

泡沫金属板腔体添加剂的抑爆效果研究

战友¹, 朱亚威¹, 孙建华², 张恒², 王利雪¹, 李丁²

(1. 黑龙江科技大学 环境与化工学院, 黑龙江 哈尔滨 150022; 2. 黑龙江科技大学 矿业工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022)

摘要: 为了提高泡沫隔爆装置的抑爆性能, 提出了向泡沫金属板中填充干粉抑爆剂来增强泡沫金属板的隔爆效果。试验以自行研制的“瓦斯-煤尘爆炸系统”为试验基础, 采用 15 ppi、0.3 g/cm³、铁: 镍 = 9: 1 泡沫铁镍金属板为填充骨架, 以 ABC 和 BC 超细干粉为填充材料。通过正交试验, 寻求向泡沫金属板中填充的最佳抑爆材料和填充比例。试验结果表明: 泡沫金属板中填充干粉抑爆剂具有良好的抑爆效果, 15 ppi、0.3 g/cm³、铁: 镍 = 9: 1 泡沫铁镍金属板最佳填充比例为 35%, 抑爆效果最佳的填充体是 ABC: BC = 1: 1 的混合干粉抑爆剂, 能使爆炸产生的压强由 0.342 MPa 降低至 0.098 MPa, 衰减率为 71.3%, 火焰速度由 522 m/s 降低至 114 m/s, 降低率达到 78.1%, 爆炸产生的强度明显减小。

关键词: 泡沫金属板; 瓦斯爆炸; 抑爆剂; 火焰速度

中图分类号: TD712

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2018)04-0153-05

Study on suppression effect of foam blocking device cavity additive

ZHAN You¹, ZHU Yawei¹, SUN Jianhua², ZHANG Heng², WANG Lixue¹, LI Ding²

(1. School of Environment and Chemical Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China;

2. School of Mining Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China)

Abstract: In order to improve the explosion suppression performance of foam blocks blasting device, the foam metal plates are filled with the powder suppressant to enhance foam sheet metal block blasting effect. The experiment is based on the gas-coal dust explosion system which is self-developed, and the best filling rate of 15 ppi, 0.3 g/cm³, iron/nickel is 9: 1 foam iron nickel metal plate is the filling skeleton, and there are four suppressant powder as filling material which are ABC and BC powder. The optimal suppression and filling ratio of the foam metal plate is sought through the orthogonal experiment. The experiment results show that the foam metal plate filled with the suppressant has good suppression effect. The best filling rate of 15 ppi, 0.3 g/cm³, iron: nickel is 9: 1 foam metal plate is 35%. the filling body of the best explosion suppression effect is ABC: BC = 1: 1 mixture superfine powder, which can reduce the blast pressure from 0.342 MPa to 0.098 MPa, the rate of reduction is 71.3% and the flame speed reduce from 522 m/s to 114 m/s, the rate of reduction is 78.1%. The intensity of the explosion is significantly reduced.

Key words: foam metal plate; gas explosion; suppressant; flame speed

0 引 言

瓦斯一直是影响煤矿安全生产的重要因素。瓦斯爆炸因其影响范围大、强度大、伤亡多、损失大而备受广泛关注。现阶段, 改革和发展更加高效的隔爆装置已经迫在眉睫^[1]。近年来, 自动式隔爆装置在煤矿生产中广泛应用, 自动式隔爆装置以泡沫隔

爆装置和喷粉隔爆装置为主^[2]。

多孔材料由于其透气性好, 而且在爆炸气体通过材料后有较强的减压和阻挡火焰传播的效果而备受世界各国关注^[2-5]。魏春荣等^[6-7]在对多孔材料中的金属丝网、泡沫陶瓷、多孔泡沫铁镍金属对瓦斯爆炸时火焰温度的研究时发现, 多孔泡沫铁镍金属的抑爆性能优于金属丝网和泡沫陶瓷。孙建华

收稿日期: 2017-11-13; 责任编辑: 杨正凯 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2018.04.026

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51504086, 51604101); 黑龙江科技学院青年才俊培养计划资助项目(Q20120201)

作者简介: 战友(1968—), 男, 黑龙江七台河人, 教授。E-mail: zhanyou19681108@yahoo.com.cn

引用格式: 战友, 朱亚威, 孙建华, 等. 泡沫金属板腔体添加剂的抑爆效果研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(4): 153-157, 163.

ZHAN You, ZHU Yawei, SUN Jianhua, et al. Study on suppression effect of foam blocking device cavity additive[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(4): 153-157, 163.

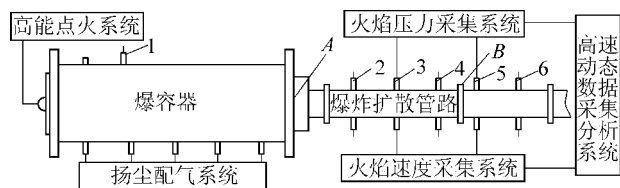
等^[8-9]在研究多孔材料中的泡沫铁镍合金材料对瓦斯爆炸的抑爆性能时,发现了厚度大、孔径小含镍成分高的泡沫铁镍合金材料有利于抑制火焰波的传播^[10]。Amrogowicz 对比了在抑制瓦斯爆炸方面,磷酸盐和碳酸盐抑爆或惰化作用的差别,研究 MAP ($(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{PO}_4$) 在惰化作用上比 SBC (NaHCO_3) 有更好的效果,而 SBC 在抑制爆炸方面有更明显的效果。KosinskiP^[11]运用数值分析模拟了粉体抑制爆炸的过程中,粉体粒子云的分布情况,对于某些特定粒径的颗粒几乎是均匀分布的,例如小颗粒倾向于聚集在爆炸形成的气相旋涡的边缘。文献^[12]做了 CO_2 和 ABC 干粉气—固混合抑制剂对瓦斯爆炸的抑爆试验,证明了在抑爆过程中 ABC 干粉和 CO_2 之间存在协同增效作用, CO_2 在整个爆炸过程中扮演一个重要组成部分,它能有效地抑制了瓦斯气体和氧气之间的化学反应,而 ABC 干粉在爆炸反应与传播过程的中后期起着至关重要的抑制作用。

以上研究都是针对单一的抑爆材料的研究,未考虑到多孔材料的多孔性能的可填充性和干粉抑爆剂的微粒径性在抑爆过程中能起到联合抑爆的效果。因此,为增强泡沫隔爆装置的抑爆性能,本文以多孔材料中的泡沫铁镍金属板为填充骨架,以常用的 ABC 超细干粉、BC 超细干粉为填充材料,通过多组正交对比试验,寻求最佳的填充材料和填充比例,为制备更加高效的隔爆装置提供理论指导。

1 试验系统和试验方案

1.1 试验系统

根据瓦斯爆炸试验的需要,自行研制了瓦斯—煤尘爆炸试验系统,该试验系统由4个子系统配合运作,即介质燃爆容器及扩散管路、高能点火系统、扬尘配气系统和高速动态数据采集系统。其中爆容器 DN 参数为:直径 300 mm,长度为 1 500 mm。单个扩散管参数为:直径 125 mm,长度 2 200 mm,如图 1 所示。



1—6 为传感器编号;A、B 为位置编号

图1 瓦斯-煤尘爆炸试验系统

Fig.1 Gas-coal dust explosion experiment system

试验共设置 6 个高频压力和 5 个火焰传感器。爆容器安装点 1 安装高频压力传感器,扩散管路安装点为 2、3、4、5、6 上部安装高频压力传感器,下部安装火焰传感器,传感器距点火点的位置见表 1。

表 1 传感器安装距离

Table 1 Sensor installation distance

传感器	1	2	3	4	5	6
高频压力传感器/mm	50	225	300	375	440	515
火焰传感器/mm	—	225	300	375	440	515

试验采用 15 ppi、 0.3 g/cm^3 、铁/镍=9:1 的泡沫金属板为填充骨架,粒径范围在 $1 \sim 18 \mu\text{m}$ 的干粉抑爆剂为填充材料,爆炸气体选用爆炸强度最强的 9.5% 的甲烷—空气混合气体,将点火控制柜配气压力设置为 -100 kPa ,点火压力设置为 0 kPa ,阀门停滞延时为 0.1 s ,静电点火延时为 60 ms ,续弧充电为 220 V ,TST6300 动态采集系统最高采样率为 200 ksps ,A/D 分辨率为 16 bit,压力和火焰传感器通道桥压都设置成 4 V ,采用内触发的触发方式^[14]。

1.2 试验方案

为保证每次试验稳定的瓦斯浓度,采用 99.99% 的纯 CH_4 ,充气原理运用负反馈机理。首先在 A 处设置用涂有凡士林膜夹持器密封,用真空泵将爆容器中的气压抽至 -9.5 kPa ,待压强稳定后,充入高纯度瓦斯气体,至压强为 0,停止注气。将泡沫金属板安装在 B 处,用法兰螺钉配合密封圈密封固定。试验进行时,预先采用排水法测得所需泡沫金属板的腔体体积为 300 cm^3 ,抑爆剂填充以等体积填充的方式进行填充,填充比例设置为 0、25%、30%、35%、40%、45%、50%。首先进行无填充的泡沫金属板抑制瓦斯爆炸的试验作为空白试验,其次进行同种材料不同填充体积的抑爆试验,最后进行同体积不同材料比例的混合填充抑爆试验,试验通过在管道中设置的高频压力传感器采集压力信号和火焰速度传感器采集的火焰速度信号。通过分析采集的信号,来确定采用不同抑爆方法的爆炸超压和火焰传播速度的变化规律,研究填充干粉抑爆剂对泡沫金属板的抑爆效果的影响特性。

2 试验结果及分析

2.1 试验现象对比

填充干粉抑爆剂的抑爆试验效果如图 2 所示。未填充的泡沫金属板爆炸强度比较大,爆炸时产

生刺耳的爆炸声,管道末端有大量火焰喷出,火焰明亮,爆炸效果明显。将泡沫金属板腔体中填充干粉抑爆剂进行试验,爆炸时产生的强度较未填充时小,爆炸声音闷响,爆炸后扩散管路火焰微红,甚至无火焰溢出,火焰较少。试验结束后,拆开扩散管路,将试验前的泡沫金属板与试验后的泡沫金属板对比,发现未填充干粉的泡沫金属板有严重的变形和大面积的烧结的现象,说明爆炸气体通过泡沫金属板时,火焰温度很高,爆炸威力很强。填充干粉抑爆剂的泡沫金属板,试验后的泡沫金属板表面仅有微量的凹陷,说明加入干粉抑爆剂后,爆炸的冲击波和火焰被抑制,致使泡沫金属板表面变形量减弱。说明填充干粉抑爆剂的泡沫金属对瓦斯爆炸强度的阻碍作用优于未填充的泡沫金属板。

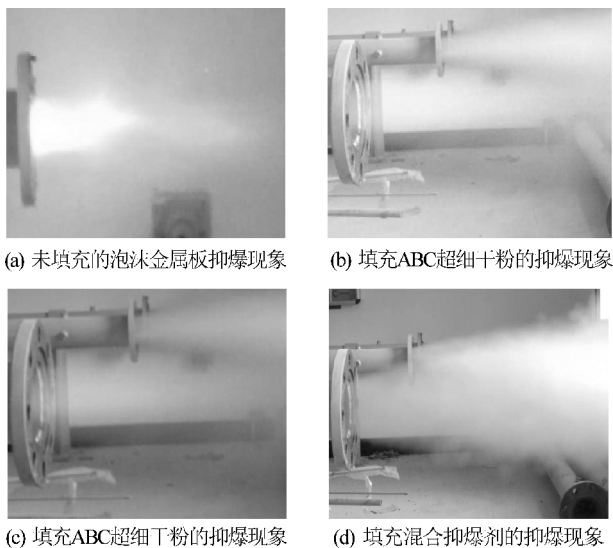


图2 抑爆试验效果

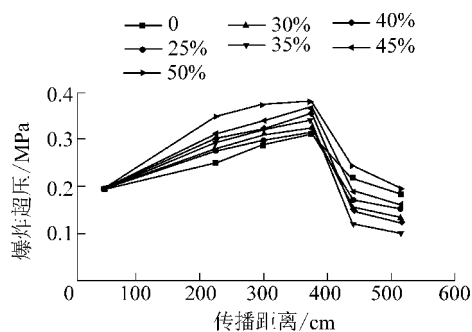
Fig.2 Experimental effect of suppression experiment

2.2 单一抑爆剂的爆炸超压曲线比较

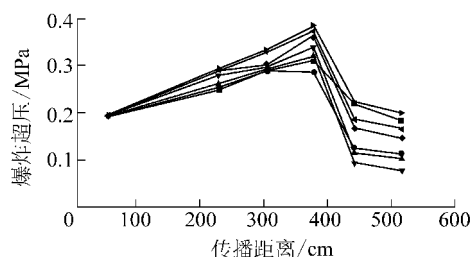
根据在试验系统中设置的高频压力传感器数据,绘制成爆炸超压-距离 L 的变化曲线。爆炸超压试验数据折线如图3所示。

由图3可知,未填充的泡沫金属板爆炸超压由 0.312 MPa 降低至 0.218 MPa ,衰减率为 30.12% 。随着干粉抑爆剂的填充,泡沫金属板的抑爆效率逐渐增强,当填充体积比为 35% 时,抑爆效率达到最大。此时,填充 ABC 超细干粉泡沫金属板的爆炸超压由 0.357 MPa 降低至 0.132 MPa ,衰减率为 58.8% ,填充 BC 超细干粉的爆炸超压由 0.34 MPa 降低至 0.154 MPa ,衰减率为 54.7% 。当填充体积比

超过 35% 再逐渐增大时,对爆炸超压的抑制效果又逐渐减弱。



(a) 填充 ABC 超细干粉抑爆的火焰传播距离效果对比



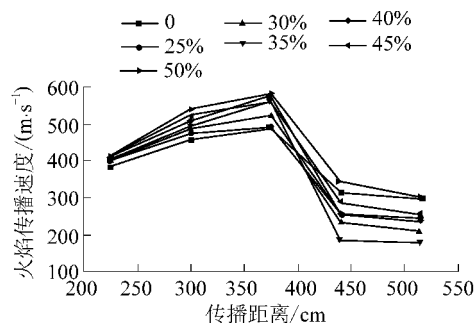
(b) 填充 BC 超细干粉抑爆的火焰传播距离效果对比

图3 爆炸超压试验数据折线

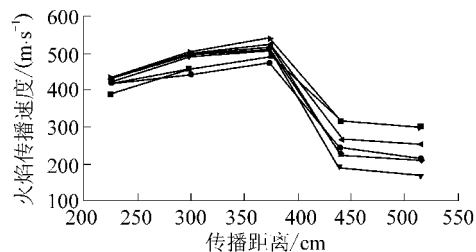
Fig.3 Data of explosion overpressure experimental data

2.3 单一抑爆剂的爆炸火焰速度的曲线比较

根据在试验系统中设置火焰传感器监测数据,绘制成火焰传播速度-距离的变化曲线如图4所示。



(a) 填充 ABC 超细干粉抑爆的火焰传播速度效果对比



(b) 填充 BC 超细干粉抑爆的火焰传播速度效果对比

图4 火焰传播速度试验数据曲线

Fig.4 Experimental data of flame propagation speed experimental data

由图4可知,在未填充泡沫金属板的爆炸传播过程中,火焰传播速度由489 m/s降低至312 m/s,衰减率为36.19%。当填充体积逐渐增大时,火焰传播速度迅速下降,填充体积为35%的ABC超细干粉时,火焰传播速度由563 m/s降低至186 m/s,衰减率为66.9%,填充体积为35%的BC超细干粉时,火焰传播速度由502 m/s降低至187 m/s,衰减率为62.7%,当再逐渐增加干粉抑爆剂的填充比例时,对火焰传播速度的抑制效果又逐渐减弱。

2.4 单一抑爆剂试验数据分析

在未填充的泡沫金属板试验时,当爆炸火焰通过泡沫金属板时,由于泡沫金属板的多孔性而分散火焰,使火焰锋面不能连续传播,冲击波也被大量的过滤,仅少量的冲击波穿过,从而阻碍火焰和冲击波的传播^[13-18]。又因为火焰爆炸的强度大小是由于冲击波和火焰波的叠加造成的^[19],因此泡沫金属板能起到有效的抑爆效果,但不能完全抑制瓦斯爆炸的传播。

由图3、图4可以看出,随着干粉抑爆剂的填充,爆炸产生的最大压强逐渐增大,分析是由于干粉抑爆剂的填充,降低了泡沫金属板的空隙率,干粉抑爆剂在未抑爆前相当于障碍物,增强了爆炸的强度,当干粉抑爆剂分解后,生成的惰性气体和水^[20],以及降低自由基交换速度的稳定化合物,才能起到抑爆效果。当填充量接近50%时,爆炸强度的增强与抑制效果基本相同,干粉抑爆剂的抑爆作用基本丧失。因此,寻求最佳的填充比,是增强泡沫金属板抑爆能力的关键,过量填充干粉抑爆剂不但不能达到抑爆效果,反而会增强爆炸强度。

对比添加ABC超细干粉和BC超细干粉的试验现象与数据,当填充比为35%时,泡沫金属板的抑爆效果都达到最优,说明15 ppi、0.3 g/cm³、铁:镍=9:1泡沫铁镍金属板最佳填充比例为35%,填充单一的抑爆剂,ABC超细干粉的抑爆效果优于BC超细干粉的抑爆效果。

3 混合抑爆剂的抑爆效果分析

3.1 填充混合干粉抑爆剂的试验效果

将泡沫金属板腔体体积的35%设置为干粉抑爆剂的填充比例,考虑两种干粉抑爆剂的抑爆效果可能起到互相促进的作用,笔者将ABC超细干粉和BC超细干粉以不同比例混合填充至泡沫金属板中,研究混合抑爆剂的抑爆效果。根据在试验系统中设

置的高频压力传感器和火焰速度传感器采集的数据(图5),绘制成爆炸超压-距离的变化曲线和火焰速度-距离变化曲线(图6)。

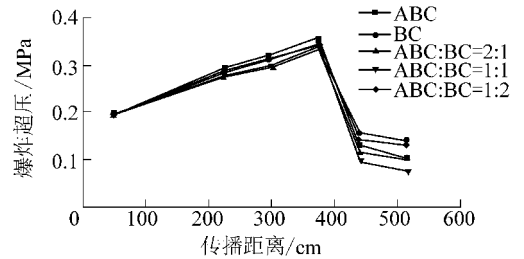


图5 填充比35%的不同材料抑爆的爆炸超压效果对比

Fig.5 Comparison of overpressure effect of explosion overpressure with different materials with 35 percent filling ratio

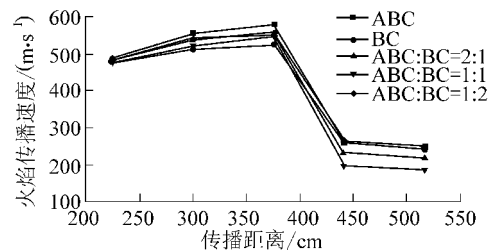


图6 填充比35%的不同材料抑爆的爆炸火焰传播速度效果对比

Fig.6 Comparison of the velocity effect of explosive flame propagation with different materials with 35 percent filling ratio

由图5、图6所示,在不同比例的添加试验中,ABC:BC=1:1时,抑爆效果最优,爆炸超压由0.342MPa降低至0.098 MPa,衰减率为71.3%,火焰传播速度522 m/s降低至114 m/s,衰减率为78.1%,优于单一的ABC超细干粉和BC超细干粉。

3.2 填充混合干粉抑爆剂的数据分析

随着ABC超细干粉与BC超细干粉填充比例的不同,泡沫金属板的抑爆效果也不相同,当ABC:BC=2:1时,爆炸超压衰减了65.6%,火焰传播速度衰减了71.8%,衰减速率大于35%填充时的ABC超细干粉,但是小于ABC:BC=1:1的抑爆效果,笔者认为这是由于BC超细干粉在高温下分解生成CO₂气体增强了ABC超细干粉的抑爆效果,BC超细干粉对ABC超细干粉的抑爆效果增益大约为6.7%左右,继续加大BC超细干粉比例,当比例增加至1:1时,增益效果达到最高为12.5%,然后随着BC超细干粉的比例逐渐增加,增益效果又逐渐降低。说明BC超细干粉能够增益ABC超细干粉的抑爆效果。因此,对比单一抑爆剂试验可以得出,当在15

ppi、0.3 g/cm³、铁/镍=9:1 泡沫金属板腔体中添加体积比为 35%、ABC:BC=1:1 的超细干粉,能使泡沫金属板抑爆效率达到最优。

4 结 论

1)在泡沫金属板中填充抑爆材料能有效抑制瓦斯爆炸的超压和火焰传播速度,在填充过程中,泡沫金属板抑爆效率的强弱与填充的材料和填充的体积比相关。

2)由抑爆前后的爆炸超压和火焰传播速度的对比可知,15 ppi、0.3 g/cm³、铁/镍=9:1 的泡沫金属板的最佳抑爆填充比例为 35%。

3)在泡沫金属板中添加单一干粉抑爆剂,填充 ABC 超细干粉时,爆炸超压衰减率和火焰传播速度衰减率分别为 58.8%、66.9%。填充 BC 超细干粉时,爆炸超压衰减率和火焰传播速度衰减率分别为 54.7%、62.7%。填充 ABC 超细的抑爆效果优于 BC 超细干粉。

4)在泡沫金属板中添加混合干粉抑爆剂的研究中发现,ABC 和 BC 超细干粉混合比例为 1:1 时,抑爆效果最佳,爆炸超压衰减率和火焰传播速度衰减率分别为 71.3%、78.1%,优于 ABC 超细干粉的和 BC 超细干粉单一抑爆剂。在抑爆过程中 ABC 超细干粉和 BC 超细干粉能够起到互相增益的效果。

参考文献(References):

[1] 孙继平,钱晓红.2004-2015 年全国煤炭事故分析[J].工矿自动化,2016,42(11):1-5.
SUN Jiping, QIAN Xiaohong. Analysis of coal mine accidents in China during 2004-2015 [J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(11):1-5.

[2] 魏春荣,徐敏强,孙建华,等.一种瓦斯抽放管道泄压阻隔爆装置[J].中国矿业,2012,21(5):71-74.
WEI Chunrong, XU Minqiang, SUN Jianhua, et al. A kind of gas drainage pressure relief explosion blocking device [J]. China Mining Magazine, 2012, 21(5):71-74.

[3] YI Y, XUEQIU H, GENG L, et al. Effect of meshy obstacle on methane gas explosion [J]. Procedia Engineering, 2011, 26:70-74.

[4] ZHANG Jinfeng, SUN Zhongqiang, ZHENG Yanmin, et al. Coupling effects of foam ceramics on the flame and shock wave of gas explosion[J]. Safety science, 2012, 50(4):797-800.

[5] LIANG Yuntao, ZENG Wen, HU Erjiang. Experimental study of the effect of nitrogen addition on gas explosion[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26(1):1-9.

[6] 魏春荣,徐敏强,王树桐,等.多孔材料抑制瓦斯爆炸火焰波的

实验研究[J].中国矿业大学学报,2013,42(2):206-213.

WEI Chunrong, XU Minqiang, WANG Shudong, et al. Experiment of porous materials for suppressing the gas explosion flame wave [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(2):206-213.

[7] 魏春荣.多孔材料对瓦斯爆炸抑制作用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

[8] 孙建华,曲征,魏春荣,等.泡沫金属抑制瓦斯爆炸火焰的实验及机理研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(3):463-467.

SUN Jianhua, Qu Zheng, WEI Chunrong, et al. Experimental and mechanism study on gas explosion flame suppressed by foam metal [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(3):463-467.

[9] 孙建华,李艳霞,魏春荣,等.泡沫铁镍金属抑制瓦斯爆炸冲击波的实验研究[J].功能材料,2013,44(10):1390-1394.

SUN Jianhua, Li Yanxia, WEI Chunrong, et al. Experimental study on the porous foam iron-nickel metal inhibition of gas explosion wave[J]. Functional Materials, 2013, 44(10):1390-1394.

[10] AMROGOWICZ J, KORDYLEWSKI W. Effectiveness of dust explosion suppression by carbonates and phosphates[J]. Combustion and flame, 1991, 85(3):520-522.

[11] KOSINSKI P. Explosion suppression by a cloud of particles; Numerical analysis of the initial processes[J]. Applied Mathematics and Computation, 2011, 217(11):5087-5094.

[12] LUO Zhenmin, WANG Tao, TIAN Zhihui, et al. Experimental study on the suppression of gas explosion using the gas-solid suppressant of CO₂/ABC powder [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 30:17-23.

[13] 李润之,司荣军.点火能量对瓦斯爆炸压力影响的实验研究[J].矿业安全与环保,2010,37(2):14-16.

LI Runzhi, SI Rongjun. Experimental study on the effect of ignition energy on gas explosion pressure [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2010, 37(2):14-16.

[14] 聂百胜,何学秋,张金锋,等.泡沫陶瓷对瓦斯爆炸火焰传播的影响[J].北京理工大学学报,2008(7):573-576.

NIE Baisheng, HE Xueqiu, ZHANG Jinfeng, et al. Effect of foam ceramics upon gas explosion flame propagation [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2008(7):573-576.

[15] 曲志明,周心权,王海燕,等.瓦斯爆炸冲击波超压的衰减规律[J].煤炭学报,2008,33(4):410-414.

QU Zhiming, ZHOU Xinquan, WANG Haiyan, et al. Overpressure attenuation of shock wave during gas explosion [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(4):410-414.

[16] 宋小雷,陈先锋,陈明,等.瓦斯爆炸过程中火焰传播的实验与数值模拟研究[J].中国安全生产科学技术,2011,7(11):5-8.

SONG Xiaolei, CHEN Xianfeng, CHEN Ming, et al. Experimental and numerical study on the flame propagation in gas explosion [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2011, 7(11):5-8.

(下转第 163 页)

- [9] 王要令,池吉安.煤自燃新型阻化剂的试验研究[J].中国煤炭,2015,41(1):88-90.
WANG Yaoling, CHI Jian. Studies on new retardant of inhibiting coal spontaneous combustion [J]. China Coal, 2015, 41(1):88-90.
- [10] 王宏飞,王继仁,郝朝瑜,等.几种无机盐类脱氧剂耗氧速率试验研究[J].中国安全科学学报,2017,27(2):47-52.
WANG Hongfei, WANG Jiren, HAO Chaoyu, *et al.* Experimental study on oxygen consumption rate of several kinds of inorganic salt deoxidizing inhibitor [J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(2):47-52.
- [11] 王德明.矿井火灾学[M].徐州:中国矿业大学出版社,2011:113-115.
- [12] 贺飞,王继仁,郝朝瑜,等.以耗氧时间为指标的脱氧剂优选试验研究[J].中国安全科学学报,2016,26(3):71-75.
HE Fei, WANG Jiren, HAO Chaoyu, *et al.* Experimental study on oxygen consuming inhibitor of spontaneous combustion of coal [J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(3):71-75.
- [13] 李春生,张道树,王华胜.综放工作面煤层自燃综合治理技术[J].煤炭科学技术,2010,38(11):74-77,89.
LI Chunsheng, ZHANG Daoshu, WANG Huasheng. Comprehensive control technology for spontaneous combustion of seam of fully mechanized top coal caving mining face[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(11):74-77,89.
- [14] 肖 旸,王振平,马 砺,等.煤自燃指标气体与特征温度的对应关系研究[J].煤炭科学技术,2008,36(6):47-51.
XIAO Yang, WANG Zhenping, MA Li, *et al.* Research on correspondence relationship between coal spontaneous combustion index gas and feature temperature[J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(6):47-51.
- [15] 吴 兵,苏 赟,王金贵,等.煤炭自然发火预报指标气体研究[J].中国安全生产科学技术,2012,8(11):76-80.
WU Bing, SU Yun, WANG Jingui, *et al.* Research on index gas for forecasting of coal spontaneous combustion [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(11):76-80.
- [16] 王从陆,伍爱友,蔡康旭.煤炭自燃倾向性试验研究及指标气体优选[J].中国安全科学学报,2006,16(10):131-134.
WANG Conglu, WU Aiyu, CAI Kangxu. Experimental study on tendency of coal spontaneous combustion based on CO concentration [J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(10):131-134.
- [17] 叶正亮.双指标划分采空区自燃“三带”的数值模拟[J].煤矿安全,2012,43(3):1-5.
YE Zhengliang. Numerical simulation of dividing gob spontaneous combustion “three zones” by double index method [J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(3):1-5.
- [18] 赵黔榕.正交法在化学试验中的应用[J].云南教育学报,1998,14(2):51-57.
ZHAO Qianrong. Application of orthogonal method in chemical experiment [J]. Journal of Yunnan Education, 1998, 14(2):51-57.
- [19] 高允彦.正交回归试验设计方法[M].北京:冶金工业出版社,1988.
- [20] RASH Herrendorfer. 试验设计方法手册[M].北京:中国统计出版社,2000.
- [21] 贺飞,王继仁,郝朝瑜,等.脱氧剂对煤自燃的抑制效果[J].煤炭学报,2016,41(11):2780-2785.
HE Fei, WANG Jiren, HAO Chaoyu, *et al.* Effect of deoxidizing inhibitor on coal spontaneous combustion [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11):2780-2785.

(上接第 157 页)

- [17] DOBASHI R, KAWAMURA S, KUWANA K, *et al.* Consequence analysis of blast wave from accidental gas explosions [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33:2295-2301.
- [18] KASMANI R M, ANDREWS G E, PHYLAKTOS H N. The influence of vessel volume and equivalence ratio in vented gas explosions [J]. Chemical Engineering Transactions, 2010, 19:463-468.
- [19] 罗振敏,张 群,王 华,等.基于 FLACS 的受限空间瓦斯爆炸数值模拟[J].煤炭学报,2013,38(8):1381-1387.
LUO Zhenmin, ZHANG Qun, WANG Hua, *et al.* Numerical simulation of gas explosion in confined space with FLACS [J]. Journal of China coal society, 2013, 38(8):1381-1387.
- [20] YE Qing, JIA ZhengZheng. Effect of the bifurcating duct on the gas explosion propagation characteristics [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2014, 50(4):424-428.