



文章栏目：大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201908175

中图分类号 X701.2

文献标识码 A

向晓东, 张雪悠, 刘涛. 表面活性剂底喷填料塔的氯化铵微粒脱除增效作用[J]. 环境工程学报, 2020, 14(6): 1613-1618.
XIANG Xiaodong, ZHANG Xueyou, LIU Tao. Enhancement effect of ammonium chloride particles removal efficiency of bottom spray packed tower based on surfactant[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(6): 1613-1618.

表面活性剂底喷填料塔的氯化铵微粒脱除增效作用

向晓东^{1,2,*}, 张雪悠¹, 刘涛²

1. 武汉科技大学资源与环境工程学院, 武汉 430081

2. 国家环境保护矿冶资源利用与污染控制重点实验室, 武汉 430081

第一作者: 向晓东(1958—), 男, 博士, 教授。研究方向: 烟尘污染控制理论与应用技术。E-mail: drxxd@163.com

*通信作者 E-mail: drxxd@163.com

摘 要 为高效去除微细颗粒物和减少水雾排放, 设计了一种底喷式填料塔, 利用表面活性剂能降低水的表面张力的原理, 对比分析饮用水、SDBS、AEO-9、A-7 对粒径小于 $1\ \mu\text{m}$ 的氯化铵微粒的净化效果。结果表明, 当底喷填料塔入口氯化铵微粒质量浓度为 $124.9\sim 194.3\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 饮用水洗涤液的微粒脱除效率仅在 40% 左右, 出口氯化铵微粒质量浓度 $>70\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; 当采用 SDBS 和 AEO-9 表面活性剂洗涤液后, 微粒脱除效率大幅提高。AEO-9 的提效作用较明显, 当 AEO-9 浓度增至 0.004% 时, 脱除效率达到 74.8%, 氯化铵微粒出口浓度为 $26.5\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; 当采用浓度为 0.3% 的 A-7 洗涤液时, 脱除效率为 89%, 此时氯化铵微粒出口浓度仅为 $15\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。通过分析可知, 表面活性剂洗涤液对微细颗粒物的脱除有提效作用。

关键词 氯化铵微粒; 表面活性剂; 底部喷淋; 填料塔; 脱除效率

锌在金属消耗排行中占第 5 位, 仅次于铁、铝、铜、锰。锌的用途广泛, 锌能与多种有色金属形成合金, 是经济建设不可或缺的有色金属^[1]。目前, 我国的锌合金生产主要采用火法冶炼, 在冶炼过程中, 为了除去高温状态下锌合金表面生成的氧化物, 提高纯度, 采用加入大量氯化铵晶体的方法^[2]。但是, 氯化铵在高温下产生大量白色烟雾, 造成严重的环境污染。

氯化铵在 $100\ ^\circ\text{C}$ 开始挥发, 在 $328\ ^\circ\text{C}$ 分解成 NH_3 和 HCl , 而 NH_3 和 HCl 在空气中遇冷又重新化合成氯化铵, 形成白烟。在氯化铵白烟中既含有颗粒物又含有气态污染物, 且烟气中的氯化铵微粒多属于微细颗粒物。何益波等^[3-4] 采样并测出白烟中的颗粒物平均粒径分布在 $1\ \mu\text{m}$ 以下, 重量轻, 不易下沉, 也不易溶于水。在烟气处理设备中, 只有湿式洗涤器能够同时去除烟气中的微细颗粒物和气态污染物^[5-7], 而作为湿式洗涤器的填料塔具有结构简单、气液接触面积大、运行可靠等明显优势, 在烟气脱硫、脱黑等工业废气净化方面发挥了重要作用^[8-10]。

通常, 传统的填料塔采用顶部喷淋方式, 这存在较严重的水雾排放问题^[11-15], 须在喷淋上部另加除雾器, 进而增加了设备投资和能耗。为此, 在研究氯化铵微粒净化中, 提出了一种底喷式

收稿日期: 2019-08-30; 录用日期: 2019-11-08

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC0210404)

填料塔。烟气先与喷淋液滴接触,进行初净化,较大水滴落入底部水箱,气流携带细水雾,经过填料层过滤,不仅增强了颗粒物净化效果,而且减少水雾排放。同时,润湿的填料表面有利于增强填料的吸附作用,提高二次净化效果。所以,底喷式填料塔既可去除微细颗粒物,又能有效控制水雾排放。

虽然使用纯水作为洗涤液的成本较低,但对微细颗粒物降尘效果较差^[16]。为了降低水的表面张力,增加颗粒物的润湿性,有研究^[17-18]表明,化学抑尘是一种新颖且效率高的粉尘防治办法。而大部分的抑尘剂均添加了阴离子表面活性剂和非离子表面活性剂^[19],表面活性剂的添加会进一步提升对微细颗粒物的脱除效率。

本研究分别选用SDBS(阴离子型)、AEO-9(非离子型)、A-7(非离子型)配制成洗涤液,采用底喷填料塔净化氯化铵微粒,通过对比研究,筛选出较为理想的表面活性剂,不仅提高了微细颗粒物的脱除效率,且废水的生物降解性好,对环境没有二次污染,为细颗粒物的高效净化提供参考。

1 实验装置与方法

1.1 实验装置与试剂

实验装置如图1所示。主体设备是填料洗涤塔,主要性能参数如下:空塔气速为 $0.5\sim 1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,压降为 $110\sim 500\text{ Pa}\cdot\text{m}^{-1}$,液气比为 $0.7\sim 2.2\text{ L}\cdot\text{m}^{-3}$,液体喷淋密度为 $1.8\sim 6.4\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,填料层高度为600 mm,塔径为250 mm;填料选用塑料矩鞍环,规格为 $25\text{ mm}\times 12.5\text{ mm}\times 1.2\text{ mm}$,比表面积为 $288\text{ m}^2\cdot\text{m}^{-3}$,空隙率为0.85,堆积数量为 $97\,680\text{ 个}\cdot\text{m}^{-3}$,堆积重量为 $68\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,干填料因子为 473 m^{-1} ;填料塔是吸收的主体设备,采用有机玻璃制作。其他附属实验设备包括模拟烟气发生装置、离心风机、粉尘浓度测定系统等。

实验试剂包括:氯化铵(NH_4Cl ,分析纯),购于天津市永大化学试剂有限公司;十二烷基苯磺酸钠(SDBS,分析纯),购于南京佳吉化工有限公司;脂肪醇聚氧乙烯醚(AEO-9,化学纯),购于吉林化学工业股份有限公司;椰子油基类低泡表面活性剂(A-7),购于湖南洁宇日化新技术股份有限公司。主要仪器包括远红外封闭电炉(上海力辰邦西仪器科技有限公司)、热线式风速仪(日本KANOMAX公司KA23型)、高压离心通风机(9-26-5A,佛山市南海九州普惠风机有限公司)等。

烟气发生装置放出的白烟是经过高温分解、遇冷又重新化合的氯化铵微粒,通过进气管道进入填料洗涤塔,与自上而下喷淋的洗涤液逆流接触,经过填料层,净化后的气体由风机抽出排放。用水泵将水箱里的洗涤液送入洗涤塔中,与白烟逆流接触后,从洗涤器下端排到水箱中,可循环再使用。填料塔正常工作时,填料层上方的喷嘴不喷雾,每组实验测试结束后,开启阀门,清洗填料层。

填料塔分上填料层和下喷淋区2个部分。含尘烟气在填料洗涤塔内经过2次净化:含尘烟气先经过喷淋洗涤后,再经过填料过滤。对于湿法净化,喷淋塔的净化效率低于填料塔^[20],作为串联系统,将低效净化器置于高效净化器之前是合理的。所以,在填料塔中采取底喷方式,这也符合净化原理。

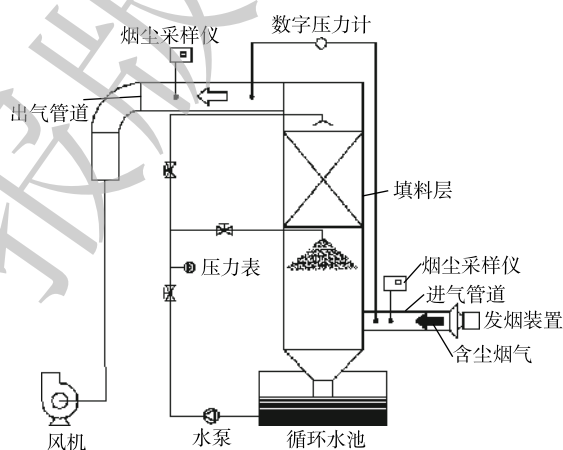


图1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

1.2 实验方法

配制实验所需浓度的洗涤液，启动实验装置。待装置运行稳定后，由烟气发生装置放出含尘烟气，在进气管道和出气管道的测试点处，使用 CCD-304 动压平衡烟尘采样仪，等速采样 20 min，并同时使用数字压力计，测定装置压降 ΔP ，采样前后的玻璃纤维滤筒均放入干燥箱至恒重。每组实验测试 3 次，取平均值。实验室环境温度 $t=20\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，湿度 $H=60\%\sim 80\%$ 。

实验洗涤液用量为 $0.2\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ，烟气流量在 $95.4\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 左右，烟气流速为 $0.5\sim 0.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，填料层高度为 0.60 m 。通过在水溶液中添加表面活性剂^[21]制备不同浓度的洗涤液，设定的浓度和对应的实验条件见表 1。

表 1 表面活性剂对氯化铵微粒脱除效率影响的实验方案
Table 1 Experimental scheme of the effect of surfactant on the removal efficiency of ammonium chloride particles

表面活性剂名称	洗涤液浓度/%				进口浓度/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	入口风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	液气比/($\text{L}\cdot\text{m}^{-3}$)
	第1组	第2组	第3组	第4组			
SDBS	0.005	0.01	0.02	0.04	124.9~194.3	3.4	2.2
AEO-9	0.001	0.002	0.003	0.004	124.9~194.3	3.4	2.2
A-7	0.1	0.2	0.3	0.4	124.9~194.3	3.4	2.2

采用滤筒称重法测定除尘效率，采用电子分析天平测玻璃纤维滤筒的质量，通过测定进出口粉尘浓度确定除尘效率。氯化铵微粒的脱除效率由式 (1) 确定。

$$\eta = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%$$

(1)

式中： η 为脱除效率； m_1 为入口处氯化铵微粒的质量浓度， $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ； m_2 为出口处氯化铵微粒的质量浓度， $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

2 结果与分析

2.1 饮用水对氯化铵微粒的脱除作用

控制氯化铵微粒入口浓度为 $124.9\sim 194.3\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，烟气入口风速为 $3.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，液气比为 $2.2\text{ L}\cdot\text{m}^{-3}$ ，洗涤液为饮用水，6 次实验结果如表 2 所示。

用饮用水作洗涤液时，由表 2 得出氯化铵微粒的平均脱除效率为 41.64%，氯化铵微粒排放浓度均高于 $70\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，超过大气污染物排放标准^[22]。在用水脱除氯化铵微粒时，效率低的原因是：氯化铵本是一种极易溶于水的物质，常温常压下，在水中的溶解度达到 28.2%，但经过高温分解，遇冷重新化合生成的氯化铵微粒物理化学性质已经发生了变化，其粒径在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下，不易下沉，也不易溶于水。氯化铵微粒很难被水润湿，并且其周围可能被一层空气膜包围，将其隔绝开来，进一步增加了被水润湿的难度，使得氯化铵溶解度大大降低，导致填料塔洗涤效率不高。

表 2 饮用水作洗涤液的氯化铵微粒脱除效率
Table 2 Removal efficiency of the ammonium chloride particles by drinking water washing liquid

实验次数	脱除效率/%	出口浓度/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)
1	39.6	77.1
2	41.64	73.5
3	42.7	71.2
4	47.9	71.6
5	38.8	75.3
6	39.2	76.8

2.2 表面活性剂对氯化铵微粒脱除的增效作用

为分析不同表面活性剂对氯化铵微粒脱除效果的影响,控制氯化铵微粒入口浓度为 $124.9 \sim 194.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 烟气入口风速为 $3.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 液气比为 $2.2 \text{ L} \cdot \text{m}^{-3}$, 在洗涤液中分别添加 SDBS、AEO-9、A-7 作对比实验。各表面活性剂浓度的选取见表3。

由图2和图3可以看出,添加 SDBS 和 AEO-9 表面活性剂的洗涤液对氯化铵微粒的脱除均有提效作用。AEO-9 洗涤液对氯化铵微粒的脱除效率优于 SDBS 洗涤液。当洗涤液中 SDBS 浓度为 0.04% 时,脱除效率为 57.1%,虽然高于清液的脱除效率,但出口浓度仍未达到排放要求。而当添加 AEO-9 洗涤液的浓度为 0.004% 时(比 SDBS 洗涤液低 10 倍),氯化铵微粒脱除效率达到 74.8%,排放浓度为 $26.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,满足排放标准。但研究发现,无论采用 SDBS 还是 AEO-9,当 SDBS 洗涤液浓度超过 0.04%,AEO-9 洗涤液浓度超过 0.004% 时,会产生较多泡沫,影响系统运行。另外,沉淀池中含 SDBS 和 AEO-9 污水须净化后外排,否则会导致水污染。

椰子油基表面活性剂可广泛用于生产民用洗涤剂,具有环境友好的特点。因此,为解决 SDBS 和 AEO-9 洗涤液多泡和二次水污染问题,对比实验选用了椰子油基类低泡表面活性剂(A-7),实验结果如图4所示。研究发现,采用 A-7 制备的洗涤液的增效作用明显优于 SDBS 和 AEO-9 洗涤液。当浓度为 0.3% 时,脱除效率达 89%,出口浓度仅为 $15 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,远低于标准规定的排放限值。虽然在洗涤液中 A-7 的添加量远高于 SDBS 和 AEO-9,但在运行中 A-7 洗涤液产生泡沫很少,且水污染小。对比分析认为,采用 A-7 表面活性剂制备脱除氯化铵微粒的洗涤液是较合理的选择。

根据图2~图4中的数据,通过指数回归分析发现,回归曲线与实验结果的决定系数 R^2 均大于 0.95。这表明3种不同表面活性剂洗涤液的氯化铵微粒脱除效率随表面活性剂浓度的变化关系基本服从指数规律(式(2))。

$$\eta = A_1 - A_2 e^{-k\omega} \quad (2)$$

式中: η 为氯化铵微粒脱除效率; ω 为表面活性剂的质量分数; A_1 、 A_2 、 k 为待定系数(见表3)。

基于式(2),根据洗涤液中表面活性剂的浓度,可预计底喷填料洗涤塔的氯化铵微粒脱

表3 不同浓度表面活性剂的洗涤液的氯化铵微粒脱除效率的指数函数参数

Table 3 Exponential function parameters of the removal efficiency of ammonium chloride particles by washing liquids with different concentrations of surfactant

待定系数	SDBS	AEO-9	A-7
A_1	56.997 29	77.962 41	100
A_2	14.692 16	36.642 17	61.463 64
k	131.918	685.798 88	4.371 55

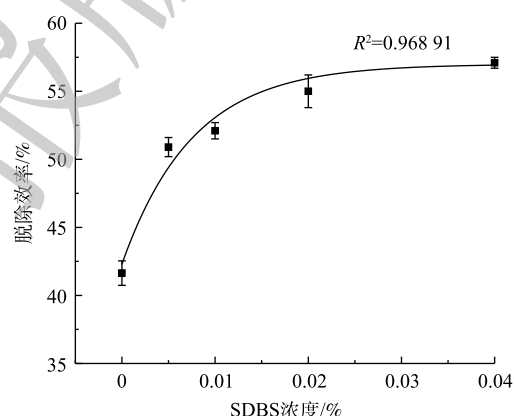


图2 SDBS 洗涤液的氯化铵微粒脱除效率

Fig. 2 Ammonium chloride particles removal efficiency by washing liquid (SDBS)

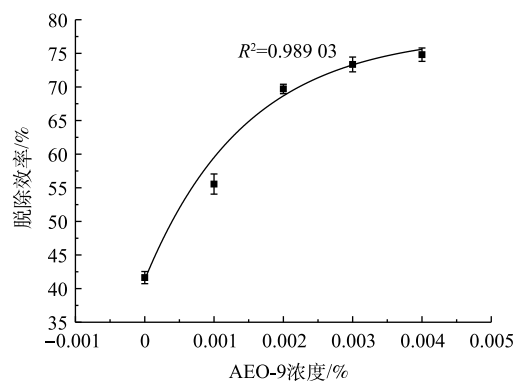


图3 AEO-9 洗涤液的氯化铵微粒脱除效率

Fig. 3 Ammonium chloride particles removal efficiency by washing liquid (AEO-9)

除效率。因此,表面活性剂的脱除效率指数模型对工程设计有一定指导作用。

3 结论

1) 将传统填料塔的顶部喷淋方式改为底部喷淋方式,不仅增强了填料塔对细颗粒物的净化作用,而且有助于大幅度削减水雾排放。

2) 饮用水作为洗涤液对粒径小于 $1\ \mu\text{m}$ 的氯化铵微粒的净化作用较弱,填料塔的脱除效率仅在 40% 左右,出口处氯化铵微粒质量浓度均高于 $70\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

3) 洗涤液中添加 SDBS、AEO-9、A-7 表面活性剂,均能提高氯化铵微粒脱除效率。AEO-9

的脱除效率高于 SDBS。当 AEO-9 浓度增至 0.004% 时,脱除效率达 74.8%,出口浓度为 $26.5\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,满足排放标准;当采用 A-7 活性剂配制的洗涤液浓度为 0.3% 时,对氯化铵微粒的脱除效率高达 89%,此时出口浓度仅为 $15\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,远低于标准规定的排放限值。虽然 A-7 的添加量远高于 SDBS 和 AEO-9,但 A-7 表面活性剂配制洗涤液的净化效果好、泡沫产出少、环境危害小。因此,A-7 是用于配制氯化铵微粒净化洗涤液较为理想的表面活性剂。

参考文献

- [1] 张启富. 中国锌和锌合金镀层钢板的发展和展望[N]. 世界金属导报, 2013-12-10(B4).
- [2] 张海龙. 锌合金工业白烟治理的实验研究[J]. 制冷与空调, 2016, 30(5): 611-614.
- [3] HE Y B. The experimental study on white smoke treatment in zinc alloy industrial[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2006, 32(6): 1-3.
- [4] 何益波. 锌合金白烟治理的试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- [5] HAK-JOON K, BANGWOO H, CHANG-GYU W, et al. NO_x removal performance of a wet reduction scrubber combined with oxidation by an indirect DBD plasma for semiconductor manufacturing industries[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(6): 6401-6407.
- [6] MANISHA B, HAMMAD S, SUBHRAJIT M, et al. Design of self priming venturi scrubber for the simultaneous abatement of HCl gas and particulate matter from the flue gas[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2019, 150: 311-319.
- [7] ABDULWAHID A A, SITU R, BROWN R J. Underground diesel exhaust wet scrubbers: Current status and future prospects[J]. Energies, 2018, 11(11): 1-22.
- [8] HUANG Z C. Study on the dust removal and desulfuration equipment with wet method for ceramic industrial spray drying tower[J]. Advanced Materials Research, 2011, 347-353: 1272-1275.
- [9] KIRAN N B, MUTHUKUMAR P, BHATTACHARYYA C. Thermal modelling and parametric investigations on coupled heat and mass transfer processes occurred in a packed tower[J]. Heat and Mass Transfer, 2019, 55(3): 627-644.
- [10] 付加, 祁贵生, 刘有智, 等. 错流旋转填料床脱除细颗粒物研究[J]. 化工进展, 2015, 34(3): 680-683.
- [11] 吕扬, 董勇, 田路泞, 等. 燃煤电厂湿烟气的除湿特性[J]. 化工学报, 2017, 68(9): 3558-3564.
- [12] WENG W G, ZHANG J, LI C J. Origin and solution of the "gypsum rain" problem of limestone-gypsum WFGD system[J].

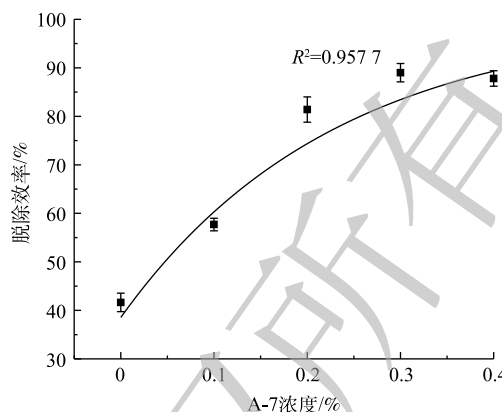


图4 A-7 洗涤液的氯化铵微粒脱除效率

Fig. 4 Ammonium chloride particles removal efficiency by washing liquid (A-7)

- Chemical Industry & Engineering Progress, 2015, 34(1): 239-244.
- [13] 叶毅科, 惠润堂, 杨爱勇, 等. 燃煤电厂湿烟羽治理技术研究[J]. 电力科技与环保, 2017, 33(4): 32-35.
- [14] 罗丹丹, 杨红, 高志远, 等. 湿法脱硫烟气带水形成机理及防治措施[J]. 化工装备技术, 2016, 37(3): 24-26.
- [15] 张泽玉, 任庚坡, 严红, 等. “烟塔合一”湿法脱硫工艺中烟囱飘雨的成因分析[J]. 上海节能, 2017(10): 602-607.
- [16] WEI Y, HOEKMAN S K. Dust suppression with glycerin from biodiesel production: A review[J]. Journal of Environmental Protection, 2012, 3(2): 237-249.
- [17] 吴超. 化学抑尘[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2003.
- [18] LIU W, CHENG W M, YU Y B, et al. Experimental study on dust suppression performance of surfactant[J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(12): 23-26.
- [19] 周杨鑫. 伞形罩除尘器表面活性剂净化黑烟的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- [20] 韩香玉, 程金明, 张海平. 塔式湿法脱硫的工艺比较[J]. 电力环境保护, 2006(3): 26-28.
- [21] 周杨鑫, 李彩亭, 路培, 等. 添加剂和湿法除尘主要参数对炭黑去除效率的影响[J]. 环境科学学报, 2010, 30(12): 2399-2404.
- [22] 环保部. 环保部公布《铸造工业大气污染物排放标准(征求意见稿)》[J]. 铸造, 2018, 67(3): 285-286.
- (本文编辑: 郑晓梅, 张利田)

Enhancement effect of ammonium chloride particles removal efficiency of bottom spray packed tower based on surfactant

XIANG Xiaodong^{1,2,*}, ZHANG Xueyou¹, LIU Tao²

1. School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China

2. State Environmental Protection Key Laboratory of Mineral Metallurgical Resources Utilization and Pollution Control, Wuhan 430081, China

*Corresponding author, E-mail: drxxd@163.com

Abstract In order to efficiently remove fine particles and reduce water mist emissions, a bottom spray type packed tower was designed. According to the principle of reducing water surface tension with the surfactant, the purification effects of drinking water, SDBS, AEO-9, A-7 on ammonium chloride particles with particle size less than 1 μm were compared and analyzed. The results showed that when the mass concentration of ammonium chloride particles at the inlet of the bottom spray packed column was 124.9~194.3 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, the particle removal efficiency by the drinking water washing liquid was only about 40%, and the mass concentration of the ammonium chloride particles at the outlet was higher than 70 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$. When SDBS or AEO-9 surfactant washing liquid was used, the particle removal efficiency was greatly improved. The enhancement effect of efficiency by AEO-9 was more obvious. When the concentration of AEO-9 increased up to 0.004%, the removal efficiency reached 74.8%, and the concentration of the ammonium chloride particles at the outlet was 26.5 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$. When A-7 washing liquid with concentration 0.3% was used, the removal efficiency was 89%, and the concentration of the ammonium chloride particles at the outlet was only 15 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Through above analysis, the surfactant washing liquid had an enhancement effect on the removal of fine particles.

Keywords ammonium chloride particles; surfactant; bottom spray; packed tower; removal efficiency