



绿色表面活性剂喷雾降尘试验研究

彭静^{1,2}, 黄雪萍¹, 蒋殿君^{1*}, 陈维洪^{1,2}, 邓晓珊¹, 梁丽丽¹, 黄良志²

(1. 广东省科学院产业技术育成中心, 广东 广州 510650; 2. 广州粤有研光电材料有限公司, 广东 广州 510650)

摘要: 为提高城市喷雾降尘效率, 通过对喷雾降尘用表面活性剂进行筛选, 旨在寻求更为优越的性能。采用实验研究方法, 测定了APG、AES、1307、CAO-30、BS-12和APG-ET表面活性剂的表面张力和润湿性, 发现阴离子表面活性剂和非离子表面活性剂的性能明显优于两性离子表面活性剂, 以烷基糖苷(APG)为主, 与筛选出的另外两种性能优良的表面活性剂异构十三醇聚氧乙烯醚(1307)和烷基糖苷酒石酸酯盐(APG-ET)进行复配, 测定复配表面活性剂的表面张力和润湿性。结果表明: APG、1307、APG-ET三元复配体系的性能最佳, 在 $m(\text{APG}):m(1307):m(\text{APG-ET})=6:2:2$ 条件下, 表面活性剂溶液质量浓度为0.1%时的表面张力可达 $23.13 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ 、粉尘的沉降时间为10 s; 通过降尘试验研究了复配表面活性剂在不同浓度下对细颗粒物的去除能力, 当复配表面活性剂质量浓度为0.1%时, 对 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{1.0}$ 的去除率分别达到86.2%、84.5%、76.5%。降尘用表面活性剂的最优配方为 $m(\text{APG}):m(1307):m(\text{APG-ET})=6:2:2$, 喷雾质量浓度为0.1%, 该研究为提高城市喷雾降尘效果提供了参考。

关键词: 表面活性剂; 降尘率; 细颗粒物; 烷基糖苷; 润湿性

中图分类号: X513

文献标志码: A

文章编号: 1673-9981(2023)06-1165-06

引文格式: 彭静, 黄雪萍, 蒋殿君, 等. 绿色表面活性剂喷雾降尘试验研究[J]. 材料研究与应用, 2023, 17(6): 1165-1170.

PENG Jing, HUANG Xueping, JIANG Dianjun, et al. Experimental Study of Green Surfactant Spray for Dust Control[J]. Materials Research and Application, 2023, 17(6): 1165-1170.

0 引言

由于我国城市大气首要污染物为大气颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} , 其过度浓度严重影响着人们的生产和生活。城市大气环境中, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度超标的主要原因是道路交通扬尘和机动车尾气排放。针对防治道路交通扬尘的问题, 目前主要采用喷雾降尘方法, 但效果不太理想^[1]。研究表明^[2-6], 在喷雾降尘过程中添加适量表面活性剂于水中, 能够有效地降低水溶液的表面张力, 使得溶液与扬尘颗粒物相互作用时更容易润湿颗粒物, 从而提高喷雾降尘的降尘效果。

当前, 表面活性剂在降尘方面的研究主要侧重于矿山除尘, 而在城市降尘的应用研究相对较少。金龙哲等^[7]对喷雾降尘原理进行了系统梳理, 主要包括惯性碰撞、截留、扩散与重力沉降等原理。王晓楠^[8]探讨了表面活性剂在改善煤尘润湿性方面的协同效应及降尘效果, 发现阴-非离子表面活性剂复配体系能够更有效地改善煤尘的润湿性, 达到最佳的降尘性能。此外, 胡夫^[9]通过研究指出, 采用不同离

子类型的单体湿润剂复配, 可以显著提高表面活性剂的湿润性能。赵迪^[10]通过对不同煤种特性、不同类型表面活性剂的润湿性的系统研究, 发现在水中添加适量表面活性剂, 能够显著增加水溶液对煤尘的润湿性, 其中非离子表面活性剂的表现最为优越, 而阳离子表面活性剂则相对较差。王延秋^[11]研究了不同类型表面活性剂单体及复配体系对煤尘润湿效果的影响, 发现阴离子表面活性剂优于非离子型表面活性剂和两性离子表面活性剂, 其中快渗T表现出的效果最佳。

本文的主要目的在于研究多种类型表面活性剂的化学特性, 筛选出具有优良润湿性的表面活性剂并进行复配, 测定不同浓度复配溶液的对城市扬尘的沉降性能, 从而确定降尘剂的最优配方, 为表面活性剂在城市降尘领域中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验仪器

实验所用仪器列于表1。

收稿日期: 2023-11-02

基金项目: 广州市科技计划项目(202103000056)

作者简介: 彭静, 硕士, 工程师, 研究方向为精细化工, E-mail: pjxiaoxiang@126.com。

通信作者: 蒋殿君, 本科, 工程师, 研究方向为精细化工, E-mail: jiang.dianjun@163.com。

表1 实验仪器
Table 1 Experimental instruments

序号	名称	型号	生产厂家
1	电子天平	JJ300	常熟市双杰测试仪器厂
2	电动喷雾器	3WBD-18L	蓝艺科技有限公司
3	便携式气体检测仪	—	基恩思(重庆)电子有限公司
4	自动界面张力仪	JYW-200B	承德市世鹏检测设备有限公司
5	秒表	—	上海秒表厂
6	凌鼎烟雾发生器	—	青岛凌鼎智能科技有限公司

1.2 实验原料

本实验参考了应用于矿山除尘的已有研究成

果^[13-14],对常见的表面活性剂及实验室自行合成的烷基糖苷衍生物(烷基糖苷酒石酸酯盐)进行实验。实验所用表面活性剂列于表2。

表2 实验所用表面活性剂
Table 2 Surfactants used in the experiment

序号	简称	名称	种类	生产厂家
1	APG	烷基糖苷	非离子表面活性剂	上海发凯化工有限公司
2	AES	脂肪醇聚氧乙烯醚硫酸盐	阴离子表面活性剂	浙江汇森科技有限公司
3	1307	异构十三醇聚氧乙烯醚	非离子表面活性剂	江苏省海安石油化工厂
4	CAO-30	椰油酰胺丙基氧化胺	两性离子表面活性剂	广州中海化工股份有限公司
5	BS-12	月桂基甜菜碱	两性离子表面活性剂	济南双盈化工有限公司
6	APG-ET	烷基糖苷酒石酸酯盐	阴离子表面活性剂	实验室自制

1.3 实验方法

1.3.1 表面张力测定

在实验中,配制了一系列不同浓度的表面活性剂溶液,其质量分数分别为0.005%、0.01%、0.03%、0.05%、0.10%、0.15%。在温度25℃下,测定了自来水和表面活性剂溶液的表面张力,分别测量3次并取平均值。

1.3.2 润湿性测定

参照矿用降尘剂性能测定方法(MT 506-1996),采用粉尘的沉降时间作为表征表面活性剂润湿性的指标。首先将不同浓度的表面活性剂溶液加入到50 mL的试管中,随后将0.1 g的粉尘快速倒入试管中,记录粉尘与液面初始接触及粉尘被完全润湿所用的时间,即为沉降时间,分别进行3次测量并取平均值。

所用粉尘为广州市某建筑工地附近采集的地面降尘,经过干燥处理后,用0.1 mm标准筛去除粗颗粒^[12]。同时,分别配制质量分数为0.02%、0.04%、0.06%、0.08%和0.10%的表面活性剂溶液。

1.3.3 降尘率测定

降尘率测定试验^[15-16],在密闭实验仓内进行。首先,利用烟雾发生装置生成特定数量的细颗粒物,待烟雾分散稳定后,使用便携式气体检测仪测定PM₁₀、PM_{2.5}和PM_{1.0}的浓度。然后,在实验仓内进

行均匀喷雾1 min,经过一段时间的静置后,再次测定PM₁₀、PM_{2.5}和PM_{1.0}的浓度。最后,在实验仓的空间对角线上设置3个采样点,采样点高度分布在0.5—1.5 m之间,最终测定值取3个点位的平均值。待烟雾散尽后进行下一组实验,用自来水作空白对照降尘实验。同时,配制了不同浓度的表面活性剂溶液,质量分数分别为0.01%、0.05%、0.10%和0.15%。

通过公式计算降尘率 $\eta = \frac{c_1 - c_2}{c_1} \times 100\%$,式

中 c_1 为喷雾前实验仓内PM₁₀、PM_{2.5}或PM_{1.0}的浓度平均值, c_2 为喷雾后实验仓内PM₁₀、PM_{2.5}或PM_{1.0}的浓度平均值。

2 结果与讨论

2.1 表面活性剂筛选

2.1.1 单一表面活性剂表面张力的测定

图1为不同浓度下表面活性剂溶液的表面张力。在相同的实验条件下,测得自来水的表面张力为67.20 mN·m⁻¹。从图1可见:表面活性剂的加入可显著降低水的表面张力,其中加入表面活性剂APG、1307和APG-ET溶液的表面张力明显低于加入BS-12、CAO-30和AES的溶液;表面活性剂溶液的表面张力随着质量浓度的增加而迅速降低,当溶液浓度为0.05%—0.1%时,溶液表面张力基本达

到最低水平,随后随着浓度增加表面张力下降趋势减缓;此外,在相同浓度下改性烷基糖苷(APG-ET)溶液的表面张力明显低于烷基糖苷溶液,当溶液质量分数为0.1%时改性烷基糖苷(APG-ET)的表面张力降至 $23.56 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$,表明其具有较强的表面活性。

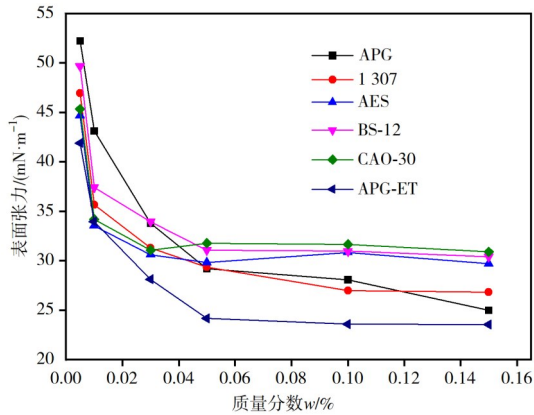


图1 不同表面活性剂的表面张力

Figure 1 Surface tension of different surfactants

2.1.2 单一表面活性剂润湿性的测定

图2为不同浓度下表面活性剂溶液的润湿性。在相同的实验条件下,自来水对粉尘的沉降时间为120 s。从图2可见:不同浓度下6种表面活性剂溶液对粉尘的润湿效果均优于水对粉尘的润湿效果,表明表面活性剂能够提高水对粉尘的润湿性能;非离子表面活性剂APG和1307表现出最佳的对粉尘的润湿效果,其次是阴离子表面活性剂APG-ET和AES,而两性表面活性剂CAO-30和BS-12的润湿性能较差。粉尘的沉降时间随着表面活性剂浓度的增加而逐渐缩短,这是由于大多数粉尘具有低能量表面,而水溶液具有高表面张力,水分子很难稳定吸附在粉尘表面,然而加入表面活性剂后溶液表面张

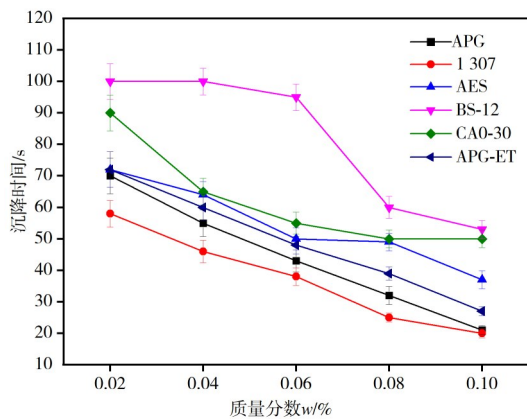


图2 不同表面活性剂的润湿性

Figure 2 Wettability of different surfactants

力迅速降低,表面活性剂分子可通过氢键作用轻松地吸附在粉尘表面及周围的水分子,溶液表面张力降低越大对粉尘的润湿性能就越好,这与表面张力的测量结果基本一致;此外,改性烷基糖苷(APG-ET)润湿性能相较烷基糖苷略有下降,这是由于烷基糖苷改性后引入了很多亲水基团,导致润湿性不如烷基糖苷^[17-18]。

2.2 表面活性剂复配性能

2.2.1 表面活性剂复配比例筛选

通过对单一表面活性剂性能的测定,筛选出性能优良表面活性剂APG、1307和APG-ET。因筛选出的3种表面活性剂中APG的价格最为经济,所以以APG为主,研究其与另外两种表面活性剂的复配性能,以探究是否能够实现协同增效的效果。当溶液浓度为0.05%时,测定了不同复配比例的表面活性剂的表面张力,结果列于表3。由表3可知,添加少量的1307或APG-ET即可显著改善复配表面活性剂的表面张力。综合考虑,优选出协同作用较好的3种类型的复配降尘剂,即 $m(\text{APG}):m(1307)=8:2$ 、 $m(\text{APG}):m(\text{APG-ET})=8:2$ 和 $m(\text{APG}):m(1307):m(\text{APG-ET})=6:2:2$ 。

表3 表面活性剂复配比例筛选

Table 3 Screening of surfactant compounding ratio

序号	复配比例	表面张力平均值/($\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$)
1	$m(\text{APG}):m(1307)=8:2$	24.62
2	$m(\text{APG}):m(1307)=6:4$	25.35
3	$m(\text{APG}):m(1307)=4:6$	26.14
4	$m(\text{APG}):m(1307)=2:8$	26.96
5	$m(\text{APG}):m(\text{APG-ET})=8:2$	23.82
6	$m(\text{APG}):m(\text{APG-ET})=6:4$	23.98
7	$m(\text{APG}):m(\text{APG-ET})=4:6$	24.05
8	$m(\text{APG}):m(\text{APG-ET})=2:8$	24.1
9	$m(\text{APG}):m(1307):m(\text{APG-ET})=8:1:1$	24.22
10	$m(\text{APG}):m(1307):m(\text{APG-ET})=6:2:2$	23.01
11	$m(\text{APG}):m(1307):m(\text{APG-ET})=4:3:3$	23.89
12	$m(\text{APG}):m(1307):m(\text{APG-ET})=2:4:4$	24.95

2.2.2 复配表面活性剂表面张力的测定

图3为不同浓度下3种类型复配表面活性剂溶液的表面张力。从图3可见:在相同浓度下,复配表面活性剂的表面张力明显低于单一表面活性剂的表

面张力;当复配表面活性剂的浓度增加至0.05%时,表面张力均基本趋于稳定;在APG复配体系中,少量1307或APG-ET的加入显著降低了APG的表面张力,而同时加入这两者的效果更为显著。表明,APG与1307、APG-ET的二元或者三元复配均能起到协同增效的作用。

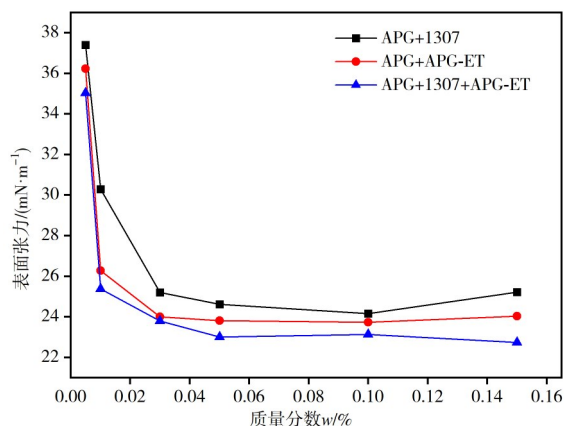


图3 复配表面活性剂的表面张力

Figure 3 Surface tension of compound surfactants

2.2.3 复配表面活性剂润湿性的测定

图4为不同浓度下复配表面活性剂溶液的润湿性。从图4可见:在相同浓度下,复配表面活性剂对粉尘的润湿性远优于单一表面活性剂对粉尘的润湿性;在0%—0.1%浓度范围内,复配表面活性剂的沉降时间随着浓度的增加而持续下降,当复配表面活性剂 $m(\text{APG}):m(1307):m(\text{APG-ET})=6:2:2$ 质量浓度为0.1%时,其表面张力可达 $23.13 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ 、0.1 g 粉尘的沉降时间为10 s。综合考虑经济成本和处理效果,选取三元复配体系的降尘剂,即复配表面活性剂 $m(\text{APG}):m(1307):m(\text{APG-ET})=6:2:2$ 。

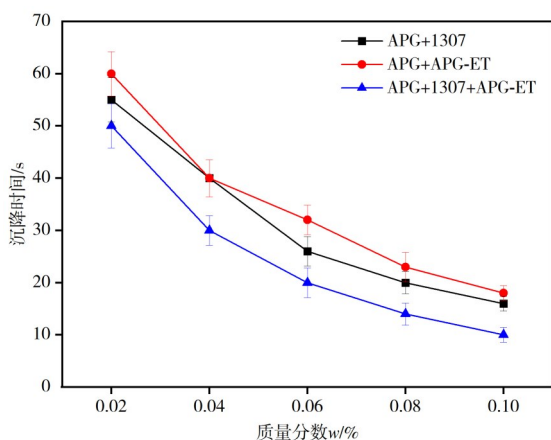


图4 复配表面活性剂的润湿性

Figure 4 Wettability of compound surfactants

2.3 降尘效率测试结果

图5为不同浓度下三元复配表面活性剂对 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{1.0}$ 的去除率。从图5可见:表面活性剂溶液的喷雾降尘效果显著高于自来水喷雾降尘效果,随着表面活性剂浓度的增大降尘率基本呈上升趋势,当复配表面活性剂浓度为0.1%时 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{1.0}$ 的去除率分别达到了86.2%、84.5%和76.5%。

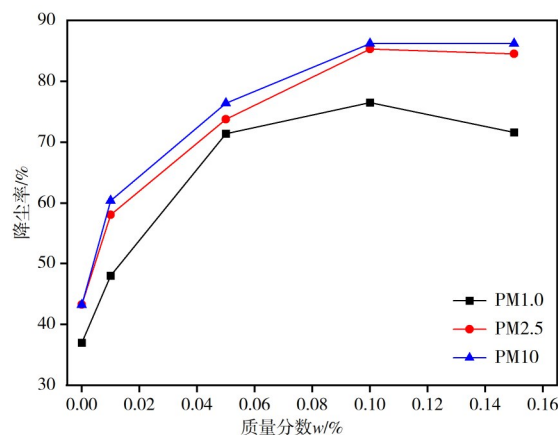


图5 复配表面活性剂的降尘率

Figure 5 Dust control rate of compound surfactants

2.4 表面活性剂的降尘机理

大多数粉尘表面具有低能量,而水溶液具有高表面张力,因此水分子很难稳定吸附在粉尘表面,导致自来水的降尘效率较低^[2]。通过添加表面活性剂可以有效提高喷雾的降尘效率。

表面活性剂由亲水基团和亲油基团组成,其中亲油基团受到水分子排斥而延伸至气相,而亲水基团则受到水分子吸引而伸入水相。当溶液中表面活性剂浓度很低时,其会首先吸附在溶液表面^[19],并且在溶液表面定向排列形成界面吸附膜,使大部分水-空气界面被表面活性剂分子-空气界面所取代。随着同种表面活性剂分子在液面处的聚集增多,其浓度越高,表面张力降低得越多,当液面完全被表面活性剂分子覆盖时表面张力降低至最低。亲油基团在水和粉尘颗粒之间起纽带作用,可使粉尘颗粒突破表面吸附的空气膜,促进水在粉尘颗粒上的润湿和凝结^[20]。空气中的细小粉尘颗粒凝结成核并形成团聚物,这些团聚物随着进一步吸附更多的颗粒物而增大,导致发生重力沉降或湿沉降,从而达到提高降尘效率和净化空气的目的。

3 结论

(1)实验测定了6种不同类型表面活性剂的表面张力和润湿性,其中阴离子表面活性剂和非离子表面活性剂的性能明显优于两性离子表面活性剂,更适合用做降尘剂材料。

(2)筛选出性能优良的表面活性剂APG、1307和APG-ET。以APG为主,使其与另外两种表面活性剂进行二元或三元复配,结果表明复配活性剂均可产生协同增效的效果。

(3)综合考虑经济成本和处理效果,选取三元复配体系的降尘剂,其配比为 $m(\text{APG}):m(1307):m(\text{APG-ET})=6:2:2$ 。当复配表面活性剂的质量浓度为0.1%时,体系的表面张力可降至 $23.13\text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$,粉尘的沉降时间为10 s,对 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{1.0}$ 的去除率分别达到86.2%、84.5%和76.5%。

参考文献:

- [1] 邬高高,王鹏飞,蒋逸丹,等.阴离子表面活性剂SDBS强化喷雾降尘试验研究[J/OL].安全与环境学报,2023(9):1-9 [2023-11-01]. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2023.1226>.
- [2] NIU Wenjin, NIE Wen, YUAN Mingyue, et al. Study of the microscopic mechanism of lauryl glucoside wetting coal dust: Environmental pollution prevention and control[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 412, 125223.
- [3] 张建国,李红梅,刘依婷,等.煤尘微观润湿特性及抑尘剂研发初探—以平顶山矿区为例[J].煤炭学报,2021,46(3):812-825.
- [4] 孙鑫,程卫民,周刚,等.煤矿用新型抑尘剂的研究与应用[J].安全与环境学报,2011,11(3):91-94.
- [5] XU Guang, CHEN Yinping, Jacques E, et al. Surfactant-aided coal dust suppression: A review of evaluation methods and influencing factors[J]. Science of the Total Environment, 2018, 639(22):1060-1076.
- [6] LI Shugang, ZHAO Bo, LIN Haifei, et al. Review and prospects of surfactant-enhanced spray dust suppression: Mechanisms and effectiveness[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 154: 410-424.
- [7] 金龙哲,刘建国,林清侠,等.矿山喷雾降尘技术研究与应用现状综述[J].金属矿山,2023(7):2-17.
- [8] 王晓楠.表面活性剂复配对煤尘润湿性的协同效应研究[D].淮南:安徽理工大学,2021.
- [9] 胡夫.基于正交试验的煤尘湿润剂复配研究[J].中国煤炭,2019,45(7):84-87.
- [10] 赵迪.煤的润湿特性及其与润湿降尘剂的性能匹配研究[D].徐州:中国矿业大学,2015.
- [11] 王延秋.表面活性剂对煤尘润湿效果的量化研究[D].西安:西安科技大学,2021.
- [12] 高峰,张树礼,郭二果.城市大气降尘研究方法综述[J].北方环境,2011,23(7):97-99.
- [13] 张迎新,吴强.表面活性剂的强化喷雾降尘实验[J].黑龙江科技学院学报,2008,18(4):269-271.
- [14] 朱良,周刚,孙明东,等.喷雾降尘用化学除尘剂的实验研究[J].煤炭工程,2014,46(9):96-98.
- [15] 王军锋,莫晓健,张铮,等.表面活性剂影响下细水雾吸附细颗粒物特性的试验[J].江苏大学学报(自然科学版),2016,37(1):31-34.
- [16] 彭静,陈维洪,黄雪萍,等.雾霾净化环保表面活性剂的降尘效果研究[J].广东化工,2020,47(13):104-105.
- [17] 吴志宇.烷基糖苷酒石酸酯的制备与性能研究[D].太原:中国日用化学工业研究院,2020.
- [18] GAO Yuyang, YANG Xiuquan, BAI Liang, et al. Preparation and Physicochemical properties of disodium lauryl glucoside sulfosuccinate [J]. Journal of Surfactants and Detergents, 2014, 17: 603-608.
- [19] 廖奇,樊煜熔,徐乐华.矿用复合抑尘剂的研究及应用[J].中国矿业,2020,29(4):56-60.
- [20] 刘伟,程卫民,于岩斌,等.综放工作面表面活性剂抑尘实验与应用研究[J].矿业安全与环保,2012,39(6):1-3.

Experimental Study of Green Surfactant Spray for Dust Control

PENG Jing^{1,2}, HUANG Xueping¹, JIANG Dianjun^{1*}, CHEN Weihong^{1,2}, DENG Xiaoshan¹, LIANG Lili¹, HUANG Liangzhi²

(1. Industrial Technology Incubation Center, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. Guangzhou Yueyouyan Photoelectric Materials Co., Ltd., Guangzhou 510650, China)

Abstract: To enhance the efficiency of urban dust suppression by spraying, this study conducted a systematic screening of surfactants used for spraying dust control, aiming to identify surfactants with superior performance. The surface tension and wettability of six types (APG, AES, 1307, CAO-30, BS-12, APG-ET) of surfactants were examined by experimental methods. The results showed that the anionic and non-ionic surfactants exhibited significantly better performance compared to amphoteric

surfactants. By primarily employing alkyl polyglucoside (APG) and blending it with the other selected surfactants with excellent performances: isomerized tridecyl alcohol polyethylene glycol ether (1307) and alkyl glucoside tartaric acid ester salt (APG-ET), the surface tension and wetting properties of the composite surfactant were determined. The results demonstrated that the ternary compound of APG-1307-(APG-ET) exhibited the best performance. The surface tension was tested as $23.13 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ and the dust sedimentation time was 10 s when $m(\text{APG}) : m(1307) : m(\text{APG-ET})$ ratio was 6:2:2 and the mass concentration of the surfactant solution was 0.1%. Dust suppression experiments were conducted to study the removal efficiency of the composite surfactant at different concentrations for fine particulate matter. When the mass concentration was 0.1%, the surfactant solution achieved removal rates of 86.2%, 84.5% and 76.5% for PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ and $\text{PM}_{1.0}$, respectively. Therefore, the optimal formulation for dust suppression surfactant was determined as $m(\text{APG}) : m(1307) : m(\text{APG-ET}) = 6 : 2 : 2$, with a spray mass concentration of 0.1%. This study provides practical formula references for improving the effectiveness of urban dust suppression through spraying.

Keywords: surfactant; dust control rate; fine particles; alkyl glycosides; wettability

(学术编辑:褚欣)