



中国煤炭行业知识服务平台 (中国煤炭期刊网)
CHINA COAL INDUSTRY KNOWLEDGE SERVICE PLATFORM

推荐阅读:

[综采工作面上隅角瓦斯流动活跃区形成机理研究](#)

[高瓦斯突出煤层综采工作面注水降尘技术应用研究](#)

[超大直径钻孔采空区瓦斯抽采技术研究](#)

[风速对近距离煤层采空区漏风及煤自燃影响研究](#)

[深部高瓦斯矿井大采高工作面立体抽采瓦斯技术](#)

[水力冲孔压裂卸压增透抽采瓦斯技术研究](#)

[巷道火灾时期流场及瓦斯浓度变化规律数值模拟研究](#)

[高突低渗透煤层超高压水力割缝卸压增透研究](#)

[高瓦斯综采工作面定向高位钻孔瓦斯抽采技术研究](#)

[寺河井田煤层气产能分布特征及影响因素分析](#)

[我国煤矿覆岩采动裂隙带卸压瓦斯抽采技术研究进展](#)

[基于高位定向长钻孔的上隅角瓦斯治理研究](#)

[松软突出煤层瓦斯抽采钻孔施工技术及发展趋势](#)

[综采工作面煤层注水防尘优化及效果研究](#)

[我国煤层气钻井技术及装备现状与展望](#)

[高瓦斯矿井高抽巷合理布置及终巷位置确定研究](#)

[原生结构煤与构造煤孔隙结构与瓦斯扩散特性研究](#)

[不同孔间距抽采孔对深孔预裂爆破增透效果影响研究](#)

[顺层瓦斯抽采钻孔封隔一体化封孔工艺研究](#)

[煤层瓦斯赋存特征及其关键地质因素影响研究](#)



移动扫码阅读

王 燕,齐英全,温小萍,等.煤尘组分对瓦斯/煤尘复合爆炸下限的影响研究[J].煤炭科学技术,2020,48(2):125-130. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.02.015

WANG Yan, QI Yingquan, WEN Xiaoping, et al. Influence study of coal dust composition on the lower explosion limit of hybrid mixture of gas and coal dust[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(2): 125-130. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.02.015

煤尘组分对瓦斯/煤尘复合爆炸下限的影响研究

王 燕¹,齐英全¹,温小萍²,王 蔚¹,甘向阳¹,裴 蓓¹,纪文涛¹

(1.河南理工大学 安全科学与工程学院,河南 焦作 454000;2.河南理工大学 机械与动力工程学院,河南 焦作 454000)

摘 要:瓦斯和煤尘复合爆炸是煤矿井下爆炸灾害的主要形式之一,研究瓦斯/煤尘复合爆炸下限变化规律,是有效防治煤矿爆炸灾害的必备条件。为研究煤尘组分对瓦斯/煤尘复合爆炸下限的影响,特选用2种组分不同的煤尘(烟煤和无烟煤)。依据EN 14034标准,使用10 kJ化学点火头在标准20 L球形爆炸容器中,分别对2种煤尘的最小爆炸浓度、相同试验条件下的瓦斯爆炸下限以及煤尘与瓦斯的复合爆炸下限进行了测量。试验测得烟煤和无烟煤的最小爆炸浓度分别为50 g/m³和70 g/m³,瓦斯爆炸下限为4%。当煤尘中分别通入1%、2%、3%、4%的瓦斯后,烟煤最小爆炸浓度分别降低至40、20、5、0 g/m³,无烟煤最小爆炸浓度分别降低至50、20、5、0 g/m³。基于上述测量结果,对比分析了煤尘组分对瓦斯/煤尘复合爆炸下限变化规律的影响,并探讨了Le Chatelier、Bartknecht、Jiang等气粉复合爆炸下限预测模型对瓦斯/煤尘复合体系的适用性。结果表明:2种煤尘的最小爆炸浓度均随瓦斯浓度的增大而降低,但挥发分含量低的煤尘降幅更大,即瓦斯对低挥发分煤尘最小爆炸浓度的影响更为显著。Jiang模型预测值远远偏离实际测量值;Le Chatelier模型预测值高于实际测量值,且误差随瓦斯浓度的增大而增大;Bartknecht模型适用性相对较好,且更适用于低挥发分瓦斯/煤尘复合体系。

关键词:瓦斯;煤尘;复合爆炸;爆炸下限;预测模型

中图分类号:TD75.1

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2020)02-0125-06

Influence study of coal dust composition on the lower explosion limit of hybrid mixture of gas and coal dust

WANG Yan¹, QI Yingquan¹, WEN Xiaoping², WANG Wei¹, GAN Xiangyang¹, PEI Bei¹, JI Wentao¹

(1. College of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The combined explosion of gas and coal dust is one of the main forms of explosion disasters in coal mines. Studying the lower limit change law of the gas/coal dust composite explosion is an indispensable condition for effective prevention of coal mine explosion disasters. In order to study the effect of coal dust composition on the lower explosion limit of hybrid mixture of gas/coal dust, two different components of coal dust (bituminous coal and anthracite coal) were selected. According to EN 14034 standard, the minimum explosion concentration of the two kinds of coal dust, lower explosion limit of methane and the lower explosion limit of methane and coal dust mixtures were measured by using a 10 kJ chemical ignitor in a standard 20 L spherical explosion container. The results show that the minimum explosion concentration of bituminous coal is 50 g/m³, and that of anthracite is 70 g/m³ respectively, and the lower explosion limit of methane is 4%. When 1%, 2%, 3% and 4% was injected into coal dust, the minimum explosion concentration of bituminous coal were reduced to 40 g/m³, 20 g/m³, 5 g/m³ and 0 g/m³ respectively, and the minimum explosive concentration of anthracite coal were reduced to 50 g/m³, 20 g/m³, 5 g/m³ and 0 g/m³ respectively. According to the measured results listed above, the lower explosion limits of hybrid mixtures of the

收稿日期:2019-11-25;责任编辑:王晓珍

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874120,51904094,51774115)

作者简介:王 燕(1982—),女,河南周口人,教授,博士。Tel:0391-3987440,E-mail:yanwang@hpu.edu.cn

通讯作者:纪文涛(1989—),男,河南周口人,讲师,博士。Tel:0391-3987440,E-mail:jiwentao@hpu.edu.cn

two kinds of coal dust and gas were measured in a 20 L spherical explosive device. Based on the measured results, the effects of coal dust components on the lower explosion limit of hybrid mixture of gas and coal dust were analyzed. Simultaneously, the applicability of three different models (Le Chatelier, Bartknecht, Jiang) for predicting the lower explosion limit of hybrid mixture to gas/coal dust mixtures was discussed. It is shown that the minimum explosion concentration of the two types of coal dust decreases with the increase of gas concentration, but the coal dust with low volatile content decreases more, that is, the effect of gas on the minimum explosion concentration of low volatile coal dust is more significant. The predicted value of the Jiang model is far from the actual measured value; the predicted value of the Le Chatelier model is higher than the actual measured value, and the error increases with the increase of gas concentration; the Bartknecht model is relatively applicable, and more suitable for low-volatile gas/coal dust composite system.

Key words: gas; coal dust; hybrid explosion; lower explosion limit; prediction model

0 引言

调查显示,煤矿爆炸事故多由瓦斯和煤尘共同引起,即使最后事故被定性为瓦斯或煤尘爆炸,其爆炸过程多是由瓦斯和煤尘共同参与的^[1-3]。因此,研究瓦斯/煤尘复合爆炸特性是有效防治煤矿爆炸灾害的必备条件。

爆炸下限作为表征瓦斯/煤尘复合爆炸特性的重要参数,是煤矿井下爆炸灾害防治重要参考依据。目前,国内外学者已经针对瓦斯/煤尘复合爆炸下限变化规律开展了部分研究^[4-6],并从宏观上明确了瓦斯/煤尘复合爆炸下限变化规律,即低于爆炸下限的瓦斯和低于最小爆炸浓度的煤尘混合后仍具有爆炸危险性,或可描述为瓦斯可显著降低煤尘最小爆炸浓度,反之亦然^[7-9]。但是,上述结论只是瓦斯/煤尘复合爆炸下限变化规律的定性描述,缺乏定量分析,研究结果还不能从根本上为煤矿爆炸灾害防治提供有效支撑。

研究表明,瓦斯或煤尘爆炸下限受多种因素的影响,如煤尘粒径^[10]、组分^[11]、含湿量^[12]、点火能量^[13]、湍流强度等^[14],而瓦斯/煤尘复合爆炸下限也必将受这些因素的影响。文献[14]将甲烷添加至不同组分的煤尘中,发现灰分含量较高煤尘的最小爆炸浓度下降趋势更为显著。文献[15]采用1、5、10 kJ三种不同能量的点火头对比分析了点火能量对瓦斯/煤尘复合爆炸下限变化规律的影响,结果表明点火能量的提升可提高瓦斯/煤尘两相体系可爆区范围,即降低两相体系爆炸下限。因此,若要全面反映瓦斯/煤尘复合爆炸下限变化规律,并定量评估瓦斯/煤尘复合爆炸下限变化规律,还需综合考虑煤尘粒径、组分、含湿量、点火能量、初始湍流强度等因素对其爆炸下限的影响。

此外,煤矿井下防护措施的设计和实施常需要以具体的瓦斯/煤尘复合爆炸下限值作为依据。但是,受限于瓦斯和煤尘浓度配比影响,瓦斯/煤尘复合爆炸下限是动态值,工作人员无法将所有浓度配

比下的复合爆炸下限进行测量。因此,构建能够快速、准确计算复合爆炸下限的预测模型显得尤为重要。目前,已有的预测模型均为半经验公式,在使用过程中均有自身的局限性^[16-18]。因此,验证已有预测模型对瓦斯/煤尘复合体系的适用性,并提出修正方案或新的预测模型对于煤矿爆炸灾害防治具有重要意义。

基于此,笔者选用2种不同组分的煤尘(烟煤和无烟煤),在20 L球爆炸装置中开展了瓦斯/煤尘复合爆炸下限变化规律研究。通过对比分析2种不同组分的瓦斯/煤尘两相体系爆炸下限变化规律的异同,以期阐明煤尘组分在瓦斯/煤尘复合爆炸下限变化规律中的作用。此外,笔者还基于试验结果对比分析了3种已有爆炸下限预测模型对笔者选取的2种瓦斯/煤尘两相体系的适用性,为建立更加精确的瓦斯/煤尘复合爆炸下限预测模型提供了参考和依据。

1 试验装置及材料

1.1 试验装置

试验在标准20 L球形容容器内开展,如图1所示。该装置主要由爆炸容器、喷粉系统、点火系统、控制和数据采集系统组成。爆炸容器为20 L钢制双层容器,夹层中循环通入恒温水或油来保证容器内温度恒定,减少容器内温度变化带来的试验误差。喷粉系统由容积0.6 L的粉尘仓,气粉两相阀和分散阀组成。试验采用10 kJ化学点火头进行点火,点火延迟时间为60 ms。试验开始后,首先将20 L球形容容器抽至一定真空度,然后采用道尔顿分压法配置甲烷,并向粉尘仓中充入空气至2 MPa;最后启动控制和数据采集系统,依次进行喷粉、点火和压力数据采集。为保证数据可靠性,每组试验至少重复3次。

1.2 试验材料

为了对比分析煤尘组分在瓦斯/煤尘复合爆炸下限变化规律中的作用,试验选取了烟煤和无烟煤

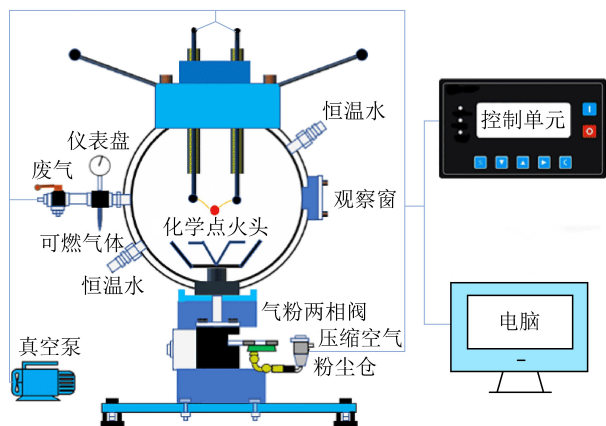
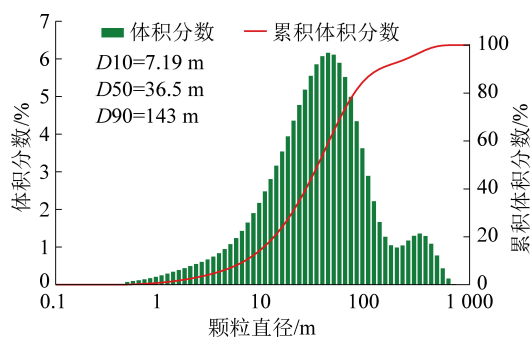


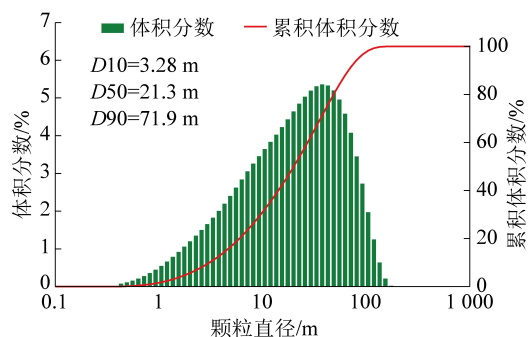
图1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental equipment

2种组分区别较大的煤尘作为研究对象,其粒径和形貌特征如图2和图3所示,其中,烟煤中位粒径为 $36.5\text{ }\mu\text{m}$,无烟煤中位粒径为 $21.3\text{ }\mu\text{m}$ 。本研究以高纯度 CH_4 代替瓦斯。



(a) 烟煤



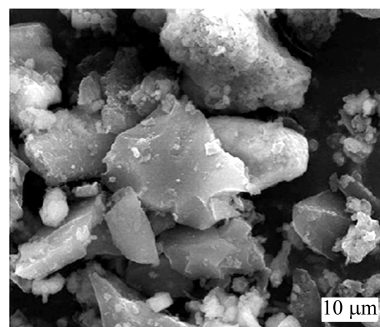
(b) 无烟煤

D_{10} : 粒径小于它的颗粒占 10%; D_{50} : 中位径或中值粒径; D_{90} : 粒径小于它的颗粒占 90%

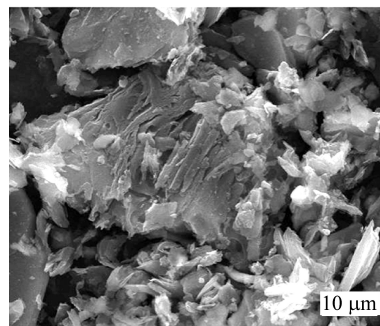
图2 煤尘粒径分布

Fig.2 Particle size distribution of coal dust

试验采用 5E-MAG6700 分析仪对 2 种煤尘的组分进行了分析,结果见表 1。由表 1 可知,烟煤中挥发分、水分、固定碳含量均高于无烟煤,但灰分低于无烟煤。在相同倍数的扫描电镜图中,烟煤颗粒表面比无烟煤有更多的孔隙,吸附着更多的挥发分介质,在爆炸瞬间可快速的热解和析出挥发分。



(a) 烟煤



(b) 无烟煤

图3 煤尘扫描电镜图

Fig.3 Coal dust scanning electron microscope

表1 煤尘组分分析结果

Table 1 Analysis results of coal dust composition

煤样	水分/%	灰分/%	挥发分/%	固定碳/%
无烟煤	0.42	36.68	2.33	60.57
烟煤	4.50	20.60	13.90	61.00

2 试验结果与分析

2.1 爆炸下限测量

依据 EN 14034 标准^[19],试验采用压力准则作为介质爆炸发生与否的判定标准^[20]。对于单相粉尘和气粉两相体系,EN 14034 规定当容器中粉尘爆炸压力 $P_{\text{ex}} \geq (P_{\text{ig}} + 0.05)$ 时,即可认为容器内粉尘或两相体系发生了爆炸,其中点火头压力 $P_{\text{ig}} = P_0 + \Delta P_{\text{ig}}$ 。本试验中的压力均为绝压, P_0 为初始压力,取 $P_0 = 0.101\text{ }3\text{ MPa}$; ΔP_{ig} 为点火头引起的压升,约为 0.07 MPa 。粉尘最小爆炸浓度以及两相体系爆炸下限取 3 次连续试验均不能发生爆炸的最大粉尘浓度。对于单相瓦斯,试验采用与粉尘和两相体系相同的试验条件和压力准则对其爆炸下限进行测量。这是因为在相同的试验条件下测量煤尘、瓦斯和瓦斯/煤尘复合爆炸下限,更有利于科学体现煤尘、瓦斯和瓦斯/煤尘复合爆炸下限之间的关联性,进而更加合理地反应瓦斯/煤尘复合爆炸下限变化规律。试验选取的瓦斯体积分数梯度为 1%,以期更加准确地反应瓦斯/煤尘复合爆炸下限变化规律。

笔者测得的煤尘、瓦斯以及不同瓦斯浓度下的瓦斯/煤尘复合爆炸下限值见表2和表3。由表2可知,无烟煤的爆炸下限为 70 g/m^3 ,大于烟煤的 50 g/m^3 ,而由粒径分布图可知烟煤的中位粒径为 $36.5\text{ }\mu\text{m}$,大于无烟煤的 $21.3\text{ }\mu\text{m}$ 。一般情况下,在一定粒径范围内,粉尘粒径越小,其最小爆炸浓度越低。本文中无烟煤粒径较小,但其爆炸下限却大于烟煤。主要是因为烟煤挥发分含量更高,较低浓度的烟煤即可释放出足够的挥发分维持火焰的传播。

表2 煤尘、瓦斯爆炸下限

Table 2 Lower explosion limit of coal dust and gas

介质名称	爆炸下限
无烟煤	70 g/m^3
烟煤	50 g/m^3
甲烷	4 %

表3 瓦斯-无烟煤、瓦斯-烟煤复合爆炸下限

Table 3 Lower explosion limit of gas-anthracite mixture and gas-bituminous mixture

瓦斯体积分数/%	爆炸下限/ $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	
	烟煤	无烟煤
1	40	50
2	20	20
3	5	5
4	0	0

2.2 瓦斯/煤尘复合爆炸下限变化规律

根据表2和表3中的数据,得到烟煤和无烟煤与甲烷复合爆炸下限变化规律,如图4所示。由图可知,较低浓度的瓦斯即可导致2种煤尘最小爆炸浓度的显著降低,且最小爆炸浓度均随瓦斯浓度的增大而逐渐减小。当瓦斯体积分数增大到4%时,2种煤尘的最小爆炸浓度均降低至 0 g/m^3 ,这是因为在本文试验条件下,4%的甲烷即可导致爆炸的发生。

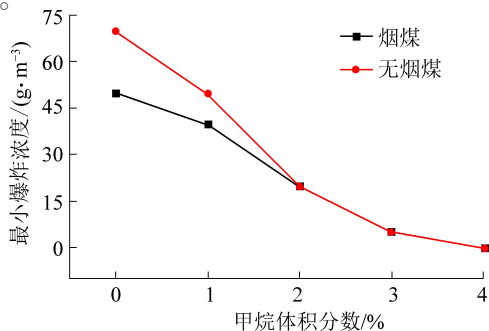


图4 不同挥发分煤尘最小爆炸浓度随甲烷体积分数变化曲线

Fig.4 Minimum explosion concentrations of different volatile coal dust with methane concentration

上述结果同样表明,低于爆炸下限的瓦斯和低于最小爆炸浓度煤尘混合之后,仍然具有爆炸危险性,这是因为煤尘爆炸需要经过热解析出 CH_4 、 C_2H_6 、 H_2 、 CO 等可燃性气体、与空气混合、引燃并形成稳定传播的火焰等过程。低浓度煤尘析出的可燃气体浓度较低,不足以维持火焰的稳定传播,而一定浓度瓦斯的添加提高了可燃气体浓度,进而促使低浓度煤尘形成稳定传播的火焰,最终导致爆炸的发生。

2.3 煤尘组分对复合爆炸下限影响的差异性分析

观察图4还可以发现,当瓦斯体积分数增大至2%以后,2种煤尘的最小爆炸浓度趋于相同。这是因为煤尘燃烧本质是热解析出挥发分进行的气相燃烧反应。随着瓦斯体积分数的提升,瓦斯逐渐在两相爆炸过程中起主导作用,而由煤尘组分的不同导致的两相体系爆炸下限之间的差异减小。

但是,由于2种煤尘的初始最小爆炸浓度不同(烟煤: 50 g/m^3 ,无烟煤: 70 g/m^3),则相同体积分数瓦斯引起2种煤尘最小爆炸浓度的降低幅度不同,即对于不同组分的煤尘,瓦斯对其最小爆炸浓度的影响具有差异性。为了进一步分析煤尘组分对瓦斯/煤尘复合爆炸下限影响的差异性,以煤尘浓度 c 与其最小爆炸浓度 c_m 的比值 c/c_m 和瓦斯体积分数为坐标轴,得到2种不同组分煤尘最小爆炸浓度随瓦斯体积分数变化对比,如图5所示。

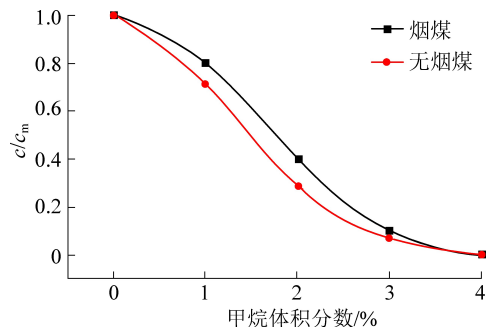


图5 不同挥发分煤尘最小爆炸浓度随甲烷体积分数变化对比

Fig.5 Comparison of minimum explosion concentrations of different volatile coal dust with methane concentration

由图5可知,相同浓度的瓦斯诱导无烟煤最小爆炸浓度的降低幅度更大,即相同体积分数瓦斯对无烟煤最小爆炸浓度的影响更为显著。因为煤尘燃烧本质是热解析出挥发分进行的气相燃烧反应,因此挥发分含量是影响瓦斯/煤尘复合爆炸特性的最重要因素。挥发分含量越小,加入相同体积分数的瓦斯对其爆炸特性的影响越大。由表2可知,笔者选取的烟煤挥发分含量为13.9%,远大于无烟煤的挥发分含量2.3%。因此,瓦斯对烟煤最小爆炸浓度的影响弱于无烟煤。

2.4 预测模型适用性分析

目前常见的两相体系爆炸下限预测模型有以下3种:

Le Chatelier's 模型^[21]:

$$\frac{c}{c_m} + \frac{y}{y_1} = 1 \quad (1)$$

Bartknecht 模型^[22]:

$$\frac{c}{c_m} = \left(\frac{y}{y_1} - 1 \right)^2 \quad (2)$$

Jiang 模型^[23-24]:

$$\frac{c}{c_m} = \left(\frac{y}{y_1} - 1 \right)^{(1.12 \pm 0.03) \frac{K_{St}}{K_G}} \quad (3)$$

式中: c 为复合体系中粉尘质量浓度, g/m^3 ; y 为复合体系中可燃气体系积分数,%; c_m 为粉尘最小爆炸浓度, g/m^3 ; y_1 为可燃气体系爆炸下限,%; K_{St} 为煤尘粉尘爆炸指数; K_G 为气体爆炸指数。

以 c/c_m 和 y/y_1 为坐标轴,得到3种爆炸下限预测公式和试验测量结果对比,如图6所示。图6中,每种预测方法的曲线将坐标面分为2个区,即曲线下方的非爆区和曲线上方的可爆区。

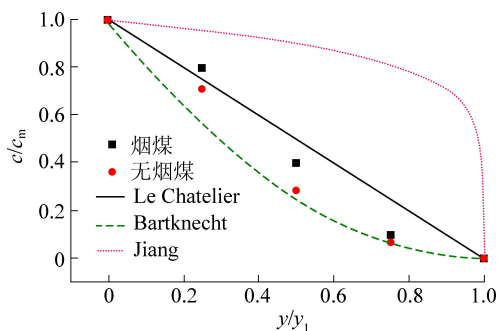


图6 爆炸下限预测模型与不同挥发分煤尘瓦斯两相体系测量结果对比

Fig. 6 Comparison of the lower explosion limits between measured results and predictive values

由图6可知,笔者选取的2种瓦斯/煤尘两相体系爆炸下限均位于Jiang模型的非爆区内,且与预测值偏差较大,即Jiang模型对于笔者选取的2种瓦斯/煤尘两相体系均不适用。所有试验结果也几乎全部位于Le Chatelier模型的非爆区内,只是偏差值相比Jiang模型较小,但是随着两相体系中甲烷浓度逐渐升高时,偏差值也越来越大。但对于Bartknecht模型,所有试验结果均位于可爆区内,即Bartknecht模型预测结果偏于保守。随着两相体系中甲烷浓度 y_1 逐渐升高时,Bartknecht模型预测精准度越来越高。2种不同挥发分煤尘相比,含有低挥发分煤尘复合体系的实际值更加贴近于预测值,即Bartknecht

模型更适用于瓦斯/低挥发分煤尘复合爆炸下限预测。

综合可知,3种预测模型均不能精确预测瓦斯/煤尘复合爆炸下限,但Bartknecht模型适用性相对较好,且更适用于瓦斯/低挥发分煤尘复合爆炸下限预测。因此,构建新的瓦斯/煤尘复合爆炸下限预测模型具有必要性,且新模型需要考虑煤尘组分对瓦斯/煤尘复合爆炸下限变化规律的影响。

3 结 论

基于标准20 L球形爆炸容器,分别对不同组分煤尘与瓦斯的复合爆炸下限进行测试,对比分析其复合爆炸下限变化规律,得到结论如下:

1) 瓦斯的添加可导致煤尘最小爆炸浓度显著降低,即低于爆炸下限的瓦斯和低于最小爆炸浓度的煤尘混合之后仍然具有爆炸危险性。

2) 相同浓度的瓦斯诱导下,低挥发分煤尘最小爆炸浓度的降幅更大,即瓦斯对低挥发分煤尘最小爆炸浓度的影响更为显著。

3) 3种预测模型均不能精确预测瓦斯/煤尘复合爆炸下限,相比Le Chatelier模型和Jiang模型,Bartknecht curve模型适用性较好,且更适用于瓦斯/低挥发分煤尘复合体系。

参考文献 (References):

- [1] SONG Y, NASSIM B, ZHANG Q. Explosion energy of methane/deposited coal dust and inert effects of rock dust [J]. Fuel, 2018, 228: 112-122.
- [2] CHEN D L, SUN J H, WANG Q S, et al. Combustion behaviors and flame structure of methane/coal dust hybrid in a vertical rectangle chamber [J]. Combustion Science and Technology, 2008, 180: 1518-1528.
- [3] YIN W, FU G, YANG C, et al. Fatal gas explosion accidents on Chinese coal mines and the characteristics of unsafe behaviors: 2000-2014 [J]. Safety Science, 2017, 92: 173-179.
- [4] ENGLER K O V. BEITRAGE Zur KENNTNISS Der Staubexplosionen [J]. Chemische Industrie, 1885: 171-173.
- [5] CASHDOLLAR K L. Coal dust explosibility [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1996, 9(1): 65-76.
- [6] 刘 义, 孙金华, 陈东梁, 等. 甲烷-煤尘复合体系中煤尘爆炸下限的试验研究 [J]. 安全与环境学报, 2007, 7(4): 129-131. LIU Yi, SUN Jinhua, CHEN Dongliang, et al. On lower limit of explosive coal dust in coal dust mixture with methane [J]. Chinese Journal of Safety and Environment, 2007, 7(4): 129-131.
- [7] 李润之. 瓦斯煤尘共存条件下的煤尘云爆炸下限 [J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(4): 913-917. LI Runzhi. Minimum explosive concentration of coal dust cloud in the coexistence of gas and coal dust [J]. Explosion and Impact, 2018, 38(4): 913-917.

- [8] 王磊,李润之. 瓦斯/煤尘共存条件下爆炸极限变化规律试验研究[J]. 中国矿业,2016,25(4):87-90.
WANG Lei, LI Runzhi. Experimental study on the variation law of explosion limit under the coexistence of gas and coal dust [J]. China Mining Industry, 2016, 25(4): 87-90.
- [9] 王者鹏. 低浓度瓦斯对煤尘爆炸下限的影响研究[J]. 煤矿安全,2017,48(2):26-32.
WANG Zhepeng. Experimental study on the explosion limits change laws under gas and coal dust coexisting conditions [J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(2): 26-32.
- [10] CAO W, HUANG L, ZHANG J, *et al.* Research on characteristic parameters of coal-dust explosion [J]. Procedia Engineering, 2012, 45: 442-447.
- [11] 曹卫国,徐森,梁济元,等. 煤粉尘爆炸过程中火焰的传播特性[J]. 爆炸与冲击,2014,34(5):586-593.
CAO Weiguo, XU Sen, LIANG Jiyuan, *et al.* Characteristics of flame propagation during coal dust cloud explosion [J]. Explosion and Impact, 2014, 34(5): 586-593.
- [12] MITTAL M. Limiting oxygen concentration for coal dusts for explosion hazard analysis and safety[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26(6): 1106-1112.
- [13] NORMAN F, BERGHMANS J, VERPLAETSEN F. The dust explosion characteristics of coal dust in an oxygen enriched atmosphere[J]. Procedia Engineering, 2012, 45(2): 399-402.
- [14] 何朝远. 瓦斯煤尘共存条件下爆炸危险性的研究[J]. 煤矿安全,1996,12(3):5-6.
HE Zhaoyuan. Study on the explosion risk under the coexistence of gas and coal dust [J]. Safety in Coal Mines, 1996, 12(3): 5-6.
- [15] AJRASH M J, ZANGANEH J, MOGHTEADARI B. Effects of ignition energy on fire and explosion characteristics of dilute hybrid fuel in ventilation air methane[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 40: 207-216.
- [16] ADDAI E K, GABEL D, KRAUSE U. Lower explosion limit of hybrid mixtures of burnable gas and dust[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 36: 497-504.
- [17] KHALILI I, DUFAUD O, POUPEAU M, *et al.* Ignition sensitivity of gas-vapor/dust hybrid mixtures [J]. Powder Technology, 2012, 217: 199-206.
- [18] SANCHIRICO R, RUSSO P, DI Sarli V, *et al.* On the explosion and flammability behavior of mixtures of combustible dusts [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2015, 94: 410-419.
- [19] BRITISH Standard EN 14034. Determination of explosion characteristics of dust clouds[S]. UK, 2004.
- [20] 喻健良,纪文涛,孙会利,等. 甲烷/石松子粉尘混合体系爆炸下限的变化规律[J]. 爆炸与冲击,2017,37(6):924-930.
YU Jianliang, JI Wentao, SUN Huili, *et al.* Summary and prospect of research on theory and technology for coal mine dust control in China [J]. Explosion and Impact, 2017, 37(6): 924-930.
- [21] CASHDOLLAR K L, HERTZBERG M. 20-L explosibility test chamber for dusts and gases [J]. Review of Scientific Instruments, 1985, 56(4): 596-602.
- [22] BARTKNECHT W. Explosions: course, prevention, protection [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012.
- [23] JIANG J, LIU Y, MASHUGA C V, *et al.* Validation of a new formula for predicting the lower flammability limit of hybrid mixtures [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 35: 52-58.
- [24] JIANG J, LIU Y, MANNAN M S. A correlation of the lower flammability limit for hybrid mixtures [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 32: 120-126.