

DOI:10.11784/tdxbz202504024

基于固液交互作用调控的聚氨酯烟尘捕集润湿作用机理

刘丽艳^{1,2}, 刘超凡¹, 吕东³, 王浩¹

(1. 天津大学化工学院, 天津 300350; 2. 天津市化工安全与装备技术重点实验室, 天津 300350;

3. 应急管理部天津消防研究所, 天津 300381)

摘要: 冷库火灾过程中因为保温材料燃烧生成大量烟气, 导致能见度大幅降低影响消防救援效率. 为提升对冷库常用保温材料聚氨酯烟尘颗粒的捕集抑尘效率, 本研究首先使用光学显微镜与场发射扫描电镜观测聚氨酯烟尘颗粒的宏观与微观形貌, 使用傅里叶变换红外光谱仪测定聚氨酯烟尘颗粒表面官能团构成, 然后测定了十八烷基三甲基氯化铵(STAC)、十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)、十二烷基硫酸钠(SDS)、椰油酰胺丙基甜菜碱(CAB-35) 4 种表面活性剂水溶液的表面张力曲线与 zeta 电位值, 并通过接触角测量与沉降实验探究了不同溶液对聚氨酯烟尘样品颗粒的捕集润湿性能的影响机制. 研究表明表面活性剂对样品颗粒的润湿性能主要受固相颗粒表面电性与液相表面张力的影响: 表面活性剂电性显著调控初期沉降过程(0~7 s), 对于表面带负电的样品颗粒, 其在阴离子表面活性剂 SDS 中的沉降速度约为在其他 3 种表面活性剂中的 3.0 倍; 表面张力显著影响后期沉降过程(>7 s), 溶液表面张力与后期沉降速度呈强负相关($r=-0.9683$), 阳离子表面活性剂 STAC 的后期沉降速度约为阴离子表面活性剂 SDS 的 2.9 倍. 相关研究结果可为消防除烟药剂设计中表面活性剂选择提供理论依据.

关键词: 冷库火灾; 烟尘; 固液交互作用; 表面活性剂; 润湿捕集

中图分类号: X701.2

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)05-0443-08

Wetting Mechanism of Smoke Dust Capture in Polyurethane Combustion Based on Solid-Liquid Interaction Regulation

Liu Liyan^{1,2}, Liu Chaofan¹, Lü Dong³, Wang Hao¹

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Chemical Process Safety and Equipment Technology, Tianjin 300350, China;

3. Tianjin Fire Science and Technology Research Institute of MEM, Tianjin 300381, China)

Abstract: During cold storage fires, the combustion of thermal insulation materials generates large quantities of smoke dust, which significantly reduces visibility and hinders fire rescue efficiency. This study comprehensively investigated methods that enhanced the collection efficiency of fire suppressants for combustion smoke dust particles generated from polyurethane insulation materials. The macro/micromorphological characteristics of the polyurethane combustion products were investigated using optical microscopy and field-emission scanning electron microscopy. Furthermore, surface functional groups were analyzed using Fourier transform infrared spectroscopy. Subsequently, the surface tension curves and zeta potential values of four surfactant solutions—stearyltrimethylammonium chloride (STAC), cetyltrimethylammonium bromide (CTAB), sodium dodecyl sulfate (SDS), and cocamidopropyl betaine (CAB-35)—were experimentally measured. Contact angle measurement and sedimentation experiments were conducted to investigate mechanisms influencing wetting and particle capture performance. The main findings indicate that surfactant performance in terms of particle wettability is governed by the surface charge of solid particles and the surface tension of the liquid. The surfactant electrical properties critically control initial sedimentation (i.e., 0–7 s).

收稿日期: 2025-04-22; 修回日期: 2025-05-19.

作者简介: 刘丽艳(1977—), 女, 博士, 教授.

通信作者: 刘丽艳, liuliyang@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21978204).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 21978204).

For negatively charged particles, sedimentation velocity in an anionic SDS solution is approximately three times higher than that in other surfactant solutions. Surface tension strongly correlates with late-stage sedimentation (i.e., > 7 s) velocity ($r = -0.9683$). The cationic surfactant STAC exhibits 2.9 times higher sedimentation velocity than SDS. These results provide theoretical foundations for surfactant selection in designing smokeproof agents for fire-fighting.

Keywords: cold storage fire; smoke dust; solid-liquid interaction; surfactant; wetting and particle capture

以聚氨酯为主的冷库保温材料在发生火灾事故时会产生大量有毒烟气,大幅度降低火场内的能见度,使得被困人员难以分辨方向,也会极大阻碍消防救援工作的顺利进行,因此如何高效捕集聚氨酯燃烧产生的烟气是消防救援工作中关注的重点^[1-3]。目前消防环节中常用的喷雾除尘法具有成本较低、除尘效率高、环境适应力强等特点^[4-5]。但使用这种方法处理表面疏水的烟尘颗粒时,水的表面张力较大,水雾液滴难以迅速接触润湿烟尘颗粒,导致抑尘效果不理想^[6-7]。相较于其他固液两相体系而言,在喷雾除尘的过程中存在固液两相在空间中分散较广、液相雾滴与固体颗粒间接触几率较小、固液交互作用时间较短的特点,在该领域的相关研究仍有待深入^[8-9]。

科研人员发现,向水中加入表面活性剂能够显著降低水雾液滴的表面张力,使得烟尘颗粒更容易被水雾液滴接触润湿,形成较大的颗粒团后加速沉降,从而显著提升对疏水烟尘颗粒的捕集效率^[10-11]。顾海林等^[12]使用 3 种不同性质的表面活性剂进行喷雾捕集细颗粒物的实验,结果表明含表面活性剂溶液喷雾颗粒加快了细颗粒物去除速率;Chang 等^[13]用 4 种不同种类的表面活性剂捕集煤尘,发现无论初始煤尘浓度如何,十二烷基硫酸钠(SDS)和十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)的平均抑制效率均高于其他两种表面活性剂。

同时现有研究使用了不同的方法对烟尘颗粒的表面物性进行表征,以探究其对烟尘捕集过程的影响机制。Zhou 等^[14]通过 SEM 等方法测定了煤尘表面特征对其被表面活性剂捕集效率的影响,发现粗糙的煤尘表面会导致较差的润湿性;易双霞等^[15]通过红外光谱实验等方法,比较了不同表面活性剂对煤尘颗粒的润湿性能,发现烷基糖苷(APG)对煤尘的润湿性能最好。然而现有研究主要集中在煤尘的表面物性上,缺少对聚氨酯烟尘颗粒的物性分析。

对于烟尘润湿捕集过程中的固液交互作用,现有研究提出了多种表征方法。Ji 等^[16]采用接触角实验与沉降实验等方法,探究了复配表面活性剂对烟煤的润湿效果,发现在加入表面活性剂后能够显著降低烟煤在液相中的沉降时间。然而现有研究主要关注相

关表征的实验结果,而缺少对于固液交互作用表征实验过程中的机理性分析。

本研究以聚氨酯烟尘颗粒为研究对象,分别使用光学显微镜与场发射扫描电子显微镜拍摄其宏观与微观形貌,并结合傅里叶变换红外光谱仪测试分析其表面官能团。选取了阳离子表面活性剂十八烷基三甲基氯化铵(STAC)、阳离子表面活性剂十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)、阴离子表面活性剂十二烷基硫酸钠(SDS)、两性离子表面活性剂椰油酰胺丙基甜菜碱(CAB-35)这 4 种常见的表面活性剂,通过测量其表面张力随浓度变化的曲线确定后续实验浓度。然后进行接触角测量与沉降实验,比较不同种类表面活性剂对聚氨酯烟尘颗粒的润湿捕集性能,并结合 zeta 电位测试分析实验现象,综合探究固液相间润湿捕集机理,以期后续开发消防除烟药剂提供理论指导。

1 实验材料与方法

1.1 主要试剂

实验所使用的主要试剂及材料见表 1。

表 1 主要实验试剂及材料

Tab.1 Main reagents and materials used in experiments

试剂名称	简称	规格	来源
十八烷基三甲基氯化铵	STAC	98%	天津希恩思生化科技有限公司
十六烷基三甲基溴化铵	CTAB	98%	天津希恩思生化科技有限公司
十二烷基硫酸钠	SDS	99%	天津希恩思生化科技有限公司
椰油酰胺丙基甜菜碱	CAB-35	35%	天津希恩思生化科技有限公司
聚氨酯泡沫材料	HDPU	60 kg/m ³	廊坊捷澳节能科技有限公司

注:表中百分数均为质量分数。

1.2 实验方法

1.2.1 聚氨酯烟尘颗粒物性

将聚氨酯块置于研钵中研磨 3 min,然后在马弗炉(KJ-KR1400,郑州科佳电炉有限公司)中 400 °C 处理 15 min 后,取出冷却干燥,常温研磨 3 min 得到聚氨酯烟尘颗粒样品。

使用倒置显微镜 (IX73, Olympus Corporation) 直接观察聚氨酯烟尘颗粒的宏观形貌; 将烟尘颗粒喷金处理后, 用场发射扫描电镜 (Apreo S, Thermo Fisher Scientific) 观测微观形貌; 最后使用傅里叶红外光谱仪 (iS50, Thermo Fisher Scientific) 测定烟尘颗粒样品中含有的官能团。

1.2.2 溶液对聚氨酯烟尘颗粒的润湿性能

使用全自动表面张力仪 (QBZY-1, 上海方瑞仪器有限公司) 测量各表面活性剂水溶液的表面张力随浓度的变化曲线, 进而确定后续实验中使用的表面活性剂水溶液浓度。考虑到表面活性剂的样品特征, 使用白金板法测量各表面活性剂溶液的表面张力值。对于每种表面活性剂均设置了 6 个质量浓度梯度, 测定其表面张力曲线, 每组重复 3 次。

采用 zeta 电位仪 (Zetasizer Nano ZS, Malvern Panalytical) 测量聚氨酯烟尘颗粒在不同浓度表面活性剂水溶液中的 zeta 电位。配置指定浓度的表面活性剂溶液 50 mL, 取 50 mg 聚氨酯烟尘颗粒放入其中充分混合, 配制成 1 g/L 的混悬液, 另外配置一份水与聚氨酯烟尘颗粒的混悬液作为对照。之后取一定量混悬液放入 zeta 测试样品池中, 使用 zeta 电位测量仪测量不同混悬液的 zeta 电位并记录数据, 每组实验重复 3 次。

使用去离子水与表面活性剂进行接触角实验, 方法为取烟尘颗粒用压片机压片, 使用直径 15 mm 的压片模具, 加压至 30 MPa 维持 3 min。使用接触角测量仪测试不同表面活性剂溶液在聚氨酯烟尘颗粒压片上的接触角。

使用去离子水和选取的 4 种指定浓度的表面活性剂进行沉降实验, 方法为取 45 mL 去离子水和指定浓度的 4 种表面活性剂溶液沿壁面缓慢加入 50 mL 量筒中, 将 5 个量筒并排放在量筒架上。称量 5 组 150 mg 的聚氨酯烟尘颗粒, 同时加入 5 个量筒中, 观察并记录烟尘颗粒随时间变化的沉降情况。

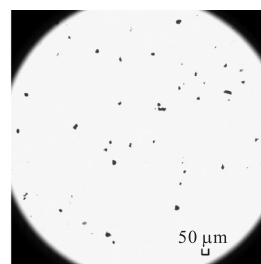
2 结果与讨论

2.1 聚氨酯烟尘颗粒物性分析

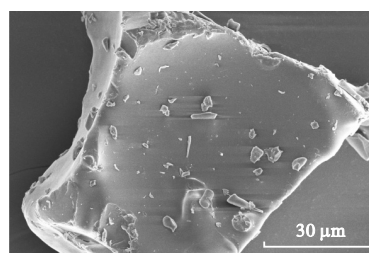
2.1.1 表面形貌

使用倒置显微镜观测得到的样品颗粒宏观形貌图像如图 1(a) 所示, 可以看到颗粒宏观形貌无固定规则, 颗粒粒径均在 $60 \mu\text{m}$ 以下。使用场发射扫描电镜观测得到的样品颗粒的微观形貌图像如图 1(b) 所示, 可见样品颗粒表面较为光滑, 说明表面活性剂液滴对样品颗粒的润湿性可能较低^[17]。另外注

意到样品颗粒表面没有明显孔结构。相较于粗糙的表面结构, 这避免了气体进入孔隙中影响表面活性剂的润湿性能^[14]。



(a) 烟尘颗粒宏观形貌



(b) 烟尘颗粒微观形貌

图 1 聚氨酯烟尘颗粒形貌

Fig.1 Morphology of polyurethane smoke dust particles

2.1.2 表面官能团分析

聚氨酯烟尘颗粒的傅里叶变换红外光谱测试结果如图 2 所示, 结合相关研究对其表面官能团进行分析^[15,18]。可见, 在波数 $3700 \sim 3000 \text{ cm}^{-1}$ 区段附近, 主要为羟基官能团集中处; 在波数 $3000 \sim 2800 \text{ cm}^{-1}$ 区段附近, 主要为脂肪结构聚集处; 在波数 $2800 \sim 1800 \text{ cm}^{-1}$ 区段附近谱线变化平缓, 没有明显峰值出现; 在波数 $1800 \sim 1000 \text{ cm}^{-1}$ 区段附近, 主要为含氧官能团; 在 $900 \sim 700 \text{ cm}^{-1}$ 区段附近, 主要构成为芳香结构。样品颗粒中的亲水性基团以羟基官能团与含氧官能团为主, 疏水性基团以脂肪结构与芳香结构为主。在烟尘颗粒中, 主要表现疏水性官能团性质, 呈现表面疏水的状态。

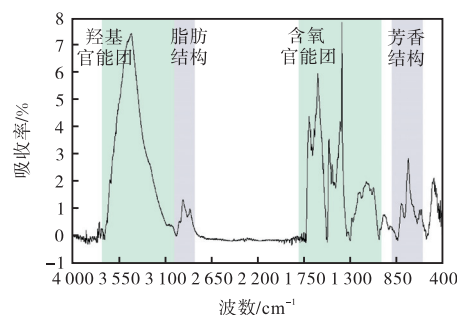


图 2 傅里叶变换红外光谱测试结果

Fig.2 Test results of Fourier transform infrared spectroscopy

2.2 溶液对聚氨酯烟尘颗粒的润湿性能

2.2.1 表面张力

向水中添加少量的表面活性剂能够显著降低液体的表面张力,使得水基灭火剂更容易在烟尘颗粒表面铺展,进而提升其润湿性能. 在现有研究^[12-16]基础上选取了 STAC、CTAB、SDS、CAB-35 4 种具有代表性的表面活性剂,其中 STAC 与 CTAB 为阳离子表面活性剂,SDS 为阴离子表面活性剂,CAB-35 为两性离子表面活性剂. 使用全自动表面张力仪测量 4 种表面活性剂溶液的表面张力曲线如图 3 所示. 所选取的 4 种表面活性剂的拐点均在 0.10% (质量分数)附近,到达该浓度后即使继续增加表面活性剂浓度,表面张力的变化幅度也相对较小,对润湿性能的影响较小,因此后续实验中均采用质量分数为 0.10% 的表面活性剂溶液进行实验.

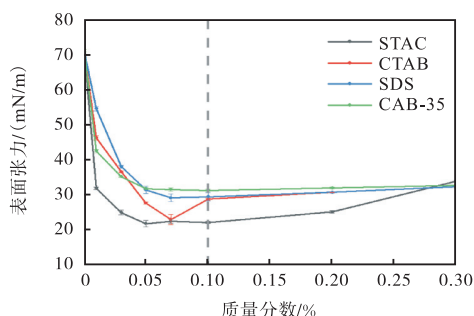


图 3 4 种表面活性剂的表面张力曲线

Fig.3 Surface tension curves of four types of surfactants

2.2.2 zeta 电位

聚氨酯烟尘颗粒表面可能带有一定的电性,从而影响不同种类的表面活性剂对其润湿效果. 根据 stern 双电层理论,施加外电场时, stern 层与扩散层发生相对移动,这时两层之间界面的电位就是 zeta 电位^[19-20]. 实验测得的 zeta 电位值如图 4 所示. 可见: ①聚氨酯烟尘颗粒与水配成的混合溶液的 zeta 电位值为负值,这说明烟尘颗粒混入水中后表面呈现负电性. ②zeta 电位的绝对值体现了颗粒与其表面附近离子构成的体系的稳定性,绝对值越大,该体系的稳定性越强. 由图 4 可以看出,两种阳离子表面活性剂混合溶液的 zeta 电位绝对值最大,均在 60 mV 以上,阴离子表面活性剂 SDS 混合溶液的 zeta 电位绝对值约为 50 mV,两性离子表面活性剂 CAB-35 混合溶液的 zeta 电位绝对值最小,接近 0 mV. 对于阳离子、阴离子表面活性剂,与样品颗粒构成的体系稳定性较强,体系外层为亲水极性基团,因此润湿性能相对较高;两性离子与样品颗粒构成的体系稳定性较差,表面离子流动性较强,亲水基团无法稳定在体系外层,因此

润湿性能相对较差. ③聚氨酯烟尘样品颗粒与两种阳离子表面活性剂分别配成的混合溶液的 zeta 电位值为正值,与阴离子表面活性剂配成的混合溶液的 zeta 电位值为负值,与两性离子表面活性剂配成的混合溶液的 zeta 电位值位于 0 附近,说明加入不同种类的表面活性剂会改变颗粒表面电性,具体变化方式与加入的表面活性剂电性有关,如图 5 所示.

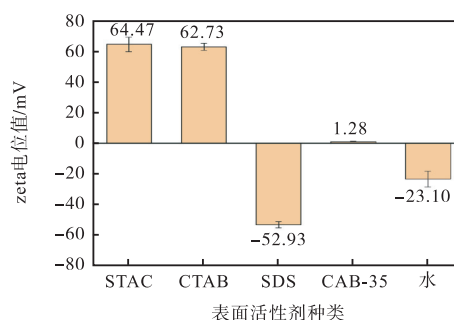
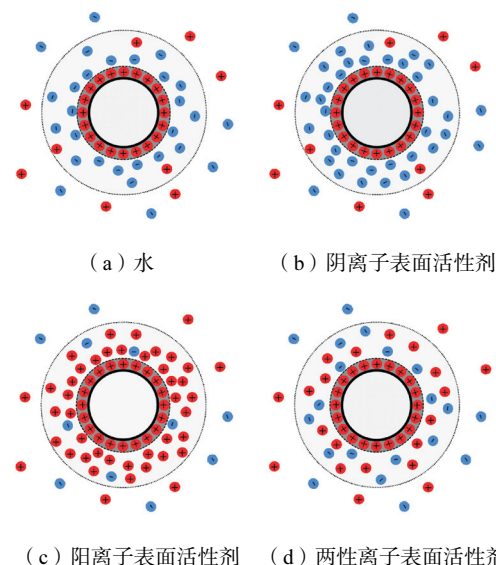


图 4 样品颗粒在不同溶液中的 zeta 电位测量值

Fig.4 Zeta potential measurements of different solutions mixed with sample particles



(c) 阳离子表面活性剂 (d) 两性离子表面活性剂

图 5 样品颗粒在不同表面活性剂溶液中的 zeta 电位示意

Fig.5 Schematic of the zeta potential of sample particles in different surfactant solutions

2.2.3 表面活性剂对聚氨酯烟尘颗粒的润湿性能

使用去离子水和表面活性剂溶液对样品颗粒压片进行接触角测量,得到的结果如图 6 所示. 去离子水在样品颗粒压片表面的形态比较稳定,平均接触角为 105.93°. 接触角大于 90°,说明样品颗粒表面呈现明显疏水性. 使用表面活性剂溶液进行接触角测试时,液滴在 3 s 内就渗入压片,接触角明显小于 90°,说明使用表面活性剂溶液能够显著改善液相对聚氨酯烟尘颗粒的润湿性能.

然而在实验过程中,表面活性剂液滴在样品颗粒压片表面无法保持稳定形貌,无法评价液相润湿性能;同时,使用压片方法处理样品颗粒会形成多孔介

质,毛细作用会影响接触角测定结果,干扰润湿性能分析.因此,使用接触角实验无法准确有效地表征润湿时固液间交互作用.

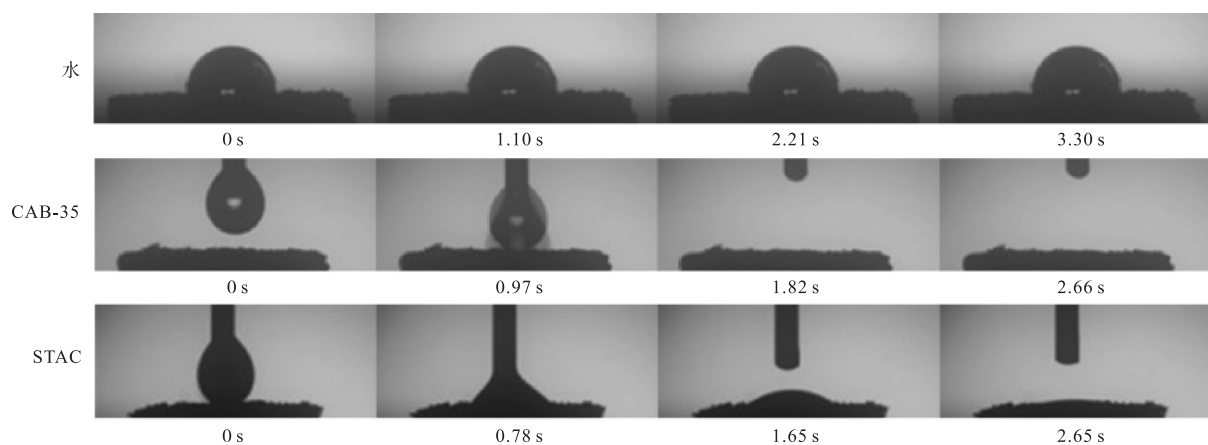


图6 接触角测量结果

Fig.6 Contact angle measurement results

鉴于此,改用润湿沉降表征实验.结合样品颗粒在不同种类表面活性剂溶液中的沉降速度,探究不同种类表面活性剂对样品颗粒的润湿性能^[13,16].进行沉降实验时,样品颗粒在不同表面活性剂溶液中的沉降实物如图7所示,从左至右分别为CAB-35、SDS、STAC、CTAB、水.在沉降过程中,从固相颗粒前端接触到45mL刻度处液面时开始计时,固相前端到达5mL刻度处时视为沉降进度达到100%.

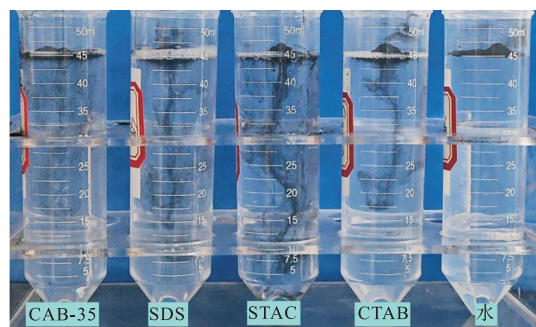


图7 沉降实验实物

Fig.7 Photograph of sedimentation experiment

记录样品颗粒固相前端在不同液相中的沉降进度随时间变化如图8所示.样品颗粒在去离子水中并未发生沉降,表明样品颗粒自身呈现疏水性质.加入表面活性剂后,样品颗粒在表面活性剂溶液中发生润湿沉降现象,说明表面活性剂分子能够改善样品颗粒表面的疏水性质,表面活性剂分子的疏水端指向样品颗粒表面,亲水端指向外侧,从而显著提高了溶液对样品颗粒的润湿性能.

由图8可知,按照完成沉降的总时间来看,样品

颗粒在4种表面活性剂中的平均沉降速度排序为:STAC > CTAB > SDS > CAB-35.但观察发现样品颗粒在各表面活性剂溶液中的沉降曲线并非线性,沉降进行到第7s时各曲线均出现明显转折.因此以7s处为分界,分别对4条曲线的不同沉降阶段进行线性拟合,以沉降拟合曲线的斜率表征不同阶段下样品颗粒的沉降速度,进而比较分析样品颗粒在各表面活性剂溶液中不同时间下的沉降状态.拟合曲线如图8所示,图中数据点为实验值,数据线为拟合曲线.

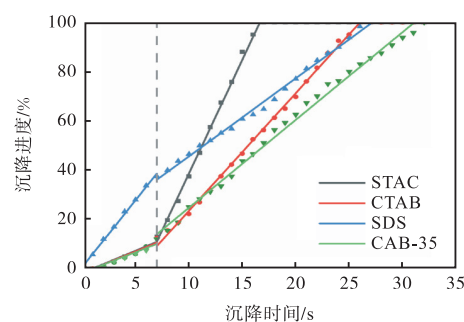


图8 样品颗粒沉降曲线分段拟合结果

Fig.8 Segmented fitting results of the sample particle sedimentation curves

(1) 观察图8可知,在沉降前期(0~7s),样品颗粒在4种表面活性剂溶液中的沉降状态主要分为两种:在STAC、CTAB、CAB-353种表面活性剂溶液中的沉降拟合曲线的斜率分别为 1.807×10^{-2} 、 1.789×10^{-2} 、 1.670×10^{-2} ,最大值和最小值之间差距不超过10%,说明样品颗粒在这3种表面活性剂溶液中沉降初期阶段的沉降速度相差较小;而样品颗粒在SDS表面活性剂溶液中的沉降拟合曲线的斜率为 $5.438 \times$

10^{-2} , 约为其他 3 条沉降拟合曲线斜率的 3.0 倍, 这说明在沉降初期, 样品颗粒在 SDS 表面活性剂溶液中的沉降速度显著高于其他 3 种表面活性剂溶液。

在沉降过程中, 首先发生的是聚氨酯烟尘颗粒与表面活性剂溶液接触并逐渐浸入溶液中. 这与表面活性剂喷雾接触、润湿烟尘颗粒一样, 都发生了固液界面驱替气固界面的过程. 这一阶段沉降速度越快, 则表明对应表面活性剂对该固相颗粒的润湿性能可能越好。

结合 zeta 电位测试结果对这一现象进行分析, 如图 9(a) 所示, 对于阴离子表面活性剂的润湿过程来说, 表面活性剂的疏水端与颗粒表面的疏水端相吸引, 带负电荷的亲水端与带负电荷的颗粒表面存在静电排斥, 从而使得颗粒表面围绕了一层疏水端指向颗粒表面、带有负电荷的亲水端指向外侧的表面活性剂分子, 使得颗粒的润湿性提高. 如图 9(b) 所示, 对于阳离子表面活性剂的润湿过程来说, 由于阳离子表面活性剂分子中带有正电荷的亲水端与带有负电荷的疏水颗粒表面之间的静电吸引力较大, 使得颗粒表面紧密围绕一层亲水端指向颗粒表面、疏水端指向外侧的表面活性剂分子, 而外侧的疏水端又会吸引游离的表面活性剂分子的疏水端, 从而使得最外层为疏水端指向颗粒表面、亲水端向外侧的表面活性剂分子, 形

成双分子层结构, 最终最外层为带有正电荷的亲水基团, 使得颗粒的润湿性提高. 如图 9(c) 所示, 两性离子表面活性剂的作用机理较为复杂, 可能同时存在有阴离子、阳离子表面活性剂分子的作用机理, 使得最外层电位接近电中性。

由于在阴离子表面活性剂中, 样品颗粒与液相接触时, 阴离子表面活性剂分子迅速包裹在样品颗粒外层, 共同形成结构相对简单的外层亲水的单分子层基团, 润湿速度较快. 而在阳离子与两性离子表面活性剂中, 表面活性剂分子需要在样品颗粒表面形成双分子层或更复杂的结构才能提高颗粒表面润湿性, 结构相对复杂, 因此在沉降前期其润湿速度相对较慢。

(2) 观察图 8 可知, 在沉降后期 ($> 7\text{ s}$), 样品颗粒在 STAC、CTAB、SDS、CAB-35 4 种表面活性剂溶液中的沉降拟合曲线斜率各不相同, 分别为 9.223×10^{-2} 、 4.775×10^{-2} 、 3.166×10^{-2} 、 3.564×10^{-2} . 与沉降前期相比, 样品颗粒在 STAC、CTAB、CAB-35 3 种表面活性剂中的沉降速度分别提升为沉降前期的 5.1 倍、2.7 倍、2.1 倍, 而在 SDS 表面活性剂溶液中的沉降速度下降为沉降前期的 0.6 倍。

在聚氨酯烟尘颗粒完全浸入表面活性剂溶液之后, 不再发生相界面的驱替过程, 而是固相颗粒在液相中的沉降过程. 这一阶段与表面活性剂雾滴捕集到烟尘颗粒后, 烟尘颗粒在其中沉降的过程一样, 通常希望表面活性剂雾滴能够截留固相颗粒较长时间. 因此, 这一阶段沉降速度越慢, 则表明使用对应表面活性剂对该固相颗粒的捕集效果可能越好。

结合第 2.2 节对 4 种表面活性剂的表面张力测定结果, 使用皮尔逊相关系数说明沉降后期的沉降曲线斜率与表面张力之间的相关性, 其计算式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

式中: r 为皮尔逊相关系数; X_i 为第 i 组实验沉降后期沉降曲线斜率; Y_i 为第 i 组沉降实验所用表面活性剂溶液的表面张力. 计算 7 s 后样品颗粒在 4 种表面活性剂溶液中的沉降拟合曲线斜率与对应表面活性剂的表面张力的皮尔逊相关系数 r 为 -0.9683 , 说明二者具有较强的负相关性, 即表面活性剂的表面张力越大, 样品颗粒在溶液中沉降的速度越慢. 其主要原因在于向水中加入表面活性剂后, 溶液的密度、黏度等变化幅度较小, 此时影响液体沉降所受阻力的主要因素为表面张力的大小, 表面张力越大, 样品颗粒在沉降过程中所受阻力的越大, 沉降速度也就越慢。

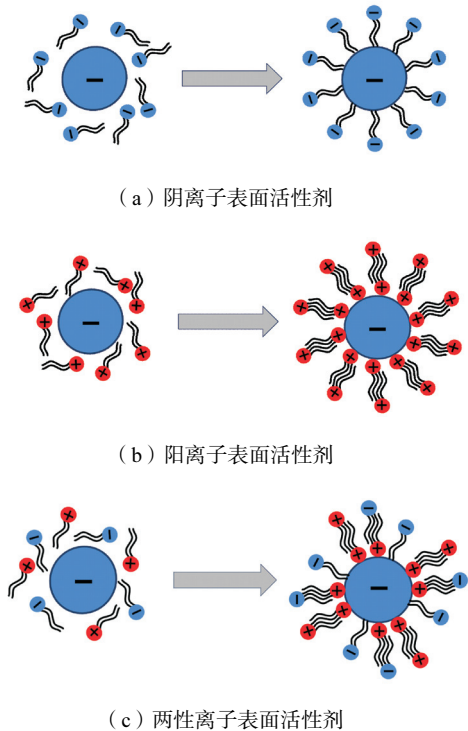


图 9 表面活性剂分子在样品颗粒表面聚集机理示意
Fig.9 Schematic of the aggregation mechanism of surfactant molecules on the surfaces of sample particles

3 结 论

(1) 不同种类表面活性剂带有不同的电性,会影响溶液对样品颗粒的润湿性能. 对于表面带负电的样品颗粒,阴离子表面活性剂的润湿效果更好,显著强于阳离子表面活性剂与两性离子表面活性剂. 在沉降实验初期(0~7s),样品颗粒在阴离子表面活性剂溶液中的沉降速度约为其他3种表面活性剂的3.0倍. 因此,表面活性剂 SDS 对聚氨酯烟尘颗粒的润湿性能更好.

(2) 不同种类表面活性剂的表面张力大小也会影响溶液对样品颗粒的捕集性能. 在能够有效捕集固相颗粒的前提下,表面张力越大,表面活性剂雾滴对样品颗粒的留存性能越强. 在沉降实验后期(>7s),样品颗粒在4种表面活性剂中的沉降速度排序为: STAC > CTAB > SDS > CAB-35,其沉降速度与表面张力的皮尔逊相关系数 r 为 -0.9683,呈明显负相关. 因此,表面活性剂 CAB-35 对聚氨酯烟尘颗粒的捕集留存效果更好.

参考文献:

- [1] Singh H, Jain A K. Ignition, combustion, toxicity, and fire retardancy of polyurethane foams: A comprehensive review[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, 111(2): 1115-1143.
- [2] 唐秀翠. 冷库火灾频发成因分析防范对策研究[C]//中国消防协会学术工作委员会消防科技论文集(2022). 北京, 中国, 2022: 163-165.
Tang Xiucui. Analysis of the causes of frequent cold storage fires and research on preventive measures[C]//Collection of Fire Science and Technology Papers by Academic Work Committee of China Fire Protection Association(2022). Beijing, China, 2022: 163-165(in Chinese).
- [3] 王岳. 冷库建筑火灾风险分析及对策研究[C]//中国消防协会学术工作委员会消防科技论文集(2022). 北京, 中国, 2022: 423-425.
Wang Yue. Research on fire risk analysis and countermeasures of cold storage buildings[C]//Collection of Fire Science and Technology Papers by Academic Work Committee of China Fire Protection Association(2022). Beijing, China, 2022: 423-425(in Chinese).
- [4] Wang P F, Liu R H, Tang M, et al. Experimental study on atomization characteristics and dust suppression efficiency of high-pressure spray in underground coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(9): 2124-2130.
- [5] Mehaddi R, Collin A, Boulet P, et al. Use of a water mist for smoke confinement and radiation shielding in case of fire during tunnel construction[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2020, 148: 106156.
- [6] Wang X N, Yuan S J, Jiang B Y. Experimental investigation of the wetting ability of surfactants to coals dust based on physical chemistry characteristics of the different coal samples[J]. *Advanced Powder Technology*, 2019, 30(8): 1696-708.
- [7] Wang X N, Yuan S J, Jiang B Y. Wetting process and adsorption mechanism of surfactant solutions on coal dust surface[J]. *Journal of Chemistry*, 2019, 2019: 9085310.
- [8] Li S G, Zhao B, Lin H F, et al. Review and prospects of surfactant-enhanced spray dust suppression: Mechanisms and effectiveness[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 154: 410-424.
- [9] 王凯, 杨孟娇, 徐敏. 煤矿井下湿式喷雾除尘技术研究前沿与展望[J]. *煤炭技术*, 2023, 42(11): 183-186.
Wang Kai, Yang Mengjiao, Xu Min. Research frontier and prospect of wet spray dust removal technology underground coal mine[J]. *Coal Technology*, 2023, 42(11): 183-186(in Chinese).
- [10] 王利军, 张友兰, 刘志华, 等. 炭黑在水性体系中的分散及分散剂结构的影响[J]. *天津大学学报*, 1999, 32(5): 616-620.
Wang Lijun, Zhang Youlan, Liu Zhihua, et al. Dispersion of carbon black in waterborne system and the effect of dispersant structure[J]. *Journal of Tianjin University*, 1999, 32(5): 616-620(in Chinese).
- [11] 赵少静, 程发, 陈宇, 等. Gemini 表面活性剂的合成及性能[J]. *天津大学学报*, 2012, 45(1): 81-86.
Zhao Shaojing, Cheng Fa, Chen Yu, et al. Synthesis and properties of Gemini surfactants[J]. *Journal of Tianjin University*, 2012, 45(1): 81-86(in Chinese).
- [12] 顾海林, 陈斌康, 郭佳琪, 等. 含表面活性剂溶液的雾化特性及对细颗粒物的强化去除效果[J]. *化工进展*, 2024, 43(2): 865-871.
Gu Hailin, Chen Binkang, Guo Jiaqi, et al. Atomization characteristics of surfactant-containing solutions and enhanced removal of fine particulate matter[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2024, 43(2):

- 865-871 (in Chinese).
- [13] Chang P, Zhao Z D, Xu G, et al. Evaluation of the coal dust suppression efficiency of different surfactants: A factorial experiment[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, 595: 124686.
- [14] Zhou Q, Qin B T, Li H Z, et al. Changes of physical properties of coal dust with crush degrees and their effects on dust control ability of the surfactant solution spray[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(22): 33785-33795.
- [15] 易双霞, 袁梅, 何季民, 等. 表面活性剂对无烟煤润湿性的影响实验研究[J]. *煤矿安全*, 2024, 55(10): 38-45.
- Yi Shuangxia, Yuan Mei, He Jimin, et al. Experimental study on the effect of surfactant on wettability of anthracite[J]. *Safety in Coal Mines*, 2024, 55(10): 38-45 (in Chinese).
- [16] Ji B, Jiang B Y, Yuan L, et al. Experimental and molecular dynamics simulation study on the influence of SDS and JFC composite ratios on bituminous coal wettability[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 174: 473-484.
- [17] 张坤尹, 严敏, 李树刚, 等. 煤体表面粗糙度对非阳离子表面活性剂润湿性影响的实验研究[J]. *煤矿安全*, 2021, 52(11): 8-15.
- Zhang Kunyin, Yan Min, Li Shugang, et al. Experimental study on the influence of coal surface roughness on wettability of non-cationic surfactants[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(11): 8-15 (in Chinese).
- [18] 王晓婷, 袁红, 李梅. 不同表面活性剂对煤的润湿性的影响研究[J]. *煤矿安全*, 2024, 55(12): 97-105.
- Wang Xiaoting, Yuan Hong, Li Mei. Study on the influence of different surfactants on the wettability of coal[J]. *Safety in Coal Mines*, 2024, 55(12): 97-105 (in Chinese).
- [19] Jin H, Zhang Y S, Chen K, et al. Preparation and characterization of a composite dust suppressant for coal mines[J]. *Polymers*, 2020, 12(12): 2942.
- [20] Chang P, Xu G, Chen Y P, et al. Experimental evaluation of the surfactant adsorptions performance on coal particles with different properties[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 648: 129408.

(责任编辑: 田 军)