

我国矿用抑尘剂研究综述

许袁熙 杨溢 房雪明

昆明理工大学公共安全与应急管理学院

DOI:10.12238/gmsm.v7i12.2072

[摘要] 随着煤矿采掘技术的不断发展,工作面粉尘污染对矿工健康和安全生产构成了严重威胁,粉尘治理成为矿区环境管理的重点和难点。喷雾降尘技术作为一种经济有效的治理手段,得到了广泛应用,在喷雾中添加抑尘剂能显著提高降尘效率。本文阐述了煤矿润湿型、粘结型、凝聚型及复合型化学抑尘剂的原理与应用,通过对我国矿用抑尘剂应用现状进行分析,探讨了各类抑尘剂在实际操作中的效果与存在的问题。同时,结合目前的技术发展趋势,预测未来抑尘剂技术的发展方向。

[关键词] 润湿型; 粘结型; 凝聚型; 复合型; 抑尘剂

中图分类号: TD714 文献标识码: A

A Review of the Research on Mine Dust Suppressant in China

Yuanxi Xu Yi Yang Xueming Fang

School of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology

[Abstract] With the continuous advancement of coal mining technologies, dust pollution in working faces has emerged as a significant threat to miners' occupational health and production safety, thereby making dust control a critical and challenging aspect of mine environmental management. Among various mitigation strategies, spray-based dust suppression technology has gained widespread application due to its cost-effectiveness and operational efficiency. The incorporation of chemical dust suppressants into spray systems has been demonstrated to significantly enhance dust control performance. This study provides a comprehensive review of the principles and applications of different categories of chemical dust suppressants, including wetting agents, binders, coagulants, and composite formulations, in coal mining operations. By analyzing the current state of dust suppressant utilization in China's mining industry, this paper evaluates the effectiveness and operational challenges associated with various suppressants in real-world applications. Furthermore, in light of emerging technological trends, the study offers insights into potential future advancements in dust suppressant technologies, aiming to inform the development of more efficient and sustainable dust control solutions.

[Key words] Wetting type; Bonding type; Coagulating type; Composite type; Dust suppressant

前言

煤矿采掘工作面是煤矿生产中最核心的区域,是工作人员和与大型机械设备高度集中的场所,各种设备大量产尘而导致工作面粉尘浓度极高。粉尘不仅对矿工的健康构成威胁,还可能引发爆炸事故,严重影响矿山的安全生产。近年来,随着国家对煤矿安全生产监管力度的加大,煤矿采掘面粉尘的治理逐渐成为煤矿安全管理中的一项重要任务。

目前,煤矿粉尘治理方式主要有煤层预湿润、通风隔尘、喷雾捕尘、除尘器除尘等,其中喷雾降尘技术操作简便、成本较低、效果显著,因而被广泛采用。通过在喷雾中添加抑尘剂,可以有效改善喷雾的湿润性和黏附性,提高其降尘效果,降低矿井粉尘浓度,保障煤矿工人的健康和平安。

抑尘剂的种类繁多,常见的有润湿型抑尘剂、粘结型抑尘剂、凝聚型抑尘剂以及复合型抑尘剂。不同类型的抑尘剂依据其作用机理的不同,表现出不同的降尘效果。

1 润湿型抑尘剂理论及应用

煤尘颗粒与水或其他液体接触时,液体在煤尘表面铺展并浸润其孔隙的过程称为润湿,润湿性反映了煤尘对液体的亲和能力。煤尘润湿效果受到表面粗糙度、变质程度、元素含量、自身结构差异、组分、粒径、非晶质组分等自身物化性质的影响。

同种物质分子间的相互吸引力称为内聚力,液体分子与固体表面分子之间的相互作用力称为附着力,当附着力大于内聚力,液体就容易铺展开来,表现出较好的润湿性。

煤是一种疏水物质,表面通常具有大量的疏水位点(如非极性的碳氢基团)和少量的亲水位点(如含氧官能团),很难被水润湿,润湿型抑尘剂通过降低水溶液的表面张力,使雾滴能够更容易地与煤尘表面接触并附着,从而提高喷雾降尘的效率。润湿型抑尘剂在我国煤矿工作面应用较为广泛,其优点在于能够迅速降低溶液的表面张力,提升喷雾降尘效果。

王晓楠等^[1]研究表明表面活性剂一方面可以降低水的表面张力,使水分子之间收缩力减小,另一方面表面活性剂的亲水基团和水分子又以氢键连接,使粘接力增大,并发现0.025wt% FMES和0.025wt% CDEA的复配溶液能够显著降低溶液的表面张力。王建国等^[2]通过对18种表面活性剂和3种粒径的煤尘样品进行沉降实验,筛选出4种表面活性剂,并进行了阴离子型与阴离子型表面活性剂复配实验、阴离子型与两性离子型表面活性剂复配实验和阴离子型与非离子型表面活性剂复配实验,发现接触角的数值与煤尘的粒径大小无关,表面活性剂的分子量数值越小煤尘的润湿效果越好。唐明云^[3]等通过分子动力学模拟和润湿性实验得出,并非所有的表面活性剂复配都具有协同增效作用,有些反而会产生拮抗作用,其中阴离子表面活性剂与非离子表面活性剂的复配协同增效作用最强,并发现质量分数为0.15%的快渗T和质量分数为0.10%的APG复配溶液对提高烟煤的润湿效果最好。郑春山^[4]等研发了基于氟碳表面活性剂(FS-31)增效的复合抑尘剂,并基于红外光谱(FTIR)测试和Peakfit分峰拟合,定量研究了煤体疏水性和亲水性官能团变化。

2 粘结型抑尘剂及理论

粘结型抑尘剂的主要作用是在煤尘颗粒表面形成一层粘性膜,这层膜能够把煤尘颗粒“粘”在一起,使其不易飞扬。通过这一机制,煤尘颗粒被固化或团聚成较大的颗粒,较大的颗粒由于重力的作用,难以再进入空气中,从而减少了粉尘污染的扩散。尤其是在干燥的环境下,煤尘容易变得松散和浮动,而粘结型抑尘剂通过“粘住”颗粒,防止其被风力带走。粘结型化学抑尘剂通常难溶于水,为了提高这些原料的使用效率,会对其进行乳化,让其变成一种乳液状。然后将合成的抑尘剂溶液喷洒向煤尘,将煤尘充分润湿使其降落,达到抑尘、降尘的目的。

粘结型化学抑尘剂主要用于高浓度煤尘区域,如采煤机和刮板输送机附近,能有效降低煤尘悬浮,减少粉尘飞扬风险。尽管效果明显,但因成本较高,且部分成分可能影响环境,其应用范围仍受一定限制。

汪志强等^[5]以硬度和渗透深度为评价指标设计正交试验分析获得粘结型抑尘剂的最佳配方为0.06%CAD+0.10%AEC-7+0.20%MC,经测试该抑尘剂具有良好的保水性以及固结性。任强等^[6]以E412作为黏结剂,PAAS作为保水剂制备高效抑尘剂优化配方GHY-1,测定其黏度为0.4mPa·s、保水率为80.5%,具有较好的喷雾黏度、煤尘包裹性和保水性。

3 凝聚型抑尘剂及理论

凝聚型化学抑尘剂通过改变煤尘颗粒之间的相互作用,使其凝聚成较大的颗粒,从而减少粉尘的悬浮和扩散。其工作原理

主要有:(1)破坏煤尘颗粒的静电斥力。煤尘颗粒在空气中通常带有相同电荷,相互之间存在静电斥力,使它们保持分散状态,不易自然沉降。凝聚型抑尘剂通过中和或降低煤尘颗粒表面的电荷,削弱其静电排斥作用,从而促进颗粒相互接近和结合。(2)增强煤尘颗粒间的范德华力。煤尘颗粒间本身存在微弱的范德华引力,但通常不足以使它们自然凝聚。凝聚型抑尘剂含有高分子聚合物或带电颗粒,它们能够在煤尘颗粒间架起“分子桥”,增强颗粒间的相互吸附力,使小颗粒凝聚成更大的团块最终沉降到地面或设备表面。

凝聚型化学抑尘剂根据作用机理和材料可分为高倍吸水树脂型、吸湿性无机盐型、絮凝剂型和聚合物乳液型。高倍吸水树脂是一种高分子材料,能吸收数百至数千倍自身重量的水分,形成凝胶层,起到保水、吸湿、促进煤尘凝聚的作用。其抑尘效果良好,能长时间保持煤尘湿润,减少二次悬浮。然而,由于其制备成本较高、生产工艺复杂,在煤矿等大规模抑尘应用中受到一定限制,但在特定环境(如高温或低湿度区域)仍具有应用价值。吸湿性无机盐型抑尘剂主要由具有强吸湿性能的无机盐组成,如氯化钙(CaCl₂)、氯化镁(MgCl₂)等。这些盐类物质能够吸收空气中的水分,形成一层薄水膜,将煤尘颗粒表面湿润,从而增加颗粒的粘附性,促进其凝聚和沉降。絮凝剂是一种可以促进颗粒间凝聚的化学物质,通常是聚合物类物质,如聚丙烯酰胺(PAM)等。它通过化学反应在煤尘颗粒之间架设“桥梁”,形成絮状物,使煤尘颗粒聚集在一起,增加颗粒的比重,从而促进沉降。聚合物乳液型抑尘剂通常由水性聚合物乳液组成,具有较好的粘结性。它们在煤尘颗粒表面形成一层膜或胶质层,通过物理吸附和表面张力作用来减少煤尘的飞扬。

凝聚型化学抑尘剂在我国煤矿工作面应用逐渐增多,这类抑尘剂的优点是能够大幅度降低煤尘的悬浮浓度,提高煤尘沉降速度。但由于其使用的化学成分需要严格控制,以避免对矿区水源和环境造成污染,应用时需要谨慎选择。孙健等^[7]以淀粉、膨润土作为基体,丙烯酰胺作为单体,用过硫酸钾作为引发剂,N,N'-一亚甲基双丙烯酰胺作为交联剂,制备一种润湿性能和凝聚效果优良的凝聚型抑尘剂。

4 复合型化学抑尘剂及理论

复合型抑尘剂是由润湿型、粘结型和凝聚型抑尘剂组合而成,具有多重降尘机制。这类抑尘剂能够同时发挥多个作用,如润湿、粘结和凝聚,从而在不同的工作环境和煤矿条件下提高降尘效果。复合型抑尘剂适用于复杂的工作面,特别是在矿井环境条件变化较大的情况下,能够保证较好的降尘效果。

复合型抑尘剂是目前煤矿综采工作面降尘的研究热点之一,在复杂的矿井环境中得到了广泛应用。例如,在煤层开采过程中,复合型抑尘剂能够适应多种工作条件,并提高煤尘治理效果。然而,复合型抑尘剂的研发和应用仍面临一定的技术挑战,特别是在成本控制和环保问题方面。张琦等^[8]选取天然高分子材料黄原胶为改性原料,采用水溶液聚合法合成XG-g-PAM聚合物,与AEO-7和JFC-E复合制备一种新型抑尘剂,对全尘和呼尘的降尘

效率分别为83.83%和78.64%,具有良好的抑尘和降解性。张雨晨^[9]等以鼠李糖脂、内酯型槐糖脂等为主要成分,制备了一种新型生物可降解型复合抑尘剂,并通过傅里叶红外光谱分析发现所配制的复合抑尘剂是通过增加煤尘表面亲水性官能团的含量,进而提高煤尘的润湿性能。刘阳昊等^[10]采用化学改性的实验方法,以壳聚糖为主要原料,合成HTCC,通过单体实验确定辅料润湿剂丙三醇和渗透剂JFC的最佳浓度范围,设计正交试验和喷雾降尘模拟实验确定最优配比。

5 抑尘剂发展趋势

目前,我国能源消费结构仍然以煤炭为主,煤矿采掘过程中产生的粉尘污染不仅对周边环境构成了巨大危害,而且严重威胁工人健康。抑尘剂作为一种高效、经济的粉尘控制手段,在降低颗粒物排放、改善空气环境方面发挥着关键作用。近年来,中国在抑尘剂的研发、生产和应用方面取得了显著进展,并呈现出多元化、绿色化和智能化的发展趋势。

5.1 抑尘剂向绿色环保方向发展

随着国家环保政策的收紧以及公众环保意识的提高,抑尘剂的绿色环保性成为研究和应用的核心关注点。传统的高分子类或表面活性剂类抑尘剂由于可能含有重金属或难以降解的有机物,在使用过程中容易造成二次污染。因此,当前的研究重点集中于开发基于天然高分子材料(如淀粉、纤维素及其衍生物)和生物降解材料的抑尘剂,以提高其可降解性和生态安全性。

5.2 复合型抑尘剂的应用不断扩大

单一成分的抑尘剂在某些工况条件下可能存在稳定性差、作用周期短或适应性不强等问题。因此,复合型抑尘剂的开发成为新的研究热点。例如,将高分子黏结剂与表面活性剂、无机盐或生物酶结合,可提高抑尘剂的润湿性、保水性和持久性,从而增强其在不同环境下的适应性。近年来,复配型抑尘剂已在煤矿、钢铁冶炼、建筑施工和公路运输等领域得到广泛应用。

5.3 抑尘机理的深入研究

抑尘剂的作用机理主要涉及润湿、包裹、凝聚和结壳等过程。近年来,利用分子动力学模拟、界面化学分析等先进研究方法,对抑尘剂与粉尘颗粒之间的相互作用进行了深入探讨。例如,研究发现表面活性剂的极性基团与煤尘颗粒的亲水性表面之间的作用力对抑尘效果具有重要影响。此外,某些纳米材料(如纳米二氧化硅、石墨烯氧化物等)的引入,能够显著提升抑尘剂的分散性和吸附能力,为高效抑尘剂的设计提供了新的思路。

5.4 智能化抑尘技术的发展

随着物联网、大数据和人工智能技术的进步,智能抑尘技术逐步应用于工业和市政领域。基于传感器和远程控制系统的智能喷雾抑尘设备,可实现实时监测环境粉尘浓度,并根据粉尘分布情况自动调节抑尘剂的喷洒量和喷洒区域,以提高抑尘效果

和资源利用率。

我国煤矿抑尘剂的研究正朝着绿色环保、高效能、智能化和低成本方向发展。煤矿抑尘剂的技术发展将推动煤矿行业的可持续发展与环境保护目标的实现。

6 结语

煤矿粉尘污染严重威胁矿工健康与生产安全,喷雾降尘结合抑尘剂是有效的治理途径。润湿型、粘结型、凝聚型及复合型抑尘剂各有其独特的作用原理与应用场景,在实际中也都面临不同挑战。

如今,抑尘剂技术发展呈现多元态势,向绿色环保转型,减少对环境的二次污染;复合型抑尘剂应用愈发广泛,提升适应性;对抑尘机理的探究更为深入,借助先进手段挖掘关键影响因素;智能化技术赋能抑尘,实现精准喷洒。未来,需持续创新,克服成本、环保等难题,让抑尘剂为煤矿安全生产与环境保护提供更有力的支持,助力煤矿行业稳健迈向可持续发展之路。

[基金项目]

云南省教育厅科学研究基金(2023J0158)。

[参考文献]

- [1]王晓楠.表面活性剂复配对煤尘润湿性的协同效应研究[D].安徽理工大学,2020.
- [2]张京兆,王建国,王延秋,等.复配型表面活性剂对煤尘润湿效果的优选研究[J].矿业研究与开发,2021,41(03):142-146.
- [3]金靖艳,唐明云,江丙友,等.多组分表面活性剂复配对烟煤润湿效果研究[J].煤矿安全,2024,55(1):100-106.
- [4]郑春山,李灿灿,江丙友,等.基于氟碳表面活性剂增效的复合抑尘剂润湿抑尘特性研究[J].煤矿安全,2025,56(02):47-57.
- [5]汪志强,刘涛.高效固结矿用抑尘剂的制备与性能研究[J].能源与环保,2024,46(5):30-35.
- [6]任强,于学雷,佟林全,等.矿井高效抑尘剂优化配方及性能研究[J].煤矿安全,2024,55(05):114-121.
- [7]孙健,王钰颖,高丹红.一种凝聚型抑尘剂的制备及性能测试[J].矿业研究与开发,2019(4):5.
- [8]张琦.黄原胶基环保型复合抑尘剂的制备及性能研究[D].安徽理工大学,2024.
- [9]张雨晨.生物可降解型复合抑尘剂对不同煤质粉尘润湿性的协同效应研究[D].中国矿业大学,2022.
- [10]刘阳昊.矿用新型复合型抑尘剂的研制及性能研究[D].山东科技大学,2018.

作者简介:

许袁熙(1994--),女,汉族,云南省昆明市人,硕士研究生,研究方向:安全管理、风险评估、粉尘治理。