

我国综采工作面煤层注水技术研究进展与展望

王甜^{1,2} 何相梓² 魏庆媛²

1. 黑龙江科技大学安全工程学院 黑龙江哈尔滨 150022

2. 哈尔滨石油学院机械工程学院 黑龙江哈尔滨 150028

摘要: 矿尘作为矿山开采最主要职业危害与之一,其不仅对矿山从业人员的健康和生命安全造成严重危害和威胁还因其自身的理化特性易发生煤尘爆炸及设备损坏,带来及其不良的社会影响。为了进一步提高矿井清洁化生产水平,本文分析了我国防尘技术的研究现状,粉尘弥散移数值模拟研究、煤层湿润性理论研究现状特别是近年来随着综采一次采全高现代化开采技术的普遍推广,在煤层注水、喷雾降尘等技术领域阐述了现有的理论技术及煤层注水工艺现状。同时笔者针对现有研究的不足,在煤层注水减尘方面给出了研究展望。研究与实践表明,我国煤矿防治技术有了长足的发展,但由于缺乏关于这些最新成果的全面分析和系统总结,导致技术应用中存在盲目性,因此从煤层注水基础理论、构建机械模型、注水装置改进优化、根本源头减少粉尘污染4个方面给出了展望,来实现矿山粉尘的分源高效治理,提升矿井的清洁化生产水平。

关键词: 煤矿粉尘防治; 除尘技术; 湿式除尘; 注水防尘

Research progress and prospect of control seam infusion and technology in China's fully mechanized mining face

Tian Wang^{1,2}, Xiangzi He², Qingyuan Wei²

1. School of Safety Engineering, Heilongjiang University of Science of Technology, Harbin 150022, China

2. School of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Petroleum, Harbin 150028, China

Abstract: As one of the major natural hazards, coal dust not only poses serious threat to mine workers, but also is prone to dust explosion because of its own physical and chemical characteristics, which exerts negative effects on society. In a bid to further improve the level of clean production in mines, the paper analyzes China's cutting-edge studies on dust control, numerical simulation of dust dispersion movement, and coal seam wet ability theory. The paper specially focuses on the latest developments on the fully-mechanized coal mining technology applied in the areas of coal seam water injection and spraying-removal of dust. In the meantime, the paper projects a further development of the two areas above in view of the deficiency in current researches. Research and practice show that China has made remarkable progress on the technologies of managing coal mines, but the improper application of the relevant technologies still prevail due to the lack of a comprehensive and systematic analysis and summary. Therefore, the prospect is given from four aspects: basic theory of coal seam water injection, construction of mechanical model, improvement and optimization of water injection device, and reduction of dust pollution at the root source, to achieve the goal of the efficient management of the separation of sources of mine dust, and boost the level of clean production of coal mines.

Keywords: Coal mine dust control; Dust removal technology; Wet de-dusting; Water injection dust reduction

项目名称: 黑龙江省科学自然基金项目, 项目号: JJ2022LH1354.

引言:

中国是世界上最大的煤炭生产和消费国,进入20世纪,随着石油、天然气等新能源的快速发展,煤炭资源在我国能源生产和消费结构中的比重有所下降,但社会对煤炭的需求量将会增加。所以煤炭资源在一次能源生产的主导地位并没有发生根本性的变化。根据BP发布的《BP World Energy Statistical Review 2020 June 2020》,可得到世界能源生产及消费情况,煤炭在一次能源中的份额下降到16年来的最低水平27%,由于需求的大幅下降消费量下降了0.6%。然而,煤炭仍然是发电的最大单一能源,占全球电力的36%以上。随着近年来国家和人民对生态环保认识的不断提高,作为二氧化碳高排放的矿物资源,在今后中国经济和社会的发展过程中,煤炭在消耗能源中的比例会出现一定比例的下降,但是由于石油资源的分布不平衡和洁净煤技术发展,预计在今后相当长的一段时间内,煤炭仍将是人类生产生活中无法替代的重要能源之一。因此,我国煤炭行业的未来前景还有很大的发展空间。

一、粉尘弥散数值模拟研究现状

煤矿综采工作面是产尘量最高的地点之一,也是除降尘的主抓对象。由于采高综采工作面采煤机滚筒截割产尘量大,且扩散迅速,由于尘量大等特点,气流场和粉尘场的迁移分布规律较为复杂。从连续体的角度来看,美国Vainshtein PB等研究人员将颗粒状聚集体视为非平衡连续相,将气体视为理想的连续相,将两者结合后称为物理模型。作为两相流的连续介质,该理论为建立气清两相流模型提供了坚实的理论基础。宋淑郑等^[15-18]针对综采工作面粉尘运移的问题,以陈蛮庄煤矿3604作业面为例,基于气固两相流理论,建立综采工作面三维模型。

在计算中,用欧拉-拉格朗日法来描述主相,用拉格朗日法来描述粒子项。在FLUENT中,对质点力微分方程进行积分求解拉普拉斯坐标系中的离散投影。最特别的元素,对综采工作面粉尘弥散规律进行模拟分析。

研究人员设计了低速率隧道压力传递的物理模型,然后,利用粒子图像速度法和CFD软件对物理模型进行实验测量和数值模拟,并将实验结果与模拟结果进行比较。因此采用高涡大涡方法模拟气体运动过程,采用欧拉-拉格朗日方法数值模拟尘埃粒子的空间分布。

最后通过理论分析、实验和数值模拟分析了某综采场扬尘运移规律。根据综采不同地表扬尘来源的产尘特点,建立了综采地表扬尘颗粒流与欧拉-拉格朗日方法

相结合的DPM空气扬尘流数学模型。对多个粉尘源的粉尘分布过程进行了数值CFD模拟,例如综采工作面吹尘、移动框架产生的粉尘和真空产生的粉尘。然而,随着综采系统的不断发展,综采区扬尘污染日益严重,以往的理论和技术已不足以满足当前的生产要求。因此,关于综采地表粉尘和废屑的分布规律,目前最先进的理论是原位测量和实验测试相结合,以确定综采工作面风流-粉尘运移、逸散规律。

二、煤层注水技术研究

1. 煤层湿润性理论研究

煤层注水技术的本质是尚未用水抽出的预湿煤,以避免扬尘,通过钻孔并借助水的压力使其在开采过程中的大量减少或基本消除浮游煤尘的发生。煤层注水是减少粉尘产生的最基本、最有效的技术措施。如果处理得当,总粉尘和残留粉尘可以从70%降低到88%,还可以防止岩石和煤以及瓦斯的爆炸。因此,为了更好地了解煤尘的润湿性,有必要研究煤尘与水的固液比。国内研究人员提出煤孔隙水渗透和储水的最小孔径为0107-0122 μm,并得出孔隙度与注煤增长的关系。1805年提出了著名的杨氏润湿方程,1856年提出了多孔介质中的线性流动定律,称为达西定律。1985年,日本研究员村田拓实对煤体表面表面活性剂溶液的润湿性进行了深入研究,首次提出了润湿性研究中的重要参数——接触角的概念,确立了煤质的变化。分析了煤质对水分动态值的影响。我国的保护研究以实验为主,采用的方法主要有表面张力测定法、沉降法、滴液法、毛细管上下向渗透法、动力试验法及电位测定法等。电位法等材料主要集中在阴离子和非离子表面活性剂及其化合物在改善粉末润湿性的过程中,有一些基础的理论研究。

2. 尘雾-凝并湿式降尘技术

由于煤矿井下生产的特殊条件,除煤预湿技术外,采用湿法注水、喷雾除尘技术是一种有效的解决方案,往往是完全机械化的,现阶段较为普遍认同的理论有射流破碎理论和液膜破碎理论。通过尘雾单元的机理,尘滴和颗粒的重力沉降、随机碰撞、布朗扩散和静电效应可以有效去除分散的灰尘。喷雾降尘主要是尘滴和颗粒的撞击、收集和凝结。水被喷射器雾化成小水滴,空气中的灰尘被捕获并与之碰撞并相互作用。颗粒被水蒸气带走,附着在水滴上,在地面或一些潮湿的尘粒上,相互加速,聚集成较大的颗粒落到地面上。在一定压力下,以气态介质为能量载体,使液态介质运动,通过加速或冲击使其破碎,将液体破碎成细小液滴,设计开发气、

水雾化系统。也就是说，使用压缩空气会激活产生高频声波的声波振荡器，该声波用于雾化水，具有最佳液滴尺寸以减少静止的灰尘。此外，多数国内学者通过雾化喷嘴雾滴场空间分布特性实验筛选出最优喷嘴的雾化性能，确定出适用于综采工作面不同区域最优喷嘴。为提高喷雾降尘效率，国内外最先进的原理主要是改善不同喷雾器的粒径、分布速度和尘滴、冲击力等粉尘流量。雾-冷凝机构调节水流角度、入口直径、出气孔数量和注水孔直径等参数，水雾化喷嘴的气帽出口直径。开发了了几种系统喷嘴雾化功能和微喷雾降尘机制，并开发了水和风水的新型高效喷嘴。材料可以是不同类型的喷嘴，例如铜、不锈钢和陶瓷。得到了雾化粒径与雾化速度、

细观粒子大小等参数与液滴捕获粉尘的相对速度之间的关系：

(1) 低压喷雾时，液滴粒径分布范围一般为 $[65 \mu\text{m}, 160 \mu\text{m}]$ ，平均液滴速度小于 20m/s ；高压喷雾时，雾滴分布区间为 $[40 \mu\text{m}, 90 \mu\text{m}]$ ，雾滴平均速度大于 35m/s 。(2) 雾滴尺寸与截留尘粒的比值 D_c ：当雾滴尺寸变化时。范围是 $[40 \mu\text{m}, 65 \mu\text{m}]$ ， $\Delta D_c = 0.208 D_w^{0.7815}$ ；当雾滴粒径 D_w 变化范围为 $[65 \mu\text{m}, 100 \mu\text{m}]$ 时， $\Delta D_c = 0.1086 D_w^{0.9792}$ ；当雾滴粒径变化范围为 $[100 \mu\text{m}, 160 \mu\text{m}]$ 时， $\Delta D_c = 2998 D_w^{-1.074}$ 。采用煤层湿润性理论综合防尘技术措施后，我国部分煤矿的综采工作面粉尘质量浓度检测情况见表1。

表1 我国部分煤矿的综采工作面采用不同综合防尘技术措施后的粉尘质量浓度检测情况
(2014年现场调研实测数据)

序号	煤矿编号	瓦斯状况	风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	主要防尘措施	呼吸性粉尘是时间加权平均质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	呼吸性粉尘质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	总粉尘质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)
1	山东煤矿1	低瓦斯	1.23	煤层注水、高压喷雾、尘源跟踪喷雾、降柱移架喷雾	1.6	11.6	25.0
2	河南煤矿2	低瓦斯	1.08	煤层注水、高压喷雾、尘源跟踪喷雾、液压支架自动喷雾	1.3	2.4	22.0
3	内蒙古煤矿3	低瓦斯	1.75	高压喷雾、尘源跟踪喷雾、液压支架自动喷雾	1.4	8.7	37.4
4	山东煤矿4	低瓦斯	1.31	高压喷雾、尘源跟踪喷雾、架间喷雾、转载点密闭喷雾	2.7	33.4	81.7
5	河北煤矿5	高瓦斯	2.51	压气喷雾、移架、放煤喷雾、转载点半密闭压气喷雾	3.7	11.8	42.0
6	山西煤矿6	低瓦斯	1.50	高压喷雾、尘源跟踪喷雾、降柱移架喷雾	3.7	9.6	38.6
7	新疆煤矿7	低瓦斯	1.73	高压喷雾、尘源跟踪喷雾、	2.9	5.1	--
8	山西煤矿8	高瓦斯	2.80	煤层潜孔动压注水、内外喷雾、液压支架喷雾	13.6	378.3	1213.0
9	山西煤矿9	高瓦斯	3.00	煤层注水、采煤机内外喷雾；液压支架喷雾	13.4	29.0	97.2
10	河南煤矿10	高瓦斯	3.80	采煤机内外喷雾（冷却水）、液压支架喷雾（静压）	16.6	163.3	209.0
11	重庆煤矿11	高瓦斯	2.77	煤层注水、高压喷雾、尘源跟踪喷雾、液压支架自动喷雾	8.6	40.8	170.0

表1显示，在测量的11个矿井工作面中，有3个工作面的平均质量可吸入粉尘浓度不超过质量可吸入粉尘浓度（碳为 2.5mg/m^3 ），均为低瓦斯矿，分布于山东、河南、内蒙古；4略高于标准（ $2.7 \sim 3.7 \text{mg/m}^3$ ），分布于山东、河北、陕西、新疆；4一个非常严重的标准是散布在山西、河南和重庆的所有高气田。然而，只有十分之一的煤矿粉尘浓度不超过单位质量的最大粉尘浓度（碳 3.5mg/m^3 ）。

三、煤层注水方式及工艺

煤层注水发展至今，主要采用的方法有长井注水、

短井注水和深井注水。常规注水使用液压钻孔来形成注水孔。在钻孔过程中，使用高压水管通过钻孔中的排水孔抽水，再用水泥封孔后向孔内注水。1956年，我国在本溪彩电矿进行了第一次深孔煤层注水试验。长钻孔注水已经成为广泛使用的注水方式。煤层注水技术是一种通过钻孔向工作面煤体注入水溶液，改变煤体物理力学性质和围岩应力场分布的动态煤矿防灾技术，并降低工作台上发生动态事故的风险，注水实践中应根据煤层的集体构造特征，合理确定各种工艺参数，如钻孔的位置、倾角、长度、封孔长度以及注水的压力和流量等，注水过程

中应依据现场实际对注水情况进行监控调节,同时还可以采用添加湿润剂等技术措施,使注水效果得到改善。

四、结语

1.加强煤层注水基础理论研究,特别是对硫源注水理论、工程理论与技术并行的煤层注水技术研究,为煤层注水及煤炭洁净燃烧提供助力。

2.建立煤渗透率与煤分形结构的定量关系,构建不同性质的含水率与孔径的解析模型;然后,通过试验获得煤的断裂应力、应变和渗透率。分析动量发展规律以及断流过程中的响应特性。

3.常规注水设备存在钻孔效率低、钻孔深度差、注水吸力差、钻孔困难等问题,应对注水装备进行改进优化,提高注水效率和效果。

4.技术上,本着标本兼治的原则,从主源上减少粉尘产生,根据不同粉尘源的特点采取预防措施,防止粉尘扩散,提高人身安全。

参考文献:

[1]陈武,李云峰.我国能源可持续发展的探讨[J].能源技术经济,2010,22(5):17-23.

[2]Nagaraju A Energy-Efficient Routing Technique for Wireless Sensor Networks Using Multiple Mobile Sink Nodes[J]Parallel Computing,2020(prepublish).

[3]中华人民共和国国家统计局.2012-2018年国家煤炭消费总量数据[EB/OL].(2019-02-11)(2020-02-17).
<http://data.stats.gov.cn>.

[4]林永听,葛燕萍,施为利,等.当前中国职业病防治问题的研究综述[J].中国卫生法制,2010(3):0-22.

LIN Yongting, GE Yanping, SHI Weili, et al. Review of current research on occupational disease prevention in China [J].Chinese Health Law,2010(3):20-22.

[5]程卫民,聂文,周刚,等.煤的降尘性能研究[J].中国矿业大学学报,2011,40(2):185-189.