

矿山抑尘泡沫基础特性及性能定量评估方法

王和堂^{1,2}, 章琦^{1,2}, 王德明^{1,2}, 李星诚^{2,3}, 徐超航^{2,4}

(1. 中国矿业大学 矿山瓦斯粉尘灾害技术基础研究国家级专业中心实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 北京大学 工学院, 北京 100871; 4. 武汉理工大学 安全科学与应急管理学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 源头抑制粉尘产生和飞扬是矿山粉尘防控的优先方向; 泡沫作为一种含有发泡剂的气液两相介质, 具有接尘面积大、黏附粉尘能力强、润湿粉尘速度快的独特优势, 是一种高效的抑尘手段, 尤其是对呼吸性粉尘有很强的抑制能力。但过去对抑尘泡沫本身形态及性能研究较为缺乏, 导致在抑尘泡沫制备与利用中有一定盲目性, 制约该技术在矿山的低成本应用。为此, 采用理论推导、实验研究、定量分析等相结合的方法, 研究了抑尘泡沫排液过程及规律、抑尘泡沫微观形态、性能影响机制及定量评估方法。结果表明: 排液因子 w 与发泡过程的泡沫柱高度、泡沫含液量相关, 即抑尘泡沫高度越高、含液量越大, 排液因子 w 越小, 利用排液模型计算得到的排液因子 w 、理论排液曲线预测值与实验值有较好的一致性; 泡沫尺寸分布、平均直径随发泡剂的添加浓度(质量分数)变化而变化, 当发泡剂质量分数小于0.1%时泡沫均匀性较差、数量较少, 提高其质量分数至一定范围(0.3%~0.6%)后, 泡沫均匀性和数量都有改善, 泡沫可获得较大半衰期, 其形态难以被破坏, 但发泡剂质量分数大于1%时, 泡沫的数量下降、大粒径气泡增多; 在发泡剂中加入聚合物羧乙基纤维素的质量分数小于0.3%时对溶液在煤尘接触角无明显影响, 但质量分数增大后接触角比未添加前有所提升, 在发泡性能和稳泡性能方面, 加入0.1%聚合物可达到较好地提升抑尘泡沫的产生效率和稳定性。基于从抑尘泡沫产生、输运到其作用于截割尘源全过程剖析, 提出了抑尘泡沫性能的评价指标体系, 并给出了抑尘泡沫性能定量评估准则及4个评价等级的判定依据。

关键词: 矿山粉尘; 抑尘泡沫; 泡沫形态; 泡沫性能; 定量评价

中图分类号: TD714 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2023)04-1584-12

Basic characteristics of mine dust suppression foam and the quantitative evaluation method of its performance

WANG Hetang^{1,2}, ZHANG Qi^{1,2}, WANG Deming^{1,2}, LI Xingcheng^{2,3}, XU Chaohang^{2,4}

(1. National Professional Center Laboratory of Basic Research of Mine Gas and Dust Control Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 4. School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The priority direction of mine dust control is to suppress dust generation and flying at the source. Foam, a gas-liquid two-phase medium, has some unique advantages of large dust covering area, strong adhesion ability and fast wetting of dust. It is an efficient way of dust suppression, especially for respiratory dust. However, there is limited research on

收稿日期: 2022-11-28 修回日期: 2023-01-06 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.1747

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52274237, 51474216, 51504249)

作者简介: 王和堂(1985—), 男, 湖南耒阳人, 教授, 博士生导师。E-mail: wanghetang@cumt.edu.cn

引用格式: 王和堂, 章琦, 王德明, 等. 矿山抑尘泡沫基础特性及性能定量评估方法[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1584-1595.

WANG Hetang, ZHANG Qi, WANG Deming, et al. Basic characteristics of mine dust suppression foam and the quantitative evaluation method of its performance[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1584-1595.



移动阅读

the morphology and properties of dust suppression foam in the past, resulting in a certain blindness in the preparation and utilization of dust suppression foam. And there is a problem of a large amount of spray foam in exchange for higher dust suppression efficiency, which restricts the low-cost application of this technology in mines. Therefore, in this study, a theoretical derivation was combined with experimental research and quantitative analysis to study the process and law of dust suppression foam drain, the micromorphology of dust suppression foam, the performance influence mechanism and the quantitative evaluation method. These results show that the drain factor w is related to the height of the foam column and the liquid of foam in the foaming process. The higher height of the dust suppression foam and the greater liquid content, the value of the discharge factor w will be lower. The predicted value of w and the theoretical discharge curve calculated by the drainage model show a high degree of consistency with the experimental results, which verifies the accuracy of the theoretical model. The results show foam size distribution, average diameter with the concentration of foaming agent changes. At a low concentration ($<0.1\%$), the foam uniformity is poor and the number is less. After increasing the foam concentration to a certain range ($0.3\%–0.6\%$), the foam uniformity and quantity are improved. Foam can obtain higher half-life, and its morphology is more difficult to be destroyed. But at a higher foaming agent concentration ($>1\%$), the number of foam decreases and large particle size bubbles increase. The addition of low-concentration ($<0.3\%$) polymer to the foaming agent has no obvious effect on the wetting angle of coal dust, but the contact angle increases when enlarging the concentration of polymer. In terms of foaming performance and foam stability performance, the production efficiency and stability of dust suppression foam can be improved after the addition of 0.1% polymer. Based on the analysis of the whole process from the generation of dust suppression foam to its action on the dust cutting source, the indicators for evaluating the foam performance are proposed, and the quantitative evaluation criteria and four grades of dust suppression foam performance are given.

Key words: mine dust; dust suppression foam; foam morphology; foam performances; evaluation methodology

矿业是国民经济和社会发展的重要基础产业,但矿山开采活动中产生的矿尘对从业人员的健康和安全造成危害及威胁。矿尘是矿山最严重的职业危害,常诱发不可治愈性的尘肺病^[1-4];还是矿山最主要的自然灾害之一,可发生爆炸事故,造成重大人员伤亡^[5-6]。同时,尘肺病和矿尘爆炸事故造成巨大的经济损失,并带来极其不良的社会影响^[7-8]。为了防治矿尘,国内外普遍采用以水或水雾作为降尘介质的湿式防尘技术^[9-13],但随着矿山机械化程度和开采强度的增加,采掘作业场所粉尘产生量、呼吸性粉尘占比大幅上升^[14],水雾介质对高浓度、细颗粒粉尘的抑制能力较弱,难以满足矿尘高标准源头治理的要求。研发高效的抑尘技术成为迫切需求。

与降尘水雾相比,抑尘泡沫作为一种含有发泡剂的气液两相介质,具有接尘面积大、黏附粉尘能力强、润湿粉尘速度快的独特优势,尤其是对呼吸性粉尘有很强的抑制能力^[15],成为近年来的研究热点之一。2008年以来,中国矿业大学通风与防尘团队系统性研究了泡沫抑尘技术,在发泡材料、泡沫制备与泡沫利用等方面取得系列创新成果^[16-21],并在现场进行了成功应用,实现了高效率、低耗水抑制矿尘的目标^[22-23],取得了显著的社会经济效益。美国国家职业安全健康研究院(NIOSH)Reed W. R.博士课题组自2017年

起进行了利用泡沫抑制长壁工作面粉尘的物理模拟试验并在现场测试了泡沫性能,取得较好效果^[24-28]。但该技术在现场的规模化应用对成本控制有更高要求。笔者基于长期研究和工程实践,认为降低泡沫使用成本的必由之路是实现泡沫从被动“降尘”到主动“抑尘”的转变,即从粗放式喷洒泡沫沉降浮尘到集约化利用泡沫在尘源处抑制粉尘的产生和逸散;并在国际上较早进行了煤矿综掘、综采工作面泡沫抑尘的探索,为矿井粉尘源头治理提供了新途径^[29-30]。在进一步的研究中发现,直接在尘源处实施“抑尘”对泡沫性能有着非常高的要求,但由于抑尘泡沫基础研究的缺乏,使得泡沫抑尘技术的迭代发展受到制约,其中4个比较突出的问题是:①对抑尘泡沫排液规律的研究不够,未能对泡沫排液过程气泡变化进行合理解释,使得调控抑尘泡沫稳定性的理论依据不足;②发泡剂浓度影响泡沫形态的研究较少,发泡剂浓度影响泡沫性能的机制不明,使得确定最优发泡剂使用浓度缺少理论指导;③添加绿色助剂提升泡沫性能的原理性研究不够,利用助剂降低抑尘泡沫成本面临挑战;④缺少抑尘泡沫性能定量评估的研究,尚未回答如何科学评价抑尘泡沫性能这个关键问题,导致在技术研发中有一定盲目性。

为此,笔者进行矿山抑尘泡沫特性及其性能定量

评估的应用基础研究,以期破解抑尘泡沫基础特性认识不清、抑尘泡沫性能量化评估手段缺失的问题,提高矿山泡沫抑尘的科学性和经济性,促进泡沫抑尘技术的优化升级与更广泛应用。

1 研究内容与方法

1.1 抑尘泡沫排液规律

首先,建立泡沫在柱中的完整排液过程模型,推导排液速率、排液量随时间变化函数等定量排液规律,并求解工程中常使用的排液半衰期,依据模型结论,对常用的部分泡沫性能评价指标的合理性进行讨论。通过建立的模型进行分析计算,得出排液过程理论数值,然后选择矿井中常使用的发泡剂进行实验验证。将发泡剂溶解于纯水中,形成质量分数为 0.10% 的发泡液,在泡沫扫描仪内用特定的进气速率分别发泡形成体积为 120、140、160、180、200 mL 的泡沫柱,使用泡沫扫描仪对排液过程进行观察与数据采集。

1.2 发泡剂浓度对抑尘泡沫形态特征影响

采用泡沫扫描仪测试发泡剂成泡性能,通过计算不同样品的平均气泡半径、分布和均匀程度,分析不同时刻抑尘泡沫形态特点。在室温条件下,分别配制不同质量分数的发泡剂溶液,充分搅拌直至溶解。将发泡剂溶液注入玻璃样品池中,通过恒定速率进气鼓泡产生泡沫并测试性能。CCD 相机和图像分析 (CSA) 软件用于记录和分析气泡图像。

1.3 添加聚合物对抑尘泡沫性能的影响

采用界面流变仪测试添加不同水溶性聚合物后对发泡剂润湿性的影响,并通过泡沫分析仪测试聚合物对抑尘泡沫发泡性和稳定性的影响规律。选用水溶性聚合物聚乙烯醇 (PVA)、聚丙烯酰胺 (PAM)、羟乙基纤维素 (HEC),这些聚合物具有良好的水溶性、成膜性和黏性,将 HPAM、HEC、PVA 添加至 AOS 溶液制成样品。使用界面流变仪 (Tracker) 液滴在煤片上形成的接触角。然后,使用泡沫扫描仪测试添加聚合物后溶液的气泡时间和耗气量等。

1.4 抑尘泡沫性能定量评估方法

基于泡沫从产生、运输、喷射到作用于尘源的泡沫抑尘全过程的理解和剖析 (图 1),建立科学评估抑尘泡沫性能的指标体系,主要包括润湿性、黏附性、稳定性、输送能力、定向喷射性能和抗风吹散性能。采用界面流变仪测定发泡液与粉尘试样的动态接触角,并测定泡沫液的黏性模量,用来评估发泡液的润湿性和黏附性;采用泡沫分析仪测定泡沫的半衰期,评估泡沫的稳定性;采用压力传感器测定泡沫流体在其输送管路中的单位距离压降,评估管路的输送能力;采



图 1 抑尘泡沫性能评估指标

Fig.1 Performance evaluation index of dust suppression foam

用粒子图像测速法测定泡沫流体的轴向喷射速度,评估抑尘泡沫的定向喷射性能;利用风速计测试风流将覆盖于尘源上的泡沫体吹散的临界风速,评估抑尘泡沫的定向喷射性能。

2 结果与讨论

2.1 抑尘泡沫排液规律

2.1.1 模型假设

湿泡沫随着排液逐渐变为干泡沫,2者在结构、形态、堆积方式、排液性质上都存在不同。针对这些差异,本模型采用以下界定和假设以区别湿泡沫与干泡沫。

干、湿泡沫的直接判断依据是含液比,即

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{liq}}}{V_{\text{foam}}} \quad (1)$$

式中, ε 为泡沫中的液体比例; V_{liq} 为泡沫中的液体体积; V_{foam} 为泡沫的体积。

事实上,湿泡沫转变为干泡沫是一个渐变过程,不存在一个绝对的临界值。为了简化计算,认为存在一个临界值 ε^* ,使当 $\varepsilon \geq \varepsilon^*$ 时泡沫为湿泡沫,而当 $\varepsilon < \varepsilon^*$ 时泡沫为干泡沫,一般情况下 $\varepsilon^* \approx 0.01$ ^[31],可能因为泡沫的性质略有不同,本模型采用 $\varepsilon^* = 0.01$ 作为判据。

湿泡沫以球体形态或近似球体形态存在,而近似球体在几何上没有看起来尖锐的曲率,任意方向上的曲率半径差异不大。对于近似球体, r 代表平均曲率半径,则

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r_x} + \frac{1}{r_y} \right) \quad (2)$$

其中, r_x 和 r_y 为气泡2个正交方向的曲率半径,对于一个球体来说, $r_x = r_y$ 。干泡沫在形态上存在棱与面,与相邻泡沫相互约束,其拓扑关系被认为符合柏拉图规则。

假设湿泡沫群呈面心立方堆积,干泡沫群呈体心立方堆积^[32]。泡沫柱内的液体在气泡的分隔下形成液道和节点,如图2所示,将液道和节点组成的可重复结构单元定义为泡沫网束^[33]。图2(a)为一个由相邻的节点和通道组成的网束,通道长度 L 为2个节点

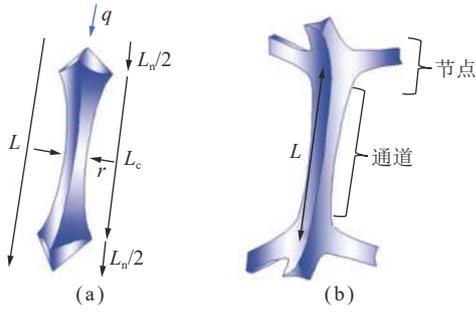


图 2 泡沫网束模型示意
Fig.2 Image of foam mesh model

间的距离; L_c 为流通网络单元通道长度; $L_n/2$ 为节点长度; q 为排量流量; 图 2(b) 为流通网络单元, 出于可重复的要求包含 1 个通道和 2 个 1/4 节点。

待排液的泡沫是气体在液体中的亚稳态分散体, 包括以球体或近似球体存在的气泡 (气相) 和占据余下空间的液体 (液相)。泡沫被约束于容器中时, 液体被球形气泡群隔开形成复杂的网络状结构, 由许多泡沫网束构成。处于高位的液体在重力 (细管还需要考虑毛细力) 的作用下流经网状结构, 逐渐向下移动, 形成排量过程。液体在网络间流动与通过多孔固体 (例如沙子, 土壤) 的流体流动在原理上类似, 可以参照达西定律来描述液体流动。泡沫排液的模型是刻画网状结构中液体流动的模型, 可以先描述每条支路中液体流动速度, 再通过守恒定律和液体的连续性方程推广至完整的网络。

2.1.2 模型计算

(1) 湿泡沫排水。

湿泡沫在理想状态下, 气泡形状为球体或近似球体, 通道长度接近 0, 因此节点的水力阻力占主导地位, 建立节点主导模型。最低阶平均网络流速满足 $v_d \propto rLa_n \nabla P / \mu$, 其中, ∇P 为压力梯度; μ 为黏度; α_n 为节点流量因子。

忽略节点主导模型中通道的水力阻力, 网络单元顶部到底部的压降 $L \nabla P_{macro}$ 等于在节点位置的黏滞损失 $R_1 = \mu v_w / r$, v_w 为网络单元节点位置的排量速度, 在管内排量条件下其宏观压力梯度 $\nabla P_{macro} = \rho g$, ρ 为液体密度, g 为重力加速度。根据幂率行为和达西定律, 湿泡沫的宏观排量速度^[34] 可以表示为

$$v = \frac{KL_0^2 \varepsilon^{\frac{1}{2}} \nabla P_{macro}}{\mu} = \frac{KL_0^2 \varepsilon^{\frac{1}{2}} \rho g}{\mu} \quad (3)$$

式中, K 为无量纲因数, 表示部分未知的因数; L_0 为气液边界长度。

取管的横截面面积 A_y , 则排量流量为

$$q_1 = v A_y = \frac{KL_0^2 \varepsilon^{\frac{1}{2}} \rho g A_y}{\mu}, \quad \varepsilon > \varepsilon^* \quad (4)$$

由于泡沫中液体体积相对较少, 取 $\varepsilon = \frac{V_{liq}}{V_{liq} + V_{gas}} \approx \frac{V_{liq}}{V_{gas}}$, V_{gas} 为泡沫气体体积, 并将式 (4) 表示为时间 t 的变量为

$$q_1(t) = v(t) A_y = \frac{KL_0^2(t) \sqrt{V_{liq}(t)} \rho g A_y}{\mu \sqrt{V_{gas}}}, \quad \varepsilon > \varepsilon^* \quad (5)$$

使用代换 $A_y = \frac{v(t) - V_{air}}{H}$ 发泡完成后总排液量为

$$Q_1(t) = \int_0^{t_1} q(t) dt = \int_0^{t_1} \frac{KL_0^2(t) \rho g \sqrt{Q_0 - Q_1(t)}}{\mu \sqrt{V_{gas}}} \times \frac{v(t) - V_{air}}{H} dt = \int_0^{t_1} \frac{KL_0^2(t) \rho g}{\mu \sqrt{V_{gas}}} \times \frac{[Q_0 - Q_1(t)]^{\frac{3}{2}}}{H} dt, \quad \varepsilon > \varepsilon^* \quad (6)$$

式中, Q_0 为发泡完成后泡沫含有的初始液量; t_1 为排量时间; H 为泡沫在管中的高度; V_{air} 为生成泡沫所使用的气体体积。

从开始发泡到发泡完成 ($t=0$), 为泡沫携液阶段, 气体以恒定的流量通入, 泡沫含液体积成线性增长。当 $t=0$ 时, 停止通入气体, 泡沫体积不再增加, 泡沫中的含液量达到最大值, 记为泡沫的初始液体体积, 然后进入排量阶段。当时间 $t=t_1$ 时含液率下降到 $\varepsilon = \varepsilon^*$, 此后泡沫结构发生了重排, 不能再用此模型。此情况将在干泡沫排量中讨论。

两边同时取微分得微分方程

$$Q_1'(t) - \frac{KL_0^2(t) \rho g}{\mu H \sqrt{V_{gas}}} [Q_0 - Q_1(t)]^{\frac{3}{2}} = 0 \quad (7)$$

记

$$w = \frac{KL_0^2(t) \rho g}{\mu H \sqrt{V_{gas}}} \quad (8)$$

式 (7) 可简化为

$$Q_1'(t) - w [Q_0 - Q_1(t)]^{\frac{3}{2}} = 0 \quad (9)$$

其通解为

$$Q_1 = \frac{w^2 Q_0 t^2 + 2w Q_0 C_1 t + Q_0 C_1^2 - 4}{2(wt + C_1)}, \quad t \leq t_1 \quad (10)$$

常数 C_1 由初始条件 $Q_1(t=0) = 0$ 给出, 可以求得

$$C_1 = \frac{2}{\sqrt{Q_0}} \quad (11)$$

于是排液量为

$$Q_1 = \frac{w^2 Q_0 t^2 + 4w \sqrt{Q_0} t}{\left(wt + 2/\sqrt{Q_0} \right)^2} \quad (12)$$

当 $Q_1 = Q_0/2$ 时,可以得到排液半衰期

$$T_{0.5} = \frac{2\sqrt{2}-2}{w\sqrt{Q_0}} \quad (13)$$

(2) 干泡沫排液。

对于 $\varepsilon < \varepsilon^*$ 的干泡沫,堆积方式由体心立方转变为面心立方,气泡形状从平面上看起来是多边形。泡沫结构中节点和通道的水力阻力对排液行为的影响都无法忽略,因此建立网络单元模型(节点—通道混合模型),该模型将节点与通道混合考虑。模型中液相流动区域为网络单元的串联,有多条支路时液量满足基尔霍夫第一定律(KCL)。

通道和节点的流阻与它们的液流长度成正比(设它们的长度分别为 L 和 φr , φ 为极坐标中的极角,则网络长度为 $L+\varphi r$ 并且与截面积的平方成反比。分别用 α_c 和 α_n 表示通道与节点流量因子, A_c 和 A_n 分别为通道与节点的截面积,通道与节点的流阻分别为

$$R_c = \frac{\mu\alpha_c L}{A_c^2}, R_n = \frac{\mu\alpha_n \varphi r}{A_n^2} \quad (14)$$

一个网络单元包含 1 个通道与 2 个 1/4 节点,因此其水力阻力为 $R_c + R_n/2$ 。网络单元上的压降为 $(L+\varphi r)\nabla P$ 。使用代换 $A_n = \delta_n A_c / \delta_c$, δ_n 和 δ_c 分别为通道和节点的截面积系数,可以表示通过单个网络单元的排液流量

$$q = \frac{(L+\varphi r)\nabla P}{R_c + R_n/2} = \frac{2\rho g \delta_n^2 A_c^2}{\mu(2\delta_n^2 \alpha_c L + \delta_c^2 \alpha_n \varphi r)} \quad (15)$$

通过一个单元的平均排液速度是平均通道速度 $v_c = q/A_c$ 和节点速度 $v_n = q/A_n$ 的加权平均值^[33],可以表示为

$$\bar{v} = \frac{v_c v_n (L+\varphi r)}{v_c \varphi r + v_n L} = \frac{v_c (L+\varphi r)}{\varphi r (\delta_n - \delta_c) + \delta_c (L+\varphi r)} \quad (16)$$

式(16)使用了代换: $\frac{v_n}{v_c} = \frac{A_c}{A_n} = \frac{\delta_c}{\delta_n}$ 。

联立式(15)和式(16),可得出通过网络单元的平均速度的表达式,考虑所有方向的速度将平均宏观速度修正为

$$v = \frac{-A_c \nabla P}{3\mu \left[\alpha_c \left(1 - \frac{r}{L} \right) + \alpha_n \frac{\varphi \delta_c^2 r}{2\delta_n^2 L} \right] \left[\left(\frac{\delta_n}{\delta_c} - 1 \right) \frac{\varphi r}{L+\varphi r} + 1 \right]} - \frac{\rho g}{3\mu\alpha} A_c, \varepsilon < \varepsilon^* \quad (17)$$

式(17)较经典模型修正了网络模型下的加权阻力因数 α ,即

$$\alpha = \left[\alpha_c \left(1 - \frac{r}{L} \right) + \alpha_n \frac{\varphi \delta_c^2 r}{2\delta_n^2 L} \right] \left[\left(\frac{\delta_n}{\delta_c} - 1 \right) \frac{\varphi r}{L+\varphi r} + 1 \right]$$

在面心立方堆积结构中,通道形态可近似视为曲面三棱柱^[35],其平均通道截面积 A_c 可近似通过式(18)计算, r_c 为通道形态半径:

$$A_c = \delta_n r_c^2 \quad (18)$$

式中, $\delta_n = \frac{4\sqrt{2}\delta_2}{3\varphi} + 2\delta_c$, $\delta_c = \sqrt{3} - \frac{\pi}{2}$, δ_2 为管道的径向截面积系数。

析液流量为

$$q_2 = v A_y = \frac{\rho g A_c A_y}{3\mu \left[\alpha_c \left(1 - \xi \frac{r}{L} \right) + \alpha_n \frac{\xi \delta_c^2 r}{2\delta_n^2 L} \right] \left[\xi \left(\frac{\delta_n}{\delta_c} - 1 \right) \frac{r}{L} + 1 \right]}, \varepsilon < \varepsilon^* \quad (19)$$

总析液量为

$$Q_2 = \int_{t_1}^t q dt = \int_{t_1}^t \frac{\rho g A_c A_y}{3\mu H \left[\alpha_c \left(1 - \xi \frac{r}{L} \right) + \alpha_n \frac{\xi \delta_c^2 r}{2\delta_n^2 L} \right] \left[\xi \left(\frac{\delta_n}{\delta_c} - 1 \right) \frac{r}{L} + 1 \right]} dt = \int_{t_1}^t \frac{\rho g A_c L^2 (Q - Q_0)}{3\mu H \left[\alpha_c (L - \xi r) + \alpha_n \frac{\xi \delta_c^2 r}{2\delta_n^2 L} \right] \left[\xi \left(\frac{\delta_n}{\delta_c} - 1 \right) \frac{r}{L} + 1 \right]} dt, \varepsilon > \varepsilon^* \quad (20)$$

式中, Q 为某时刻的排液量。

记

$$r(t) = \frac{\rho g A_c}{3\mu H \left[\alpha_c \left(1 - \xi \frac{r}{L} \right) + \alpha_n \frac{\xi \delta_c^2 r}{2\delta_n^2 L} \right] \left[\xi \left(\frac{\delta_n}{\delta_c} - 1 \right) \frac{r}{L} + 1 \right]}$$

两边同时取微分

$$Q_2' + r(t)Q_2 = r(t)Q_0 \quad (21)$$

通解形式为

$$Q_2 = \exp\left(-\int_{t_1}^t r(t)dt\right) \left[\exp\left(\int_{t_1}^t r(t)dt\right) r(t)Q_0 dt + D \right], \quad t > t_1 \quad (22)$$

常数 D 由初始条件 $Q_2(t=t_1)=Q_1(t=t_1)$ 给定。

2.1.3 实验与验证

排液因子 w 是本模型中自定义的重要排液参数,它主要与泡沫本身的性质与状态(黏度、气体含量、液柱高度等)有关,借助 w 可以方便地验证模型的正确性,并讨论矿用发泡剂产生泡沫的特点。

通过排液半衰期和排液量拟合来验证模型,包括对 w 的定量验证和排液曲线的验证。

根据式(13),可以通过 $T_{0.5}$ 和 Q_0 求算 w ,即

$$w = \frac{2\sqrt{2}-2}{T_{0.5}\sqrt{Q_0}} \quad (23)$$

液体体积以 mL 为单位记录,但在 w 的计算中,

使用 m^3 作为液体体积单位, 使得 w 的单位为国际标准单位。

根据 $w = \frac{KL_0^2 \rho g}{\mu H \sqrt{V_{\text{gas}}}}$ 可以得知, w 与泡沫柱高度 H 、泡沫中气体体积 V_{gas} 有关, 对于同样截面积的发泡柱, 体积为 V_x 的泡沫柱高度 H 可以由一个比例系数 m 表示

$$H = mH_0 \quad (24)$$

$$m = \frac{V_x}{V_{\text{max}}} \quad (25)$$

其中, V_{max} 为发泡柱产生泡沫体积的最大值; H_0 为此时泡沫柱的高度。本实验中体积为 200、180、160、140、120 mL 的泡沫 m 分别为 1.0、0.9、0.8、0.7、0.6。

以 m 和 V_{gas} 为变量, 对式 (8) 进行对数处理后得到

$$\ln w = \ln \left(\frac{KL_0^2 \rho g}{\mu H_0} \right) - \left(\ln m + \frac{1}{2} \ln V_{\text{gas}} \right) \quad (26)$$

理论中, $\ln w - \left(\ln m + \frac{1}{2} \ln V_{\text{gas}} \right)$ 曲线应当是一条斜率为 -1 的直线。根据实验数据作曲线, 如图 3 所示, 并对其进行线性回归。

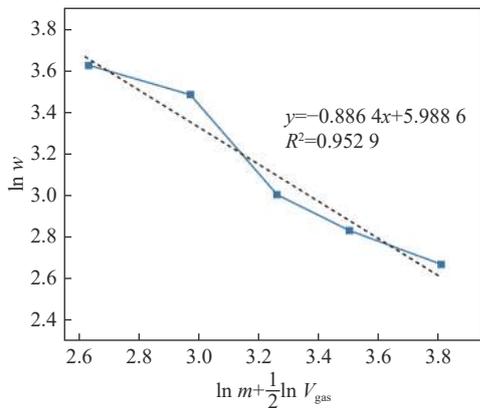


图 3 泡沫排液因子的线性回归曲线
Fig.3 Linear regression curve of w

由图 3 可知, 实验曲线都近似表现出线性的特点, 确定系数均满足 $R^2 > 0.95$ 可以认为线性关系较强。拟合的直线斜率略大于 -1, 其误差可能来自排液过程中 L_0^2 的微小变化、泡沫堆积方式的渐变、模型中使用的近似、时间间隔导致的测量误差以及部分未知因素等。直线与 y 轴的截距为 $\ln \left(\frac{KL_0^2 \rho G}{\mu H_0} \right)$, G 为泡沫重力, 其中包含的物理量多数与产生的泡沫本身或发泡剂本身有关, 因此斜率可以用于区别不同表面活性剂。排液因子 w 与发泡过程 (泡沫柱高度、泡沫含液量) 相关, 实验中产生的泡沫高度越高、含液量越大, w 越小。

式 (12) 给出了总排液量随时间变化的理论方程, 方程由排液因子 w 和初始液量 Q_0 决定。即给定 w

和 Q_0 就可以画出理论排液图线, 同时实际排液曲线可以由实验数据容易地绘出, 因此可以对二者进行比较。对于一次特定的排液过程, Q_0 可以从实验数据中读出, 因此基于模型的理论排液曲线仅由排液因子 w 决定。

另一方面, 还可以将 w 作为未知参数, 以式 (13) 作为目标函数针对实验数据进行拟合, 通过最小二乘等拟合算法求得最合适的 w , 或在一定置信域下 w 的置信区间。求得的 w 是否落在拟合值的置信区间内, 是对模型正确性的二重验证方法。

将泡沫排液量随时间变化实验数据进行拟合 (图 4)。 Q_d 为 t 时刻的排液量, 初始时刻 ($t=0$) 为停止进气的瞬间, 此时总排液量设置为 0。

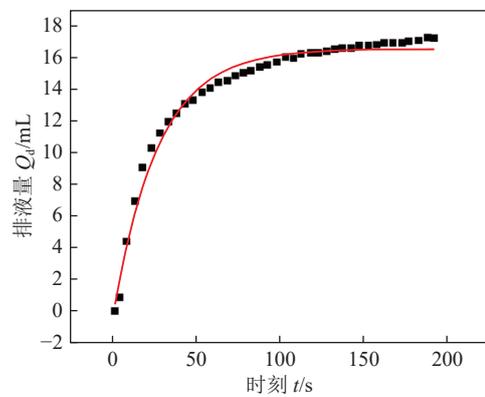


图 4 泡沫排液量随时间变化实验数据拟合
Fig.4 Curve fitting of experimental data for foam drainage

排液曲线的最优拟合 w 为 10.34, 置信区间为 (10.06, 10.63), 此区间的置信度为 95%。通过实验计算得到的 w 为 10.06, 在该置信区间内拟合准确度较高。拟合结果直观地说明了通过测量半衰期可以准确地计算排液常数, 且理论模型对排液全过程中的排液量测算具有很高的准确度。

2.2 发泡剂质量分数对抑尘泡沫形态的影响

泡沫衰变过程是抑尘泡沫形态变化的宏观表现, 而泡沫稳定性是决定泡沫衰变过程的重要因素。泡沫半衰期 T_{half} , 即泡沫体积减少到原始体积一半的时间, 是表征泡沫稳定性的重要参数之一, T_{half} 越大, 泡沫越稳定。通过泡沫半衰期可直观了解泡沫形态变化。图 5 为不同质量分数 AOS 下的泡沫半衰期 T_{half} , 从图 5 可以看出, T_{half} 随质量分数变化呈现 2 个明显转折点, 将这 2 个转折点分别定义为 C_a 和 C_b ($C_a < C_b$), 其中 C_a 在发泡剂质量分数为 0.3%~0.6% 内, C_b 约在 1% 处。实验结果表明, T_{half} 在发泡剂质量分数 (F_{AC}) 为 C_a 时达到峰值, 将此定义为最大稳定性质量分数 (OSC), 即溶液中发泡剂的质量分数达到 OSC 时,

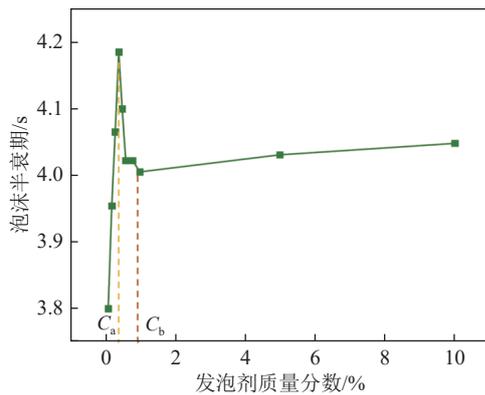


图 5 发泡剂的质量分数与泡沫半衰期关系

Fig.5 Relationship between concentration and foam half-life

泡沫半衰期可达到最大值, 泡沫稳定性最好; 当 $F_{AC} < C_a$ 时, 泡沫半衰期随着发泡剂质量分数的增加而增加; 当 $C_b > F_{AC} > C_a$ 时, 泡沫半衰期随着发泡剂质量分数的增加而减少, 当 F_{AC} 超过 C_b 后 T_{half} 保持平稳, 不随 F_{AC} 的增加而产生明显变化, 这是因为发泡剂分子在液相中的胶束形态发生改变, 转变成为非常规球形胶束, 超出临界范围, 因此将第 2 个转折点 C_b 定义为无球形胶束浓度 (NSMC)。

2.2.1 不同 F_{AC} 的泡沫尺寸分布

泡沫尺寸分布及平均气泡直径 d_{mb} 是影响泡沫半衰期的主要因素, 也会对泡沫稳定性产生重要影响。因此, 通过对发泡结束的图像分析, 比较了不同 F_{AC} 下泡沫的平均气泡直径和气泡尺寸分布。

图 6 为不同质量分数 AOS 溶液发泡后的气泡直径与气泡数, 从图 6 可以看出, AOS 形成的气泡直径在 0.5 mm 以下, 且泡沫数量最多为 105。当 $F_{AC} = 0.1\%$ 时, 气泡数量较少, 但气泡直径跨度较大, 这说明在较低浓度时, 活性分子都分布于气液界面, 并呈稀释性无序排列, 难以在气体动力作用下稳定界面形态,

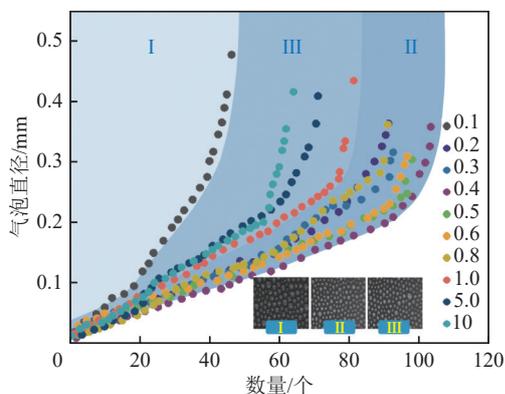


图 6 不同质量分数 AOS 生成的泡沫大小分布

Fig.6 Size distribution of foam generated by different concentrations of AOS

这使得 AOS 泡沫液的产泡能力相对较弱, 并且因为气液界面处活性分子分布稀疏, 泡沫抗扰动能力弱、重力排液速度快, 加剧了泡沫兼并, 使得泡沫均匀性较差; 当 $0.1\% < F_{AC} < 1\%$ 时, 气泡的直径下降到 0.35 以下, 但此时泡沫数量增加近 1 倍, 并且在此范围内增加泡沫质量分数后, 并不会对气泡数量和直径产生较大影响, 这是因为提升表面活性剂质量分数有助于增加其在气液界面的分子吸附量, 尤其是在受气体扰动后能够快速恢复原有形态, 从而更好地保持泡沫均匀和稳定。当 $F_{AC} > 1\%$ 时, 气泡数量随浓度增大而减少, 此时气泡直径则与 F_{AC} 呈正相关也逐渐增大, 这是因为由于表面活性剂质量分数增高后也提升了泡沫液的黏度, 使得鼓起产泡过程泡沫的破裂变得困难, 为大气泡产生提供了适宜条件, 故导致泡沫数量减少、气泡直径增加。

2.2.2 平均气泡直径与发泡剂质量分数的关系

图 7 为不同质量分数的 AOS 溶液发泡后的平均气泡直径变化规律。从图 7 可以看出, 当发泡剂的质量分数 $F_{AC} < C_a$ 时, 平均气泡直径 d_{mb} 随着 F_{AC} 的升高而下降; 当 $C_a < F_{AC} < C_b$ 时, 平均气泡直径 d_{mb} 随着发泡剂质量分数的升高而升高, 这意味着当 $F_{AC} < C_b$ 时发泡剂质量分数对 d_{mb} 起着重要的作用; 当 $F_{AC} > C_b$ 时, 平均气泡直径 d_{mb} 随着 F_{AC} 增加而增加, 但增幅缓慢, 说明当 $F_{AC} > C_a$ 时, 有其他因素影响 d_{mb} 。

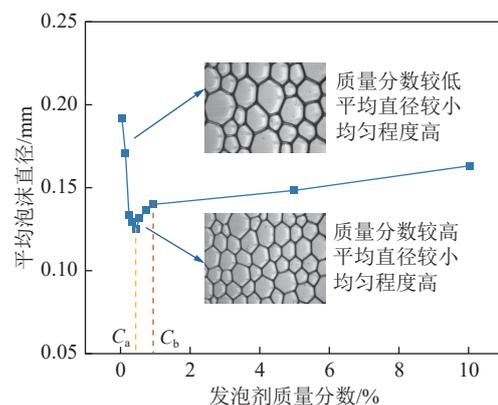


图 7 不同质量分数的发泡剂产生泡沫的平均直径

Fig.7 Average foam diameter at different blowing agent concentrations

通常来说, 气泡由于浮力而上升到表面的过程是一个准静态过程^[36], 其中浮力和表面张力的平衡可通过式 (27) 表示:

$$d_{mb} = 2 \left(3\delta \frac{r}{2\rho g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (27)$$

式中, d_{mb} 为平均气泡直径; δ 为表面张力。

通过平均气泡直径的计算公式分析可知,对于低浓度溶液, δ 、 g 和 r 可以视为常数,而表面活性剂溶液的密度 ρ 的影响可以忽略。随着发泡剂浓度的增大,较高的浓度可以实现更高更快的吸附,从而增加表面覆盖率,导致溶液表面张力降低,进而降低了泡沫的 d_{mb} 和数量。同时对于高质量分数溶液 ($F_{AC} > C_b$),由于发泡剂分子的质量分数几乎没有变化, d_{mb} 基本由液体的密度决定。此时,在泡沫生成过程中, d_{mb} 随着溶液密度的增加而减小。发泡后,较大的溶液密度会造成排液速度过快,因此薄膜会更薄;然而,这一过程对 d_{mb} 的影响比发泡过程更大,因此随着发泡剂浓度的增加, d_{mb} 在 1 000 s 后出现了增大的现象。

综合对比图 5~7,可以发现当 $F_{AC} < C_b$ 时, T_{half} 主要由 d_{mb} 决定。而 T_{half} 与 F_{AC} 的关系类似于 d_{mb} 与 F_{AC} 的关系。当 $F_{AC} = C_a$ 时,泡沫更稳定,因为此时的平均气泡直径最小。当 $F_{AC} > C_b$ 时, T_{half} 受液体密度和 d_{mb} 共同的影响。随着发泡剂质量分数的增加,液体密度逐渐增加, d_{mb} 逐渐降低,两者均改善了泡沫的稳定性,因此 T_{half} 在其共同作用下保持不变。因此在低浓度发泡剂溶液中,泡沫的稳定性在很大程度上取决于平均气泡直径。当溶液中发泡剂的质量分数较高时,泡沫的稳定性取决于液体密度及平均气泡直径。如果平均气泡直径随质量分数增加的变化不明显,则液体密度的影响更大。

2.3 聚合物添加对抑尘泡沫性能的影响

2.3.1 润湿性

润湿性是指发泡剂润湿粉尘的能力,通常用接触角表示^[37-38]。图 8 显示了不同质量分数的几种溶液在煤片上接触角的变化。在不添加聚合物的情况下,表面活性剂 AOS 溶液在煤片上的接触角随着质量分数的增加而降低,这表明 AOS 溶液对煤的润湿性在实验浓度范围内随着质量分数的增加而增加。在聚合物质量分数小于 0.3% 时对接触角影响不明显,但当聚合物质量分数较高时,溶液的接触角随聚合物质量分数的增加而增加,接触角显著高于不添加聚合物的表面活性剂溶液。通过添加 HPAM 的溶液在煤片上的躺滴形状图片可知,没有添加聚合物的液滴可以更加“平铺”在煤片上,而添加聚合物的液滴更显“收紧”,润湿性具有一定的区别。因此,向表面活性剂溶液中加入聚合物会降低其对煤的润湿性,这在实验范围内随聚合物质量分数的增加而更明显。

2.3.2 发泡性与稳泡性

表面活性剂-聚合物混合溶液的起泡时间如图 9 所示,被用来表征溶液的起泡能力。从图 9 可以看出,随添加发泡剂质量分数的增加,起泡时间先快

速下降然后逐渐达到稳定值,溶液的起泡时间在 204~210 s 波动,转折点处对应的发泡剂质量分数约为 0.1%。当发泡剂质量分数低于 0.05% 时,增大发泡剂的质量分数能够提高溶液的起泡能力,使得起泡时间急剧缩短;当发泡剂质量分数在 0.05%~0.10% 时,起泡时间却随发泡剂浓度的增大继续减小,表明溶液的起泡能力仍在增加;当发泡剂质量分数高于 0.10% 时,发泡剂浓度的增加并未显著改变溶液的起泡能力,这是因为本体溶液中有足够的表面活性剂分子扩散并吸附到新的气液界面上,维持气液界面的饱和吸附状态和液膜的强度,因而起泡能力不再发生变化。而增加聚合物至溶液中发现,起泡时间出现明显变化,尤其是发泡剂质量分数为 0.01% 和 0.05% 时,聚合物质量分数的增加缩短了发泡剂溶液的起泡时间,显著提高了起泡能力。这是因为加入聚合物后,聚合物能够增大溶液的体相黏度和气泡液膜的强度,增强气泡

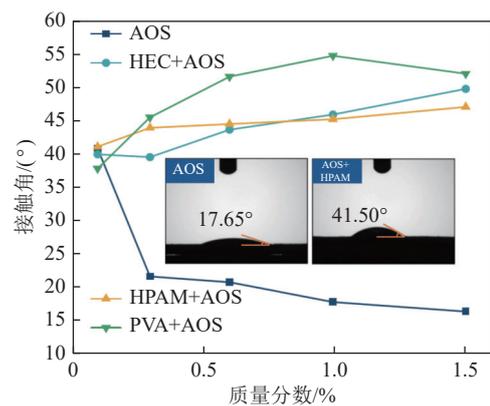


图 8 添加不同质量分数聚合物对发泡剂溶液与煤尘间接触角的影响

Fig.8 Changes of contact angle between solution and coal dust after adding polymers with different mass fraction

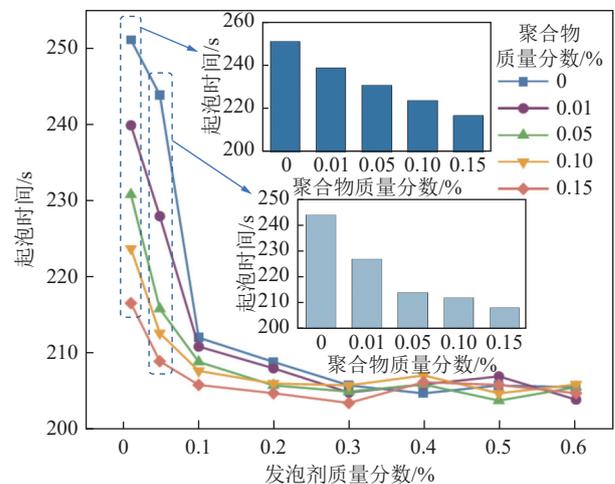


图 9 表面活性剂-聚合物混合溶液的起泡时间

Fig.9 Foaming time of surfactant-polymer solutions

液膜的稳定性, 气泡的生成速率大于破裂速率, 降低了气泡的破裂速率。因此随聚合物质量分数的增加, 溶液的起泡时间逐渐缩短。

在产泡过程中, 若不存在气泡破裂, 泡沫体积 200 mL 减去泡沫中液体的体积 V_{liquid} 即理想的供气体积 $V_{\text{ideal gas}}$ 。实际产泡过程中的供气量 $V_{\text{total gas}}$ 与 $V_{\text{ideal gas}}$ 之间的差值为气泡破裂所逸出的气体体积 ΔV 。 ΔV 越大, 则气泡液膜强度和稳定性越差, 在产泡过程中气泡破裂现象越严重。发泡剂质量分数为 0.01% 和 0.05% 时, 混合溶液产泡时的 $V_{\text{total gas}}$ 、 $V_{\text{ideal gas}}$ 与 ΔV 见表 1。随聚合物质量分数的增加, ΔV 呈下降趋势, 这说明在泡沫生成过程中气泡破裂逸出的气体体积逐渐较少, 即聚合物的加入能够增大气泡液膜的强度和稳定性。

表 1 发泡剂质量分数为 0.01%、0.05% 时 $V_{\text{total gas}}$ 和 $V_{\text{ideal gas}}$ 之间的差值 ΔV

Table 1 ΔV between $V_{\text{total gas}}$ and $V_{\text{ideal gas}}$ when the mass fraction of foaming agent is 0.01% and 0.05%

发泡剂质量 分数/%	聚合物质量 分数/%	$V_{\text{total gas}}/mL$	$V_{\text{ideal gas}}/mL$	$\Delta V/mL$
0.01	0	209.17	190.92	18.25
	0.01	200.00	187.29	12.71
	0.05	192.50	184.40	8.10
	0.10	186.67	181.37	5.30
	0.15	180.83	178.30	2.53
0.05	0	203.33	184.84	18.49
	0.01	190.00	178.18	11.82
	0.05	180.00	175.34	4.66
	0.10	177.50	173.80	3.70
	0.15	174.17	171.72	2.45

进一步地讲, 聚合物主要是通过增黏改变溶液性质, 包含 2 个方面, 一种是水溶性聚合物通过其自身黏性增加水相的黏性, 另一种是水溶性高分子化合物作用于水中的分散相或水中的其他高分子化合物, 达到增黏效果^[39]。而添加聚合物到表面活性剂溶液中时, 这 2 种增黏效果均有发生。聚合物添加至表面活性剂溶液后, 聚合物大分子链分布在溶液中增加了溶液黏性, 并且由于疏水相互作用, 体相中的聚合物链将与表面活性剂胶束结合, 形成致密的网络结构, 显著增加了原始溶液的黏性, 这就是聚合物添加后表面活性剂溶液黏性变化的原因, 而溶液黏性的变化同时会影响其发泡后的泡沫稳定性。

泡沫衰变主要是由于泡沫排水造成, 泡沫中的液

体主要受重力作用, 同时还受液膜内外的压力差影响:

$$\Delta P = P_1 - P_g = \frac{2\sigma}{R_2} \quad (28)$$

式中, P_1 和 P_g 为液膜内外的压力; σ 为表面张力; R_2 为该点处的液膜半径。

这种压力差导致液膜膨胀, 从而促进液膜之间的液体流动。排水速率可以表征泡沫稳定性: 较慢的排水速率使泡沫更稳定, 因此泡沫黏性的增加将增加其稳定性。发泡剂溶液本身就具有一定的黏性, 液膜的表面黏性和体相中的胶束阻碍了泡沫排水, 因此提高了稳定性。图 10 显示了表面活性剂溶液添加聚合物后的泡沫排水行为, 在聚合物溶解于表面活性剂溶液中后, 大分子链胶束以及 2 者聚集体在体相中存在, 显著增加了液体的黏性, 黏滞力减缓了泡沫的排出, 增加了泡沫的稳定性, 并且随着聚合物浓度的增加, 这种排水的黏滞会更加明显。

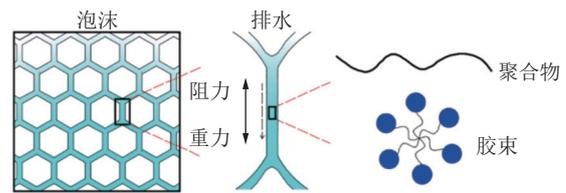


图 10 发泡剂添加聚合物后的泡沫排水行为

Fig.10 Foam drain behavior after polymer addition to blowing agents

2.4 抑尘泡沫性能定量评估

2.4.1 评价指标

如 1.4 节所述, 泡沫性能定量评估指标主要包括润湿性、黏附性、稳定性、输送能力、定向喷射性能和抗风吹散性能。润湿性指泡沫润湿粉尘的能力; 黏附性指泡沫黏附粉尘或产尘物料 (如矿山煤岩体) 的能力; 稳定性指泡沫保持初始体积的能力; 输送能力是指在管路中的有效输送距离和输出压力; 定向喷射性能是指泡沫以一定速度从喷嘴射出并定向作用于尘源的能力; 抗风吹散性能指施加于尘源上的泡沫覆盖层抵抗通风风流吹起飞散的能力。上述 6 个评价指标的量化参数分别是: 动态接触角、界面黏性模量、泡沫半衰期、单位距离压降、定向喷射速度和临界风速。

2.4.2 评估方法

通过分析各评价指标的重要度, 提出以抑尘泡沫性能指数 I_{FP} 定量表征抑尘泡沫的性能, 用公式表示如下:

$$I_{\text{FP}} = 0.3F_{\text{W}} + 0.2F_{\text{A}} + 0.2F_{\text{S}} + 0.1F_{\text{T}} + 0.1F_{\text{J}} + 0.1F_{\text{R}} \quad (29)$$

式中, F_{W} 、 F_{A} 、 F_{S} 、 F_{T} 、 F_{J} 、 F_{R} 分别为润湿能力、黏附

能力、稳定能力、输送能力、定向喷射能力、抗风吹散能力, 取值区间为 (0, 1) 的开区间。

I_{FP} 越大, 则其性能越优, 反之则越差; 根据 I_{FP} 将抑尘泡沫的性能分为 4 个评价等级(图 11)。

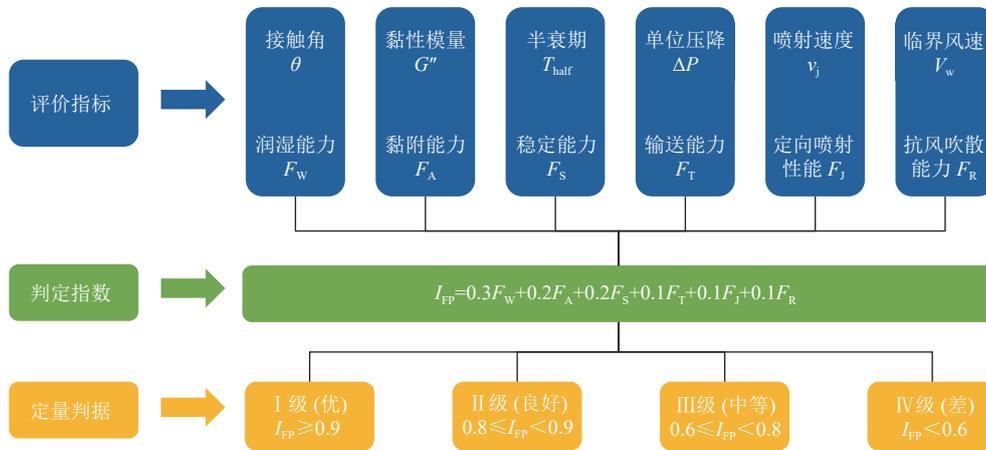


图 11 抑尘泡沫性能定量评估方法

Fig.11 Diagram of quantitative evaluation method for dust suppression foam performance

定量评估抑尘泡沫性能的方法, 具体包括以下步骤:

(1) 取采自工矿生产场所产尘点的粉尘, 筛分制备粒径小于 100 μm 的粉尘试样, 取粉尘试样少许, 压制成片后在界面流变仪上测定发泡液与粉尘试样的动态接触角 θ , 据此评估抑尘泡沫的润湿能力 F_W : $\theta \leq 20^\circ$, 则 $F_W \geq 0.9$; $20^\circ < \theta \leq 30^\circ$, 则 $0.8 \leq F_W < 0.9$; $30^\circ < \theta \leq 35^\circ$, 则 $0.7 \leq F_W < 0.8$; $35^\circ < \theta \leq 40^\circ$, 则 $0.6 \leq F_W < 0.7$; $\theta > 40^\circ$, 则 $F_W < 0.6$ 。

(2) 利用界面流变仪测定泡沫液的黏性模量 G'' , 据此评估抑尘泡沫的黏附能力 F_A : $G'' \geq 5 \text{ mN/m}$, 则 $F_A \geq 0.9$; $4 \text{ mN/m} \leq G'' < 5 \text{ mN/m}$, 则 $0.8 \leq F_A < 0.9$; $3 \text{ mN/m} \leq G'' < 4 \text{ mN/m}$, 则 $0.7 \leq F_A < 0.8$; $1.5 \text{ mN/m} \leq G'' < 3 \text{ mN/m}$, 则 $0.6 \leq F_A < 0.7$; $G'' < 1.5 \text{ mN/m}$, 则 $F_A < 0.6$ 。

(3) 利用泡沫分析仪测定泡沫的半衰期 T_{half} , 据此评估抑尘泡沫的稳定能力 F_S : 若 $T_{half} \approx 30 \text{ min}$, 则 $F_S \geq 0.9$; $20 \text{ min} \leq T_{half} < 30 \text{ min}$, 则 $0.8 \leq F_S < 0.9$; $10 \text{ min} \leq T_{half} < 20 \text{ min}$, 则 $0.7 \leq F_S < 0.8$; $5 \text{ min} \leq T_{half} < 10 \text{ min}$, 则 $0.6 \leq F_S < 0.7$; $T_{half} < 5 \text{ min}$ 或者 $\geq 30 \text{ min}$, 则 $F_S < 0.6$ 。

(4) 利用压力传感器测定泡沫流体在其输送管路中的单位距离压降 ΔP , 据此评估抑尘泡沫的输送能力 F_T : 若 $\Delta P \leq 25 \text{ Pa/m}$, 则 $F_T \geq 0.9$; $25 \text{ Pa/m} < \Delta P \leq 50 \text{ Pa/m}$, 则 $0.8 \leq F_T < 0.9$; $50 \text{ Pa/m} < \Delta P \leq 75 \text{ Pa/m}$, 则 $0.7 \leq F_T < 0.8$; $75 \text{ Pa/m} < \Delta P \leq 100 \text{ Pa/m}$, 则 $0.6 \leq F_T < 0.7$; $\Delta P > 100 \text{ Pa/m}$, 则 $F_T < 0.6$ 。

(5) 采用粒子图像测速法测定泡沫流体的轴向喷射速度 v_j , 据此评估抑尘泡沫的定向喷射性能 F_J : 若 $4 \text{ m/s} \leq v_j \leq 5 \text{ m/s}$, 则 $F_J \geq 0.9$; $3 \text{ m/s} \leq v_j < 4 \text{ m/s}$, 则 $0.8 \leq$

$F_J < 0.9$; $2 \text{ m/s} \leq v_j < 3 \text{ m/s}$, 则 $0.7 \leq F_J < 0.8$; $1 \text{ m/s} \leq v_j < 2 \text{ m/s}$, 则 $0.6 \leq F_J < 0.7$; $v_j > 4 \text{ m/s}$ 或 $< 1 \text{ m/s}$, 则 $F_J < 0.6$ 。

(6) 利用风速计测试风流将覆盖于尘源上的泡沫体吹散的临界风速 v_w , 据此评估抑尘泡沫的抗风吹散能力 F_R : 若临界风速 $v_w \geq 5 \text{ m/s}$, 则 $F_R \geq 0.9$; $4 \text{ m/s} \leq v_w < 5 \text{ m/s}$, 则 $0.8 \leq F_R < 0.9$; $3 \text{ m/s} \leq v_w < 4 \text{ m/s}$, 则 $0.7 \leq F_R < 0.8$; $2 \text{ m/s} \leq v_w < 3 \text{ m/s}$, 则 $0.6 \leq F_R < 0.7$; $v_w < 2 \text{ m/s}$, 则 $F_R < 0.6$ 。

(7) 根据以上求出的 F_W 、 F_A 、 F_S 、 F_T 、 F_J 、 F_R , 然后利用式 (29) 得出泡沫性能指数 I_{FP} , 由 I_{FP} 判定抑尘泡沫性能, 根据图 11 中判定依据划分泡沫性能等级。

2.4.3 应用实例

取采自某煤矿综采工作面的煤尘, 筛分制备成粒径小于 100 μm 的粉尘试样, 取粉尘试样少许, 压片后在泡沫界面流变仪上测试发泡液样品 A 与粉尘试样的动态接触角 θ , 测得结果为 $\theta = 17.5^\circ$, 据此评估抑尘泡沫 A 的润湿能力 $F_W > 0.9$; 利用泡沫界面流变仪测定泡沫液的黏性模量 G'' , 测定结果为 $G'' = 6.0 \text{ mN/m}$, 据此评估抑尘泡沫 A 的黏附能力 $F_A \geq 0.9$; 利用泡沫分析仪测定泡沫的半衰期 T_{half} , 测定结果为 $T_{half} = 29.8 \text{ min}$, 据此评估抑尘泡沫 A 的稳定能力 $F_S \geq 0.9$; 利用压力传感器测定泡沫流体在其输送管路中的单位距离压降 ΔP , 测定结果为 $\Delta P = 20 \text{ Pa/m}$, 据此评估抑尘泡沫 A 的输送能力 $F_T \geq 0.9$; 采用粒子图像测速法测定泡沫流体的轴向喷射速度 v_j , 测定结果为 $v_j = 4.5 \text{ m/s}$, 据此评估抑尘泡沫 A 的定向喷射性能 $F_J > 0.9$; 采用风速计测试风流将覆盖于尘源上的泡沫体吹散的临界风速 v_w , 测定结果为 $v_w = 6 \text{ m/s}$, 据此评估抑尘

泡沫 A 的抗风吹散能力 $F_R \geq 0.9$ 。

根据以上得出的 F_W 、 F_A 、 F_S 、 F_T 、 F_J 、和 F_R 的区间值,得到: $I_{FP} = 0.3F_W + 0.2F_A + 0.2F_S + 0.1F_T + 0.1F_J + 0.1F_R > 0.9$ 。根据计算得到的泡沫性能指数 I_{FP} 和评估方法中的判定准则,评定抑尘泡沫 A 的性能等级为 I 级(优)。

3 结 论

(1) 泡沫排液是液体在气泡间向下流动的过程,可采用干/湿泡沫两段式研究并建模。建立模型分别计算了湿泡沫、干泡沫的排液速率和排液曲线,定义了重要的排液因子 w ,提出了排液微分方程;通过实验数据与排液因子和排液曲线计算结果拟合,验证了模型的合理性与准确性。

(2) 当发泡剂的质量分数在 0.3%~0.6% 时,抑尘泡沫的均匀性较好、产生的气泡数量较多,此时抑尘泡沫稳定性更好,泡沫形态更不容易被破坏;而较高或较低浓度都会使泡沫均匀性变差、气泡数量减少,导致气泡半衰期减小,从而影响泡沫稳定性;添加聚合物可以增加泡沫液的黏性,是改善发泡剂性能的有效途径,测试结果发现添加聚合物后,尤其是聚合物质量分数为 0.1% 时对提升抑尘泡沫性能最有利。

(3) 从抑尘泡沫产生到抑尘全过程分析,确立了性能评估的 6 项指标(润湿性、黏附性、稳定性、输送能力、定向喷射性能和抗风吹散性能)和量化参数(动态接触角、界面黏性模量、泡沫半衰期、单位距离压降、定向喷射速度和临界风速),提出了泡沫性能定量评估准则 $I_{FP} = 0.3F_W + 0.2F_A + 0.2F_S + 0.1F_T + 0.1F_J + 0.1F_R$,通过 I_{FP} 给出了抑尘泡沫性能等级判定依据。

参考文献(References):

- [1] HUANG Xinru, CHEN Hong, LONG Ruyin, et al. Development and validation of the quality of life scale for Chinese coal miners with pneumoconiosis (QOL-CMP): Measurement method and empirical study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 232: 1062–1075.
- [2] YANG Xuesong, ZHAO Xu, CHEN Xingbang, et al. Proportions distribution of pneumoconiosis stages in China: A study based on a meta-analysis and field investigation[J]. *Journal of Environmental Science and Health Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 2022, 57(12): 1024–1036.
- [3] 顾大钊, 李全生. 基于井下生态保护的煤矿职业健康防护理论与技术体系[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(3): 950–958.
GU Dazhao, LI Quansheng. Theoretical framework and key technologies of underground ecological protection based on coal mine occupational health prevention[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(3): 950–958.
- [4] LU Yaoqin, LIU Qi, YAN Huan, et al. Effects of occupational hazards and occupational stress on job burn-out of factory workers and miners in Urumqi: A propensity score-matched cross-sectional study[J]. *BMJ Open*, 2022, 12(9): e51911.
- [5] WANG Xiao, MENG Fanbao. Statistical analysis of large accidents in china's coal mines in 2016[J]. *Nature Hazards*, 2018, 92(1): 311–25.
- [6] LIU Zhenqi, ZHONG Xiaoxing, ZHANG Qi, et al. Experimental study on using water mist containing potassium compounds to suppress methane/air explosions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 394: 122561.
- [7] WANG Yujie, CHEN Hong, LONG Ruyin, et al. Health economic loss measurement and risk assessment of new cases of coal worker's pneumoconiosis in China[J]. *Safety Science*, 2019, 122: 104529.
- [8] 王和堂, 贺胜, 章琦, 等. 微生物发酵法合成生物抑尘剂的试验研究[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(2): 477–488.
WANG Hetang, HE Sheng, ZHANG Qi, et al. Experimental study on synthesis of biological dust suppressant by microbial fermentation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(2): 477–488.
- [9] 张天, 荆德吉, 葛少成, 等. 超音速汲水虹吸气动雾化降尘技术[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(12): 3912–3921.
ZHANG Tian, JING Deji, GE Shaocheng, et al. Supersonic siphon suction water aerodynamic atomization in dust removal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(12): 3912–3921.
- [10] 王鹏飞, 刘荣华, 王海桥, 等. 煤矿井下气水喷雾雾化特性实验研究[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(5): 1213–1220.
WANG Pengfei, LIU Ronghua, WANG Haiqiao, et al. Atomization characteristics of air-water spray in underground coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(5): 1213–1220.
- [11] HU Shengyong, GAO Yang, HU Fei, et al. A novel method for cleaning coal-dust-laden air and its application[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 153: 311–319.
- [12] 周宏伟, 刘泽霖, 孙晓彤, 等. 深部煤体注水过程中渗流通道演化特征[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(3): 867–875.
ZHOU Hongwei, LIU Zelin, SUN Xiaotong, et al. Evolution characteristics of seepage channel during water infusion in deep coal samples *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(3): 867–875.
- [13] ZHANG Qi, FAN Lan, WANG Hetang, et al. A review of physical and chemical methods to improve the performance of water for dust reduction[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 166: 86–98.
- [14] 周文东. 掘进机截齿割煤产尘机制及减尘应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020: 1–3.
ZHOU Wendong. Mechanisms of dust generation cut by pick used in roadheader and application of reducing dust[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020: 1–3.
- [15] LU Xinxiao, WANG Deming, XU Chaohang, et al. Experimental investigation and field application of foam used for suppressing roadheader cutting hard rock in underground tunneling[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology* 2015, 49: 1–8.
- [16] WANG Hetang, WANG Deming, TANG Yan, et al. Foaming agent self-suction properties of a jet-type foam preparation device used in mine dust suppression[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2015, 98: 231–238.

- [17] WANG Hetang, GUO Wangbiao, ZHENG Chuanbao, et al. Effect of temperature on foaming ability and foam stability of typical surfactants used for foaming agent[J]. *Journal of Surfactants and Detergents*, 2017, 20(3): 615–622.
- [18] YANG Husheng, ZHU Xiaolong, HU Ruixia, et al. Characteristics of a cavitating spoiler mixing device and its performance in a foam dust suppression system[J]. *ACS Omega*, 2022, 7(34): 29886–29900.
- [19] WANG Hetang, WANG Deming, TANG Yan, et al. Effects of geometric parameters on air suction characteristics of a new Jet-type foam generator for mine dust suppression[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2018, 43(3): 1445–1454.
- [20] WANG Hetang, WEI Xiaobin, DU Yunhe, et al. Experimental investigation on the dilatational interfacial rheology of dust-suppressing foam and its effect on foam performance[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 123: 351–357.
- [21] XU Chaohang, WANG Hetang, WANG Deming, et al. Study on the mechanism of polyethylene oxide groups improving the foamability of anionic surfactants in hard water[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 613: 126046.
- [22] WANG Hetang, WANG Deming, TANG Yan, et al. Experimental investigation of the performance of a novel foam generator for dust suppression in underground coal mines[J]. *Advanced Powder Technol.*, 2014, 25(3): 1053–1061.
- [23] ZHU Xiaolong, WANG Hetang, WANG Deming, et al. Improved foam application at the tunnel face with large ventilation volume and low pressure supplied water[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 95: 103139.
- [24] REED W R, ZHENG Y, KLIMA S, et al. Experimental study on foam coverage on simulated longwall roof[J]. *Transactions*, 2017, 342(1): 72–82.
- [25] REED W R, ZHENG Y, KLIMA S, et al. Assessing foam application to mine roof for longwall mining shield dust control[C]// SME Annual Conference and Expo 2017: Creating Value in a Cyclical Environment. United States, 2017: 67–79.
- [26] REED W R, BECK TW, ZHENG Y, et al. Material property tests of foam agents to determine their potential for longwall mining dust control research[C]// SME Annual Conference and Expo 2017: Creating Value in a Cyclical Environment. United States, 2017: 396–407.
- [27] REED W R, BECK T W, ZHENG Y, et al. Foam property tests to evaluate the potential for longwall shield dust control[J]. *Mining Engineering*, 2018, 70(1): 35–41.
- [28] REED W, SHAHAN M, ZHENG Y, et al. Laboratory results of foam application testing for longwall shield dust control in a simulated environment[J]. *International Journal of Coal Science and Technology*, 2021, 8(2): 217–227.
- [29] WANG Hetang, WANG Deming, REN Wanxing, et al. Application of foam to suppress rock dust in a large cross-section rock roadway driven with roadheader[J]. *Advanced Powder Technology*, 2013, 24(1): 257–262.
- [30] WANG Hetang, WANG Deming, WANG Qingguo, et al. Novel approach for suppressing cutting dust using foam on a fully mechanized face with hard parting[J]. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2014, 11(3): 154–164.
- [31] HÖHLER R, SANG Y, LORENCEAU E, et al. Osmotic pressure and structures of monodisperse ordered foam[J]. *Langmuir the ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2008, 24(2): 418.
- [32] MEAGHER A, MUKHERJEE M, WEAIRE D, et al. Analysis of the internal structure of monodisperse liquid foams by X-ray tomography[J]. *Soft Matter*, 2011, 7(21): 9881–9885.
- [33] STEENSON P. *Foam Engineering: Fundamentals and Applications* [M]. Wiley, 2012: 1–4.
- [34] STEPHAN A, KOEHLER, et al. Liquid flow through aqueous foams: The node-dominated foam drainage equation[J]. *Physical Review Letters*, 1999, 82(21): 4232–4235.
- [35] KRAYNIK A. Foam structure: from soap froth to solid foams[J]. *Mrs Bulletin*, 2003, 28(4): 275–278.
- [36] EXEROWA D, KRUGLYAKOV P M. *Foam and foam films: Theory, experiment, application*[M]. Elsevier, 1997.
- [37] 王德明. 矿尘学[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 215–222.
- [38] WANG Y, HOU B, CAO X, et al. Interaction between polymer and anionic/nonionic surfactants and its mechanism of enhanced oil recovery[J]. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2018, 39: 1178–1184.
- [39] STEPHAN A, KOEHLER. *Foam Engineering*[M]. New Jersey: A John Wiley and Sons, 2012.