

文章编号:0253-9993(2013)S2-0359-05

# 煤层气分离富集吸附剂抑爆隔爆性能实验研究

杨 雄<sup>1,2</sup>, 刘应书<sup>1,2</sup>, 李永玲<sup>1,2</sup>, 宋燕民<sup>3</sup>, 张传钊<sup>1</sup>, 孟 宇<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083; 2. 北京科技大学 冶金工业节能减排北京市重点实验室, 北京 100083; 3. 北京时代桃源环境科技有限公司, 北京 100085)

**摘 要:**针对含氧煤层气变压吸附分离过程中存在的安全问题,通过实验的方法研究了吸附剂对瓦斯气体的抑爆和隔爆特性,旨在为煤矿抽排瓦斯分离过程中的安全生产提供参考。实验以甲烷与空气的混合气及甲烷与氧气的混合气为研究对象,其中甲烷体积分数分别为10%和36%。研究结果如下:当吸附剂处于爆炸气氛的环境中,在吸附剂装填区域进行点火引爆不会发生爆炸;对不装填吸附剂的区域进行点火引爆,火焰不能通过吸附剂层传递到其他区域;压力波通过吸附剂层时出现了较大的衰减,如甲烷与氧气的混合气在大气压下引爆后,压力由起爆容器的5.5 MPa迅速衰减到了0.03 MPa。研究结果表明:吸附剂具有抑爆和隔爆的特性,可对吸附分离系统起到安全防护作用。

**关键词:**活性炭;碳分子筛;煤层气;抑爆;隔爆

**中图分类号:**TD712.6;TQ038.4 **文献标志码:**A

## Research on the role of adsorbent for coal mine methane separation in explosion suppression and flameproof

YANG Xiong<sup>1,2</sup>, LIU Ying-shu<sup>1,2</sup>, LI Yong-ling<sup>1,2</sup>, SONG Yan-min<sup>3</sup>, ZHANG Chuan-zhao<sup>1</sup>, MENG Yu<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Beijing Key Laboratory for Energy Saving and Emission Reduction of Metallurgical Industry, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Beijing Fairland Environmental Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China)

**Abstract:** For the hazardous problem existing in the separation of oxygen-bearing coal mine methane during the process of pressure swing adsorption, the role of the adsorbent in suppression of explosion and flameproof was studied experimentally. The experimental results offer a reference to the safe production of methane separating from the coal mines gas. Two samples were adopted, they were CH<sub>4</sub>/Air and CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> with the volume fraction of methane account for 10% and 36% respectively. The results show that the ignition will not cause any explosions within the filling area of adsorbent, when the adsorbent is in an explosive atmosphere. The flame generating by ignition within the non-filling area of adsorbent will not go through the layer of adsorbent to pass on to other area. And there is a sharp decline after the pressure wave went through the adsorbent layer, the pressure has dropped to 0.03 MPa from 5.5 MPa rapidly after the mixed gas of methane and oxygen exploded under the condition of atmospheric pressure. The results illustrate the adsorbent has the characteristic of explosion suppression and suppression of explosion and flameproof, it could provide protective effects for the separation process.

**Key words:** activated carbon; carbon molecular sieve; coal mine gas; explosion suppression; flameproof

我国煤层气储量丰富,据报道,已探明储量为 36.8 万亿 m<sup>3</sup>,居世界第3位<sup>[1]</sup>。虽然煤层气储量丰

收稿日期:2012-10-09 责任编辑:许书阁

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)资助项目(2009AA063201);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-AS-10-005B,FRF-TP-13-011A)

作者简介:杨 雄(1984—),男,湖南益阳人,讲师,博士后。E-mail:ustbyangx@163.com。通讯作者:刘应书(1960—),男,教授,博士。E-mail:ysliu@ustb.edu.cn

富,但煤层气利用率却很低,据统计 2010 年我国煤矿瓦斯抽采量 75 亿  $\text{m}^3$ ,而利用量仅为 23 亿  $\text{m}^3$ ,大量的瓦斯气体被直接排放或对天销毁,不但污染了环境,更造成了大量能源气体的浪费。《煤层气“十二五”规划》指出,到“十二五”末,我国煤层气的抽采量要达到 300 亿  $\text{m}^3$ ,其中井下抽采瓦斯 140 亿  $\text{m}^3$ ,利用量要达到 60% 以上,提高煤层气的利用效率已经成为工业应用领域研究的热点。我国井下抽采的瓦斯气中甲烷体积分数很低,约有 2/3 以上的矿井甲烷体积分数低于 30%<sup>[2]</sup>,这部分煤层气浓度低,在利用过程中存在爆炸危险,是瓦斯利用率低的主要原因,提高这部分瓦斯的浓度是提高瓦斯利用率十分有效的手段。

吸附法是提高瓦斯浓度最具潜力的方法,但吸附分离过程中存在爆炸隐患,因此传统的煤层气在分离过程中一般将煤层气考虑成甲烷和氮气的二元气体,而不考虑氧气的存在<sup>[3-5]</sup>。而传统的吸附分离方法无法避免进入甲烷的爆炸极限<sup>[6]</sup>。刘应书等<sup>[7]</sup>利用一种安全的分离方法控制分离过程中甲烷与氧气的浓度,安全地将浓度为 20% 的含氧瓦斯气体富集到了 30% 以上。然而安全问题是煤矿生产中的重大问题,若分离系统发生故障,系统内部有可能进入甲烷的爆炸极限,因此研究吸附剂对瓦斯爆炸的影响特性,确保安全生产是一项十分迫切的工作。吸附剂是一种多孔介质,其内部具有发达的孔隙结构,在吸附塔内吸附剂之间存在大量狭小间隙,对于气体的爆炸和火焰的传播具有抑制作用。而吸附剂又具有较强的吸附特性,能吸附煤层气中的甲烷和氧气,如在 1 标准大气压下 1 kg 活性炭对甲烷的吸附量可达 0.8 mol,对氧气的吸附量可达 0.25 mol<sup>[8]</sup>,这部分气体在受热后又能从吸附剂中解吸,从而对气体的燃烧和爆炸起到促进作用。目前,仅兰洽淮等<sup>[9]</sup>指出其单位针对煤层气分离生产的防爆型吸附剂,具有抑爆的特性,而其他吸附剂对混合气体抑爆和隔爆性能如何尚缺乏研究。

本文通过实验探索低浓度煤层气分离用吸附剂(活性炭与碳分子筛的混合吸附剂和活性炭)的抑爆和隔爆机理,旨在为煤矿抽排瓦斯富集过程中的安全生产提供参考。

## 1 实 验

本文从两个方面研究吸附剂对瓦斯爆炸的影响机理:一方面,研究吸附剂处在爆炸环境下,当吸附剂所在区域出现点火源的时候是否能够抑制爆炸的发生;另一方面,研究未装吸附剂的空间内发生爆炸后,

吸附剂层对爆炸是否有抑制和阻碍其传播的特性。

### 1.1 实验装置

实验装置由球形容器、高能点火器、压力变送器、火焰探测器、高速数据采集仪、氧气钢瓶、 $\text{CH}_4$  钢瓶、空气钢瓶、混气仪、真空泵、计算机及连接的线路、管道等构成,实验装置原理如图 1 所示。

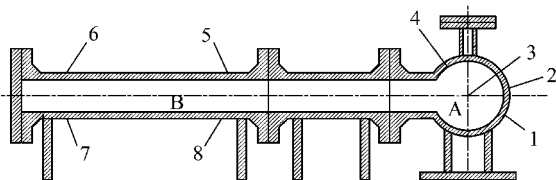


图 1 实验原理

Fig. 1 Schematic diagram of experiment

A—球形容器(22 L);B—连接管道;1—进气口;2—压力传感器 1;3—火花塞;4—真空压力表;5—压力传感器 2;6—压力传感器 3;7—火焰探测器 1;8—火焰探测器 2

球形容器的体积为 22 L,里面设置了压力传感器、点火器及进出气系统。球形容器通过法兰与管道相连,管道直径为 89 mm,分为 3 段,每段长度为 2 m。实验过程中在第 1 段管道中可以装填吸附剂,压力传感器和火焰探测器分别位于第 2 段管道和第 3 段管道的前端,间距为 2 m。高能点火器点火点位于球形容器中部,点火能量为 6 J,远大于  $\text{CH}_4$  的点火能 0.28 mJ。

### 1.2 实验内容

本文主要研究吸附剂的抑爆性能和隔爆性能。实验中选用了两种吸附剂进行实验,一种为活性炭与碳分子筛的混合吸附剂,另一种为活性炭。实验中选用的气体为甲烷与空气的混合气及甲烷与氧气的混合气,混合气体中  $\text{CH}_4$  处于爆炸极限范围内最易爆的浓度,其体积分数分别为 10% 和 36%。实验在不同压力下考察了吸附剂的抑爆和隔爆性能。实验条件见表 1,文中所有压力均为相对压力。

表 1 实验条件

Table 1 Experimental conditions

编号	气体组成	$\text{CH}_4$ 体积分数/%	初始温度	压力/MPa	点火能量/J
1	甲烷/空气	10	室温	0	6
2	甲烷/空气	10	室温	0.1	6
3	甲烷/空气	10	室温	0.2	6
4	甲烷/空气	10	室温	0.3	6
5	甲烷/氧气	36	室温	0	6

进行抑爆实验时,吸附剂装填于球形容器内。隔爆实验时,吸附剂装填于与球形容器连接的第 1 段管道内,球形容器是引爆容器不装填吸附剂。实验时先

充入实验所需工况条件的混合气,然后进行点火引爆,为保证实验结果的准确性,每个工况下实验3次。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 吸附剂抑爆特性

表2为使用混合吸附剂和活性炭进行抑爆实验的实验结果,实验过程中吸附剂装填于球形容器内,点火器置于吸附剂中。从表中可以看出,无论是使用混合吸附剂还是活性炭,当甲烷和空气的混合气(体积分数为10%)压力为0~0.3 MPa,以及甲烷与纯氧的混合气(甲烷体积分数为36%)压力为0时,利用高能点火器对其进行点火引爆均未发生爆炸。

表2 混合吸附剂和活性炭抑爆实验结果

Table 2 Result of mixture adsorbent's and active carbon's explosion suppression experiment

吸附剂	实验编号	混合气体	CH <sub>4</sub> 体积分数/%	压力条 件/MPa	实验结果
混合吸附剂	1	CH <sub>4</sub> /Air	10	0	未爆炸
	2	CH <sub>4</sub> /Air	10	0.1	未爆炸
	3	CH <sub>4</sub> /Air	10	0.2	未爆炸
	4	CH <sub>4</sub> /Air	10	0.3	未爆炸
	5	CH <sub>4</sub> /O <sub>2</sub>	36	0	未爆炸
活性炭	1	CH <sub>4</sub> /Air	10	0	未爆炸
	2	CH <sub>4</sub> /Air	10	0.1	未爆炸
	3	CH <sub>4</sub> /Air	10	0.2	未爆炸
	4	CH <sub>4</sub> /Air	10	0.3	未爆炸

这种情况可以根据链式反应理论进行解释,当甲烷与氧气同时存在时混合气体吸收一定的能量后,反应物分子甲烷的链即行断裂,离解成2个或2个以上具有很强化学活性的自由基。这些自由基很容易与CH<sub>4</sub>和O<sub>2</sub>结合产生新的自由基,反应过程中自由基逐渐积累,系统反应自动加速,直至发生爆炸<sup>[10]</sup>。瓦斯爆炸的反应可以看成8个基元反应的集合,其中4个基元反应为吸热反应,另外4个为放热反应,当基元反应中生成的中间产物活性自由基与壁面发生碰撞,反应即终止<sup>[11]</sup>。本文虽然提供了高达6 J的点火能,远大于C—H化学键发生断裂产生自由基所需要的能量,但由于处于吸附剂中,吸附剂的高比表面积使得自由基与冷壁面的碰撞机率大增,这部分自由基在碰撞过程中湮灭。此时自由基与壁面的碰撞占主导地位,自由基数量急剧减少,反应不能继续进行,因此爆炸未能发生。此外,高能点火器处于吸附剂之中,而吸附剂表面积巨大,导致点火时产生的能量很大一部分会被吸附剂吸收,这也导致了吸附剂对瓦斯的爆炸产生了抑制现象。

综上可知,在煤层气分离过程中吸附塔内气体处于甲烷的爆炸极限范围内,若在吸附剂填充区域内出现点火源,不会导致爆炸的发生,说明了吸附剂具有抑爆的特性。

### 2.2 吸附剂隔爆特性

表3为利用混合吸附剂及活性炭进行隔爆实验的实验结果。实验中无论是使用甲烷与空气的混合气还是甲烷与氧气的混合气,在空管段均未监测到有火焰通过,说明了所有工况下均未发生传爆现象。

表3 混合吸附剂和活性炭隔爆实验结果

Table 3 Results of mixture adsorbent's and active carbon's flameproof experiment

吸附剂	实验编号	混合气体	CH <sub>4</sub> 体积分数/%	压力条 件/MPa	实验结果
混合吸附剂	1	CH <sub>4</sub> /Air	10	0	未传爆
	2	CH <sub>4</sub> /Air	10	0.1	未传爆
	3	CH <sub>4</sub> /Air	10	0.2	未传爆
	4	CH <sub>4</sub> /Air	10	0.3	未传爆
	5	CH <sub>4</sub> /O <sub>2</sub>	36	0	未传爆
活性炭	1	CH <sub>4</sub> /Air	10	0	未传爆
	2	CH <sub>4</sub> /Air	10	0.1	未传爆
	3	CH <sub>4</sub> /Air	10	0.2	未传爆
	4	CH <sub>4</sub> /Air	10	0.3	未传爆

这主要是由于火焰进入吸附剂层后出现了淬熄现象。对于火焰淬熄现象有两种常用理论进行解释:冷壁效应理论和链式反应理论。冷壁效应理论又称热理论,认为火焰能在通道内传播的条件是燃烧释放的热量必须大于通道壁面散失的热量,反之,火焰就会熄灭。Spalding<sup>[12]</sup>用能量平衡描述了火焰的淬熄现象,认为火焰的熄灭是由于燃烧反应热损失引起。火焰通过吸附剂层时,火焰被分割成若干细小的火焰,由于表面积剧增火焰向环境的换热强度大幅度增加,当温度降低到一定的温度时火焰被冷熄。从链式反应理论来说,火焰向吸附剂层传递时,由于吸附剂的高比表面积特性,活化分子和自由基与壁面碰撞和销毁的机率大增,导致参与反应的活化分子和自由基不断降低,直到燃烧反应终止。这两种理论都能很好地解释预混火焰的淬熄现象,利用这一原理,目前已经研制出金属丝网阻火器<sup>[13]</sup>及煤矿巷道中的主动抑爆装置。

文献[14]还指出了波纹型、金属网型和多孔板型阻火器阻火层厚度的计算公式可以表示为: $Y=100Vd^2/(0.38A)$ ,其中, $Y$ 为阻火层厚度,m; $V$ 为火焰传播速度,m/s; $d$ 为阻火直径,m; $A$ 为有效面积比(阻火层面积与阻火层空隙面积之比)。当实际的阻火层装填厚度大于 $Y$ 时,火焰不能通过阻火层传递

到其他区域。按此公式,本文不考虑吸附剂的吸附特性,以吸附剂为研究对象计算出火焰传播速度与阻火层厚度的关系,如图2所示。图中分别选取了阻火直径0.1 cm和0.2 cm进行计算, $A$ 值取1.5(按吸附剂空隙率0.4计,则相当于阻火层面积为0.6)。从图中可以看出,火焰传播速度越快,火焰淬熄所需要的阻火层厚度越大;在相同的阻火层厚度下,阻火直径越小,阻火效果越好。当火焰传播速度达到300 m/s的情况下,若阻火直径为0.2 cm,需要的阻火层厚度仅为21 cm。若不考虑吸附剂中吸附的甲烷和氧气解吸后对瓦斯爆炸的促进作用,吸附剂能够在很短的距离内将火焰淬熄。

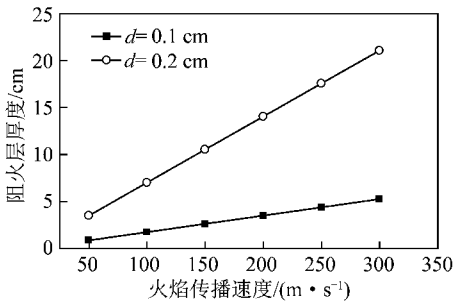


图2 火焰传播速度与阻火层厚度的关系  
Fig. 2 Effect of flame propagation speed on fire-stopping layer thickness

综上所述,吸附剂能对瓦斯的爆炸起到阻隔作用,当爆炸发生后吸附剂能阻止火焰沿着吸附剂层传递到其他区域。

### 2.3 吸附剂对爆炸波的衰减作用

可燃性混合气体在发生爆炸后会产生爆炸波。

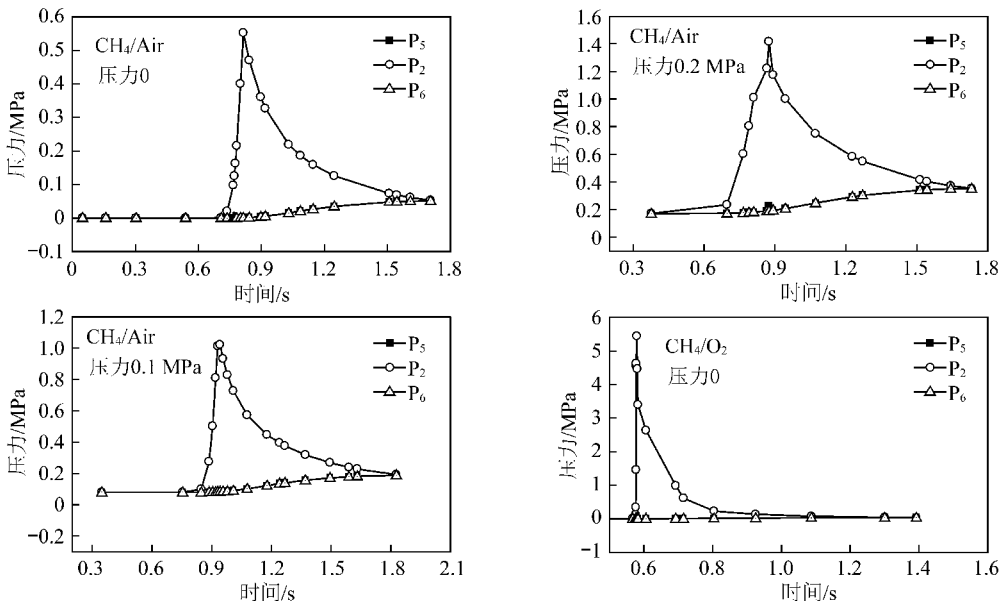


图3 甲烷传爆实验压力

Fig. 3 Pressure curves of detonation transmission experiment on CH<sub>4</sub>

文献[15]指出瓦斯在火焰峰面完全燃烧后,反应区域压强急剧升高,在火焰峰面和未燃区压差的作用下,会产生一个压缩波向前传播,传播速度为当地音速。爆炸波除能带来较大的物理性破坏外,还能促进燃烧反应过程中的能量和质量交换,使反应区域温度、反应物混合更均匀,加快反应速度。抑制爆炸波的传播在一定程度上能够降低瓦斯爆炸灾害的破坏。多孔材料能够抑制瓦斯爆炸,对冲击波的传递也具有较强的衰减特性<sup>[16]</sup>。

图3为混合气体在爆炸后,球形容器和管道中的压力变化曲线,实验中使用的吸附剂为碳分子筛与活性炭的混合吸附剂,图中 $P_2$ 、 $P_5$ 、 $P_6$ 分别代表图1中压力传感器2(球形容容器内)、压力传感器5(第2段管与第1段管相连处)、压力传感器6(第2段管靠近盲板处)这3处的压力。从图3可以看出,爆炸发生后起爆容器和空管段存在较大的压差,如甲烷与空气混合气压力分别为0,0.1,0.2 MPa时起爆容器中的压力分别为0.55,1.02,1.40 MPa,而管道中的压力最大仅达到了0.05,0.20和0.35 MPa,甲烷与纯氧的混合气爆炸后压力虽然达到了5.5 MPa,但管道中的压力也仅能达到0.03 MPa,且空管断压力最大值的出现滞后起爆容器约0.5 s以上。这说明了爆炸发生后压力波在通过吸附剂层时发生了较大的衰减,其主要原因是由于多孔材料对爆炸波波阵面的横波具有吸收特性,使得压力波未能通过吸附剂层。此外,爆炸发生后产生的热量很快被容器和具有高比面积的吸附剂所吸收,气体温度降低导致系统内部整体温度降低,这也是空管段压力较低的原因。

综上所述,吸附剂层对爆炸后的压力波具有较强的衰减特性,爆炸发生后空管段压力仅相对于初始压力有小幅提升。

### 3 结 论

(1)活性炭与碳分子筛的混合型吸附剂及活性炭能对瓦斯爆炸起到安全防护的作用。

(2)煤层气分离用吸附剂对瓦斯气体的爆炸具有抑制作用,在甲烷与空气的混合气氛及甲烷与氧气的混合气氛内,对吸附剂装填部分利用6 J的点火源进行引爆,系统内不会发生爆炸。

(3)通过吸附剂的隔爆特性研究可知,爆炸发生后吸附剂可以阻止火焰沿着吸附剂层传递到其他区域。

(4)吸附剂对爆炸波的传递具有衰减特性,当甲烷与氧气的混合气在当地大气压下引爆后,压力达到5.5 MPa,经吸附剂层后压力衰减到了0.03 MPa。

### 参考文献:

[1] Yang Ming. Climate change and energy policies, coal and coalmine methane in China[J]. Energy Policy, 2009, 37: 2858-2869.

[2] 刘应书, 杨 雄, 李永玲, 等. 真空变压吸附分离含氧煤层气的工艺参数实验研究[J]. 现代化工, 2011(1): 64-67.

Liu Yingshu, Yang Xiong, Li Yongling, et al. Experiment study on process parameters of coal-bed gas separation by vacuum pressure swing adsorption[J]. Modern Chemical Industry, 2011(1): 64-67.

[3] Vincent G Gomes. Coal seam methane recovery by vacuum swing adsorption[J]. Separation and Purification Technology, 2001, 24: 189-196.

[4] 辜 敏, 鲜学福, 张代均, 等. 变压吸附技术分离  $\text{CH}_4/\text{N}_2$  气体混合物[J]. 煤炭学报, 2002, 27(2): 140-143.

Gu Min, Xian Xuefu, Zhang Daijun, et al. Separation of  $\text{CH}_4/\text{N}_2$  gas mixture by pressure swing adsorption processes[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(2): 140-143.

[5] Sodzawiczny W, Warmuzinski K. Pressure swing adsorption system for the enrichment of  $\text{CH}_4/\text{N}_2$  mixtures in methane[J]. Inzynieria Chemiczna i Procesowa, 2001, 22(3): 1291-1296.

[6] Li Y L, Liu Y S, Yang X. A new safety enrichment method for low concentration coal bed methane-proportion pressure swing adsorption[J]. Advanced Materials Research, 2011, 233-235: 2276-2279.

[7] 杨 雄, 刘应书, 李永玲, 等. 变压吸附法富集低体积分数含氧煤层气的研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1): 91-96.

Yang Xiong, Liu Yingshu, Li Yongling, et al. Study on low concentration oxygen-bearing coal mine methane enrichment by pressure swing adsorption[J]. Journal of China Coal, 2011, 36(1): 91-96.

[8] 杨 雄, 刘应书, 李永玲, 等. 基于活性炭的真空变压吸附提浓煤层气甲烷的实验研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(6): 987-991.

Yang Xiong, Liu Yingshu, Li Yongling, et al. The experimental study on upgrade of coalmine gas by vacuum pressure swing adsorption with activated carbon[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 987-991.

[9] 兰治淮, 刘青源, 余兰金. 变压吸附法提浓煤矿低浓度瓦斯过程中的脱氧及抑爆技术研究与应用[J]. 中国煤炭, 2011, 37(3): 93-96.

Lan Zhihuai, Liu Qingyuan, Yu Lanjin. Research and application of deoxidation and explosion suppression technology in the concentration processes of logy concentration CMM by PSA method[J]. China Coal, 2011, 37(3): 93-96.

[10] 张 丽, 周玲玲. 瓦斯爆炸机理及预防措施[J]. 化学教育, 2006(1): 2-3.

Zhang Li, Zhou Lingling. The mechanism of coal gas explosion and preventive measures[J]. Chemical Education, 2006(1): 2-3.

[11] 罗振敏. 链式反应理论在矿井瓦斯抑爆中的应用[J]. 煤矿安全, 2009(2): 67-69.

Luo Zhenmin. Application of chain reaction theory on suppression of coal mine gas explosion[J]. Safety in Coal Mines, 2009(2): 67-69.

[12] Spalding D B. A theory of inflammable limits and flame quenching [A]. Proc. Roy. Soc. [C]. London, 1957: 83-100.

[13] 胡春明. 火焰在阻火器中传播与淬熄的研究综述[J]. 广州化工, 2011, 39(5): 38-40.

Hu Chunming. A summary of study on flame propagating and quenching in flame arrester[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2011, 39(5): 38-40.

[14] 高 岭, 高庆贵. 阻火器的设计和选用[J]. 化工设计, 2011, 21(2): 24-28.

Gao Ling, Gao Qinggui. Design and selection of fire arrester[J]. Chemical Engineering Design, 2011, 21(2): 24-28.

[15] 梁建军, 蒋新生, 周建忠. 瓦斯爆炸波自激励效应的实验研究[J]. 后勤工程学院学报, 2010, 26(5): 33-37.

Liang Jianjun, Jiang Xinsheng, Zhou Jianzhong. Experimental study on the self-oscillation laws of gas explosion in tube[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2010, 26(5): 33-37.

[16] Nie B S, He X Q, Zhang R M. The roles of foam ceramics in suppression of gas explosion overpressure and quenching of flame propagation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 192(2): 741-747.