

磁化表面活性剂溶液的降尘机理及应用

聂百胜^{1,2}, 卢红奇^{1,2}, 郭建华^{1,2}, 周香妤²

1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083

2. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083

摘要 随着煤炭行业机械化和采掘速度的加快, 工作面粉尘浓度越来越大, 威胁着工人的安全。通过分析磁化降尘机理和磁化表面活性剂溶液降尘机理, 以山西省某矿为例, 确定了适合该矿综采工作面的最佳表面活性剂为 LDLC 表面活性剂及最佳浓度为 0.1%, 以及最佳磁化强度 1000 mT 和最佳磁化时间 60 s, 并根据结果设计磁化管路和添加装置。该措施在该矿回采工作面进行现场试验, 使该工作面的全尘浓度降尘效果比常规措施提高 72% 左右, PM_{2.5} 降尘效果提高 60% 左右, 有效改善了工作面的作业环境。

关键词 降尘; 磁化; 表面活性剂; 工作面

中图分类号 TD714

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.04.007

Research and application of magnetized surfactant for reducing dust

NIE Baisheng^{1,2}, LU Hongqi^{1,2}, GUO Jianhua^{1,2}, ZHOU Xiangyu²

1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China

2. College of Resources and Safety Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China

Abstract With the mechanization and the increased speed of the mining, the dust concentration in working faces gets more and more higher, and becomes a big threat to the health of the workers. In this paper, the dust-reduction mechanisms of the magnetization and the surfactant are analyzed. The parameters of the magnetization and the surfactant are determined by experiments based on the coal samples of a coal mine in Shanxi province, and it is shown that the best surfactant is LDLC, the best concentration is 0.1%, the best duration of magnetization is 60 seconds and the best strength of magnetization is 1000 mT. At the same time, the magnetic tube and the accessory equipment are designed. And the field test shows that after the test, the concentration of the total dust is reduced to 72% as compared to the usual dust-reduction measure, and the dusts of 2.5 μm are reduced to about 60%, so the environment of the working face is significantly improved.

Keywords dust-reduction; magnetization; surfactant; working face

近年来,随着煤炭行业机械化和现代化程度的加快,使矿井工作面的粉尘浓度成倍增长,其产尘量比传统开采技术大大增加。综采工作面作为煤矿产尘量最大的作业场所之一,其产尘量约占矿井产尘量的 60% 左右^[1]。国内外研究表明,粉尘粒径越小,特别是当煤尘粒径小于 2.5 μm 时,会对人体呼吸系统和肺部产生极大危害,且这种危害很难治愈^[2-4]。同时,当煤尘具有爆炸倾向时,更易发生有煤尘参与的瓦斯

爆炸的事故造成巨大危害。在采取常规降尘措施下,一些工作面的工作条件粉尘浓度也可达到 1000 mg/m³,超出《煤矿安全规程》等国家有关标准和规定^[5]。因此,急需对综采工作面的粉尘采取新的降尘方法来降低工作面的粉尘浓度,切实保障工作人员的安全。

目前,对工作面除尘方法研究较多,主要有煤层注水、喷雾除尘、利用除尘器除尘、通风除尘及化学抑尘等,由于井下

收稿日期:2014-09-03;修回日期:2014-11-24

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(2009KZ03)

作者简介:聂百胜,教授,研究方向为煤岩动力灾害防治、煤矿瓦斯灾害防治等,电子信箱:bshnie@163.com

引用格式:聂百胜,卢红奇,郭建华,等.磁化表面活性剂溶液的降尘机理及应用[J].科技导报,2015,33(4):44-48.

条件限制,以喷雾除尘、煤层注水应用最为广泛。但由于水的表面张力较大而且煤尘具有憎水性,影响着降尘效果。近年来,随着对磁化技术和化学抑尘的研究深入,表明该技术能够降低水的表面张力,提高雾粒扑捉煤尘的能力^[6-11]。本文分析2种技术的作用机理,并通过实验确定相关参数,从而为同类技术现场应用提供参考。

1 磁化表面活性剂溶液降尘机理

1.1 矿井水磁化降尘机理

磁化降尘是指通过磁化管路等设施对喷雾用水进行处理,然后再通过喷头进行喷雾降尘。由于水中存在盐、碱、酸等杂质和金属离子,因此能够被磁化^[12]。矿井水经过磁化处理后,能够显著降低粉尘与喷雾用水的接触角,从而使雾粒与粉尘快速结合,使粉尘得以下降,减少粉尘在漂浮过程中对人体和机器设备的危害。磁化处理会破坏水原本的结构,使较大的缔合水分子变成较小的缔合水分子集团,改变水的雾化结构^[13]。

此外,雾粒捕捉粉尘能力也与其粒径有一定关系。研究表明,当雾滴粒径为 50 μm 左右时,降尘效果最好^[14],而经过

磁化处理的喷雾用水能够使喷雾的粒径得到降低,增加单位体积的雾滴数及粉尘与雾滴碰撞的机会,使雾滴的粉尘捕捉能力显著提高。同时,矿井水经过磁化处理,使水中的离子如 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 等离子得到沉积,减小了对井下设备的腐蚀,延长设备使用年限。

1.2 表面活性剂溶液降尘机理

根据斯托克斯沉降公式,使粉尘加快降落具有以下3种途径:1) 增大粉尘颗粒和空气的密度差;2) 增大粉尘颗粒直径;3) 降低空气黏滞度。但由于煤矿井下条件限制,最有效的方法就是使喷雾液滴与煤尘快速结合,增大煤尘粒径。但由于矿井水的表面张力较大,无法达到理想的降尘效果。

表面活性剂多为阴离子型硫酸盐,通过在表面活性剂溶液中添加含高价负离子电解质,可以降低矿井水的表面张力达到降尘效果^[15-19]。另外,表面活性剂具有亲水性和亲油性,当表面活性剂溶于水,活性分子会在水表面上定向排列,亲水基团朝向水溶液中,亲油基团朝向溶液表面,使得水的表面性质得到较大的改善^[8,20]。当煤尘与表面活性剂溶液中的极性分子接触时,亲油基与煤尘中的重烃等基团发生吸附作用,将粉尘捕获,起到湿润煤尘的作用,机理如图1所示。

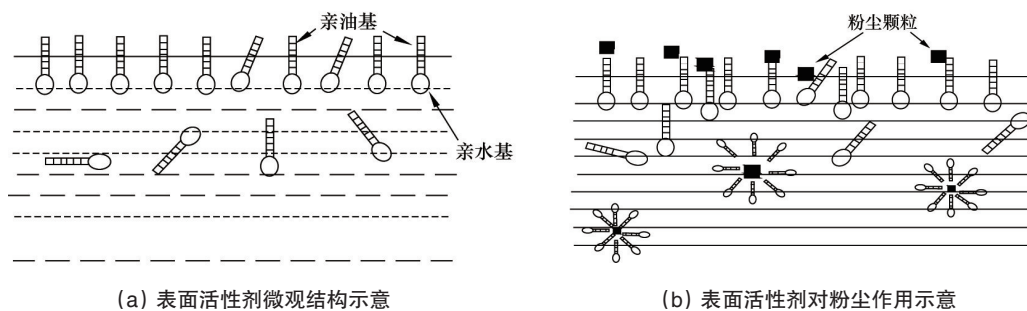


图1 表面活性剂降尘机理示意

Fig.1 Mechanism of dust-reduction of surfactant

2 实验研究

由于煤体含水率与粉尘产尘量有直接关系^[21],因此在进行实验前对煤体含水率进行测试,经测定该煤样含水率为 2.75%。根据磁化降尘机理和表面活性剂溶液降尘机理,在实验室对磁化参数和表面活性剂参数进行测试,以确定最佳磁化参数和表面活性剂溶液质量分数。其中矿井水来自山西长治矿区某矿井下工作面。

2.1 表面活性剂参数的确定

2.1.1 实验设备及方法

为确定符合该矿矿井水表面活性剂溶液,在实验室对十二烷基磺酸钠、十二烷基苯磺酸钠、十二烷基硫酸钠和中国矿业大学(北京)自行研制的 LDLC 除尘剂进行实验。采用 JZYW-200B 界面张力仪测定了溶液的表面张力,该仪器测试范围为 0~200 mN/m,实验设备如图2所示。



图2 JZYW-200B 界面张力仪

Fig. 2 JZYW-200B tension monitor

按照以下步骤进行实验:1) 冲洗铂金环和玻璃杯,然后将铂金环挂吊臂上稳定;2) 把已配置好的各种浓度的表面活性剂溶液倒入玻璃杯中 20~25 mm,将玻璃杯放入托盘中间位置,然后操作软件使铂金环深入到液体中 5~7 mm 处,按停止键,待铂金环稳定后点击调零键进行调零,结束后点击开

始键进行实验;3) 通过缓慢的拉力使铂金环拉脱液面,在其过程中所施加的最大拉力即为待测液体的表面张力;4) 选用另一种待测表面活性剂溶液再次进行实验,重复1)~4)的步骤。每种试样实验3次,取其平均值。

2.1.2 实验结果

图3为不同活性剂溶液、不同质量分数下表面活性剂溶液表面张力。实验结果显示,当不添加任何表面活性剂溶液的矿井水表面张力为71.7 mN/m,添加表面活性剂溶液之后,溶液的表面张力显著下降。其中,以中国矿业大学(北京)自行研制的LDLC除尘剂效果较好,表面张力降幅最大,当表面活性剂溶液浓度大于0.1%时,表面张力趋于稳定。因此将LDLC表面活性剂溶液的浓度定为0.1%。

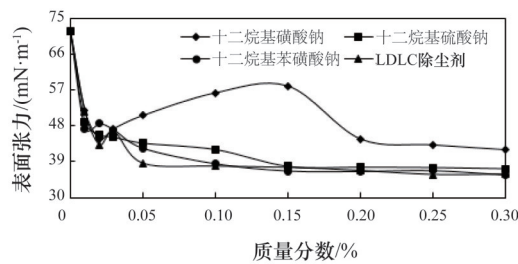


图3 不同表面活性剂与表面张力之间的关系

Fig. 3 Relationship between different surfactants and surface tension

2.2 磁化参数的确定

2.2.1 实验设备及方法

磁化时间和磁场强度是影响磁化效果的重要参数。若磁化时间太短、磁场强度太小,则达不到磁化效果,若磁化时间太长,同样也达不到理想的效果也不够经济。因此需要根据该矿的矿井水性质确定适合的磁化参数。

为确定最佳磁化参数,采用TYU-2000H磁化仪对水进行磁化,该设备磁场产生系统由直流电源和电磁铁组成,磁场强度范围为0~1.6 T,实验设备如图4所示。实验前用高斯计设定好磁场强度,将装有一定量水样的玻璃杯放入电磁铁的两级之间,利用秒表计算一定时间后立即测定表面张力。由于磁化对水的作用具有一定的记忆效应,其作用时间约为18 d,但在10 d后有明显减弱^[6]。



图4 TYU-2000H型磁化仪(a)和TYU-2002型高斯计(b)

Fig. 4 TYU-2000H magnetizer device (a) and TYU-2002H gauss meter (b)

2.2.2 实验结果

为确定磁化时间,在磁场强度1000 mT的条件下进行实验。由于矿井水和自来水的性质差异,造成其表面张力的不

同。从图5可以看出,添加表面活性剂溶液之后,LDLC矿井水溶液表面张力明显下降,其表面张力约为41 mN/m。但经过磁化作用,LDLC矿井水溶液出现小幅下降,说明磁场对溶液的表面张力有影响,但由于添加表面活性剂后溶液表面张力已达到最小值,因此经过磁化后溶液表面张力下降较小。从图5可以看出,当磁化时间大于60 s时,0.1%质量分数的LDLC表面活性剂溶液表面张力变化不大,趋于稳定。因此,将该矿0.1%质量分数的LDLC溶液的磁化时间定为60 s。

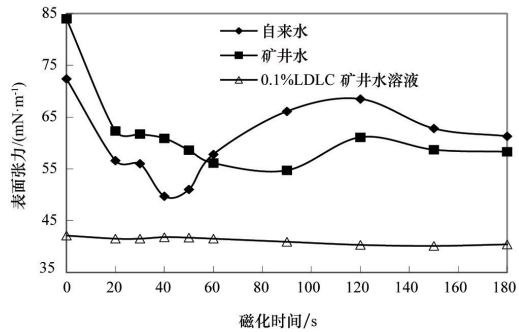


图5 磁化时间与LDLC溶液表面张力曲线

Fig. 5 LDLC solution surface tension against the duration of magnetization

在确定磁化时间60 s的条件下,对自来水、矿井水和浓度为0.05%、0.1%和0.15%的LDLC表面活性剂矿井水溶液进行实验。根据前人的研究,实验磁场强度分别为0、800、900、1000、1100、1200、1300、1400 mT,不同磁场强度条件下溶液的表面张力如图6所示。从图6可以看出,当磁场强度大于1000 mT时,0.1%、0.15%两种浓度LDLC表面活性剂矿井水溶液表面张力趋于稳定,而0.05%质量分数的LDLC溶液出现了小幅波动,但基本维持在41~44 mN/m。因此可以确定适合该矿矿井水的LDLC表面活性剂最佳的磁化强度为1000 mT。

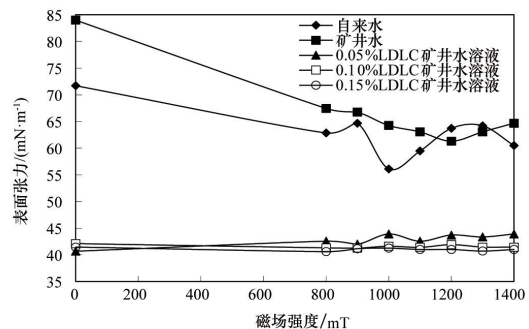


图6 磁场强度与LDLC溶液表面张力曲线

Fig. 6 LDLC solution surface tension against the strength of magnetization

为分析磁化前后对接触角的影响,在矿井水和磁场强度为1000 mT条件下进行接触角测试,本实验采用角度测试法进行测试,实验仪器如图7所示。其测试步骤为:1) 调试实验仪器,在注射器中吸入被测溶液安装到实验设备,把煤样

放置到测试台上;2) 点击开启视屏,调试连续变倍镜头,工作台及液滴器,使注射器针头及煤样平面在屏幕上达到最清晰;3) 顺时针旋转液滴器上方的旋钮,缓缓滴下水滴到煤样光滑的表面上;4) 点击停止视屏,在大窗口视屏中用测量三点形成的角度来测量接触角;5) 保存最终测量结果图片。

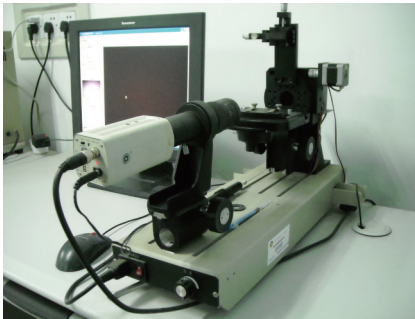
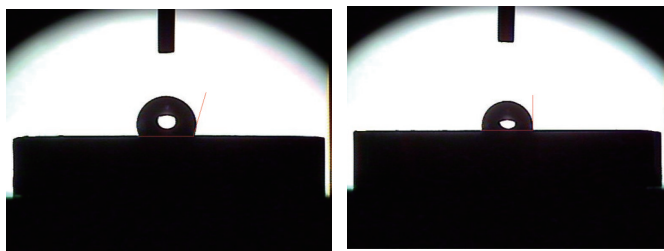


图7 JY-PHb 接触角测定仪

Fig. 7 JY-PHb contact angle apparatus

实验结果如图8所示。从图8可以看出,经过磁化,矿井水的接触角减小,说明磁化能够降低矿井水的接触角,增大喷雾颗粒捕捉粉尘的能力。



(a) 矿井水接触角

(b) 磁化后矿井水接触角

图8 磁化前后矿井水接触角变化

Fig. 8 Contact angle of mine water before and after magnetizing

3 现场应用研究

3.1 工程应用概况

该矿开采煤层为二叠系山西组下部的三号煤层,煤层赋存稳定,煤厚变异较小,煤层结构简单。煤层厚度平均为6.08 m,煤层倾角为 $2^{\circ}\sim 16^{\circ}$,煤的坚固性系数为0.8~1.0。该工作面设计切眼长为236.6 m,可采长度为1830 m,煤尘具有爆炸倾向性。采用倾斜长壁低位放顶煤一次采全高综合机械化采煤方法,顶板采用全部垮落法进行管理。该工作面回风巷风量为 $1490\text{ m}^3/\text{min}$,进风巷风量 $1750\text{ m}^3/\text{min}$ 。进风巷转载点、回风巷等位置安装有喷雾降尘装置,工作面采煤机使用内、外喷雾进行降尘。另外,回风巷距离工作面和回风巷交汇点约50 m处设有降尘水幕。

3.2 现场使用方法

针对工作面条件,提出采用风流液体增压泵比例添加系

统进行表面活性剂溶液的定比添加,即通过比例添加器进行定比添加,该设备配比率 $1/10\sim 1/4000$ 。根据防尘用水平均流量计算表面活性剂添加比例,通过井下风管与喷雾等供水装置之间的压力差异使表面活性剂进入定比添加器,实现了表面活性剂溶液的准确、定量添加。而该系统中磁化装备为磁化管,由铁钕硼稀土制成的永磁方块和不锈钢外壳构成,进出口选用螺纹接口方便连接。根据工作面情况,将磁化管路、自动添加装置安装在该工作面进风巷中,距进风巷与工作面的交汇处约150 m处。

3.3 降尘效果

根据实验结果,将LDLC表面活性剂溶液通过自动添加装置注入到降尘管路中,根据管路流量调节自动添加装置流量,使表面活性剂溶液的质量分数为0.1%。将根据实验结果设计完成的磁化管路串联到降尘管路中,其位置位于自动添加装置之后。

由于进入肺泡的尘粒粒径约 $3.2\text{ }\mu\text{m}$,大多数粉尘粒径小于 $2.0\text{ }\mu\text{m}$,且随着粉尘粒径越小对人体危害就越大^[17,22],由此在现场测试了工作面全尘浓度和粒径小于 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 粉尘浓度。本次测试中,采用DUSTTARK全自动粉尘测定仪,该仪器可以测量 1.0 、 2.5 、 4.0 、 $10.0\text{ }\mu\text{m}$ 粒径粉尘和全尘。按照《GBZ/T 192.1—2007 工作场所空气中粉尘测定第1部分:总粉尘浓度》、《GBZ/T 192.2—2007 工作场所空气中粉尘测定第2部分:呼吸性粉尘浓度》进行布点和测定。在进风巷、回风巷每隔50 m布置1个测点,从距工作面200 m开始测试。在工作面切眼约20 m布置1个测点,测试了进、回风巷及工作面粉尘浓度,同时在采煤机司机位置前后5 m、降尘装置前后10 m各加1个测点。

采取该措施前后, $\text{PM}_{2.5}$ 与全尘在该回采工作面的结果如图9和图10所示。从图中可以看出,采取该措施前后, $\text{PM}_{2.5}$ 、全尘降低幅度都较大, $\text{PM}_{2.5}$ 平均降低了60%左右,全尘浓度降低了72%左右,极大地改善了工作面的工作环境。但由于采取该措施前后采煤机位置不同,因此粉尘分布位置不同,因而粉尘降低的绝对幅度无法比较。但从 $\text{PM}_{2.5}$ 和全尘降低幅度来看,在井下环境中,大粒径的粉尘比小粒径的粉尘更容易降落,小粒径的粉尘其飘落距离较远,对工作面工作人员的危害更大。

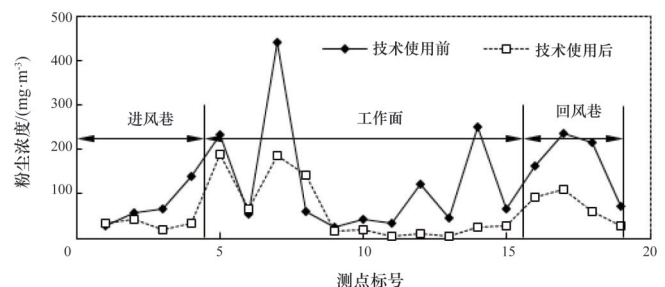


图9 回采工作面 $\text{PM}_{2.5}$ 降低效果

Fig. 9 Diagram of dust $2.5\text{ }\mu\text{m}$ in working face

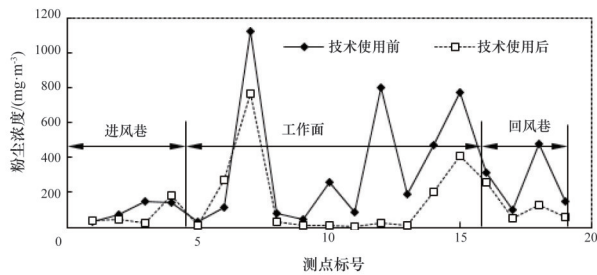


图10 回采工作面全尘降低效果

Fig. 10 Diagram of total dust in working face

4 结论

1) 磁化管路通过降低喷雾溶液的接触角来加强水滴对煤尘的捕捉能力,同时能够改变水的物理结构提高捕捉粉尘的能力,表面活性剂通过对降低矿井水的表面张力提高降尘效果,其中亲水基、亲油基更能使煤尘尽快降落。

2) 在实验室利用表面张力测试仪对矿井水、表面活性剂溶液进行测试,确定了适合某回采工作面的LDLC表面活性剂溶液和0.1%的最佳质量分数。同时,确定了60 s的磁化时间和1000 mT的磁化强度。同时接触角测试证明经过磁化后能够使溶液能够更快地与粉尘结合,提高降尘效率。

3) 采用风流液体增压泵比例添加系统将该技术在某回采工作面进行现场应用,经过现场实测,2.5 μm粒径的粉尘降尘效果比原有降尘效果提高了60%左右,全尘降低效果提高了72%左右,极大地改善了工作面的作业环境。

参考文献(References)

[1] 时训先, 蒋仲安, 周姝嫣, 等. 综采工作面粉尘分布规律的实验研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(10): 1117-1121.
Shi Xunxian, Jiang Zhong'an, Zhou Shuyan, et al. Experimental study on dust distribution regularity of fully mechanized mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(10): 1117-1121.

[2] Donbak L, Rencuzogullari E, Yavuz A, et al. The genotoxic risk of underground coal miners from Turkey[J]. Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, 2005, 588(2): 82-87.

[3] Pablo F N, Javier G P, Rebeca R, et al. Proximity to mining industry and cancer mortality[J]. Science of the Total Environment, 2012, 435(1): 66-73.

[4] 徐映如, 王丹侠, 张建文, 等. PM₁₀和PM_{2.5}危害、治理及标准体系的概况[J]. 职业与健康, 2013, 29(1): 117-119.
Xu Yingru, Wang Danxia, Zhang Jianwen, et al. General situation for hazards, control and evaluation standard system of PM₁₀ and PM_{2.5} [J]. Occup and Health, 2013, 29(1): 117-119.

[5] 刘毅, 蒋仲安, 蔡卫, 等. 综采工作面粉尘运动规律的数值模拟[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(4): 351-353.
Liu Yi, Jiang Zhong'an, Cai Wei, et al. Numerical simulation of the dust movement rule in fully-mechanized coal faces[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(4): 351-353.

[6] 聂百胜, 丁翠, 李祥春, 等. 磁场对矿井水表面张力影响规律的实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(1): 19-23.
Nie Baisheng, Ding Cui, Li Xiangchun, et al. An experimental study of the influence of magnetic field on the surface tension of mine water[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(1): 19-23.

[7] Nie B S, Guo J H, Zhao H, et al. Comparative effects of magnetic field and surfactants on the surface tension of mine water[J]. Disaster Advances, 2013, 6(S6): 53-61.

[8] 刘伟, 程卫民, 于岩斌, 等. 综放工作面表面活性剂抑尘实验与应用研

究[J]. 矿业安全与环保, 2012, 39(6): 1-5.

Liu Wei, Cheng Weimin, Yu Yanbin, et al. Research on dust suppression tests by surfactant in fully mechanized caving face and its application[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2012, 39(6): 1-5.

[9] 金龙哲, 杨继星, 欧盛南. 润湿型化学抑尘剂的试验研究[J]. 安全与环境学报, 2007, 7(6): 109-112.
Jin Longzhe, Yang Jixing, Ou Shengnan. Experimental study of wetting chemical dust-depressor[J]. Journal of Safety and Environment, 2007, 7(6): 109-112.

[10] 何维军, 金龙哲, 孟国营. 磁化帘降尘模拟实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(2): 155-158.
He Weijun, Jin Longzhe, Meng Guoying. Simulative research on dedusting with magnetized curtain[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 28(2): 155-158.

[11] 陈梅岭, 宋文超, 蒋仲安, 等. 煤矿磁化水喷雾降尘机理及试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(7): 65-69.
Chen Meiling, Song Wenchao, Jiang Zhong'an, et al. Study on dust fall mechanism and experiment with magnetized water spraying in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(7): 65-69.

[12] 克拉欣 B N. 磁化水[M]. 北京: 中国计量出版社, 1982: 119.
Krasin B N. Magnetized water[M]. Beijing: Chinese Metrology Press, 1982: 119.

[13] 李言涛, 薛永金. 水系统的磁化处理技术及其应用[J]. 工业水处理, 2007, 27(11): 11-14.
Li Yantao, Xue Yongjin. Magnetic treatment and its applications to water systems[J]. Industrial Water Treatment, 2007, 27(11): 11-14.

[14] 程卫民, 聂文, 周刚, 等. 煤矿高压喷雾雾化粒度的降尘性能研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(2): 185-190.
Cheng Weimin, Nie Wen, Zhou Gang, et al. Study of dust suppression by atomized water from high-pressure sprays in mines[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(2): 185-190.

[15] 魏光平, 侯凤才, 王乐平, 等. 国内外润湿型抑尘剂研究与应用[J]. 中国矿业, 2007, 16(9): 90-92.
Wei Guangping, Hou Fengcai, Wang Leping, et al. Domestic and foreign research and application present situation of wetting dust suppressant[J]. China Mining Magazine, 2007, 16(9): 90-92.

[16] 吴超. 化学抑尘剂的基础研究及在矿山中的应用[J]. 矿业快报, 2001(12): 5-7.
Wu Chao. The basic research and application of chemical dust suppressants[J]. Express Information of Mining Industry, 2001(12): 5-7.

[17] 金龙哲, 李晋平, 孙玉福, 等. 矿井粉尘防治理论[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 207-213.
Jin Longzhe, Li Jinping, Sun Yufu, et al. The theory of preventing and controlling of coal mine dust[M]. Beijing: Science Press, 2010: 207-213.

[18] 吴超, 古德生. 硫酸钠改善阴离子表面活性剂湿润煤尘性能的研究[J]. 安全与环境学报, 2001, 1(2): 45-49.
Wu Chao, Gu Desheng. The improvement of adding of sodium sulfate on wettability of coal dust by anionic surfactants[J]. Journal of Safety and Environment, 2001, 1(2): 45-49.

[19] 吴超, 欧家才, 吴国珉. 阴离子型湿润剂与硫化矿尘的耦合性实验[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(3): 323-328.
Wu Chao, Ou Jiakai, Wu Guomin. Experiment on coupling of wet agents composed with anionic surfactants and dust of sulfide ores[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 35(3): 323-328.

[20] 周刚, 程卫民, 王刚, 等. 综放工作面表面活性剂除尘工艺[J]. 工业安全与环保, 2009, 35(11): 17-19.
Zhou Gang, Cheng Weimin, Wang Gang, et al. Dusting technique of surfactant for fully mechanized and roof caving coal face[J]. Industrial Safety and Environment Protection, 2009, 35(11): 17-19.

[21] 张英华. 测定煤体含水率与降尘关系的实验研究[J]. 煤矿安全, 2000(2): 44-46.
Zhang Yinghua. Test and study of determination of the relation between coal water content rate and dust-laying rate[J]. Safety in Coal Mine, 2000(2): 44-46.

[22] 杨胜强. 粉尘防治理论及技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.
Yang Shengqiang. The theory and technology of preventing and controlling of coal mine dust[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2007.

(编辑 田恬)