

文章编号:1000-582X(2012)01-105-05

## 协同增效原理在煤尘抑爆剂中的应用实验

左前明<sup>1</sup>,程卫民<sup>2</sup>,邹冠贵<sup>1</sup>,汤家轩<sup>3</sup>

(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. 山东科技大学, 矿山灾害预防控制教育部重点实验室,山东 青岛 266510;3. 中国煤炭工业协会咨询中心,北京 100013)

**摘要:**煤尘抑爆技术是防治煤尘爆炸的重要手段,抑爆技术核心是研究开发具有较好抑爆性能的抑爆剂。分析了煤尘抑爆剂的物理、化学、混合 3 种作用机理形式,并对现有抑爆剂进行了分类,提出了新型抑爆剂的基本特性,运用复配协同增效技术进行了抑爆剂的开发,选取  $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、聚磷酸铵和具有天然纳米孔结构的硅藻土为单体,通过合成得到 3 种复配型抑爆剂 A、B、C;利用 20 L 球形爆炸测试系统以爆炸特性参数为指标,对新型抑爆剂的抑爆效果进行了爆炸实验;结果表明,复配型抑爆剂较传统抑爆剂有更优越的抑爆性能,实现了协同增效。

**关键词:**煤尘;爆炸实验;协同增效;抑爆剂;防爆

**中图分类号:**TD 714.5

**文献标志码:**A

## Applied experiments on coal dust inhibitor based on the theory of synergistic effect

ZUO Qian-ming<sup>1</sup>, CHENG Wei-min<sup>2</sup>, ZOU Guan-gui<sup>1</sup>, TANG Jia-xuan<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing, Beijing 100083, P. R. China;2. Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control, Ministry of Education, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, P. R. China; 3. China National Coal Association Counseling Center, Beijing 100013, P. R. China)

**Abstract:** The technology of coal dust explosion suppression is an important means for coal dust explosionproofing. The core of this technology is to develop the inhibitor with effective explosion suppression performance. Firstly, the mechanisms of 3 inhibitors are analyzed, namely physics-based, chemical-based and mixture-based mechanisms. Secondly, the existing inhibitors are categorized and the basic property of the novel inhibitor is put forward. Then, the technology of synergistic mixtures is adopted to tap inhibitors by choosing 3 monomers (aluminum hydroxide, ammonium polyphosphate and diatomaceous earth) and synthesizing, and finally get 3 new inhibitors A, B and C. Utilizing 20 L spherical explosion test system, based on the index of parameters of explicability, the effect of the novel inhibitor is verified by explosion testing. The results indicate mixtures of inhibitors obtain good results, realize synergism and perform much better than traditional inhibitors.

**Key words:** coal dust; explosion testing; synergistic effect; inhibitor; explosionproofing

收稿日期:2011-09-16

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2010CB226800, 2009CB724601);国家自然科学基金(51074100);山东省自然科学基金(ZR2010EM016, ZR2011EEQ009);山东科技大学科研创新团队支持计划项目(2010KYTD106)

作者简介:左前明(1984-),男,中国矿业大学(北京)博士研究生,主要从事瓦斯、粉尘治理等方面研究, (E-mail)qianmingzuo@163.com。

煤尘作为煤炭生产加工过程中的必然产物,是矿井生产主要的自然灾害之一,严重威胁着矿井的安全生产<sup>[1]</sup>。多数重特大煤矿事故均有煤尘参与,煤尘的参与不仅会使爆炸威力剧烈增加,而且由于煤尘的不完全反应会释放出大量的有毒气体,从而造成更多的人员伤亡和财产损失<sup>[2-3]</sup>。据调查,中国 88% 的矿井煤尘具有爆炸性,严重威胁矿井安全生产;且煤尘爆炸范围往往是整个巷道甚至整个系统。为此,煤尘爆炸事故严重的国家都投入了大量的人力物力对爆炸抑制技术进行研究,抑制剂技术作为煤尘爆炸防治技术的一个重要研究方向得到了广泛重视<sup>[4-6]</sup>。

现阶段国内对于煤尘抑制剂的研究,多集中在抑爆剂的性能对比,机理分析等方面;南京理工大学的范宝春教授实验得出相同浓度下的某种抑爆剂,粒度愈小,抑爆效果愈好<sup>[7]</sup>。西安科技大学的罗振敏、邓军等人发现同微米级粉体相比,纳米粉体的抑爆效果更好<sup>[8]</sup>。有的学者通过对抑爆剂表面改性开发出了新型抑爆剂,取得了较好的效果<sup>[9]</sup>;国外 Amyot 等学者对固体惰性介质在防止和减轻粉尘爆炸中的应用进行了研究<sup>[10]</sup>;乌克兰顿涅茨克国立技术大学的 Mikhail Krasnyansky 教授运用复配技术,开发了一种 PSE,该种粉体抑爆剂具有较高的抑

爆功效<sup>[11]</sup>。但有针对性的研发高效抑爆剂,尤其是结合煤尘抑爆机理研发抑爆剂,仍然是现阶段煤尘爆炸抑制技术的重要研究方向。笔者从抑爆机理角度,运用复配技术,将作用机理协同增效的物质进行合理配比,开发复合型抑爆剂,并运用 20 L 球形爆炸测试系统,对新型抑爆剂的抑爆效果进行了验证。

## 1 抑爆剂分类与作用机理

抑爆材料按其在抑爆过程中的作用机理可以大致分为 3 类:化学作用机理、物理作用机理和混合作用机理。其中物理作用机理又可以分为自身吸热分解、失去结晶水的吸热过程、隔绝热传导和稀释氧浓度 4 类情况或其综合。化学作用机理是以吸收反应中产生的自由基为主,借助抑爆粉体的作用,消耗了燃烧反应中的自由基  $\dot{O}H$  和  $\dot{H}$ ,使自由基数量急剧减少,致使燃烧的链反应中断,最终使火焰熄灭,爆炸中止,如 NaCl、KCl 等;物理化学混合作用机理是综合了物理抑制和化学抑制 2 方面的抑制机理,如 ABC 粉,其作用过程是首先吸热分解,生成物具有吸收自由基的作用,因此,其具有混合抑制机理<sup>[11-15]</sup>,几种常见的粉体抑爆剂分类如表 1 所示。

表 1 抑爆剂种类及抑爆机理

材料	相对分子量	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	水溶性	熔点/℃	抑爆机理
Al(OH) <sub>3</sub>	78	2.40	不溶于水	150.0	物理作用
CaCO <sub>3</sub>	100	2.93	不溶于水	825.0	物理作用
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	132	1.77	易溶于水	140.0	物理作用
SiO <sub>2</sub>	60	2.20	不溶于水	1 670.0	物理作用
NaCl	58	2.16	溶于水	800.7	化学作用
KCl	74	1.98	易溶于水	770.0	化学作用
NaHCO <sub>3</sub>	84	2.15	易溶于水	270.0	物理化学混合作用
CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	60	1.33	易溶于水	132.7	物理化学混合作用
NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	115	1.80	易溶于水	180.0	物理化学混合作用

## 2 复配型抑爆剂研究

2 种或 2 种以上具有各自作用原理的物质,按一定比例混合加工生产出新的特性的混合物叫复配技术<sup>[16]</sup>。应用该种技术,不仅可以实现多组分各自性能的共同实现;并且,通过不同性质、作用机理物

质之间的搭配以实现协同效应,即相互配合使各自性能得到更好的发挥。

开发较好抑爆性能的抑爆剂,单体选择至为关键;单体选择主要考虑因素是抑爆机理、抑爆效果以及在复配中能够实现相似作用机理抑爆剂间的复配类型。基于此,在确定单体上的主要考虑以下 3 个

方面来进行选择。

1) 反应吸热角度。Al(OH)<sub>3</sub> 阻燃剂的阻燃机理是通过提高热容,使其在达到热分解温度前吸收更多的热量,从而提高其阻燃抑爆性能。充分发挥其结合水蒸汽时大量吸热的特性,提高其自身的抑爆能力。具有很好的冷却作用,从而降低爆温、火焰以及火焰存在的时间,使燃烧反应链不能持续下去,抑制爆炸火焰的发展,从而达到扑灭火焰、抑制爆炸的作用,故选取 Al(OH)<sub>3</sub> 作为单体之一。

2) 减弱自由基的活性角度。聚磷酸铵(ammonium polyphosphate, 简称为 APP) 是长链状含磷、氮的无机聚合物。其在爆炸反应区构成阻碍燃烧爆炸传播的隔离层,也成为活化分子之间的屏障。当煤尘爆炸火焰进入固体微粒区时, N 和 P 可以快速夺取爆炸反应的自由基  $\dot{O}H$  和  $\dot{H}$ , 使得 CH<sub>4</sub> 断裂产生的自由基浓度大为减少,使燃烧反应链不能持续下去,起到抑制爆炸的作用,致使爆炸火焰熄灭,从而达到终止火焰传播的作用<sup>[17]</sup>, 选取聚磷酸铵作为单体之一。



3) 吸收自由基角度。硅藻土是一种生物成因的硅质沉积岩,主要由古代硅藻遗体组成,具有一些独特的性能如多孔性(孔隙率达 80%~90%)、较大的表面积。同一种粉体抑爆材料,粒径越小,比表面积越大,抑爆效果越好。天然纳米孔结构材料硅藻土的颗粒尺寸小,空隙发达,会对自由基产生强烈的吸收作用,支链反应的活化中心浓度大大降低,自由基的消耗速度大于增长速度,达到中断爆炸链式反应的目的。故将天然纳米孔结构材料硅藻土作为复配单体之一。

在此基础上,运用合成技术,根据组成比例及成分元素合成了 3 种抑爆剂 A、B、C。

### 3 复配型抑爆剂抑爆性能实验

实验采用 20 L 爆炸测试系统,测试系统的原理与 ISO(国际标准化组织)认可的 1 m<sup>3</sup> 装置相同,现在也已被 IEC(国际电工委员会)定为国际通用的测试装置<sup>[18]</sup>。该系统包括:爆炸反应容器、配气系统、数据采集系统、点火系统、材料喷洒系统以及清扫系统。整个系统组成如图 1 所示。

对研发的抑爆剂进行抑爆效果验证性试验。本实验方案参照国标 GB/T 16428—1996 执行。实验结果如下。

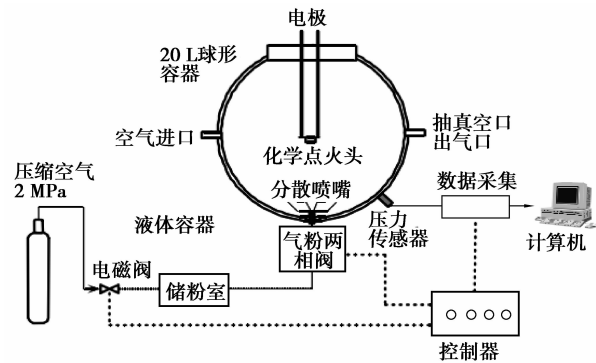


图 1 20 L 爆炸测试系统

1) 添加传统抑爆剂单体情况下实验数据见表 2, 测试系统测试结果如图 2 所示。

表 2 添加传统抑爆剂条件下煤尘爆炸试验数据

序号	抑爆剂	煤尘含量/g	抑爆剂含量/g	压力峰值/MPa	压升速率/(GPa·s <sup>-1</sup> )
1	无	4	0	0.714	47.594
2	CaCO <sub>3</sub>	4	2	0.593	39.762
3	ABC 粉末	4	2	0.476	44.590
4	AL(OH) <sub>3</sub>	4	2	0.452	35.984
5	天然纳米硅藻土	4	2	0.392	40.020
6	多聚磷酸	4	2	0.363	40.332

可以看出,由于抑爆剂的作用,虽然没有完全抑制爆炸的生成,但均使得压力峰值降低,降低效果明显的是天然纳米硅藻土和多聚磷酸。

2) 添加 3 种新型复配抑爆剂情况下实验数据如表 3 所示。

表 3 添加新型复配抑爆剂条件下煤尘爆炸试验结果

序号	抑爆剂	煤尘含量/g	抑爆剂含量/g	压力峰值/MPa	压升速率/(GPa·s <sup>-1</sup> )
1	A	4	2	0	0
2	B	4	2	0	0
3	C	4	2	0	0

测试系统未检测到任何压力变化,结果表明爆炸被完全抑制,由此可以得出,3 种单体复配形成的抑爆剂在对爆炸进行抑制的过程中起到了协同增效的效果。

3) 3 种新型复配抑爆剂最小添加量试验结果。

A 型复配抑爆剂抑爆添加量下限确定实验数据

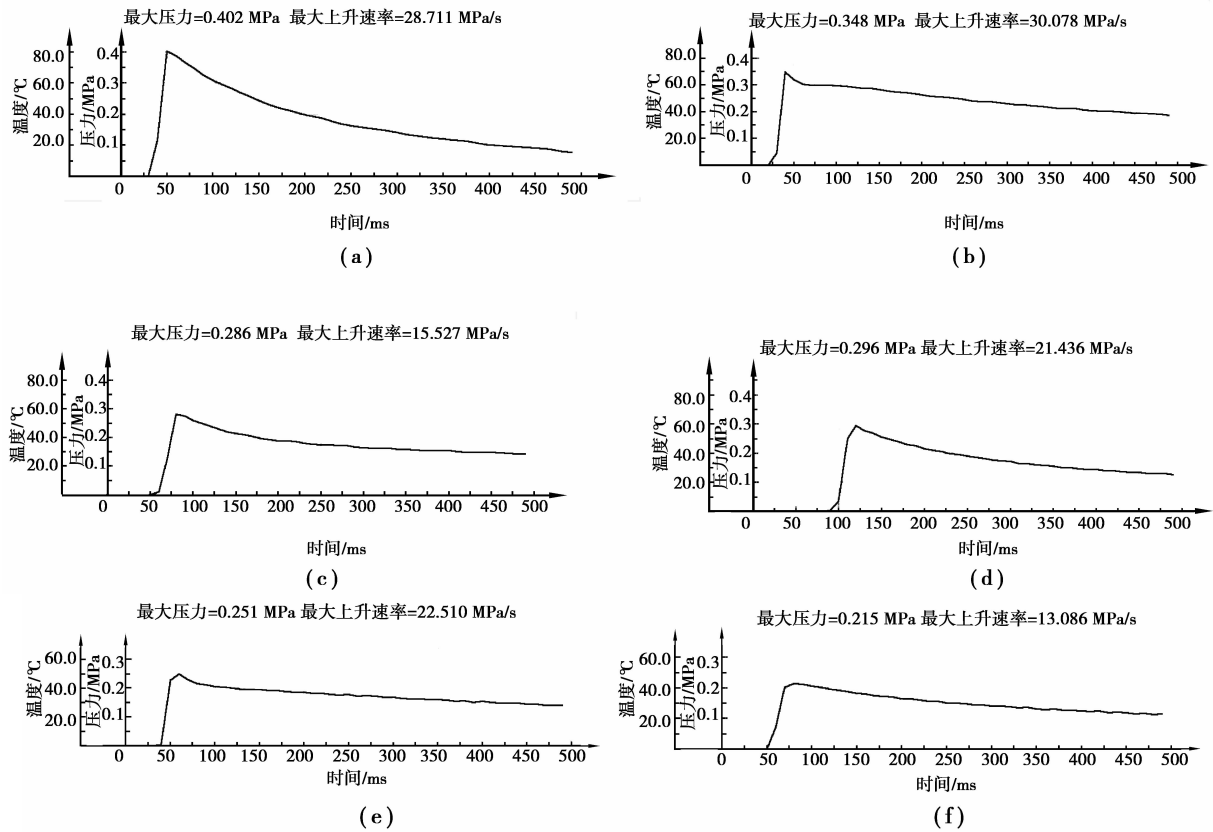


图 2 3 种添加状况下系统压力变化曲线

如表 4 所示。

表 4 A 型抑爆剂抑爆添加量确定

序号	抑爆剂	煤尘含量/g	抑爆剂含量/g	压力峰值/MPa	压升速率/(GPa·s <sup>-1</sup> )
1	A	4	1.0	0.592	42.874
2	A	4	1.0	0.598	38.184
3	A	4	1.1	0.570	33.123
4	A	4	1.1	0.574	43.946
5	A	4	1.2	0	0
6	A	4	1.2	0	0

由实验结果可以看出,在 4 g 煤尘,2.5 kJ 点火能量下,添加 A 型抑爆剂 1.2 g 可以实现完全抑爆;添加 1.1 gA 型抑爆剂虽然不能完全抑制爆炸生成,但可以降低最大爆炸压力,尤其是能够延缓爆炸生成的时间,其爆炸压力观测曲线如图 3 所示。

B 型以及 C 型抑爆剂抑爆添加量确定实验数据如表 5、6 所示。起始添加量是根据 A 型的情况选择了 1.1 g。

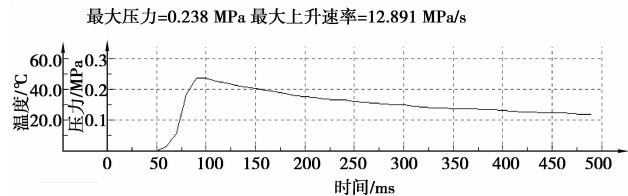


图 3 添加 1.1 g A 型抑爆剂爆炸压力观测曲线

表 5 B 型抑爆剂抑爆添加量确定

序号	抑爆剂	煤尘含量/g	抑爆剂含量/g	压力峰值/MPa	压升速率/(GPa·s <sup>-1</sup> )
1	B	4	1.1	0.548	37.792
2	B	4	1.1	0.557	36.524
3	B	4	1.2	0	0
4	B	4	1.2	0	0

可以看出,相同情况下,添加 1.2 gB 型抑爆剂同样可以完全抑制爆炸生成,且从最大爆炸压力和压力上升速率来看,添加 B 型抑爆剂的效果要好于 A 型抑爆剂。

表 6 C 型抑爆剂抑爆添加量确定

序号	抑爆剂	煤尘含量/g	抑爆剂含量/g	压力峰值/MPa	压升速率/(GPa·s <sup>-1</sup> )
1	C	4	1.5	0.568	45.118
2	C	4	1.6	0.548	37.792
3	C	4	1.7	0.502	37.518
4	C	4	1.8	0.489	35.892
5	C	4	1.9	0.357	29.874
6	C	4	2.0	0	0

可以看出,相同情况下,添加 2 gC 型抑爆剂可以实现完全抑爆。

经过验证实验得出,复配形成的抑爆剂相对其组成的 3 种单体而言,抑爆效果更好,发挥了协同增效的效果。通过抑爆剂的抑爆效果对比试验还表明通过复配技术研发的新型煤尘抑爆剂具有良好的抑爆效果。抑爆剂、煤尘按照 1:2 添加,可以完全抑制爆炸生成,这相对传统抑爆剂需要 1:1 添加,甚至更大比例添加的效果更好。

## 4 结 论

1) 在对抑爆机理分析的基础上,选取 Al(OH)<sub>3</sub>、聚磷酸铵和具有天然纳米孔结构材料硅藻土作为单体,运用复配增效技术开发出 3 种新型抑爆剂 A、B、C。

2) 经过验证实验得出,复配技术开发的新型抑爆剂相对其组成的 3 种单体而言,抑爆效果更好,发挥了协同增效的效果。

3) A、B、C 复配型抑爆剂、煤尘按照质量约 1:2 添加,可以完全抑制爆炸生成,这相对传统抑爆剂需要 1:1 添加,甚至更大比例添加的效果更好。

### 参考文献:

- [1] 赵衡阳. 气体和煤粉粉尘爆炸原理[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1996.
- [2] 王克全. 煤尘与矿井特大爆炸伤亡事故的关系[J]. 工业安全与防尘, 2005, 24(1): 25-29.  
WANG KE-QUAN. Relation between the coal dust and the large-scale explosion injury accidents in coal mines [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2005, 24(1): 25-29.
- [3] 景国勋, 段振伟. 瓦斯煤尘爆炸特性及传播规律研究进展[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(4): 67-72.  
JING GUO-XUN, DUAN ZHEN-WEI. Research progress in explosion characteristics and spread law of gas and coal dust [J]. China Safety Science Journal,

2009, 19(4): 67-72.

- [4] 谢波, 王克全. 工业粉尘爆炸抑制技术研究现状及存在的问题[J]. 矿业安全与环保, 2000, 27(1): 13-16.  
XIE BO, WANG KE-QUAN. Study status of industrial dust explosion suppression techniques and existent problems [J]. Mining Safety & Environment Protection, 2000, 27(1): 13-16.
- [5] AMYOTTE P R. Dust explosion causation, prevention and mitigation; an overview[J]. Journal of Chemical Health & Safety, 2010, 23(2): 15-28.
- [6] 金龙哲, 程卫民, 徐英锋. 关于岩粉隔爆效果的探讨[J]. 山东矿业学院学报, 1998, 17(4): 339-341.  
JIN LONG-ZHE, CHENG WEI-MIN, XU YING-FENG. Study on effect of stone dust suppression of propagation of coal dust explosion [J]. Journal of Shandong Mining Institute, 1998, 17(4): 339-341.
- [7] FAN B C, XIE B. Study on active explosion suppression by powder in large-scale duct[J]. Journal of Coal Society, 2006, 11(2): 24-28.
- [8] 罗振敏, 邓军, 文虎, 等. 纳米粉体抑制矿井瓦斯爆炸的实验研究[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(12): 23-26.  
LUO ZHEN-MIN, DENG JUN, WEN HU, et al. Experimental study on the suppression of gas explosion with nanometer powder in coalmines[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(12): 23-26.
- [9] 熊联明. 微胶囊红磷阻燃剂的制备、应用及阻燃抑烟机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
- [10] AMYOTTE P R. Solid inhibitors and their use in dust explosion prevention and mitigation[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006, 19(2/3): 161-173.
- [11] 谢波. 可燃系统中爆炸抑制过程的实验与理论研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
- [12] 左前明, 程卫民, 汤家轩. 粉体抑爆剂在煤矿中应用的研究现状与展望[J]. 煤炭技术, 2010, 12(1): 37-40.  
ZUO QIAN-MING, CHENG WEI-MIN, TANG JIA-XUAN. Current status and prospects of application and research of powder coal mine explosion suppression agent[J]. Coal Technology, 2010, 12(1): 37-40.
- [13] KRASNYANSKY M. Prevention and suppression of explosions in gas-air and dust-air mixtures using powder aerosol-inhibitor[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006, 19(6): 729-735.
- [14] XIE B, FAN B C. Study on active explosion suppression by powder in large-scale duct[J]. Journal of Coal Safety, 2006, 31(1): 54-57.

- response ratio[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(3): 329-333.
- [6] BAGDE M N, PETROS V. Fatigue and dynamic energy behaviour of rock subjected to cyclical loading[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, 46(1): 200-209.
- [7] YU H Z, SHEN Z K, WAN Y G, et al. Increasing critical sensitivity of the load/unload response ratio before large earthquakes with identified stress accumulation pattern [J]. Tectonophysics, 2006, 428(1/4): 87-94.
- [8] YILDIRIM H, ERSAN H. Settlements under consecutive series of cyclic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(6): 577-585.
- [9] 蒋宇,葛修润,任建喜. 岩石疲劳破坏过程中的变形规律及声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11):1810-1814.  
JIANG YU, GE XIU-RUN, REN JIAN-XI. Deformation rules and acoustic emission characteristics of rocks in process of fatigue failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1810-1814.
- [10] CONNELL L D, LU MENG, PAN ZHE-JUN. An analytical coal permeability model for tri-axial strain and stress conditions[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 84(2): 103-114.
- [11] MCKEE C R, BUMB A C, KOENIG R A. Stress dependent permeability and porosity of coal [M]. America: Rocky Mountain Association of Geologist, 1998.
- [12] 尹光志,李晓泉,赵洪宝,等. 地应力对突出煤瓦斯渗流影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12):2557-2561.
- YIN GUANG-ZHI, LI XIAO-QUAN, ZHAO HONG-BAO, et al. Experimental study of outburst coal's gas seepage under ground stress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2557-2561.
- [13] 尹光志,王登科,张东明,等. 两种含瓦斯煤样变形特性与抗压强度的实验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009,28(2):410-417.  
YIN GUANG-ZHI, WANG DENG-KE, ZHANG DONG-MING, et al. Test analysis of deformation characteristics and compressive strengths of two types of coal specimens containing gas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 410-417.
- [14] 杨永杰,宋扬,陈绍杰. 煤岩全应力应变过程渗透性特征试验研究[J]. 岩土力学, 2007,28(2):381-385.  
YANG YONG-JIE, SONG YANG, CHEN SHAO-JIE. Test study on permeability properties of coal specimen in complete stress-strain process [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(2): 381-385.
- [15] 许江,尹光志,王鸿,等. 不同应力水平时砂岩滞回曲线演化的实验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2006,28(2): 40-42.  
XU JIANG, YIN GUANG-ZHI, WANG HONG, et al. Experimental research on the evolution of hysteresis curve of rock in different axial stress level [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(2): 40-42.

(编辑 郑洁)

(上接第 109 页)

- [15] ECKHOFF R K. Understanding dust explosions: the role of powder science and technology[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(1): 105-116.
- [16] AMYOTTE P R, PEG M J. Application of inherent safety principles to dust explosion prevention and mitigation [J]. Process safety and Environment Protection, 2009, 87(1): 35-39.
- [17] 蔡周全,张引合. 干粉灭火剂粒度对抑爆性能的影响[J]. 矿业安全与环保, 2001, 28(4): 14-16.  
CAI ZHOU-QUAN, ZHANG YIN-HE. Influence of particle size of dry fire-extinguishing powder on explosion suppression performance [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2001, 28(4): 14-16.
- [18] DUFAUD O, TRAORE M, OERRIN L, et al. Experimental investigation and modelling of aluminum dusts explosions in the 20 L sphere[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2010, 23(2): 226-236.

(编辑 郑洁)