Trend line of aerosol concentration-diameter distribution with different spray solution

分数 KCl 溶液的趋势线和相关系数比较接近,  $b$  集中于 3.62~4.00,  $\ln a$  处于 11.11~11.92,  $R$  在 0.975 以上. 乙醇、甘油和 DEHS 等 5 种液体的趋势线除了乙醇 1:4 的  $b$  相差较大, 其他的  $b$  位于 3.13~4.05,  $\ln a$  处于 9.52~11.21,  $R$  在 0.944 以上.

## 4 结论

(1) 对于气-液二流外混式轴针喷嘴, 雾滴 Sauter 平均直径随着气液比的增加先增大经过拐点后减小.

(2) 液体工质的动力粘度和表面张力对雾化效果的影响显著. 增加 KCl 溶液的质量分数, 雾滴 Sauter 平均直径、粒子数量浓度总量、几何标准差也随之增大.

(3) 当气流速度相对较小时, Sauter 平均直径随着气流速度的提高而增大; 当气流速度提高到一定程度后气液比趋近于恒定, Sauter 平均直径显著降低.

(4) 对于 KCl 溶液, 雾化 Sauter 平均直径的实测值与经验公式计算值吻合很好; 对于甘油、DEHS 等高粘性液体, 两者相差较大, 其适用的经验公式有待后续工作进行进一步研究.

(5) 根据本文实验数据拟合的雾化液滴粒径分布关系式, 对于 KCl 溶液和其他液体工质(除乙醇 1:4 之外)均具有较为相近的实验系数和较高的相关系数.

## 参考文献:

- [1] QC/T795—2007 道路车辆-乘驾室用空气滤清器(第 1 部分): 粉尘过滤测试[S]. 2007.
- QC/T795—2007 Road vehicles-air filters for passenger compartment(Part 1): Test for particulate filtration[S]. 2007.
- [2] 刘厂文. 喷雾干燥实用技术大全[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2001.
- LIU Changwen. Practical technology of spray drying [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2001.
- [3] 曾卓雄, 姜培正, 谢蔚明. 喷嘴雾化粒径的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(4): 75.
- ZENG Zhuoxiong, JIANG Peizheng, XIE Weiming. Investigation of atomizer particle diameter[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(4): 75.
- [4] Ceidk P, Flikova I. Some aspects of spray formation by pneumatic nozzles[J]. Drying Technology, 1985, 3(1): 101.
- [5] 曹建明. 喷雾学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- CAO Jianming. Spray [M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [6] 欧阳跃军. 无机盐溶液表面张力的影响研究[J]. 中国科技信息, 2009(22): 42.
- OUYANG Yuejun. Study on effect of surface tension of the inorganic saline solution [J]. China Science and Technology Information, 2009(22): 42.
- [7] 张海朗, 张锁江, 陈庚华, 等. 电解质(NaCl 和 KCl)及其混合物含水溶液在 298.15K 下的粘度[J]. 化学学报, 1996, 47(2): 211.
- ZHANG Hailang, ZHANG Suojiang, CHEN Genghua, et al. The viscosity of electrolytes (NaCl and KCl) and their aqueous solution at 298.15K [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 1996, 47(2): 211.
- [8] 赵荣义, 范存养, 薛殿华, 等. 空气调节[M]. 第 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- ZHAO Rongyi, FAN Cunyang, XUE Dianhua, et al. Air conditioning [M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 1994.
- [9] 持田隆, 荃田嘉男, 今村薰. 喷雾干燥[M]. 张佑国译. 苏州: 江苏科学技术出版社, 1982.
- Mochidat, Kukiday, Imamurak. Spary drying [M]. Translated by ZHANG Youguo. Suzhou: Jiangsu Publishing Company of Science and Technology, 1982.