DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-0924-07

甲烷/石松子粉尘混合体系爆炸下限的变化规律*

喻健良,纪文涛,孙会利,闫兴清,张新燕
(大连理工大学化工机械与安全学院,辽宁 大连 116024)

摘要:基于标准 20 L 球形爆炸装置,在相同测试条件下,分别测量了石松子粉尘、甲烷和不同浓度配比的甲烷/石松子粉尘混合体系爆炸下限,并将测试结果与 Le Chatelier's law、Bartknecht curve、Jiang method 等混合体系爆炸下限预测结果进行了对比。结果表明:低于爆炸下限的甲烷和低于爆炸下限的石松子粉尘混合后仍具有爆炸危险性。石松子粉尘爆炸下限随混合体系中甲烷体积分数的增高而减小。Le Chatelier's law、Bartknecht curve、Jiang method 均不能准确预测甲烷/石松子粉尘混合体系爆炸下限。Le Chatelier's law 对甲烷体积分数 φ 与甲烷爆炸下限 φ_L 之比 $\varphi/\varphi_L<0.5$ 的混合体系爆炸下限的预测值偏小,而对 $\varphi/\varphi_L>0.5$ 的混合体系预测值偏大;Bartknecht curve 在预测 $\varphi/\varphi_L>0.5$ 的混合体系爆炸下限时适用性较好,而对于 $\varphi/\varphi_L<0.5$ 的混合体系预测值偏小;Jiang method 不适用于预测甲烷/石松子粉尘混合体系爆炸下限。

关键词:粉尘爆炸;爆炸下限;气粉混合体系;石松子;甲烷
中图分类号:O389;X392 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

随着生产工艺和流程的复杂化,可燃气体和粉尘共存工况不断出现[1-2],气粉混合爆炸风险逐渐增加。准确获得混合体系爆炸特性参数,是开展风险评价、灾害防治的基础。在多种爆炸特性参数中,爆炸下限作为表征可爆介质敏感程度的参数非常重要。目前,常见可燃气体及粉尘的爆炸下限已基本通过大量的标准实验测量得到。然而,混合体系爆炸下限受气粉浓度配比影响,完全通过实验方法测量其数值工作量过大。因此,如何依据单相介质爆炸下限数值,预测混合体系的爆炸下限,成为了研究人员研究的重点。

K. L. Cashdollar 等[3-4]实验发现低于爆炸下限的甲烷和煤尘混合后仍具有爆炸危险性,基于研究结果提出了关联气体爆炸下限 φ_L、粉尘爆炸下限 ρ_M、气体体积分数 φ(%)和粉尘质量浓度 ρ 的混合体系爆炸下限预测公式 Le Chatelier' law:

$$\frac{\rho}{\rho_M}+\frac{\varphi}{\varphi_L}=1 \tag{1}$$

W. Bartknecht[5]研究发现 Le Chatelier' law 预测值与实验值偏差较大,并基于实验结果对 Le Chatelier' law 进行了改进,建立了如下二阶曲线方程 Bartknecht curve:

$$\frac{\rho}{\rho_M}=\left(\frac{\varphi}{\varphi_L}-1\right)^2 \tag{2}$$

E. K. Addai 等[6]、I. Khalili 等[7]、R. Sanchirico 等[8]研究发现,Le Chatelier' law 和 Bartknecht curve 两种预测方法在实际应用中均存在较大误差,其中 Le Chatelier' law 仅对具有相近绝热燃烧火焰温度的气体和粉尘混合体系具有较好的适用性[9]。

J. Jiang 等[10-11]在容积为 36 L 的容器中研究了多种混合体系爆炸下限变化规律,并在考虑初始湍流的前提下建立了一个关于气体爆炸指数 K_G 和粉尘爆炸指数 K_{st} 的混合体系爆炸下限预测公式:

$$\frac{\rho}{\rho_M}=\left(1-\frac{\varphi}{\varphi_L}\right)^{(1.12\pm0.03)\frac{K_{st}}{K_G}} \tag{3}$$

* **收稿日期**:2016-03-17;**修回日期**:2016-07-20
基金项目:国家自然科学基金项目(51574056)
第一作者:喻健良(1963—),男,博士,教授,博导,yujianliang@dlut.edu.cn。

上述工作在一定程度上明确了气粉混合体系相比单相更容易发生爆炸，也初步建立了混合体系爆炸下限的预测方法。然而，已建立的预测方法结果差异较大，在可靠性上还有待深入验证。分析认为，爆炸极限受到测试条件如装置体积、点火能量、初始温度及压力、湍流程度等的影响很大。已开展的实验研究多数并未对气体、粉尘和气粉混合体系构建相同的初始测试条件，特别是气体爆炸极限多为静态时的测量结果，而粉尘及气粉两相爆炸极限为强湍流时测量得到。使用不同测试条件下获得的可燃气体、粉尘以及气粉混合体系爆炸下限构建这些参数之间的关系并不科学，也无法准确反应其内在的规律特征。

因此，创建相同测试条件，基于相同测试装置，在相同初始条件下测量气体、粉尘和气粉混合体系爆炸特性参数，是定量衡量混合体系与单相爆炸极限的科学途径。甲烷作为生产生活中常见的可燃气体，其物化特性及爆炸特性已被较为准确地掌握。石松子粉尘因其较好的分散性和流动性，其爆炸特性具有较好的稳定性和规律性，是国际有关粉尘爆炸规范中的标定粉尘，常用于粉尘爆炸系列研究[12-13]。因此，选用甲烷和石松子粉尘作为研究对象，不仅有利于实验结果的对比和参考，而且有利于气粉混合体系爆炸下限变化规律的探索和总结。

基于此，本文中在标准 20 L 球形粉尘爆炸试验装置内，构建相同的测试条件，分别测量甲烷、石松子粉以及气粉混合体系的爆炸下限，分析混合体系爆炸下限变化规律，并探讨现有预测公式的适用性。

1　实验装置

试验在标准 20 L 球形粉尘爆炸装置内开展，流程如图 1 所示，由爆炸容器、扬尘系统、点火系统、控制和数据采集系统组成。爆炸容器为 20 L 不锈钢制双层夹套球形容器，扬尘系统由 0.6 L 粉尘仓、气粉两相阀、扬尘喷嘴组成。点火系统采用化学点火头，实验前置于容器中心。实验时，当粉尘仓中的气体压力达到设定压力之后，开启气粉两相阀，粉尘仓中的高压气流携带粉尘进入球形容器，并在分散阀的作用下均匀地分散在球形容器之中。

为了构建与石松子粉尘相同的初始湍流条件，实验采用预混气体扬尘的方式配制甲烷/空气预混气体和甲烷/石松子粉尘/空气混合体系。即在实验前，向粉尘仓内充入一定压力的甲烷，然后向粉尘仓充

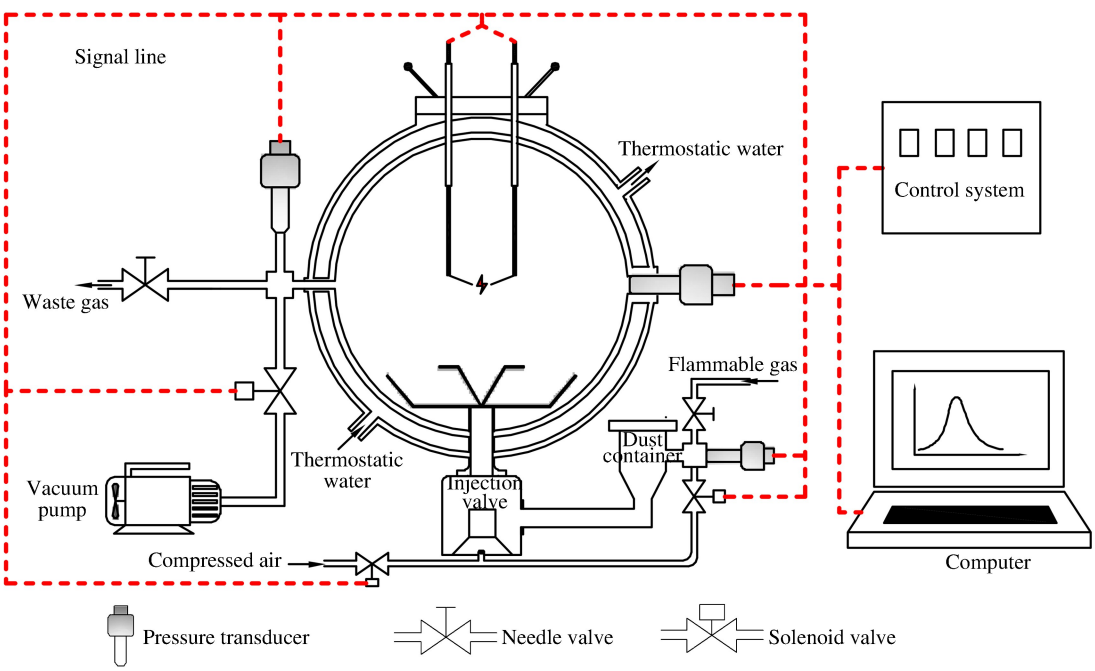

图 1　实验装置示意图

Fig. 1　Schematic of experimental setup

入空气至设定压力 2 MPa。甲烷、空气的量由道尔顿分压定律确定,扬尘 60 ms 后点燃可燃介质。

标准 EN14034-3:2006[14] 以及 GB/T-16425[15] 均规定粉尘爆炸极限测试采用点火能量为 10 kJ 的化学点火头点火,但已有研究表明,采用 10 kJ 的化学点火头容易引起"过驱效应"[16],且 10 kJ 的化学点火头引起的压力效应会局部掩盖气粉混合体系的爆炸压力变化规律[17]。因此,本实验采用点火能量为 500 J 的化学点火头进行点火。该点火头引起的压力峰值约为 8 kPa,相对较小,在很大程度上避免了点火头对混合体系爆炸压力变化规律的影响,并且该点火头在实验过程中能够实现爆炸介质的稳定点火。

采用德国产 EHPMC131 型高频压力传感器测量爆炸压力,量程为 2 MPa,采集频率为 5 kHz。甲烷纯度为 99.99%,石松子粉尘中位直径为 38.7 μm。实验前均进行干燥处理,其粒径和结构分布如图 2~3 所示。为了确保实验结果的准确性,每个实验工况至少重复 3 次。

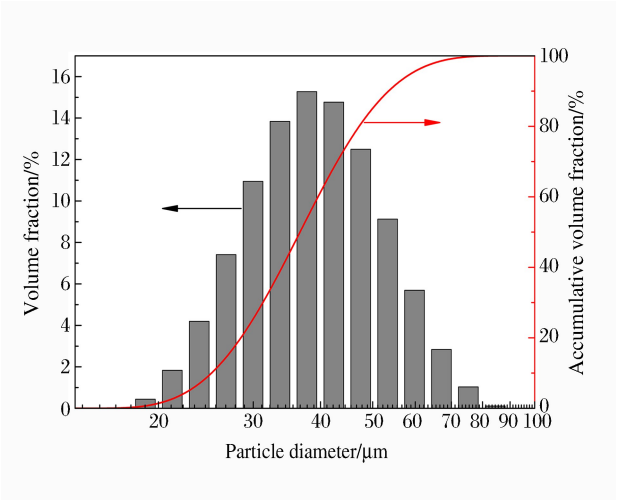

图 2 石松子粉尘粒径分布图

Fig. 2 Diameter distribution of lycopodium dust

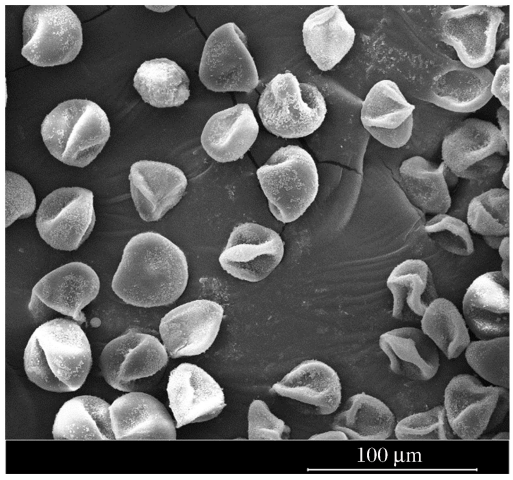

图 3 石松子粉尘扫描电镜图

Fig. 3 Scanning electron microscope of lycopodium dust

2 实验结果与分析

2.1 判定准则的选择

介质是否发生爆炸通常采用火焰和压力判定准则[18-19]。火焰判定准则需结合图像技术,仅适用于可视工况。由于本装置观察视窗较小,无法准确捕捉容器内火焰传播动态,但可以精确记录容器内压力变化规律,因此采用压力变化为判定准则。

EN 1839 中规定,当可燃气体被点燃后容器内爆炸压力提升率 $R_p \geqslant 5\%$ 时,即可认为发生了爆炸,其中:

$$R_p = (p_{ex} - p_0 - \Delta p_{ig})/p_0 \tag{4}$$

式中:p_{ex} 为爆炸压力峰值,p_0 为初始压力,取 $p_0 = 101.3$ kPa,Δp_{ig} 为点火头引起压升值,本实验中 $\Delta p_{ig} \approx 8$ kPa。可燃气体爆炸下限取爆炸发生与不发生的两个浓度的平均值。

EN14034-3:2006 规定当容器中粉尘爆炸压力 $p_{ex} \geqslant (p_{ig} + 50$ kPa)时,即可认为容器内粉尘发生了爆炸,其中 $p_{ig} = p_0 + \Delta p_{ig}$。粉尘爆炸下限取不能发生爆炸的最小粉尘质量浓度。

2.2 爆炸下限测量结果

选取 0.2% 作为甲烷体积分数变化梯度,实验测得不同浓度的甲烷爆炸压力提升率 R_p 如图 4 所示。由图 4 可知,本实验工况下甲烷爆炸下限 φ_L 为(5.0%+4.8%)/2=4.9%。选取 10 g/m^3 作为粉尘浓度变化梯度,实验测得不同浓度的石松子粉尘爆炸压力峰值如图 5 所示。由图 5 可知,本实验工况下石松子粉尘爆炸下限 $\rho_M = 180$ g/m^3。

选取 10 g/m^3 作为粉尘浓度变化梯度,不同浓度的甲烷对应的石松子粉尘爆炸下限测试结果如图 6

所示。由图 6 可知，本实验工况下当混合体系中甲烷浓度分别为 1%、2%、3%、4%时，石松子粉爆炸下限分别为 170、120、30、5 g/m^3。

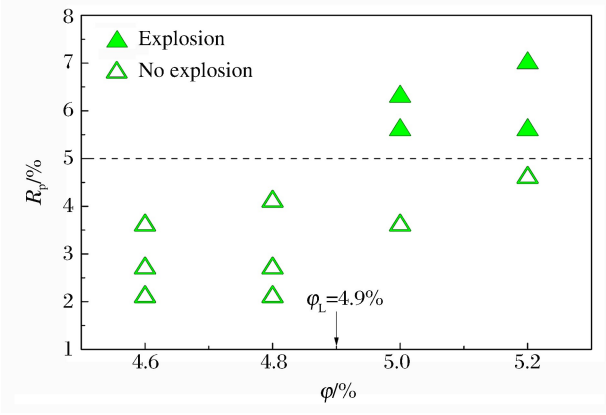

图 4　不同浓度的甲烷爆炸压力提升率

Fig. 4　Explosion pressure rise rate of methaneat different values of concentration

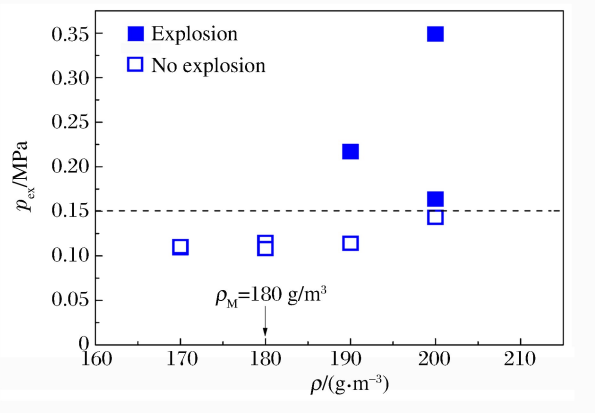

图 5　不同浓度的石松子粉尘爆炸压力峰值

Fig. 5　Maximum explosion pressure of lycopodium dust at different values of concentration

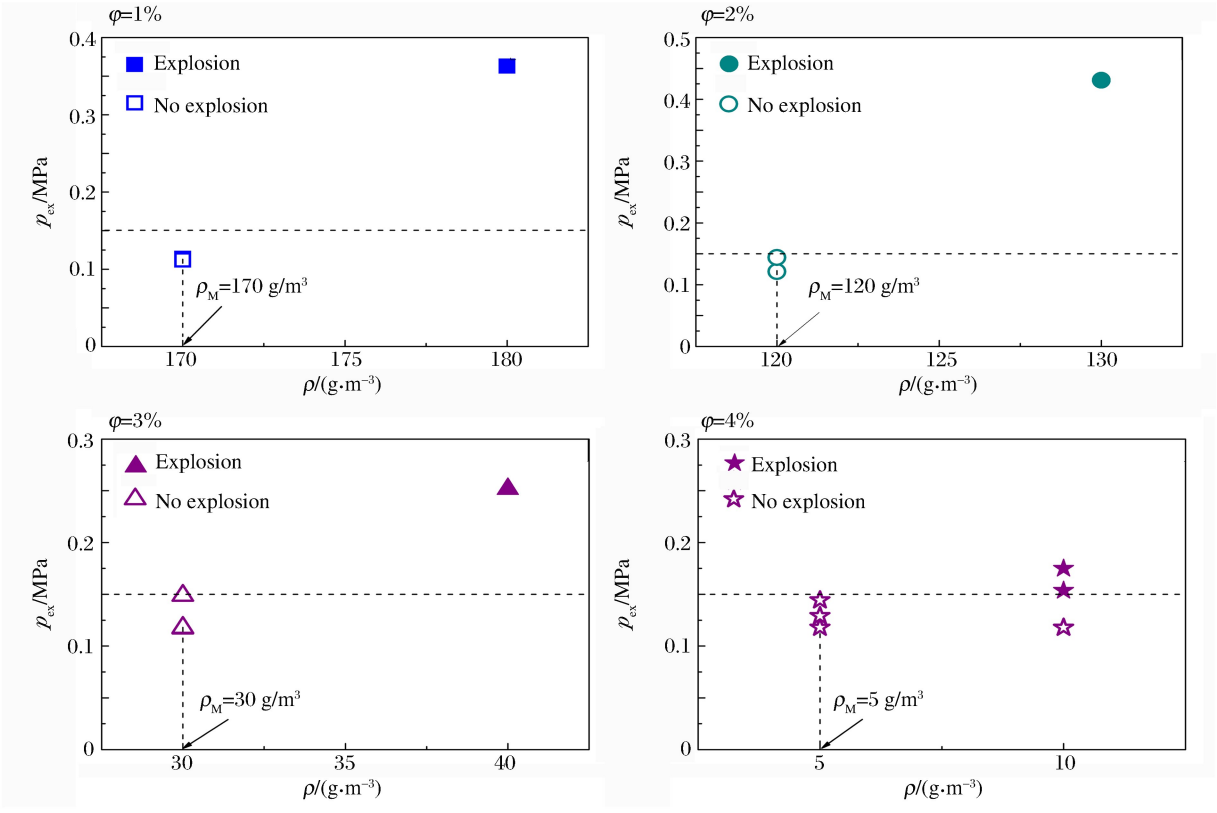

图 6　不同甲烷浓度条件下石松子粉尘爆炸下限

Fig. 6　Minimum explosion concentrations of lycopodium dust mixed with methane at different values of concentration

2.3　甲烷/石松子粉尘混合体系爆炸下限变化规律分析

图 7 为混合体系中石松子粉尘爆炸下限 ρ_M随甲烷体积分数 φ 的变化规律。由图可知，随甲烷浓度的增加，石松子粉爆炸下限逐渐降低。从变化趋势上看，当甲烷体积分数 φ 与甲烷爆炸下限 φ_L的比值在 0.2～0.6 时，甲烷浓度的改变将引起石松子粉尘爆炸下限的显著变化；当 $\varphi/\varphi_L<0.2$ 或 $\varphi/\varphi_L>0.6$ 时，甲烷浓度对石松子粉尘爆炸下限的影响并不明显。

上述结果也说明，低于爆炸下限的可燃气体和粉尘混合后仍具有爆炸危险性。如图 8 所示，分析认

为石松子粉尘爆炸会经过热解或蒸发、与空气混合、预混气体燃烧、火焰传播形成爆炸等过程。低于爆炸下限的粉尘热解或蒸发形成的可燃气体浓度过低,不足以维持火焰的稳定传播。而可燃气体的添加增加了混合体系中可燃气体浓度,进而促使低浓度的粉尘形成稳定传播的火焰,最终导致爆炸。

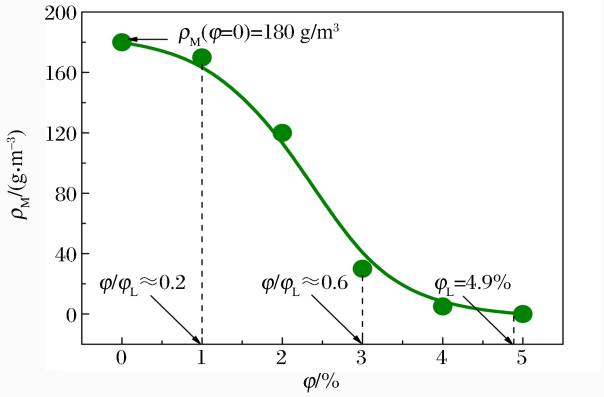

图 7 石松子粉尘爆炸下限随甲烷体积分数变化曲线

Fig. 7 Minimum explosion concentrations of lycopodium dust varying with methane concentration

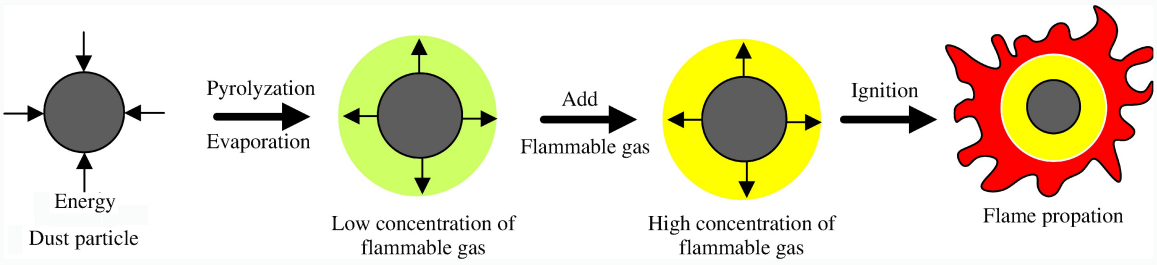

图 8 气粉混合体系爆炸发展过程

Fig. 8 Explosion development process of hybrid mixtures of burnable dust and gas

2.4 气粉混合体系爆炸下限预测公式适用性分析

由于 Jiang method 涉及可燃气体和粉尘的爆炸指数,实验首先对 500 J 点火能量、60 ms 点火延迟时间条件下的甲烷爆炸指数 K_G 和石松子粉爆炸指数 K_{st} 进行了测试,得到甲烷爆炸指数为 41.1 MPa·m/s,远大于静态条件下的甲烷爆炸指数 5.5 MPa·m/s;石松子粉尘爆炸指数为 5.8 MPa·m/s,远小于相同初始条件下的甲烷爆炸指数。

以 ρ/ρ_M 和 φ/φ_L 为坐标轴,得到 3 种爆炸下限预测公式和实验测量结果对比图如图 9 所示。图 9 中,每种预测方法的曲线将坐标面分为两个区,即曲线下方的非爆区和曲线上方的可爆区。

由图 9 可知,当混合体系中甲烷体积分数 $\varphi/\varphi_L<0.5$ 时,混合体系爆炸下限处于 Le Chatelier's law 可爆区内,此时 Le Chatelier's law 预测值小于实测值,偏于保守;当混合体系中甲烷体积分数 $\varphi/\varphi_L>0.5$ 时,混合体系爆炸下限处于 Le Chatelier's law 非爆区内,即此时 Le Chatelier's law 不适用于预测甲烷/石松子粉尘混合体系爆炸下限。甲烷/石松子粉尘混合体系爆炸下限全部处于 Bartknecht curve 可爆区内,并且当 $\varphi/\varphi_L>0.5$ 时,Bartknecht

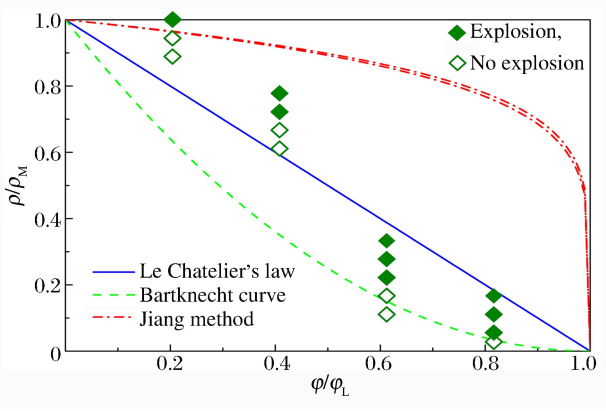

图 9 爆炸下限预测公式与测量结果对比

Fig. 9 Comparison between measured results and prediction formulas

curve 预测值和实测值较为接近，当 $\varphi/\varphi_L<0.5$ 时，Bartknecht curve 预测值和实测值偏差略大。与 Bartknecht curve 相反，甲烷/石松子粉尘混合体系爆炸下限几乎全部处于 Jiang method 的非爆区内，即 Jiang method 不适用于甲烷/石松子粉尘混合体系爆炸下限的预测。因此，Le Chatelier's law、Bartknecht curve、Jiang method 三条曲线均不能准确预测甲烷/石松子混合体系爆炸下限，其适用性仍需进一步验证和讨论。在实际工业应用中，通过上述三种预测方法计算得到的混合体系爆炸下限只能作为参考，而不能作为安全防护设计的依据。

3　结　论

基于标准 20 L 球形爆炸装置，在常温常压、500 J 点火能量、60 ms 点火延迟时间等相同初始条件下，分别对甲烷、石松子粉尘和不同浓度配比的甲烷/石松子粉尘混合体系爆炸下限进行了测试和分析，得到结论如下：

(1)低于爆炸下限的甲烷和低于爆炸下限的石松子粉尘混合后仍具有爆炸危险性。

(2)甲烷可诱导石松子粉尘爆炸下限的降低，且随着混合体系中甲烷含量的增加，石松子粉尘爆炸下限逐渐降低。当混合体系中甲烷体积分数 φ 与甲烷爆炸下限 φ_L 的比值 $0.2<\varphi/\varphi_L<0.6$ 时，甲烷含量对石松子粉尘爆炸下限的影响最为显著。

(3)Le Chatelier's law、Bartknecht curve、Jiang method 三条曲线均不能准确预测甲烷/石松子混合体系爆炸下限，在实际工业应用中需谨慎使用。

参考文献：

[1] Sanchirico R, Russo P, Saliva A, et al. Explosion of lycopodium-nicotinic acid-methane complex hybrid mixtures [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014,36:505-508.

[2] Addai E K, Gabel D, Krause U. Experimental investigation on the minimum ignition temperature of hybrid mixtures of dusts and gases or solvents[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016,301:314-326.

[3] Cashdollar K L, Hertzberg M. 20-L explosibility test chamber for dusts and gases[J]. Review of Scientific Instruments, 1985,56(4):596-602.

[4] Cashdollar K L, Sapko M J, Weiss E S, et al. Laboratory and mine dust explosion research at the Bureau of Mines [J]. ASTM Special Technical Publication, 1987,958:107-123.

[5] Bartknecht W. Explosions: course, prevention, protection[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012.

[6] 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.

[7] Khalili I, Dufaud O, Poupeau M, et al. Ignition sensitivity of gas-vapor/dust hybrid mixtures[J]. Powder Technology, 2012,217:199-206.

[8] 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.

[9] Garcia-Agreda A, Di Benedetto A, Russo P, et al. Dust/gas mixtures explosion regimes[J]. Powder Technology, 2011,205(1/2/3):81-86.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 彭于怀，黄丽媛，曹卫国，等. 石松子粉尘爆炸危险性及抑爆研究[J]. 爆破器材，2014,43(6):16-21.
Peng Yuhuai, Huang Liyuan, Cao Weiguo, et al. Hazards and suppressions research on lycopodium dust explosion[J]. Explosive Materials, 2014,43(6):16-21.

[13] 黄丽媛，曹卫国，徐森，等. 石松子粉最小点火能试验研究[J]. 爆破器材，2012,41(5):9-11.
Huang Liyuan, Cao Weiguo, Xu Sen, et al. Experimental research on minimum ignition energy of lycopodium

[J]. Explosive Materials, 2012,41(5):9-11.

[14] European Committee for Standardization. Determination of explosion characteristics of dust clouds—Part 3: determination of the lower explosion limit LEL of dust clouds: EN 14034-3: 2006[S]. Bruxelles, Belgium, 2006.

[15] 煤炭工业部煤炭科学研究总院. 粉尘云爆炸下限浓度测定方法:GB/T 16425-1996[S]. 北京:中国标准出版社, 1996.

[16] Going J E, Chatrathi K, Cashdollar K L. Flammability limit measurements for dusts in 20-L and 1-m^3 vessels[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2000,13(3/4/5):209-219.

[17] Garcia-Agreda A, Benedetto A D, Russo P, et al. Dust/gas mixtures explosion regimes[J]. Powder Technology, 2011,205(1):81-86.

[18] Brisish standard. Determination of explosion limits of gases and vapours: EN 1839: 2012[S]. London, UK, 2012.

[19] Tschirschwitz R, Schröder V, Brandes E, et al. Determination of explosion limits—Criterion for ignition under non-atmospheric conditions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015,36:562-568.

Experimental investigation of the lower explosion limit of hybrid mixtures of methane and lycopodium dust

Yu Jianliang, Ji Wentao, Sun Huili, Yan Xingqing, Zhang Xinyan

(*School of Chemical Machinery and Safety Engineering, Dalian University of Technology, Dalian* 116024, *Liaoning, China*)

Abstract: In this work, lower explosion limits of methane, lycopodium dust and methane-lycopodium dust hybrid mixtures were determined under the same testing conditions based on the 20 L sphere vessel. The measured results were compared with the values calculated by the Le Chatelier's law, the Bartknecht curve and the Jiang method. The results showed that the combination of methane prepared in concentrations below its lower explosion limit and the lycopodium dust in concentrations below its minimum explosion concentration rate was still a mixture with a hazard of explosion. The minimum explosion concentration of lycopodium dust decreased with the increase of methane concentration in the hybrid mixtures. The lower explosion limit of methane-lycopodium dust hybrid mixtures couldn't be accurately calculated by the Le Chatelier's law, the Bartknecht curve or the Jiang method. The lower explosion limit of hybrid mixtures of methane and lycopodium dust calculated by the Le Chatelier's law were smaller than the measured values for the mixtures with the methane concentration $\varphi/\varphi_L<0.5$, but bigger for the mixtures with the methane concentration $\varphi/\varphi_L>0.5$. The Bartknecht curve was suitable for predicting the lower explosion limit of the hybrid mixtures with the methane concentration $\varphi/\varphi_L>0.5$. But for the hybrid mixtures with a methane concentration $\varphi/\varphi_L<0.5$, the calculated values were smaller than the measured ones, whereas the Jiang method was unsuitable for predicting the lower explosion limit of the hybrid mixtures of methane and lycopodium dust.

Keywords: dust explosion; lower explosion limit; hybrid mixtures; lycopodium; methane

(责任编辑 曾月蓉)