

金属矿山采场爆破尘毒防控技术研究进展及展望

金龙哲¹ 郭敬中^{1,2} 李 刚^{3,4,5} 王天暘¹ 刘建国¹
欧盛南¹ 巩 琦¹ 王嘉莹¹

(1. 北京科技大学土木与资源工程学院,北京 100083;2. 华北科技学院安全工程学院,河北 廊坊 065201;
3. 中钢集团马鞍山矿山研究总院股份有限公司,安徽 马鞍山 243000;4. 华唯金属矿产资源高效循环利用国家工程
研究中心有限公司,安徽 马鞍山 243000;5. 金属矿山安全与健康国家重点实验室,安徽 马鞍山 243000)

摘 要 金属矿山爆破尘毒防控是加强企业环保意识与构建绿色矿山的重要途径,是实现矿业高质量发展的必然要求。为了系统研究金属矿山采场爆破尘毒污染问题与防控措施,从粉尘理化特性、水炮泥降尘、在线监测系统、云雾除尘等方面进行了综合评述。认为现阶段该领域研究存在的不足为:金属矿山尘毒基础研究投入不足,受重视程度不够;尘毒防控机理不完善;尘毒防控技术手段贫乏;尘毒危害分级监管、接触限值、检测方法等标准落后;粉尘监测设备精度不高;尘毒防控新技术、新装备推广应用力度不足。据此指出加强水炮泥降尘、云雾除尘、尘毒在线监测等技术研究,是现阶段缓解金属矿山爆破尘毒污染的有效措施。同时指出,今后研究的重点方向有:①开展典型金属矿尘理化特性与其润湿性之间的关系研究,为物理化学方法降解尘毒提供基础数据及技术支撑;②多组份水炮泥降尘消毒机理及配方优化研究,从源头上减少尘毒产生量;③巷道云雾除尘机理与参数优化研究,净化污染风流中的尘毒,减少排向地面的空气污染物;④研制高精度、多点连续测量、耐污染、使用寿命长的粉尘浓度检测技术和在线浓度监测装备,研发适用于工矿潮湿、冲击等复杂环境的高精度粉尘监控体系,实现粉尘监控自动化、智能化;⑤开展标准顶层设计与发展规划,完善粉尘监管强制性标准体系,加快标准的整合精减和“立、改、废”工作,提高标准的针对性和适用性;⑥注重一线作业人员实操技术培养,加强新技术、新装备在一线的适用性研究,加大新技术、新装备的推广应用,改善金属矿山的作业环境。

关键词 金属矿山 爆破尘毒 在线监测 多组份水炮泥 巷道云雾除尘

中图分类号 TD714 **文献标志码** A **文章编号** 1001-1250(2021)-01-120-15

DOI 10.19614/j.cnki.jsks.202101009

Study Progress and Prospect on Prevention and Control Technology of Blasting Dust and Poison in Metal Mine Stope

JIN Longzhe¹ GUO Jingzhong^{1,2} LI Gang^{3,4,5} WANG Tianyang¹ LIU Jianguo¹ OU Shengnan¹
GONG Qi¹ WANG Jiaying¹

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Safety Engineering College, North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, China; 3. Sinosteel Maanshan General Institute of Mining Research Co., Ltd., Maanshan 243000, China; 4. Huawei National Engineering Research Center of High Efficient Cyclic Utilization of Metallic Mineral Resources Co., Ltd., Maanshan 243000, China; 5. State Key Laboratory of Safety and Health for Metal Mines, Maanshan 243000, China)

Abstract The prevention and control of blasting dust and poison in metal mines is an important approach to strengthen enterprises' awareness of environmental protection and to build green mines, and a inevitable demand to achieve high quality development of mine. In order to systematically study the problems and solutions of blasting dust and poison in metal mines, a comprehensive review of physical and chemical characteristics of dust, dust removal technology of water-stemming, online monitoring, and dust removal with cloudy were carried out. It is show that there are many disadvantages of dust and poison prevention and control in metal mines, such as deficiency of fundamental study and attention, imperfection of the mechanism of

收稿日期 2020-06-25

基金项目 “十三五”国家重点研发计划项目(编号:2017YFC0805204);国家自然科学基金项目(编号:51874015)。

作者简介 金龙哲(1963—),男,院长,教授,博士,博士研究生导师。通信作者 郭敬中(1983—),男,讲师,博士研究生。

· 120 ·

dust and poison prevention and control, few of prevention and control techniques, backward on grading supervision, exposure limits, testing methods and other standards, low precision of monitoring equipment of dust, the insufficient of promotion and application of new technologies and equipment for the prevention and control of dust and poison. It was reported that strengthen investigation of dust removal technology of water-stemming and cloud and online monitor of blasting dust and poison, which is an effective measure for prevention and control of blasting dust and poison at this stage. At the same time, the key study directions in the future were proposed: ① The relationship between physicochemical characteristics and wettability of typical metallic mineral dust should be studied to provide basic data and technical support for the physical and chemical elimination of blasting dust and poison; ② Through the study on disinfection mechanism and formulation optimization of multi-component water-stemming, blasting dust and poison could be reduced from the source; ③ Utilize the reduction mechanism and formula optimization of roadway cloud removal technology to purify the dust and poison in the polluted air flow and reduce the air pollutants discharged to the ground; ④ Online dust monitoring technology and equipment that has the advantages of high-precision, multi-point continuous measurement, resistant to pollution, and long service life, and high-precision dust monitoring system which can resist moisture, impact and other complex environments of mine should be studied and developed, so as to realize automatic and intelligent of dust monitoring; ⑤ Carry out top-level design and development plans for standards, improve the system of compulsory dust monitoring standards, speed up the integration and reduction of standards as well as the work of "establishing, revising and abolishing" of standards, so as to improve their pertinence and applicability; ⑥ Pay attention to the training of workers on practical operational ability from front-line, strengthen the study on the applicability of new technologies and equipment in the site, increase the popularization and application of new technologies and equipment, so as to improve the working environment of metal mines.

Keywords metal mine, blasting dust and poison, online monitoring, multi-component water stemming, roadway cloudy removal

金属矿山爆破尘毒防控是加强企业环保意识与构建绿色矿山的重要途径,是实现矿业高质量发展的必然要求。爆破尘毒是指金属矿山爆破破岩产生的大量微细颗粒和有毒有害气体,严重污染作业场所及其周边环境,降低矿山生产效率,致使中毒事故和矽肺病等职业病时有发生^[1]。据2016年工业企业粉尘危害情况抽样调查结果,57.4%的工业企业(约138万家)存在粉尘和化学毒物危害,接害人数约2300万,尘毒污染相当严重。为此,《国家职业病防治规划(2016—2020年)》、《安全生产“十三五”规划》、《尘肺病防治攻坚行动方案》及《“健康中国2030”规划纲要》中明确要求,要加强高危粉尘、高毒物品等职业病危害源头治理,到2030年健康危险因素得到有效控制。因而,开展尘毒防控研究不仅符合健康中国发展战略,而且为矿山职业病的有效控制提供理论和技术支撑。

为控制采场爆破尘毒,减少作业环境污染,国内外专家学者通过分析污染因子特征,基于“源头减尘、过程控尘”的思路开展研究,取得了一定的进展。在矿尘理化特性研究方面,矿尘的润湿、沉降效果与其粒径、粒度分布,表面化学结构、官能团、荷电性等理化特征数据密切相关,粉尘润湿性能通常用润湿接触角来定量表征^[2]。KOLLIPARA等^[3]详细分析了美国某内陆盆地煤尘的理化特性,发现煤尘复杂的物理化学性质显著影响其润湿性能。粒径是影响粉

尘润湿性的重要因素,粒径越小,被润湿的可能性越小。因为煤粉经过超细化粉碎后,表面润湿性发生了很大变化,不同变质程度的超细煤粉表面都变成了强疏水表面^[4]。GOSIEWSKA等^[5]通过试验发现,煤尘表面矿物性质对其表面润湿效果影响甚大,且亲水矿物含量越大,其润湿性越好。YANG等^[2]较为系统地分析了呼吸性粉尘的表面特性及其润湿机理,基于煤尘比表面积及孔隙结构参数得出,煤尘孔隙、孔体积及表面粗糙度越大,煤尘润湿性越差。LI等^[6]采用低温氮吸附法测定了煤尘表面孔隙参数,认为具有复杂多孔表面的粉尘润湿能力相对较弱。但煤尘表面发生氧化效应可以提高粉尘润湿能力^[7]。粉尘粉碎后不仅表面发生变化,而且携带电荷^[8],直接影响其碰撞、凝结、沉降效果。影响粉尘电荷特征和强度的因素很多,主要为水分含量,环境湿度,粉尘成分(如矿物质含量、硫酸盐含量),粉尘产生方式和粒径分布等^[9]。在试验研究的基础上,粉尘润湿理论研究也不断向前发展。1975年MANDELBROT首次提出分形理论^[10],为研究煤尘粒度分布提供了全新的数学手段和理论基础。聂百胜等^[11]基于粉尘大分子和表面结构特点,应用分子热力学和表面物理化学理论分析了煤尘表面自由能特征和煤吸附水微观机理,认为煤对水分子的吸附是多层吸附,吸附第一层水的动力主要来自于煤对水分子的氢键,分子力引起的长程力是促使对其余水分子层吸附的主要

推动力,为研究煤尘润湿性提供了理论基础。随着试验研究与理论分析的深入,建立粉尘理化特性与其润湿性之间关系的设想逐步获得学术界的关注。OFORI 等^[12]建立了煤尘成分与润湿接触角的定量表征关系,用于评估粉尘的润湿能力。孙勇^[13]运用表面活性理论,进行了铝粉尘润湿性与温度、荷电性等因素之间关系的探索。程卫民等^[14-16]、杨静等^[17]通过大量试验研究发现,煤尘润湿能力与其表面基团种类及含量存在明显关联性,主要涉及煤尘表面无机矿物质官能团(以灰分和无机硅酸盐为代表)、含氧官能团(以芳香羟基为代表)以及有机大分子结构(以 C—H 键为代表);煤尘表面的脂肪烃、芳香烃等疏水基团是造成其疏水性较强的主要原因,煤尘表面赋存的羧基、羟基、羰基等含氧官能团及 Si—O—Si 矿物基团会提高粉尘的亲水能力。与煤尘方面已开展的研究相比,金属矿尘理化特性研究尚处于起步阶段,有关矿尘润湿性能与其理化特性之间的关联体系尚未建立,加之金属矿尘种类繁多、差异性大,亟待对金属矿尘理化特性展开广泛而深入的研究。

水炮泥作为一种源头降尘措施引发广泛关注。自 20 世纪 80 年代起,矿山采掘面水炮泥的使用经历了两个阶段,分别为普通水炮泥和新型水炮泥(添加一种或若干种化学试剂的混合溶液)。普通水炮泥主要用于水平、浅孔爆破,且结构简单,其水炮泥袋是由聚乙烯或聚氯乙烯压延的塑料薄膜袋,水袋周边热压封闭,一端为注水口,另一端封闭。袋口处向内折叠成双层“亚”字形压制。当袋内注满清水时,封口处薄膜在袋内水压作用下闭合形成自动封口^[18]。此类水炮泥袋存在质量较差、不能长期存放、承受压力不强、破损率高的缺点。水炮泥安放位置好坏与否直接影响其爆破及降尘效果,蔡如法^[19]分别将水炮泥放于炮眼底部、紧跟引药、炮眼口、封口泥与封头泥之间 4 个位置,试验结果表明:利用封头泥避开水炮泥与引药直接接触,能够有效传递爆炸应力波,增强爆破效果,避开引药与水炮泥接触,可以大幅降低因使用水炮泥而造成的瞎炮、燃爆现象,具有良好的除尘效果。大量水炮泥现场试验效果表明^[18]:普通水炮泥对于大颗粒粉尘具有很好的润湿及降尘效果,全尘降尘率可达 72.5%,但小颗粒粉尘(呼吸性粉尘)润湿与沉降效果不佳。由于水溶液表面张力大、易蒸发,润湿、凝聚微细粉尘能力弱,表面活性剂、润湿剂等化学试剂能够降低水溶液表面张力,提高小颗粒粉尘被润湿的概率^[20-23],因而在采掘面爆破、转载点喷雾、路面洒水等方面得到广泛应用。在普通水炮泥中加入一定数量的表面活性剂、

润湿剂等化学试剂可升级为新型水炮泥。目前新型水炮泥概念比较笼统,种类繁多,蒋仲安等^[24]、杜翠凤等^[25-26]、李向东等^[27]、邹常富等^[28]都开展了新型水炮泥的研究与试验,尽管配方不同,但都认为新型水炮泥具有降低水溶液表面张力、提高溶液润湿能力、减少尘毒产生的效果。随着表面活性剂及其复配溶液研究的大量开展,人们对其功能与使用范围提出了更高的期望。受作业环境复杂性影响,水炮泥中化学试剂成分与种类呈多样化发展趋势,功能也从降尘为主向降尘消毒^[29-32]、增湿保湿、环境友好等多重功效发展;水炮泥的使用从浅孔、水平孔爆破拓展到中深孔、倾斜孔爆破领域,从巷道掘进扩大到采场爆破,从煤矿拓展到金属矿山,使用范围逐步加大。

喷雾降尘是指将水分散成雾滴喷向尘源,抑制和捕捉粉尘的方法与技术。在巷道内安装低压喷雾装置、高压喷雾装置^[33-34]具有一定的降尘效果,但缺点明显:一是喷雾粒径较大,沉降大颗粒粉尘尚可,捕集呼吸性粉尘能力不足;二是单位耗水量巨大,湿滑路面,不利于安全生产。空气雾化是一种新型雾化方式,其雾化原理为剪切破碎,利用气液两相相互碰撞与摩擦实现液体雾化。与传统压力喷雾相比,空气雾化具有耗水量低、水压低、不易堵塞及降尘效率高等特点^[35-37]。但是,空气雾化喷嘴结构和雾化过程复杂,空气雾化喷嘴雾化性能的研究依赖于气体动力学、两相流体动力学、数值方法等学科的发展,当前除部分理论探究外,数值模拟和试验研究为主要研究手段^[38-40]。蒋仲安等^[41]、侯腾彦等^[42]、王晓英等^[43]结合理论分析与实验室试验,推导出空气雾化喷嘴降尘效率关系式,分析表明:空气雾化喷嘴的雾化特性受喷嘴的水流量、气流量、气压和水压影响,水流量随着水压的增大而增大,随着气压的增大而减小;当水流量一定时,气体流量越大,除尘效果越好;粉尘粒径越大,喷雾雾滴的有效作用距离越长,粉尘越容易被沉降。由于空气雾化喷嘴种类繁多、结构各异,试验结果差异性也比较大,根据空气雾化喷头雾化特性及最佳工况点等研究成果,可单独或组合使用,或研制除尘装置,用于不同作业地点减少污染。刘国庆等^[44]研制了气动高压微雾除尘装置,与传感器组合构成自动喷雾降尘系统,在回风巷喷雾形成一道水幕墙,在短距离内捕捉浮游煤尘,实现回风巷粉尘浓度超限报警与净化,取得一定的效果。但在金属矿山^[45-47],空气雾化主要用于破碎硐室、掘进巷道等相对狭小、风流不畅的区域,在采场、回风巷等区域的应用鲜有涉及。

目前粉尘颗粒监测方法有滤膜称重法、光散射

法、 β 射线法、微量振荡天平法等^[48-49]。滤膜称重法为人工测尘,只能测得单点设定时间内的粉尘浓度平均值,无法实现连续监测;光散射法具有非接触、监测速度快、重复性好、数据处理及时、可长时间连续监测粉尘质量浓度等优点,逐步成为粉尘浓度监测研究热点。近年来,国内外粉尘浓度连续监测设备研究方面取得了显著进展^[50-52],如美国粉尘雷达、英国西姆斯林测尘仪、德国红外数码测尘仪、我国重庆煤科院粉尘传感器等,在井下粉尘浓度连续在线监测方面发挥了重要作用。与煤矿相比,金属矿山尘烟监测手段相对落后,普遍采用滤膜称重法,采场爆破尘毒在线监测研究处于起步阶段。

综上所述,与煤矿防尘研究投入相比,金属矿山爆破尘毒防治投入严重不足。目前主要采用优化通风网络、湿式喷雾等常规措施进行尘毒防治,因井下爆破场所差异性大,尘毒防控效果有限。在金属矿山尘毒防控研究中,防尘研究优于防毒,有毒有害气体防控未引起足够重视。因此,金属矿山爆破尘毒防控面临基础性研究不足、先进技术手段缺乏、检测方法标准落后等一系列问题,加强爆破尘毒防控研究势在必行。金属矿山爆破尘毒防控是一个复杂的系统性问题,涉及面广、影响因素多、过程复杂。因此,梳理爆破尘毒源头解析、典型金属矿尘理化特性与其润湿性关系、水炮泥降尘技术、尘毒在线监测系统、巷道云雾除尘技术等方面的研究成果,探讨矿山尘毒防控的不足与未来发展方向,可为国内外类似条件下的矿山爆破尘毒防控提供技术参考。

1 爆破尘毒源头解析

1.1 矿尘源头分析

爆破是金属矿山采场粉尘产生的重要来源。爆破作业时,矿体在爆破功作用下,产生大量裂隙、孔隙,并被破碎成粉尘颗粒和碎石屑;在强大爆炸冲击波作用下,粉尘和碎石屑被细化分解,裂解成粒径更小的浮尘。爆炸冲击波不但会产生大量粉尘,而且会扬起岩壁和地表附着的粉尘。

爆破粉尘生成后,在脱离矿体的短时间内,不同粒径的颗粒物运动轨迹各不相同,不同运动轨迹的颗粒物叠加形成粉尘云。由于固相颗粒密度大于气相物质密度,因此,固相颗粒惯性大于气相物质惯性,固相颗粒及颗粒团位于粉尘云前端,且以惯性运动为主;随着时间推移,受空气阻力作用,粉尘动量逐渐变小,固相颗粒速度下降,气相物质顶替固相颗粒占据粉尘云前端,以扩散运动为主^[53]。

爆破生产的粉尘浓度及粒径分布受爆破岩体性质、爆破工艺等影响,产异性明显。当爆破岩体含水

率高时产生粉尘量少而粗,当爆破岩体含水率低时产生粉尘量大而细。此外,装药参数、起爆方式、炸药类型、炮泥类型及堵塞参数等也会影响爆破矿尘的产生量及其特征。

1.2 有毒有害气体源头分析

采场爆破时,爆炸产物以气体为主,主要有 CO_2 、 H_2O 、 CO 、 NO_2 、 O_2 、 N_2 、 SO_2 、 H_2S 等,习惯上称为炮烟。其中 CO 、氮化物(NO 、 NO_2)、 H_2S 等都是有毒有害气体^[54]。有毒有害气体产生与否与产生量大小受多种因素影响^[55]:

(1)炸药的氧平衡。爆破采矿炸药大多由碳、氢、氧、氮4种元素组成。炸药发生爆炸时,氧元素分别与碳、氢元素发生剧烈的氧化反应,生成爆炸产物。零氧平衡是最理想状态,炸药发生完全化学反应后,几乎无有毒有害气体产生。正氧平衡会产生氮氧化物,负氧平衡会产生一氧化碳。在实际应用中,正氧平衡或负氧平衡是常态,有毒有害气体的产生难以避免。

(2)炸药反应的完全程度。炸药反应的完全程度与炸药组成、成分性质、炸药密度、粒度、装药直径等因素有关,如:当炸药组成成分相同时,粒度越小,混合越均匀,反应就越完全,毒气产生量便越小。

(3)周围介质的影响。炸药发生爆炸时,瞬间产生大量热,为炸药周围介质发生化学反应提供了环境条件,造成矿石中某些元素可能会产生有毒有害气体;爆炸产生的二氧化碳在高温下也有可能被周围碳元素还原成一氧化碳。

2 典型爆破粉尘润湿性影响机制分析

润湿特性是矿山粉尘的主要理化性质之一,是矿山降尘技术的重要理论依据。以江苏梅山铁矿、山东罗山金矿、江西德兴铜矿及安徽神山石灰石矿采掘面爆破粉尘为研究对象,探索典型金属非金属矿尘理化特性对其润湿特性的影响效应,并对矿尘润湿特性进行定量表征。

2.1 粉尘润湿机理分析

润湿性常被用于评定粉尘对同一液体的亲和能力,接触角是固体粉尘润湿性的量化体现^[56]。液滴在固体表面上,在平衡液滴的固、液、气三相交界处,自固—液界面经液体内部到气—液界面的夹角称为接触角,通常以 θ 表示(图1)。固—液 γ_{ls} 、液—气 γ_{gl} 和气—固 γ_{gs} 之间作用力的关系可用润湿方程(Young equation)(式1)来表示:

$$\cos\theta = (\gamma_{gs} - \gamma_{ls}) / \gamma_{gl} \quad (1)$$

自发进行的润湿过程的润湿功必须为正数,因

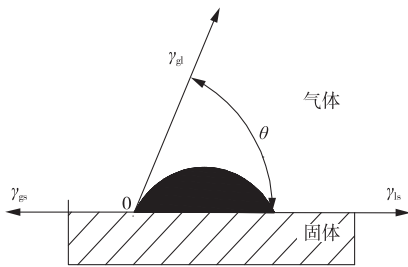


图 1 润湿接触角

Fig. 1 Wetting contact angle

此, $\theta \geq 90^\circ$ 时, 为不易润湿状态, 表现为疏水性; $\theta < 90^\circ$ 时, 为容易润湿状态, 表现为亲水性。

Young 方程是基于理想光滑固体界面的润湿方程, 但实际固体表面基本均为粗糙界面。WENZEL 等认为, 对于表面粗糙而化学成分均匀的固体界面, 实际接触角要大于观测接触角, 记作

$$\cos\theta_w = \gamma(\gamma_{gs} - \gamma_{ls})/\gamma_{gl} = \gamma\cos\theta, \quad (2)$$

式中, γ 为粗糙界面的实际面积与其投影面积的比值, 并且 γ 始终大于 1; θ_w 为表观接触角, ($^\circ$); θ 为平衡接触角, ($^\circ$)。

式(2)说明: 亲水表面会增大其亲水性, 疏水表面会增大其疏水性。但当 $\gamma\cos\theta < -1$ 时, 此式将不再适用。

CASSIE 认为, 对于多相接触的表面, 会有部分气体被阻断在液滴下面, 即液滴并不能与实际粗糙界面完全接触。故在实际条件下, 固-液接触面实则为固-液、固-气的混合接触界面(图 2), 混合界面的表面接触角 θ_{CB} 可由 Cassie-Baxter 方程计算:

$$\cos\theta_{CB} = f_1 \cdot \cos\theta_1 + f_2 \cdot \cos\theta_2, \quad (3)$$

式中, θ_{CB} 为固体表面接触角, ($^\circ$); f_1 是在整个接触底面中, 固-液接触面的占比, %; f_2 为(孔隙凹处等)液-气接触面的占比, %; θ_1 为固-液接触角, ($^\circ$); θ_2 为气-液接触角, ($^\circ$)。

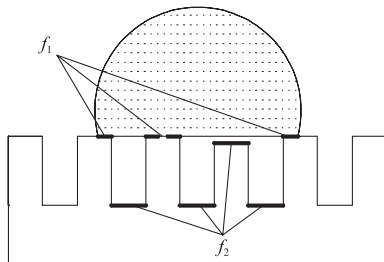


图 2 粗糙表面润湿接触角

Fig. 2 Wetting contact angle on coarse surface

因 $f_1 + f_2 = 1$, θ_2 通常定为 180° , 故式(3)可进一步转化为

$$\begin{cases} \cos\theta_{CB} = f_1 \cdot \cos\theta_1 - f_2 \\ \cos\theta_{CB} = f_1 \cdot \cos\theta_1 + f_1 - 1 \end{cases}, \quad (4)$$

对于极度粗糙的表面, $f_1 \rightarrow 0$, $\theta_{CB} \rightarrow 180^\circ$ 。

矿尘理化特性会影响 θ_1 , f_1 与 f_2 的比例。固-液接触角 θ_1 值会受到矿尘自身化学性质的影响, 主要涉及颗粒表面基团及组成物相等因子。 f_1 与 f_2 的比例关系主要与颗粒表面的自由能、表面活性、表面粗糙度等参数有关, 主要涉及粉尘的物理特性, 包括粒径、比表面积、表面孔隙特征等。

2.2 典型爆破矿尘润湿性影响机制

矿尘粒径及颗粒表面孔结构是影响粉尘润湿强弱的重要因素。从图 3 可以看出: 随着金属矿爆破粉尘颗粒粒径逐渐变小, 其表面孔体积有增大的趋势, 这与 YANG 等^[2]的观点基本一致。这是因为粉尘在破碎细化过程中, 较大孔隙易破坏而多生成介孔和微孔孔隙, 且在破碎过程中颗粒中的一些盲孔也会被打开, 导致颗粒表面的孔隙进一步增多。说明矿尘粒径减小及颗粒表面孔体积增大共同弱化了矿尘的润湿特性。

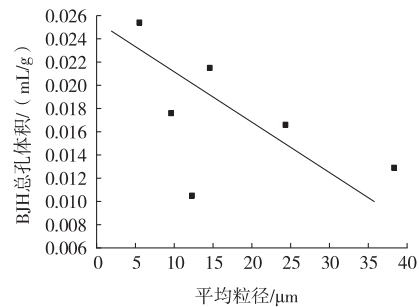


图 3 金属爆破粉尘孔体积随平均粒径的变化特征

Fig. 3 Variation characteristics of blasting dust hole volume with average particle size in metal mines

由图 4 可知: 典型金属非金属矿爆破粉尘颗粒表面总孔体积随着粉尘颗粒粒径变小有明显增大趋势, 当粒径小于 $30 \mu\text{m}$ 时, 该规律尤为明显。

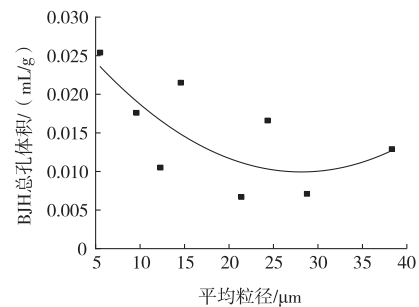


图 4 典型金属非金属矿爆破粉尘孔体积随平均粒径的变化特征

Fig. 4 Variation characteristics of blasting dust hole volume with average particle size of typical metallic in nonmetallic mines

Cassie-Baxter 公式可表示为

$$\cos\theta_{CB} = f_1 \cdot \cos\theta_1 + f_2 \cdot \cos\theta_2 = f_1 \cdot \cos\theta_1 - f_2. \quad (5)$$

由式(5)可知: 物相组成会影响固-液接触角 θ_1

大小。因粉尘粒径会影响颗粒表面自由能及表面活性强弱,通常粒径越小的粉尘,其表面孔隙结构越复杂,颗粒表面孔体积会影响表面粗糙度大小。表面自由能及表面粗糙度会进一步影响颗粒表面的空气吸附能力及表面空气膜效应的强弱,而空气膜效影响了 f_1 与 f_2 的比例关系。

进一步分析图3和图4可知:矿山爆破粉尘颗粒粒径越小、表面孔隙结构越多,致使颗粒表面自由能及表面活性越大、表面粗糙度越大,进而使得颗粒表面的空气吸附能力越强,空气膜效应更为明显,那么当液滴与固体表面接触时, f_2 会变大,则 f_1 会变小,使得 θ_{cb} 变大,粉尘的润湿性会变弱。

综上所述,典型爆破矿尘理化特性对其润湿性的影响机制(图5)可进行如下阐释^[57-60]:

(1)粉尘物相组成是界定其亲疏水性的主要指标。金属非金属矿山爆破粉尘的组成物相基本均为亲水物质,直接导致了矿尘的润湿特性表现为亲水性,使得固-液接触角 θ_1 小于 90° 。

(2)对于亲水性粉尘,颗粒粒径及表面孔结构是影响粉尘润湿性强弱的重要指标。具体表现为:粒径越小及表面孔体积越大,润湿接触角有明显变大趋势,具体通过影响固-液接触面占比 f_1 和固-气接触面占比 f_2 的配比关系,进而影响矿尘的润湿进程。

(3)溶液表面张力是影响粉尘润湿进程的重要指标。上述矿尘的试验结果均表明:降低溶液表面张力,粉尘的初始润湿接触角会变小,矿尘的润湿过程会明显加快。大部分矿尘表现出溶液表面张力越小,其对粉尘的润湿效果越明显的规律。

(4)矿尘润湿性基本不受其表面基团影响,且矿尘润湿性与其真密度之间并无明显关联。

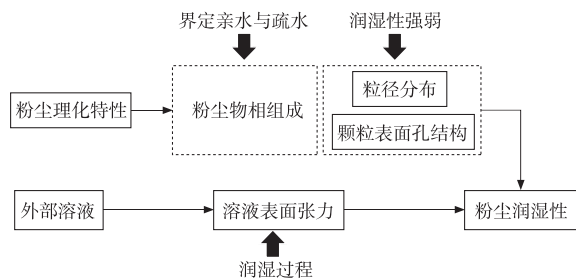


图5 典型爆破矿尘润湿性影响机制
Fig. 5 Influence mechanism of wettability of typical blasting dust

结合矿山实际工况条件及理化特性间的相互作用关系(图6)可知:粉尘粒径分布、孔隙结构及组成物相均会显著影响粉尘的润湿特性(①、②、③)。粉尘的产生工艺(如粉碎、切割、摩擦及爆炸等)直接影响粉尘的孔隙结构与粒径分布(④和⑤),产生工艺

的能量越大,粉尘粒径越小,孔隙度越发达,润湿性越差。在相同作用力下,不同力学性质(硬度、弹性等)的岩石的破坏效果不同,直接影响产生粉尘的孔隙结构与粒径分布(⑥和⑦),而岩石的力学特性又由其所含的矿物质种类与含量决定(⑧)。同时,岩石中所含矿物质的特性直接影响其真密度大小(⑨);尽管粉尘真密度对其润湿性没有直接影响,但可影响粉尘在水中的沉降特性(⑩),因此为保证试验数据的可比较性,在利用沉降法测定粉尘润湿性时需要对其真密度进行表征。

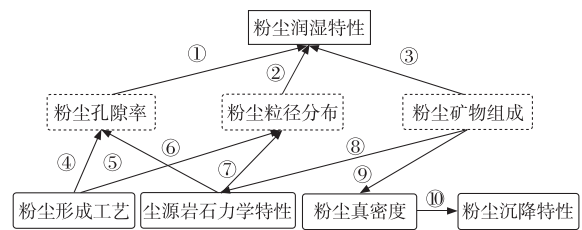


图6 粉尘润湿性与其影响因素之间的关系
Fig. 6 Relationship between wettability of dust and its influencing factors

3 多组份水炮泥试验研究

采场爆破尘毒产生及分布规律研究发现^[61-62],巷道型采场内粉尘浓度呈中间高、两侧低的分布态势,采场进路内有风流漩涡存在;在断面方向,尘毒浓度以断面中心为圆心径向逐步降低;在轴线方向,沿远离工作面方向尘毒浓度逐步降低。以通风排尘为主要降尘措施的金属矿山,粉尘净化主要依靠重力沉降,呼吸性粉尘因难以沉降,排出时间相对较长,不利于提高劳动生产效率和改善作业环境。

在采掘面,采用水炮泥代替传统炮泥,可以从源头实现降尘消烟效果。水炮泥指用水袋或添加化学添加剂的水袋代替或部分代替传统炮泥,利用爆炸产生的高温高压条件,使得炮孔内水炮泥袋爆裂,袋内液体以高速射流形式向四周发散并被汽化,形成水雾将爆破云包裹,雾滴与粉尘接触后,使粉尘湿润并凝结沉降,起到消减源头尘毒的效果。

3.1 水炮泥尘毒防控机理

多组份水炮泥具有降低水溶液表面张力、增强粉尘被润湿效果、强化液体爆破雾化效果的能力,其作用机理^[63-65]为:

(1)增强粉尘与液滴碰撞与沉降效果。吸湿性无机盐等化学试剂的加入,使得水炮泥溶液密度大于清水,爆炸时更具迸发力,形成的液滴粒径更细更小、数量更多、分布范围更广,大幅增加了气化雾滴与粉尘的碰撞概率;雾滴与粉尘碰撞结合,形成的凝结核或被润湿的矿尘密度均较大,加快了粉尘,尤其

是呼吸性粉尘的沉降速度。

(2)改善粉尘被润湿能力。由于加入了阴离子表面活性剂溶液和 CaCl_2 、 MgCl_2 等电解质,能改善矿尘的润湿能力^[64-65]。这是因为表面活性剂与添加剂结合,使矿尘表面的疏水晶格吸附表面活性剂产生亲水作用;高价负离子吸附在矿尘表面的亲水晶格上,使其保持亲水性;在矿尘表面疏水晶格的表面活性剂的密实填充作用和半胶束形成,改善其亲水性。阴离子表面活性剂溶液添加 CaCl_2 、 MgCl_2 后能改善润湿作用,对难于润湿的煤尘更有效。

(3)降低二次扬尘。水炮泥中吸湿性无机盐除了加速其凝结核沉降外,还可以使润湿后的粉尘能继续吸收空气中水分,保持一定的含水率,使微细粉尘保持长时间的湿润性,从根本上降低二次扬尘。

(4)源头降低毒气产生量。水炮泥的有效封堵作用,使得炸药在炮孔内发生充分反应,接近零氧平衡状态,减少有毒有害气体;在有限空间内,爆炸产生的高温、高压、高湿条件为各种化学反应提供了条件,水炮泥分解产生的多种离子、矿物分子,与产生的有毒有害气体等相互发生反应,特别是矿岩中含有 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 MgO 等催化剂的情况下反应加快,可从源头减少有毒有害气体产生^[66]。

3.2 试验材料

在普通水炮泥中添加一定数量的粘尘剂,能够降低水溶液的表面张力、增大润湿粉尘能力、提高粉尘捕集能力^[67]。本研究课题组在新型水炮泥研发和现场试验方面进行了大量的工作,建立了以溶液的表面张力和润湿速度等为量化指标,以正交复配试验为手段,以基料与辅料为组成成分的水炮泥研发流程^[63-64]。为减少梅山铁矿爆破工作面垂直中深孔(图7)爆破尘毒污染,课题组首次提出了应用多组份水炮泥降低爆破尘毒污染的技术思路。

多组份水炮泥^[68]是一种由基料和辅料,按照一定比例,经热合成加工工艺而制成的一种液体,其中基料为吸湿性无机盐,辅料为表面活性剂、凝胶剂和凝胶剂复配溶液。氯化钙和氯化镁不仅都具有良好的吸湿性能(图8),而且能够满足化工产品井下应用的条件,即:无毒无臭,对环境不造成污染;能溶于任何矿井水中,且溶解度较大;无燃烧、爆炸性;无明显的腐蚀性。该类材料来源广泛,价格低,是十分理想的吸湿性材料。辅料则是多种表面活性剂的复配物,主要具有降低基料溶解液的表面张力,增强其润湿、分散、增稠、缓蚀等性能。选择与 CaCl_2 和 MgCl_2 具有良好配伍性的功能表面活性剂,是对多组份水炮泥配方优化研究的技术关键。因此,在选择表面活

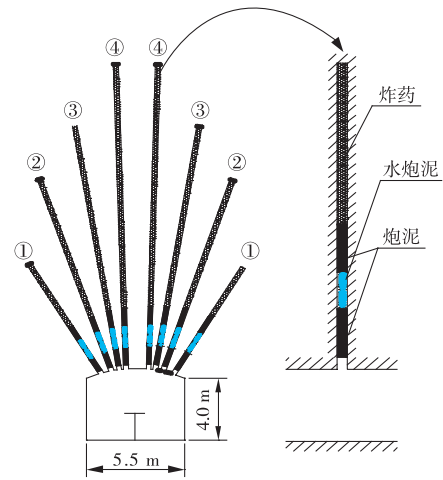


图 7 深孔爆破布置示意

Fig. 7 Schematic of the Layout of deep-hole blasting

①—8.7 m/60°; ②—13.8 m/72°; ③—16.8 m/81°; ④—20.8 m/88°

性剂时,不仅要考虑表面活性剂在无机盐溶液中的添加浓度等问题,还要解决好表面活性剂与无机盐的匹配问题。

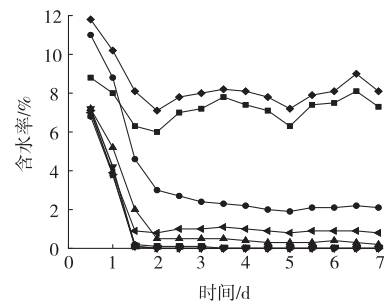


图 8 吸湿材料的吸水性能对比

Fig. 8 Comparison of the water absorption of hygroscopic materials

■—氯化钙; ●—水玻璃; ▲—甘油; ▼—硫酸钠; ◆—氯化镁;
◀—硅胶; ▶—氯化铝; ●—钠石灰

通过对多种表面活性剂、降毒剂进行正交复配,获得复合试剂,随后将其与吸湿性无机盐复配,经过热合成工艺获得 3 种多组份水炮泥配方,分别记为 M_1 、 M_2 、 M_3 。基于配方的表面张力和润湿速度,最终选择配方 M_1 、 M_2 作为现场试验材料。考虑到现场爆破钻孔深度达 21 m,直径为 90 mm,钻孔内壁粗糙,且局部区域出现孔径变小的现象,研制了耐摩擦、防滑落的大尺寸水炮泥袋,如图 9 所示。

3.3 尘毒在线监测系统

为实现对梅山铁矿巷道型采场爆破粉尘及炮烟的在线连续监测,综合考虑实用性及经济性,在该矿井下巷道型采场搭建了占地面积小、实用性强、精度高的尘烟在线监测系统。

尘烟在线监测系统^[69]主要由“感知端”、“传输端”、“应用端”三大模块组成,设备包括矿用本安型电源、呼吸性粉尘采样器、粉尘浓度传感器、有毒有

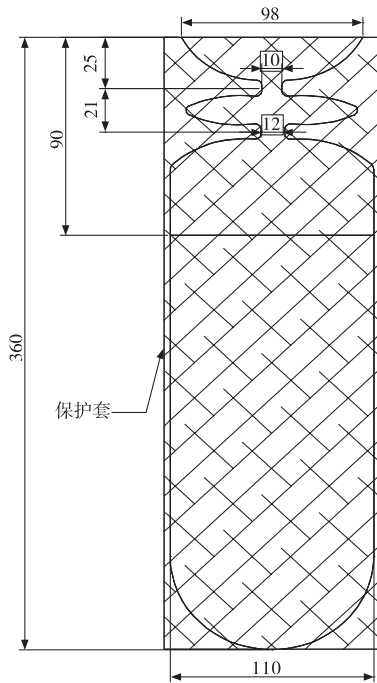


图9 多组份水炮泥袋及保护套(单位:mm)

Fig. 9 Multi-component water stemming bag and jacket

害气体传感器、计算机等,通过硬件集成共同完成巷道型采场粉尘及有毒有害气体在线监测,尘烟在线监测系统设计方案如图10所示。为有效应对采场爆

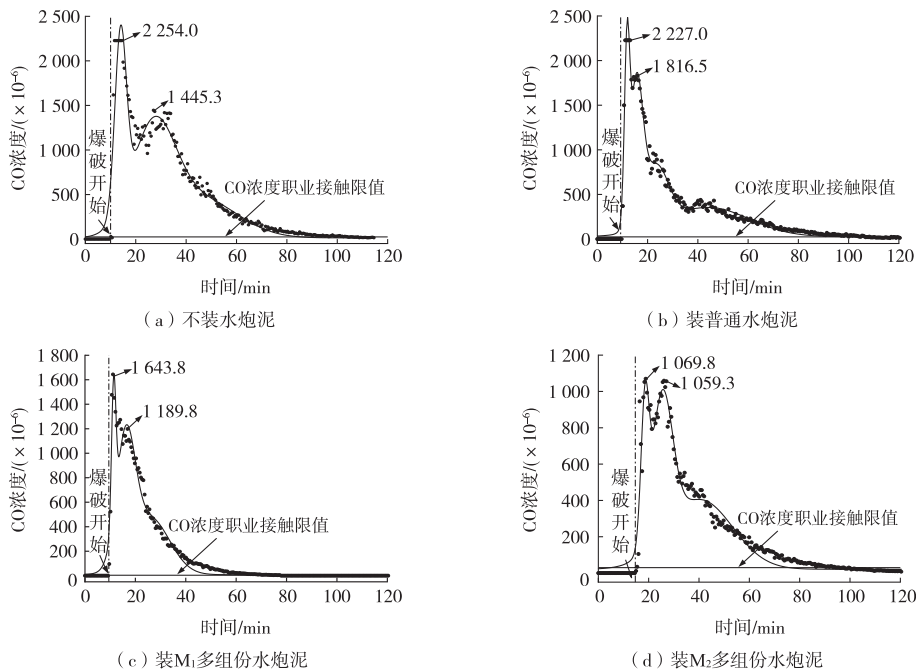


图11 不同爆破条件下CO浓度变化曲线

Fig. 11 Variation curves of the concentration of CO under different blasting conditions

由图11可知:采场爆破中不同水炮泥装填类型的CO浓度扩散均有着相似的规律,即在扩散过程中存在两个峰值,可称为“双峰曲线”。通过分析不装水炮泥情形下的试验结果(图11(a))可以发现,起爆后,部分炮烟及粉尘在冲击波的作用下迅速涌出,流

破冲击波对监测设备的破坏风险,研发了移动防爆监测车对测量设备进行集成防护,可在各个采场内来回移动。

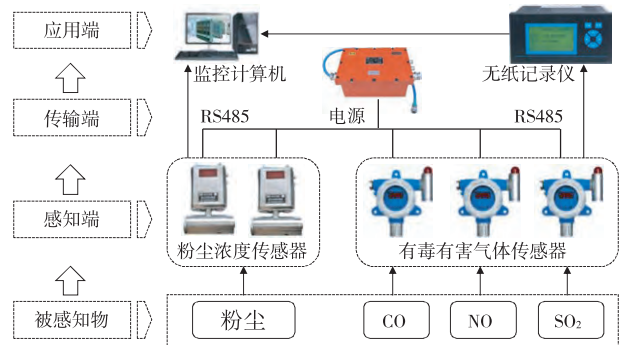


图10 粉尘在线监测平台总体设计方案

Fig. 10 Overall design plan of online dust monitoring platform

3.4 试验结果与分析

3.4.1 有毒有害气体抑制效果

利用尘烟在线监测系统,获得不装水炮泥,装普通水炮泥,装M₁、M₂多组份水炮泥情况爆破时CO、NO浓度的变化数据,并绘制了峰值拟合曲线^[31-32],如图11和图12所示,其中SO₂产生量可忽略不计,故不作分析。

经监测点处的CO浓度迅速攀升,进而出现第1个峰值2254.0 × 10⁻⁶;由于爆破产生的局部负压,联络道中的新鲜空气涌入采场内部,冲淡部分烟尘,监测点的CO浓度迅速降至1119.0 × 10⁻⁶;采场内部压力平衡后,在风流作用下采场内部存留的炮烟向联络巷

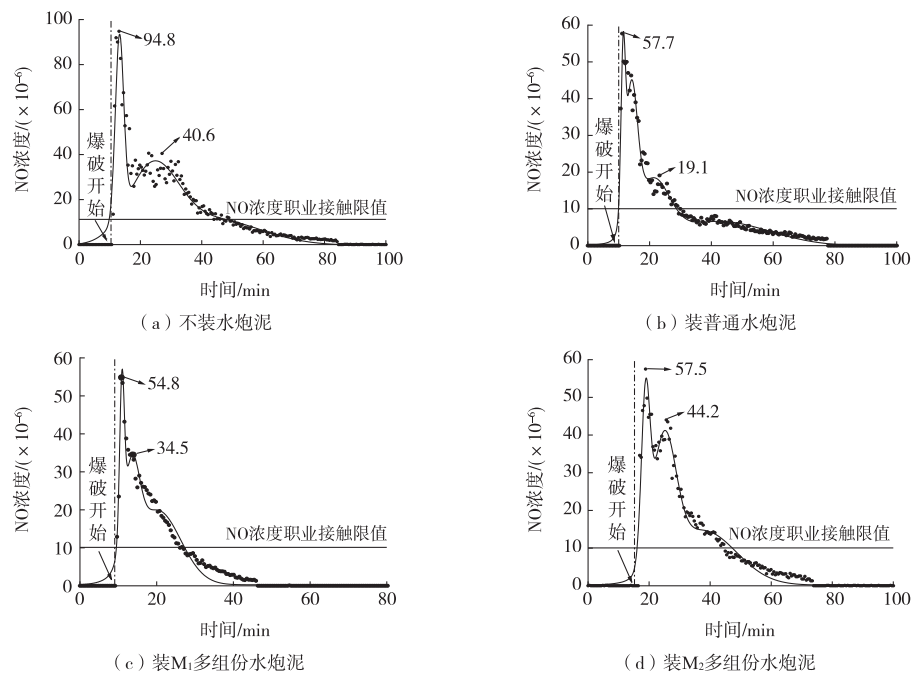


图 12 不同爆破条件下NO浓度变化曲线

Fig. 12 Variation curves of the concentration of NO under different blasting conditions

扩散,再次经过监测点使得CO浓度缓慢上升,形成第2个峰值;在风流作用下,炮烟不断被排出采场,CO浓度逐渐下降至监测结束。根据上述分析,建议矿井在CO浓度第2次上升前,及时采取有效措施抑制CO浓度,缩短CO排出采场的时间。

现场试验结果表明:添加多组份水炮泥可有效抑制CO生成,其中装M₁配方的多组份水炮泥抑制CO效果最佳,CO浓度相较于不装水炮泥时降低了52.5%,相较于普通水炮泥降低了51.9%^[32]。根据《工作场所有害因素职业接触限值》(GB Z2—2007),本研究设定的NO和CO的职业接触浓度限值分别为 11.2×10^{-6} 和 16.0×10^{-6} 。由图12可知:相较于不装水炮泥和普通水炮泥,多组份水炮泥CO浓度达到职业接触限值的时间平均缩短了30~50 min,说明多组份水炮泥抑制CO效果较为明显。

通过对比图11与图12发现:多组份水炮泥和普通水炮泥对于NO的抑制效果均很显著,在NO抑制过程中,水炮泥添加剂起到的作用十分有限,而清水起到了至关重要的作用。这是因为NO化学性质非常活泼,当它与氧气相遇即可发生反应生成NO₂,NO₂再与爆破后水炮泥产生的水雾发生反应可生成硝酸,从而减少了NO的生成量^[32]。

3.4.2 降尘效果

《金属非金属矿山安全规程》(GB 16423—2006)规定,当粉尘中游离SiO₂含量小于10%时,井下作业场所空气中粉尘最高允许浓度为10 mg/m³。在炮眼数量、装药量、水炮泥装入数量等外界条件等同的情

况下,利用尘烟在线监测系统,从装药开始开机,直至爆破后可安全下井时结束,分别记录采场巷帮、巷中处粉尘浓度,并分别对不装水炮泥、装普通水炮泥、装M₁/M₂多组份水炮泥4种爆破条件下的粉尘数据进行了记录,结果见图13。

由图13可知:起爆后,在爆炸冲击波作用下,大量粉尘迅速冲入巷道内。短时间(约2 min)内,经过测站的粉尘浓度达到最大值,为453.77 mg/m³(图13(a)),高浓度粉尘持续12 min左右,之后粉尘浓度呈间歇性减弱。巷帮与巷中处粉尘浓度变化趋势基本一致,但峰值较小,为371.21 mg/m³。经过大约1.5 h的通风排尘,粉尘浓度仍高于20 mg/m³,说明采用通风排尘方法不仅无法降低粉尘产生量,而且净化时间长、效果差、成本高。

统计4种爆破条件下粉尘浓度数据发现,巷帮区域全尘浓度峰值分别为371.27、265.51、118.62、132.29 mg/m³,降尘率分别为28.49%、68.08%、64.37%。通风排尘1.5 h后,全尘浓度分别为56.24、34.21、2.52、6.54 mg/m³,降尘率分别为39.17%、95.52%、88.37%;呼尘浓度分别为37.61、25.87、2.09、4.86 mg/m³,降尘率分别为31.22%、94.44%、87.08%。巷中区域全尘浓度峰值分别为453.77、291.85、125.87、139.82 mg/m³,降尘率分别为35.68%、72.26%、69.19%。通风排尘1.5 h后,全尘浓度分别为73.39、49.83、4.82、8.12 mg/m³,降尘率分别为32.10%、93.43%、88.94%;呼尘浓度分别为42.68、28.91、3.28、7.26 mg/m³,降尘率分别为32.26%、92.31%、82.99%。说明应用多组份水炮泥可有效地从

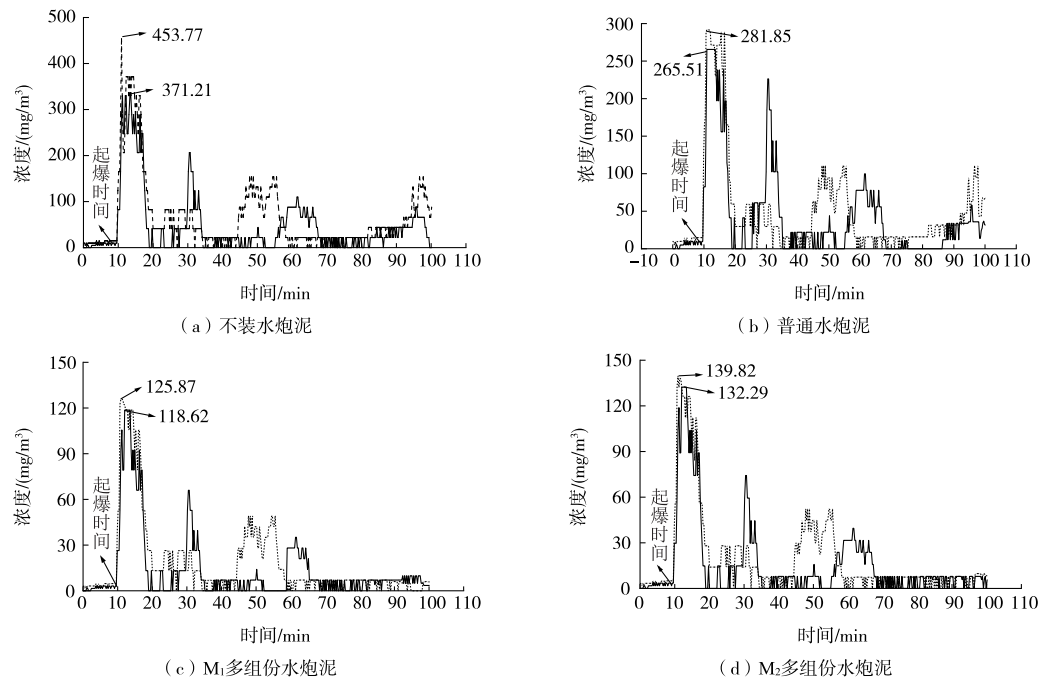


图 13 不同爆破条件下粉尘浓度变化曲线

Fig. 13 Variation curves of the dust concentration under different blasting conditions

——巷帮; ·····巷中

源头减少粉尘产生量;在1.0 h内粉尘浓度值降到安全规程规定的最高允许浓度以下,通风排尘时间减小,可降低通风成本,提高工作面效率;与普通水炮泥相比,多组份水炮泥全尘降尘率提高了90%以上,呼尘降尘率提高了80%以上。

4 巷道云雾除尘试验研究

云雾除尘装置^[70]包括云雾除尘主机和气水源处理装置两个部分。云雾除尘主机解决云雾喷嘴及其他组件的布局问题。气水源处理装置完成对云雾喷嘴工作介质的处理,提高云雾喷嘴的工作效率和使用寿命。

4.1 技术集成

4.1.1 云雾除尘主机

云雾除尘主机的工作原理是利用云雾喷嘴按照一定角度与方向固定在拱形钢架结构上,分别向巷道四周和内部喷雾,使云雾充满巷道整个断面,形成巷道全断面雾帘,拦截粉尘扩散并加速其沉降。由于金属矿山爆破地点多且较为分散,故本研究将云雾除尘装置设计为手推车形式,可随爆破地点灵活移动,除尘装置的其他组件集成于小车上方的箱体^[70]。

为了能使超声雾化喷头的喷雾充满巷道全断面,且各处雾滴粒径较为均匀,参照井下巷道断面形状——三心拱,云雾除尘装置上部设计为底角45°的等腰梯形,下部为矩形的钢架结构(图14)。将超声雾化喷头固定于钢架的四周和正面,四周的喷头向

四周喷雾,使云雾充满整个断面,正面的喷头正对着风流方向喷雾,它的作用是填补四周喷雾的空缺同时抵挡风压,并将粉尘排向四周。

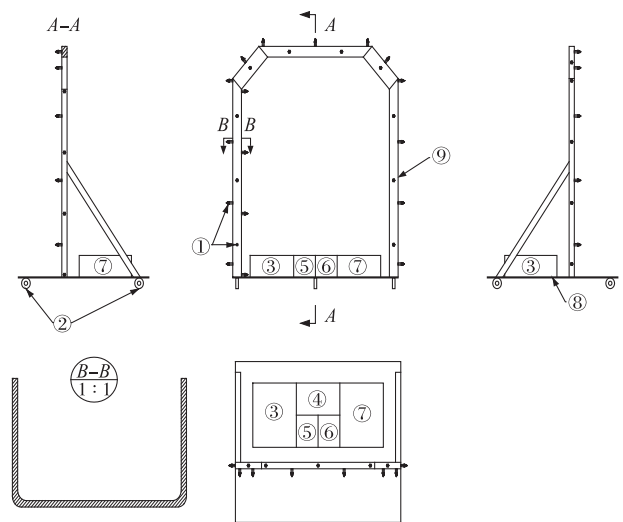


图 14 云雾除尘主机外形示意^[70]

Fig. 14 Outline schematic of cloud dusting main machine

- ①—喷雾角80°超声雾化喷头; ②—带刹车万向轮; ③—水排分流器;
- ④—精密水过滤装置; ⑤—气压表及其调节阀; ⑥—水流量计及其调节阀;
- ⑦—气排分流器; ⑧—不锈钢板; ⑨—不锈钢架结构

相对于传统除尘方式,云雾除尘主机特点有:①云雾除尘主机体积小、占用空间小、移动方便,尤其适用于金属矿山井下巷道类区域等狭小空间内的除尘;②云雾除尘主机单位时间内产生的雾滴颗粒数量大,雾滴粒径小,分布更加均匀细密,吸附能力强,能充分增加与粉尘颗粒的接触面积,定向抑尘,

可有效消除呼吸性粉尘^[70]。

4.1.2 气水源处理装置

井下气、水源供给的质量好坏直接影响到云雾喷嘴的使用性能及寿命。为净化井下气、水源质量,分别设计了气、水源两级处理装置(图 15)。水源两级处理装置包括水源预处理和水质过滤器,采用不锈钢超

滤网对水路中的铁锈、泥沙、悬浮物等进行预处理;利用水质过滤器对水源进行二级净化,水中颗粒物粒径降到 5 μm 以下,且具有反冲洗功能,完全能够满足云雾喷嘴对水质的要求。参照水源两级净化思路,自制了气源预处理器对气源进行预处理,然后经过气体精密过滤器,使之满足云雾喷嘴对气源的要求。

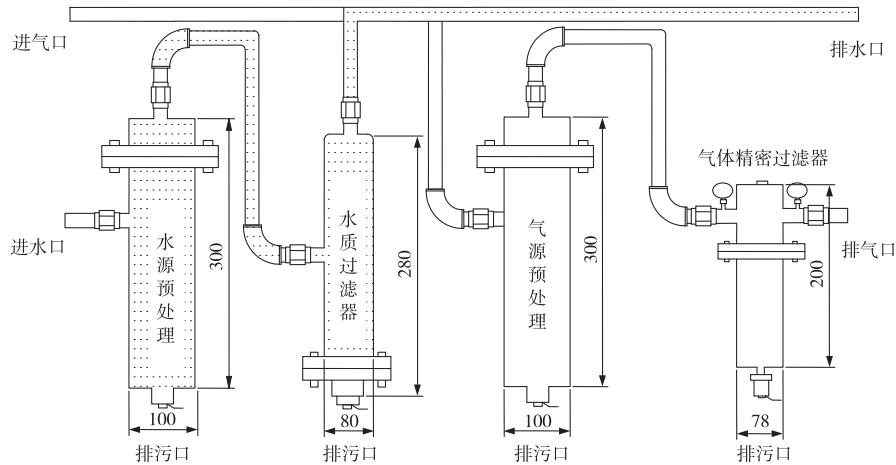


图 15 气水源处理装置示意(单位:mm)

Fig. 15 Schematic of gas and water clean machine

4.2 现场试验结果与分析

试验场所选在梅山铁矿-318 m 水平西区,在云雾除尘装置前后 5 m 分别布置观察点,记作净化前、净化后观察点。每个观测点分别安放一台观测台车,观测台车上固定一台 CCZ20 呼吸性粉尘采样器和一台 ICF-2 粉尘采样仪,分别进行呼吸尘和全尘采样,现场应用效果见图 16。

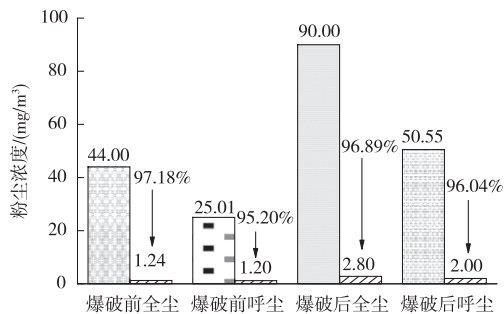


图 16 云雾除尘装置现场应用效果

Fig. 16 Field applied effect of cloudy dust removal device

■—净化前; ▨—净化后

爆破落矿前,风流未经云雾除尘装置净化前,全尘、呼吸尘浓度分别为 44.00 mg/m³、25.01 mg/m³,经云雾除尘装置净化后,全尘、呼吸尘浓度降为 1.24 mg/m³、1.20 mg/m³,降尘效率分别为 97.18%、95.20%;爆破后,应用云雾除尘装置,全尘、呼吸尘的降尘效率分别为 96.89%、96.04%。由此可知,无论是爆破前,还是爆破后,云雾除尘装置都可以将粉尘浓度降到最高许可浓度以下,说明云雾除尘装置对爆破粉尘的

控制效果非常有效。

5 存在不足及展望

倡导环境友好、矿地和谐的绿色矿业发展模式已逐步成为世界各国共识。金属矿山爆破尘毒防治是绿色矿山发展的重要内容,经过多年发展,金属矿山爆破尘毒防控技术取得了一定的进展,新技术、新工艺、新材料和新产品不断涌现,但仍与现场实际需求存在一定的差距,主要体现在以下几个方面:

(1)金属矿山种类繁多、差异性大、数量大,截至目前,各类矿尘理化特性测试样本采集基数小,金属矿尘理化特性数据库尚未建立,有毒有害气体防治鲜有涉及。

(2)水炮泥尘毒防控机理有待于从微观角度进一步探索;水炮泥配方研发流程规范性不足,评价标准相对落后,多数配方仅停留于实验室探索阶段,未得到现场验证。

(3)现有尘毒传感器精度普遍不高,无线化和智能化传输方式尚处于探索阶段;未实现基于大数据、物联网云平台等技术联网的在线尘毒监测,缺少对在线监测数据的深度处理与分析。

(4)云雾除尘作为一种新型除尘技术,其研究与应用还处于探索阶段。云雾除尘设备的核心部件是空气雾化喷嘴,空气雾化喷嘴喷雾降尘理论尚不完善,导致云雾除尘技术在实际应用中存在很大的盲目性,气、水流量等主要参数设定仅凭经验。有关若

干空气雾化喷嘴组合喷雾特征及降尘效果的研究鲜有成果问世。

(5)随着新材料、新工艺等不断出现,粉尘危害分级监管、接触限值、检测方法等标准存在规定过于笼统、年代比较久远等问题,很多内容要求与现实情况脱节严重。

(6)矿井作业场所环境复杂,工作人员操作水平参差不齐,科研成果技术转化存在优化周期长、使用效果差、投入成本高等一系列问题,降低了企业的应用意愿。

为更好地进行金属矿山尘毒防控研究,今后的发展方向主要有:

(1)借助三维激光扫描仪、CT扫描、大数据等技术手段,分级分类测定典型金属矿尘物理化学特性基础数据,如微观形态结构、物相组成、官能团等,建立典型金属矿尘理化特性数据库;探索典型金属矿尘物理性质、化学性质、不同尺度与其润湿性之间的关联矩阵,为采用物理化学方法降解尘毒提供基础数据及技术支撑。

(2)提高水炮泥润湿保湿能力、炮烟降解能力,降低对矿石与环境的影响,以表面张力、接触角、临界胶束浓度、防蒸发性等为筛选指标,建立水炮泥降尘消毒优选体系;优化多组份水炮泥配方,拓宽其适用范围;采用理论分析、试验研究、现场试验等相结合的方法,从微观上进一步探索多组份水炮泥尘毒防控机理。

(3)开展空气雾化喷雾雾化特性、降尘效果及其影响因子的研究,获得最佳工况参数;研发气源、水源过滤净化措施,为云雾除尘技术应用提供保障条件;通过数值模拟及现场实测方法研究巷道内风流时空演化规律,借鉴传统巷道喷雾及除尘器优点,研发占地空间小、成本低、移动方便的移动式全断面巷道云雾净化装置,通过优化喷嘴排列组合形成雾帘,净化污染风流,加速微细粉尘凝结与沉降。

(4)研发高精度、多点连续测量、耐污染、使用寿命长的粉尘浓度检测技术和在线浓度监测装备,研发适用于工矿潮湿、冲击等复杂环境的高精度粉尘监控体系,实现粉尘监控的自动化、智能化。

(5)组织开展标准顶层设计与发展规划,完善粉尘监管强制性标准体系,加快标准的整合精减和“立、改、废”工作,提高标准的针对性和适用性。

(6)应注重一线作业人员实操技术培养,加强新技术、新装备在一线的适用性研究,加大新技术、新装备的推广应用。

参 考 文 献

- [1] 吴超.化学抑尘[M].长沙:中南大学出版社,2003:72-78.
WU Chao. Chemical Suppressants of Dust [M]. Changsha: Central South University Press, 2003:72-78.
- [2] YANG J, WU X K, GAO J G, et al. Surface characteristics and wetting mechanism of respirable coaldust [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2010, 20(3):365-371.
- [3] KOLLIPARA V K, CHUGH Y P, MONDAL K. Physical, mineralogical and wetting characteristics of dusts from Interior Basin coal mines [J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 127(1):75-87.
- [4] 董平,单忠健,李哲.超细煤粉表面润湿性的研究[J].煤炭学报, 2004, 29(3):346-349.
DONG Ping, SHAN Zhongjian, LI Zhe. Study on the surface wet characteristic of ultrafine coal powder [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(3):346-349.
- [5] GOSIEWSKA A, DRELICH J, LASKOWSKI J S, et al. Mineral matter distribution on coal surface and its effect on coal wettability [J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2002, 247(1):107-116.
- [6] LI Q Z, LIN B Q, ZHAO S, et al. Surface physical properties and its effects on the wetting behaviors of respirable coal mine dust [J]. Powder Technology, 2013, 233(2):137-145.
- [7] PAWLIK M, LASKOWSKI J S, MELO F. Effect of coal surface wettability on aggregation of fine coal particles [J]. Coal Preparation, 2004, 24(5/6):233-248.
- [8] POLAT H, HU Q, POLAT M, et al. The effect of drop and particle charge on dust suppression by wetting agents [C]//Proceedings of the 6th US mine ventilation symposium. Littleton (CO). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1993:535-541.
- [9] JOHNSTON A M, VINCENT J H, JONES A D. Measurements of electric charge for workplace aerosols [J]. Annals of Occupational Hygiene, 1985, 29(2):271-284.
- [10] 曼德尔布罗特.分形对象:形、机遇和维数[M].文志英,苏虹,译.北京:世界图书出版公司,1999.
MANDELBROT. Fractal Objects: Shape, Opportunity and Dimension [M]. WEN Zhiying, SU Hong, translated. Beijing: World Publishing Corporation, 1999.
- [11] 聂百胜,何学秋,王恩元,等.煤吸附水的微观机理[J].中国矿业大学学报,2004,33(4):379-383.
NIE Baisheng, HE Xueqiu, WANG Enyuan, et al. Micro-mechanism of coal adsorbing water [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2004, 33(4):379-383.
- [12] OFORI P, FIRTH B, O'BRIEN G, et al. Assessing the hydrophobicity of petrographically heterogeneous coal surfaces [J]. Energy & Fuels, 2010, 24(11):5965-5971.
- [13] 孙勇.基于表面活性理论铝粉尘润湿性实验及效果研究[D].北京:中国地质大学(北京),2016.
SUN Yong. Aluminum Dust Wetting Experiment and Effect of Research Based on the Theory of Surface Active [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- [14] 程卫民,薛娇,周刚,等.基于红外光谱的煤尘润湿性[J].煤炭学报,2014,39(11):2256-2262.

- CHENG Weimin, XUE Jiao, ZHOU Gang, et al. Study of coal dust wettability based on FTIR[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(11):2256-2262.
- [15] 程卫民, 徐翠翠, 周刚. 煤尘表面碳、氧基团随变质增加的演化规律及其对润湿性的影响[J]. 燃料化学学报, 2016, 44(3):295-304.
- CHENG Weimin, XU Cuicui, ZHOU Gang. Evolution law of carbon and oxygen groups on coal surface with increasing metamorphic grade and its effect on wettability[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2016, 44(3):295-304.
- [16] 程卫民, 薛娇, 周刚, 等. 烟煤煤尘润湿性与无机矿物含量的关系研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(3):462-468.
- CHENG Weimin, XUE Jiao, ZHOU Gang, et al. Research on the relationship between bituminous coal dust wettability and inorganic mineral content[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2016, 45(3):462-468.
- [17] 杨静, 谭允祯, 王振华, 等. 煤尘表面特性及润湿机理的研究[J]. 煤炭学报, 2007, 32(7):737-740.
- YANG Jing, TAN Yunzhen, WANG Zhenhua, et al. Study on the coal dust surface characteristics and wetting mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(7):737-740.
- [18] 孙越明. 水泡泥降尘[J]. 煤炭科学技术, 1982(8):43-50.
- SUN Yueming. Water-stemming dust removal[J]. Coal Science and Technology, 1982(8):43-50.
- [19] 蔡如法. 浅谈水泡泥的最佳使用位置[J]. 煤矿安全, 1987(2):19.
- CAN Rufa. Study on optimal layout of water-stemming[J]. Safety in Coal Mines, 1987(2):19.
- [20] KOBRIK T. Water as a control method, state of the art, sprays, and wetting agents[C]//Proceedings of the symposium on respirable coal mine dust. Washington, D C: Bureau of Mines, 1970:123-132.
- [21] CHANDER S, MOHAL B R, APLAN F F. Wetting characteristics of particles and their significance in dust abatement[C]//Proceedings of Respirable Dust in the Mineral Industries: Health Effects, Characterization and Control. PA: University Park, 1988:19-23.
- [22] TIEN J C, KIM J. Respirable coal dust control using surfactants[J]. Applied occupational and environmental hygiene, 1997, 12(12):957-963.
- [23] KIM J. Respirable Coal Dust Control Using Surfactants-with Special Emphasis on Liquid Spray System[D]. Rolla: University of Missouri-Rolla, 1995.
- [24] 蒋仲安, 王伟. 降低爆破烟尘的降尘剂配方的实验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(10):1720-1724.
- JIANG Zhong'an, WANG Wei. Research on optimal formula of dust-fall agent to remove blasting smoke[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(10):1720-1724.
- [25] 杜翠凤, 别凤喜, 李怀宇. 富水胶冻泥降尘机理的实验研究[J]. 金属矿山, 1998(8):41-43.
- DUN Cuifeng, BIE Fengxi, LI Huaiyu. The experimental research on the dust-reduction mechanism of water-enriched gelatin stemming[J]. Metal mine, 1998(8):41-43.
- [26] 杜翠凤, 赵囡, 胡星灿. 掘进爆破水泡泥降尘抑制剂的试验研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2016, 68(1):61-65.
- DU Cuifeng, ZHAO Nan, HU Xingcan. Study on smoke and dust suppressant of water stemming in excavation blasting[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2016, 68(1):61-65.
- [27] 李向东, 孙萌苑. 新型水泡泥降低爆破烟尘的试验[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(1):53-56.
- LI Xiangdong, SUN Mengyuan. Experimental study on new water stemming to reduce blasting dust and smoke[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(1):53-56.
- [28] 邹常富, 张启平, 秦秀合, 等. 爆破作业面水泡泥降尘试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(5):126-129.
- ZOU Chuifu, ZHANG Qiping, QIN Xiuhue, et al. Experimental study on dust reduction of water cannon mud on blasting operation Face[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(5):126-129.
- [29] 陈沅江, 吴超. 表面活性剂在矿山尘毒治理中的应用及展望[J]. 工业安全与防尘, 1998(3):23-25.
- CHEN Yuanjian, WU Chao. Surfactant used for dust and poison control in mine and prospect[J]. Industrial Safety and Dust Control, 1998(3):23-25.
- [30] HIRSCHI J C, CHUGH Y P, SAHA A, et al. Evaluating the use of surfactants to enhance dust control efficiency of wet scrubbers for Illinois coal seams[C]//Proceedings of the North American 9th US Mine Ventilation Symposium. Lisse: Balkema, 2002:601-606.
- [31] 刘桂丽. 金属矿山爆破除尘降毒实验研究[J]. 矿业研究与开发, 2011, 31(2):76-78.
- LIU Guili. Experimental study on toxic dust and gas control in blasting at metal mines[J]. Mining Research and Development, 2011, 31(2):76-78.
- [32] 王天暘, 金龙哲, 郭敬中, 等. 铁矿采场多组份水泡泥抑制爆破烟尘试验研究[J]. 金属矿山, 2020(4):194-199.
- WANG Tianyang, JIN Longzhe, GUO Jingzhong, et al. Experimental study on suppression of blasting dust and smoke by multi-component water stemming in iron mine stope[J]. Metal Mine, 2020(4):194-199.
- [33] 程卫民, 周刚, 左前明, 等. 喷嘴喷雾压力与雾化粒度关系的实验研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(8):2-6.
- CHENG Weimin, ZHOU Gang, ZUO Qianming, et al. Experimental research on the relationship between nozzle spray pressure and atomization particle size[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(8):2-6.
- [34] 王鹏飞, 程卫民, 周刚, 等. 供气压力对煤矿井下气水喷雾降尘的影响[J]. 煤炭学报, 2016, 41(S1):137-143.
- WANG Pengfei, CHENG Weiming, ZHOU Gang, et al. Influence of air supply pressure on the air-water spraying dust-settling in underground coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S1):137-143.
- [35] 蒋仲安, 王明, 陈举师, 等. 气水喷雾雾化特征与降尘效果分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(2):151-157.
- JIANG Zhong'an, WANG Ming, CHEN Jushi, et al. Atomization characteristics and dust suppression mechanism of a gas-water nozzle[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(2):151-157.
- [36] DARIUSZ P. Using of air-water spraying systems for improving dust

- control in mines[J].Journal of Sustainable Mining, 2013, 12(2):29-34.
- [37] 王鹏飞,李泳俊,刘荣华,等.内混式空气雾化喷嘴雾化特性及降尘效率研究[J].煤炭学报, 2019, 44(5):1570-1579.
WANG Pengfei, LI Yongjun, LIU Ronghua, et al. Spray characteristics and dust removal efficiency of internal-mixing air atomizing nozzle[J].Journal of China Coal Society, 2019, 44(5):1570-1579.
- [38] 曾卓雄,姜培,谢蔚明.喷嘴雾化粒径的实验研究[J].西安交通大学学报, 2000, 34(4):75-77.
ZENG Zhuoxiong, JING Pei, XIE Weiming. Experimental research on the particle size of spray atomization[J].Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(4):75-77.
- [39] CHENG W M, WANG G, NIE W, et al. Study and application of atomatic spray system on lasting face in thin seam of Beisu Coal Mine [A]//Progress in safety Science and Technology: VolVII. Beijing: Science Press, 2008:1582-1585.
- [40] 曹建明.喷雾学[M].北京:机械工业出版社, 2005:116-156.
CAO Jianming. Spray Science [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2005:116-156.
- [41] 蒋仲安,许峰,王亚朋,等.空气雾化喷嘴雾化机理及影响因素实验分析[J].中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(10):2360-2366.
JIANG Zhong'an, XU Feng, WANG Yapeng, et al. Experimental analysis of atomization mechanism and influencing factors of air atomizing nozzle [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(10):2360-2366.
- [42] 侯腾彦,高贵军,刘邱祖.矿用风水雾化器液滴破碎机理及其降尘效率研究[J].矿山机械, 2014(7):132-135.
HOU Tengyan, GAO Guijun, LIU Qiuwu. Study on droplet breakup mechanism and dust-fall efficiency of mine wind-water atomizer[J]. Mining & Processing Equipment, 2014(7):132-135.
- [43] 王晓英,罗惕乾,沙毅,等.双流体喷嘴荷电雾化特性[J].江苏大学学报(自然科学版), 2007, 28(4):328-331.
WANG Xiaoying, LUO Tiqian, SHA Yi, et al. Charged atomization characteristics of two-fluid spray nozzle[J].Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2007, 28(4):328-331.
- [44] 刘国庆,蒋兵兵,陈凯.煤矿井下气动高压微雾除尘装置设计[J].煤矿机械, 2014, 35(4):127-128.
LIU Guoqing, JIANG Bingbing, CHEN Kai. Design of pneumatic high-pressure micro-mist dust removal device in mine [J]. Coal Mine Machinery, 2014, 35(4):127-128.
- [45] 周刚,程卫民,聂文,等.高压喷雾射流雾化及水雾捕尘机理的拓展理论分析[J].重庆大学学报(自然科学版), 2012, 35(3):121-126.
ZHOU Gang, CHENG Weimin, NIE Wen, et al. Extended theoretical analysis of jet and atomization under high-pressure spraying and collecting dust mechanism of droplet [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2012, 35(3):121-126.
- [46] 袁昌宇.混流云雾煤矿除尘装置研究与应用[J].煤矿机械, 2019, 40(5):124-126.
YUAN Changyu. Research and application of dust removal equipment by cloud mixed-flow in coal mine [J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(5):124-126.
- [47] 徐廷万.干雾除尘技术在铁路装焦中的应用[J].四川环境, 2015, 34(4):63-65.
XU Tingwan. Application of dry fog dust removal technology during railway coke charging process [J]. Sichuan Environment, 2015, 34(4):63-65.
- [48] 赵恩彪,李德文,王自亮,等.电荷法测量粉尘密度的试验研究[J].采矿与安全工程学报, 2010, 27(2):269-272.
ZHAO Enbiao, LI Dewen, WANG Ziliang, et al. Experimental study of charge method for measuring dust concentration [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(2):269-272.
- [49] 葛宝臻,潘林超,张福根,等.颗粒散射光能分布的反常移动及其对粒度分析的影响[J].光学学报, 2013, 33(6):319-326.
GE Baozhen, PAN Linchao, ZHANG Fugen, et al. Abnormal moving of scattered energy distribution and its effect on particle size analysis [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6):319-326.
- [50] 赵立永,张全柱,黄成玉.基于CAN总线的新型煤矿粉尘浓度监测系统的研究[J].中国安全生产科学技术, 2012, 8(3):76-79.
ZHAO Liyong, ZHANG Quanzhu, HUANG Chengyu. Research of new coal dust concentration measurement system based on CAN bus [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(3):76-79.
- [51] 曹茂永,李亮报,程学珍.基于PROFIBUS现场总线的煤矿粉尘在线监控系统研究[J].山东科技大学学报(自然科学版), 2007, 26(4):36-40.
CAO Maochen, LI Liangbao, CHENG Xuezheng. Study on coalmine dust on-line monitoring system based on PROFIBUS field bus [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2007, 26(4):36-40.
- [52] 戚淑芬,王国栋.基于电荷感应原理的粉尘含量在线检测仪设计[J].青岛科技大学学报(自然科学版), 2011, 32(5):526-530.
QI Shufen, WANG Guodong. Design of dust contents online detector based on charge induction principle [J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 32(5):526-530.
- [53] 廖贤鑫,蒋仲安,牛伟,等.采场爆破粉尘运移规律的fluent数值模拟[J].安全与环境学报, 2012, 12(6):43-46.
LIAO Xianxin, JIANG Zhong'an, NIU Wei, et al. Numerical simulations of blasting dust migration with the use of fluent in stope [J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(6):43-46.
- [54] 原路安.干雾抑尘技术在热电输煤皮带机的应用[J].山西电力, 2017(3):55-57.
YUAN Lu'an. Application of dry fog dust suppression technology in belt conveyor of thermal power plant [J]. Shanxi Electric Power, 2017(3):55-57.
- [55] 胡国斌,袁世伦,杨承祥.地下金属矿山爆破毒气及其预防[J].采矿技术, 2004, 4(4):29-30.
HU Guobin, YUAN Shilun, YANG Chengxiang. Blasting gas in underground metal mines and its prevention [J]. Mining Technology, 2004, 4(4):29-30.
- [56] YANG J, Wu X K, Gao J G, et al. Surface characteristics and wetting mechanism of respirable coal dust [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2010, 20(3):365-371.
- [57] 王嘉莹,金龙哲,郭敬中,等.梅山铁矿爆破粉尘润湿性能关键

- 影响因素[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(10):2527-2535.
- WANG Jiaying, JIN Longzhe, GUO Jingzhong, et al. Key influencing factors on wettability of blasting dust in Meishan Iron Mine[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(10):2527-2535.
- [58] LIU J G, JIN L Z, WANG J Y, et al. Co-influencing mechanisms of physicochemical properties of blasting dust in iron mines on its wettability[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2019, 26(9):1080-1092.
- [59] LIU J G, JIN L Z, WANG J Y, et al. Micromorphology and physicochemical properties of hydrophobic blasting dust in iron mines[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2019, 26(6):665-672.
- [60] 金龙哲,王嘉莹,刘建国,等.罗山金矿进风巷粉尘表面特性对其润湿性的影响[J].安全与环境学报,2019,19(6):1954-1962.
- JIN Longzhe, WANG Jiaying, LIU Jianguo, et al. Influence of the surface features of the inlet dust in Luoshan Mountain gold mine on its wettability[J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(6):1954-1962.
- [61] 蒋仲安,陈梅岭,陈举师.巷道型采场爆破粉尘质量浓度分布及变化规律的数值模拟[J].煤炭学报,2013,44(3):1190-1196.
- JIANG Zhong'an, CHEN Meiling, CHEN Jushi. Numerical simulation of dust concentration distribution and changing regularities in roadway stope blasting[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 44(3):1190-1196.
- [62] 陈举师,王毅,蒋仲安.采场爆破烟尘浓度分布及扩散规律的数值模拟[J].煤炭学报,2013,38(S1):147-152.
- CHEN Juhshi, WANG Yi, JIANG Zhong'an. Numerical simulation of blasting dust conception distribution and diffusion regularities in stope[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S1):147-152.
- [63] 金龙哲,于猛,刘结友,等.新型水炮泥爆破降尘的试验研究[J].煤炭学报,2007,32(3):254-257.
- JIN Longzhe, YU Meng, LIU Jieyou, et al. Experimental study on reducing the dust of explosion by the new water stemming[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(3):254-257.
- [64] 金龙哲,于猛,刘结友.高效水炮泥的降尘机理及应用研究[J].工程科学学报,2007,29(11):1079-1082.
- JIN Longzhe, YU Meng, LIU Jieyou, et al. Dust reduction mechanism and application of efficient water stemming[J]. Chinese Journal of Engineering, 2007, 29(11):1079-1082.
- [65] 赵雪,金龙哲,欧盛南.高效水炮泥降尘技术的研究与应用[J].中国安全科学学报,2015,25(4):128-132.
- ZHAO Xue, JIN Longzhe, OU Shengnan. Research on efficient water stemming dust control technology and its application[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(4):128-132.
- [66] 杨海涛,仪海豹.水力降低爆破尘毒试验研究[J].金属矿山,2016(8):148-151.
- YANG Haitao, YI Haibao. Experimental research of low-ering blasting dust and toxic gases by hydraulic action[J]. Metal Mine, 2016(8):148-151.
- [67] 金龙哲,傅国庭,宋国东.水炮泥中添加粘尘剂降尘方法的研究[J].煤炭工程师,1997(6):6-8.
- JIN Longzhe, FU Guoting, SONG Guodong. Research on dust removal by adding glue in water-ampul stemming[J]. Coal Engineer, 1997(6):6-8.
- [68] 郭敬中,金龙哲,李刚,等.多组份水炮泥配方优选及降尘试验研究[J].金属矿山,2020(3):190-196.
- GUO Jingzhong, JIN Longzhe, LI Gang, et al. Study on the formulation optimization of multi-component water stemming and dust removal test[J]. Metal Mine, 2020(3):190-196.
- [69] 郭敬中,金龙哲,赵启峰,等.基于在线监测系统的金属矿山采场爆破粉尘浓度分布规律研究[J].中国安全生产科学技术,2020,16(4):114-119.
- GUO Jingzhong, JIN Longzhe, ZHAO Qifeng, et al. Study on laws of concentration distribution of blasting dust in stope of metal mine based on on-line monitoring system[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(4):114-119.
- [70] 郭敬中,金龙哲,李刚,等.金属矿山爆破微细粉尘云雾除尘机理及试验研究[J].金属矿山,2020(7):193-198.
- GUO Jingzhong, JIN Longzhe, LI Gang, et al. Study on dust removal mechanism and test of cloud fog in metal mine blasting[J]. Metal Mine, 2020(7):193-198.