DOI: 10.11883/bzycj-2016-0331 文章编号: 1001-1455(2018)04-0913-05

瓦斯煤尘共存条件下的煤尘云爆炸下限*

李润之
(中煤科工集团重庆研究院有限公司火灾爆炸防治研究分院,重庆 400037)

摘要: 近年来瓦斯煤尘共存条件下的爆炸事故呈多发趋势。运用 20 L 爆炸特性测试系统,对瓦斯煤尘共存复合体系的爆炸特性进行实验研究,得到了瓦斯在不同点火能量、静止及湍流状态下的爆炸下限,以及不同条件下煤尘的爆炸下限。结果表明:随着瓦斯浓度的增加,煤尘的爆炸下限呈指数衰减;瓦斯浓度存在某临界点,高于此临界点,复合体系爆炸过程中瓦斯起主导作用,表现为"强瓦斯"性,反之,煤尘起主导作用,表现为"强煤尘"性。研究结论为有效预防煤矿井下瓦斯煤尘共存爆炸事故提供重要的理论依据。

关键词: 瓦斯爆炸;煤尘爆炸;瓦斯煤尘共存;爆炸下限
中图分类号: O389;X936 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

近年来,随着中国煤矿机械化水平的不断提升,煤矿开采强度逐步增加,工作面绝对瓦斯涌出量变大,产尘量急剧增大,瓦斯煤尘共存条件下的爆炸事故,特别是瓦斯矿井中瓦斯煤尘共存爆炸事故呈多发趋势。对瓦斯煤尘共存相互促进着火爆炸机理缺乏足够认识是造成该类事故多发的主要原因。

多年来,许多学者针对瓦斯煤尘共存条件下的爆炸特性开展了大量研究。Torrent 等[1]、Amyotte 等[2-3]研究了甲烷对煤尘爆炸特性的影响,得出甲烷会使煤尘的爆炸下限和最小点火能量降低,煤尘粒径减小和煤尘挥发分增加也会使煤尘的爆炸下限降低。曹卫国等[4]在 20 L 球形密闭容器内进行了煤粉爆炸特性研究,探讨了不同点火具质量对煤粉爆炸的影响。樊保龙[5]利用 10 m^3 爆炸罐实验系统,对比分析了甲烷-空气和甲烷-煤粉-空气混合物的爆炸特征参数。李江波[6]对密闭管道内甲烷-煤粉复合爆炸火焰的传播过程和爆炸强度进行了研究。陈东梁[7]利用燃烧管道对甲烷-煤尘复合火焰的传播特性、机理及其影响因素进行了深入研究。候万兵[8]利用水平管道式气体-粉尘爆炸实验装置,研究了煤尘-瓦斯混合物的最大爆炸压力、最大压力上升速率、爆炸威力以及爆炸压力在管道内的传播规律等。以上研究大多针对瓦斯煤尘共存爆炸过程中爆炸压力、火焰等参数的变化规律。由于瓦斯煤尘共存条件下燃烧爆炸的反应机理异常复杂,针对瓦斯煤尘共存条件下爆炸极限变化规律的研究有待进一步深入研究。

本文中,采用 20 L 爆炸特性测试系统,对瓦斯煤尘共存条件下不同种煤尘的爆炸下限进行实验研究,以期为瓦斯煤尘共存条件下爆炸事故的预防和治理提供依据。

1 实验系统与实验方法

1.1 实验系统组成

实验所采用的 20 L 爆炸特性测试系统主要由爆炸罐体、喷尘系统、点火系统、数据采集系统、配气系统、除尘装置 6 部分组成,如图 1 所示。

实验系统符合粉尘云爆炸下限测定方法(GB/T 16425—1996)[9]的规定。其中,爆炸罐体容积 20 L,近球形,设计承压 3.0 MPa;储气仓容积 0.6 L,设计承压3.0 MPa;压力测试范围为 0～1.0 MPa,采集频率 1 kHz。

* **收稿日期**: 2016-10-31; **修回日期**: 2017-03-08
基金项目: 国家自然科学基金项目(51504285);
中国煤炭科工集团有限公司科技项目(2014QN010)
第一作者: 李润之(1981—),男,博士,副研究员,runzhi_li@126.com。

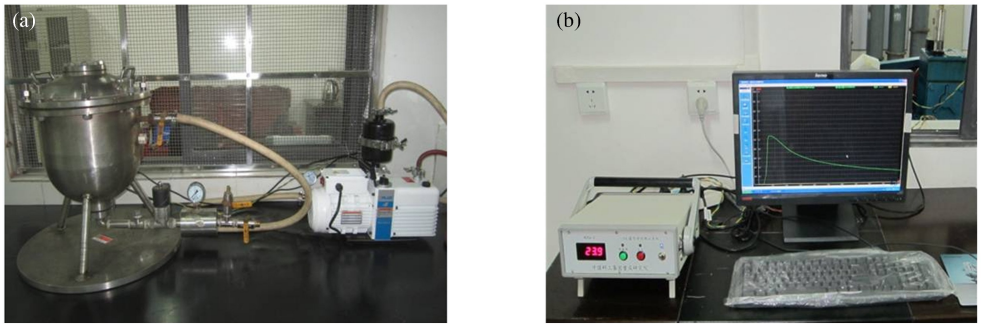


图 1 20 L 爆炸特性测试系统

Fig. 1 20 L explosion test system

1.2 实验方法

根据 GB/T 16425—1996 中的规定,在进行粉尘爆炸下限测定时,采用化学点火药头进行点火,点火能量为 10 kJ,实验所用粉尘粒度须不高于 75 μm,水分的质量分数不超过 10%。因此实验前将各煤尘样品进行研磨,利用 200 目标准筛进行筛分,并对其进行烘干处理。

由于瓦斯的主要成分为 CH_4,实验过程中以高纯度的 CH_4 代替瓦斯。实验过程中,首先将一定浓度的 CH_4-空气混合气充入爆炸罐体对罐体内的空气进行置换,然后对爆炸罐体抽真空至绝对压力为 0.04 MPa;将煤尘样品放入粉尘仓,将储气罐压力充至 2.0 MPa;启动数据采集系统,用以控制煤尘的喷入、点火以及爆炸过程中压力数据的采集。所测最大爆炸压力值均为 3 次实验数据的平均值。

1.3 爆炸判据

在低点火能量(10 J)、单纯瓦斯的爆炸实验中,是否发生爆炸的判别标准参考美国标准材料实验协会 ASTM E918[10] 的规定,即将点火后压力升高 7%及以上作为发生爆炸的判断依据。

在高点火能量(10 kJ)单纯瓦斯、煤尘爆炸及瓦斯对煤尘爆炸的影响实验中,依据 GB/T 16425—1996 的规定,即认为爆炸压力大于或等于 0.15 MPa 时发生爆炸。

2 瓦斯的爆炸下限

在瓦斯爆炸下限以上,单纯的瓦斯会发生爆炸,因此在研究瓦斯浓度对煤尘爆炸下限的影响时,将瓦斯浓度控制在相同工况的爆炸下限以下。这就需要首先考察相同实验工况下瓦斯的爆炸下限。

2.1 静止及湍流状态下瓦斯爆炸下限

在进行可燃气体爆炸特性实验时,由于可燃气体的点火能量较低,故一般选用 10 J 的点火源[11]。首先,在常温常压条件下,运用 20 L 爆炸特性测试系统,对点火前气体在静止状态下的瓦斯爆炸下限进行测试,不同瓦斯体积分数(φ_{CH_4})下瓦斯的最大爆炸压力(p_{max})如图 2 所示。

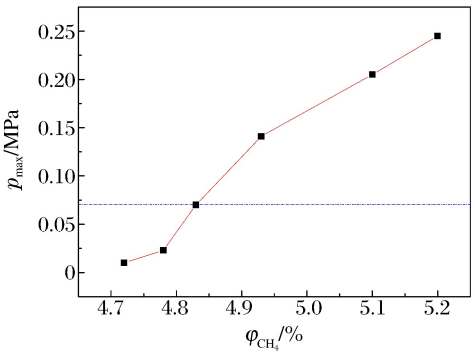


图 2 静止状态下的最大爆炸压力

Fig. 2 Maximum gas explosion pressure in static state

采用高压气流将粉尘仓内的煤尘喷入爆炸罐体内形成煤尘云,此时系统内的气体由静止状态变为湍流状态。由此模拟了粉尘爆炸特性实验时的湍流状态,在常温常压条件下对 2.0 MPa 喷气压力下瓦斯的爆炸下限进行测试,不同瓦斯体积分数下瓦斯的最大爆炸压力如图 3 所示。

从图 2 和图 3 中可以看出:当爆炸前的气体状态为静态时,随着瓦斯体积分数的增大,其最大爆炸压力平缓增大;而当气体状态为湍流状态时,在爆炸下限附近存在一个分界点,当瓦斯体积分数低于此

分界点时，在本实验条件下点火将不会发生爆炸，即点火后压力几乎不上升，当瓦斯体积分数高于此分界点时，点火后将发生爆炸，此后随着瓦斯体积分数的增大，最大爆炸压力逐渐增大，即湍流状态对瓦斯爆炸的影响非常明显。通过测试，得到常温常压、10 J 点火能量条件下，静止和湍流状态的瓦斯爆炸下限分别为 4.83%和 5.10%。

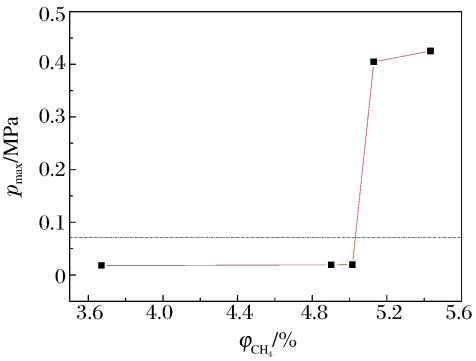


图 3　湍流条件下的最大爆炸压力

Fig. 3　Maximum gas explosion pressure in turbulent state

2.2　高点火能量条件下的瓦斯爆炸下限

在煤尘爆炸极限影响实验中，点火源为 10 kJ 化学点火药头，此时纯瓦斯爆炸的爆炸下限将发生明显变化，因此在点火能量为 10 kJ 的条件下对瓦斯的最大爆炸压力进行测试，结果见图 4。

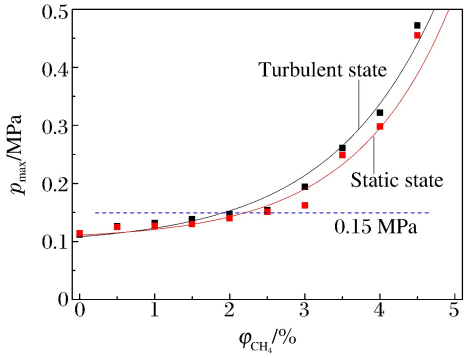


图 4　最大爆炸压力变化规律

Fig. 4　Variations of maximum explosion pressure

参考粉尘爆炸下限的判定准则，静止和湍流状态下瓦斯的爆炸下限分别为 2.15%和 1.94%，湍流状态的爆炸下限略低于静止状态。

工程应用中常采用 5.00%作为瓦斯爆炸下限，而实验测量值却远远低于该经验值。其主要原因在于：(1) 本实验所用的高能量点火药头的点火能量高达 10 kJ，是普通可燃气体 10 J 电点火能量的 1 000 倍，并且在点火药头的燃烧过程中出现大范围火焰，使低浓度瓦斯气体更容易着火；(2) 湍流效应致使更低浓度的瓦斯-空气混合气体发生爆炸。

该实验结果也为煤矿的安全生产提供了重要参考。一般情况下认为，井下瓦斯体积分数低于 5.00%时不会发生井下瓦斯爆炸。但是由实验可知，对于高能量引火源来说，5.00%的瓦斯气体浓度已远远超过发生爆炸的最低瓦斯浓度，对应的爆炸压力已非常大，会造成巨大的破坏效应。

3　瓦斯对煤尘爆炸下限的影响

3 种不同挥发分的煤尘在与瓦斯共存条件下的最大爆炸压力变化情况如图 5 所示，其中 C_{coal} 为煤尘质量浓度。3 种煤尘的工业分析数据列于表 1，其中 V_{ad}、M_{ad}、A_{ad}、F_{cad} 分别代表空气干燥基挥发分、空气干燥基水分、空气干燥基灰分以及空气干燥基固定碳含量。

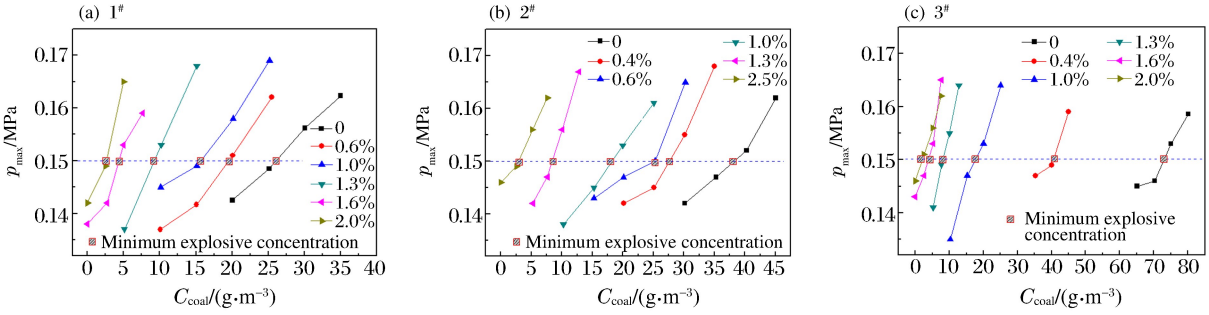


图 5　最大爆炸压力随煤尘云浓度的变化

Fig. 5　Maximum explosion pressure vs. coal dust concentration

从图 5 中可以看出：在同组实验中，随着煤尘浓度的增大，煤尘的最大爆炸压力增加，对应浓度的煤尘云从不满足爆炸判定准则（p_{max}=0.15 MPa）逐渐过渡为满足爆炸判定准则，煤尘云发生爆炸；最大爆

炸压力-煤尘浓度曲线与爆炸判定线交点的横坐标即为该工况下煤尘的爆炸下限。在同种煤尘实验中，随着混入瓦斯体积分数的增加，煤尘爆炸下限降低，所得不同条件下的煤尘爆炸下限如表 2 所示。

表 1 煤尘的工业分析结果

Table 1 Industrial analytic results of coal dusts

煤样	V_{ad}/%	M_{ad}/%	A_{ad}/%	F_{cad}/%
1#	37.45	3.15	14.81	44.59
2#	13.76	1.89	21.93	62.42
3#	22.13	3.18	48.15	26.64

表 2 不同瓦斯浓度下煤尘的爆炸下限

Table 2 Minimum explosive concentration of coal dust at different gas concentrations

φ_{CH_4}/%	煤尘爆炸下限/(g·m^{-3})			φ_{CH_4}/%	煤尘爆炸下限/(g·m^{-3})		
	1#	2#	3#		1#	2#	3#
0	28.40	37.78	73.20	1.3	10.27	8.43	7.43
0.4		27.18	42.90	1.6	5.43		3.17
0.6	19.60	24.80		2.0	2.47		2.51
1.0	16.20	21.70	20.10	2.5		2.24	

图 6 给出了 3 组实验数据的变化及拟合情况。可以看出：煤尘 3# 完全遵照指数函数规律变化，即爆炸下限随瓦斯体积分数的增加先快速衰减再缓慢衰减；而煤尘 1# 和 2# 的变化情况虽与煤尘 3# 类似，但相应的指数函数变化规律并不明显，可以近似认为遵循指数函数变化规律。

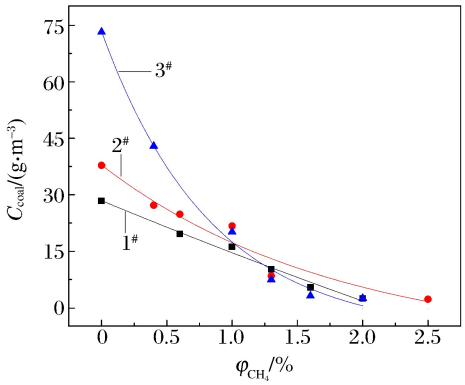


图 6 瓦斯对煤尘爆炸下限的影响

Fig. 6 Influence of gas on lower limit of explosive coal dust concentration

从表 2 和图 6 中还可以看出：在没有瓦斯参与的情况下（$\varphi_{CH_4}=0$），3 种煤尘的爆炸下限分别为 73.20、37.78 和 28.40 g/m^3，煤尘爆炸下限的差异较大；而在少量瓦斯气体参与爆炸的情况下，对应的煤尘爆炸下限分别为 42.90 g/m^3（$\varphi_{CH_4}=0.4\%$）、27.18 g/m^3（$\varphi_{CH_4}=0.4\%$）和 19.60 g/m^3（$\varphi_{CH_4}=0.6\%$），仍具有十分明显的差异性；随着瓦斯体积分数的增加，煤尘的爆炸下限降低。在较低瓦斯体积分数（0～1.0%）下，煤质组成成分对爆炸极限的影响较大，瓦斯煤尘共存的复合爆炸体系表现为“强煤尘”性。当瓦斯体积分数较高（大于 1.5%）时，煤尘的爆炸下限接近于零（小于 5.00 g/m^3），即使实验中使用很少的煤尘量也可能发生爆炸。根据上述实验结果，在有瓦斯参与爆炸的情况下，一旦瓦斯的体积分数超过该区间（1.0%至瓦斯爆炸下限），虽然对应工况的煤尘爆炸下限继续降低，但是煤种对爆炸下限的影响很小，煤质成分对煤尘爆炸下限的影响不再明显，相应的瓦斯煤尘共存复合爆炸体系表现为“强瓦斯”性。

4 结 论

（1）在常温常压且点火能量为 10 J 的条件下，20 L 爆炸容器内静止和湍流状态下的瓦斯爆炸下限分别为 4.83%和 5.10%；而在常温常压且点火能量为 10 kJ 的条件下，20 L 爆炸容器内静止和湍流状态下的瓦斯爆炸下限分别为 1.94%和 2.15%。

(2)在瓦斯煤尘共存条件下，随着瓦斯体积分数的增加，煤尘的爆炸下限呈指数函数衰减。

(3)在瓦斯煤尘共存的复合体系中，瓦斯的体积分数存在某临界点：高于此临界点，复合体系爆炸过程中瓦斯起主导作用，表现为“强瓦斯”性；低于此临界点，煤尘起主导作用，表现为“强煤尘”性。

(4)研究结论可为有效预防煤矿井下瓦斯煤尘共存爆炸事故提供重要的理论依据。

参考文献：

[1] TORRENT J G, FUCHS J C. Flammability an explosion propagation of methane-coal dust hybrid mixtures[C]// Proceedings of International Conference of Safety in Mines Research Institute. Pretoria, South Africa, 1989,23:11-15.

[2] AMYOTTE P R, MINTZ K J, PEGG M J, et al. Laboratory investigation of the dust explosibility characteristics of three Nova Scotia coals[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1991,4(2):102-109.

[3] AMYOTTE P R, MINTZ K J, PEGG M J, et al. The ignitability of coal dust-air and methane-coal dust-air mixtures[J]. Fuel, 1993,72(5):671-679.

[4] 曹卫国，黄丽媛，梁济元，等. 球形密闭容器中煤粉爆炸特性参数研究[J]. 中国矿业大学学报，2014,43(1):113-119. CAO Weiguo, HUANG Liyuan, LIANG Jiyuan, et al. Research on characteristic parameters of coal dust explosion in a spherical sealed container[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014,43(1):113-119.

[5] 樊保龙. 大尺度条件下甲烷-空气和煤尘-空气混合及爆炸特性研究[D]. 北京：北京理工大学，2015.

[6] 李江波. 密闭管内甲烷-煤粉复合爆炸实验研究[D]. 辽宁大连：大连理工大学，2010.

[7] 陈东梁. 甲烷/煤尘复合火焰传播特性及机理的研究[D]. 合肥：中国科学技术大学，2007.

[8] 侯万兵. 煤尘-瓦斯混合物爆炸压力研究[D]. 太原：中北大学，2010.

[9] 国家技术监督局. 粉尘云爆炸下限浓度测定方法：GB/T16425－1996[S]. 北京：中国标准出版社，1996.

[10] Standard practice for determining limits of flammability of chemicals at elevated temperature and pressure: ASTM E918-83[S]. American Society for Testing Materials, 1999.

[11] 赵衡阳. 气体和粉尘爆炸原理[M]. 北京：北京理工大学出版社，1996.

Minimum explosive concentration of coal dust cloud in the coexistence of gas and coal dust

LI Runzhi

(*Fire and Explosion Prevention Research Branch, China Coal Technology and Engineering Group Chongqing Research Institute, Chongqing* 400037, *China*)

Abstract: The present work was carried for the prevention of increasingly ever prevalent gas explosion accidents that had occurred in the coexistence of gas and coal dust in recent years. Using a 20 L explosion test system, we studied experimentally the explosive characteristics of the coexisting gas and coal dust and obtained the lower limit of gas explosion under different ignition energies, static and turbulent conditions and the lower limit concentration of coal dust explosion under different conditions. The results show that with the increase of gas concentration, the minimum explosive concentration of coal dust cloud decreases exponentially and that there is a critical gas concentration, in higher than which gas plays a leading role in the process of explosion, shown as the so-called “strong gas”. Otherwise, coal dust plays the leading role, which is characterized by the “strong coal dust”. The conclusions can serve as an important theoretical basis for preventing the coal mine gas and coal dust explosion.

Keywords: gas explosion; coal dust explosion; coexistence of gas and coal dust; minimum explosive concentration

(责任编辑　王　影)