DOI: 10.11883/bzycj-2016-0276
文章编号: 1001-1455(2018)01-0092-06

甲烷/石松子两相混合体系爆炸强度参数*

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

摘要: 基于改进的 20 L 球形粉尘爆炸装置,在相同初始条件下分别测量了甲烷、石松子粉尘和甲烷/石松子两相混合体系的爆炸压力、爆炸压力上升速率和爆炸指数等参数,系统研究了甲烷/石松子粉尘两相混合体系爆炸特性变化规律。结果表明:甲烷的添加能显著提高低质量浓度石松子粉尘爆炸压力而降低高质量浓度石松子粉尘爆炸压力;甲烷对石松子粉尘最大爆炸压力没有显著影响,但能显著提高石松子粉尘最大爆炸压力上升速率。甲烷/石松子粉尘混合体系爆炸指数高于单相石松子粉尘爆炸指数,但甲烷/石松子粉尘混合体系和单相石松子粉尘爆炸指数均低于单相甲烷爆炸指数。工业生产过程中应避免粉尘混入可燃气体以降低粉尘爆炸危险性。

关键词: 粉尘爆炸;气/粉尘两相体系;爆炸强度;甲烷;石松子
中图分类号: O381;X392 **国标学科代码**: 13035;6203020 **文献标志码**: A

随着工业的快速发展,可燃气体、粉尘共存的工况不断出现,如煤炭开采中的瓦斯与煤尘、制药行业的溶剂蒸气与药粉、印刷行业的溶剂蒸气与色素粉、塑料行业的乙烯与聚乙烯粉等[1-2]。气/粉两相混合体系爆炸事故已在工业粉尘爆炸事故总数中占相当比例[3]。因此,气/粉两相体系爆炸特性逐渐引起研究人员的关注。Cashdollar 等[4]、Dufaud 等[5]、Sanchirico 等[6]通过实验发现体积分数低于单相气体爆炸下限的可燃气体和可燃粉尘混合后可以被点燃,仍具有爆炸的危险性。Bartknecht 等[7]开展实验探索甲烷、丙烷和丁烷气体对纤维素粉爆炸强度作用规律,结果表明 3 种烷烃气体均能引起粉尘最大爆炸压力的上升。Denkevits 等[8]通过实验发现氢气/铝粉两相爆炸压力及压力上升速率与单相爆炸相比都显著提升。Amyotte 等[9-10]实验研究了乙烯/聚乙烯等两相体系的爆炸特性,得出乙烯的添加能够引起聚乙烯粉尘爆炸指数显著提升。Liu 等[11]利用 3.2 L 长方形容器研究甲烷/煤粉混合物的火焰传播,得出甲烷和煤粉共存显著加快了爆炸火焰传播速度,并且提高了最高火焰温度。上述研究从宏观上初步明确了可燃气体能够显著提高粉尘爆炸感度、强度等参数,即提高粉尘爆炸危险性。但现有的研究还无法解释气/粉两相体系爆炸参数的变化规律,需要继续深入开展研究。并且已开展的研究多关注低体积分数气体对粉尘爆炸特性的影响,而对高体积分数气体的影响关注较少。基于此,本文中采用改进的 20 L 球形粉尘爆炸装置,研究相比单相爆炸,气/粉两相体系爆炸强度特性参数的变化规律,以补充和完善气/粉两相爆炸理论及爆炸防治技术。

1 实验装置

实验基于改进的标准 20 L 球形粉尘爆炸装置开展。如图 1 所示,装置主要由爆炸容器、点火系统、配气系统、测量及数据采集系统等组成。本装置已在多个研究项目中使用,其可靠性已得到验证[12-13]。

爆炸容器为符合国际标准 E1226 的 20 L 球形容器,内部布置反弹式喷嘴、点火系统,底部安装气/粉两相阀。在 20 L 球形容器内使用 10 kJ 点火头容易出现过驱动效应,导致压力上升速率等测量结果明显偏大[14-15],且高能量点火头容易掩盖可燃气体对粉尘爆炸特性的影响[16]。因此,采用能量为 0.5 kJ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,相对较低,在很大程度上避免了

* **收稿日期**: 2016-09-09; **修回日期**: 2016-12-13
基金项目: 国家自然科学基金项目(51604057,51574056)
第一作者: 喻健良(1963—),男,博士,教授,博士生导师,yujianliang@dlut.edu.cn。

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。

在粉尘仓开口并连接甲烷气瓶使之满足气/粉两相体系测试要求。两相体系的配制流程为：(1)将一定量粉尘(根据粉尘质量浓度计算)置于粉尘仓，并密封。(2)将甲烷注入粉尘仓。注入的量依据道尔顿分压定律并结合压力数值计算。(3)启动真空泵，将 20 L 球形容器抽真空。(4)向粉尘仓充入高压空气至 2 MPa，甲烷与空气在粉尘仓中实现初次预混。(5)启动两相阀，一定体积分数的甲烷/空气携带粉尘高速喷入容器内，实现甲烷、石松子粉尘、空气的均匀混合。(6)60 ms 后，点火头点火点燃两相混合物。

本实验中采用预混气体扬尘的方式配置气/粉混合物，更有利于可燃气体、粉尘、空气的均匀混合。采用高频压力传感器测量球体主压力，其量程为 0～2 MPa，采集频率为 5 kHz，精度等级为 0.25 级。

采用分散性和流动性好的石松子粉尘和甲烷气体(纯度 99.99%)作为研究对象。石松子粉尘中位直径为 39 μm，其显微结构和粒径分布如图 2～3 所示。选取质量浓度为 50、100、150、200、250、500、750、1 000、1 250 g/m^3 的石松子粉和体积分数为 2%、4%、6%、8%、10%、12%的甲烷进行配比，开展实验。为了保证实验数据的可靠性，每组实验至少重复 3 次。

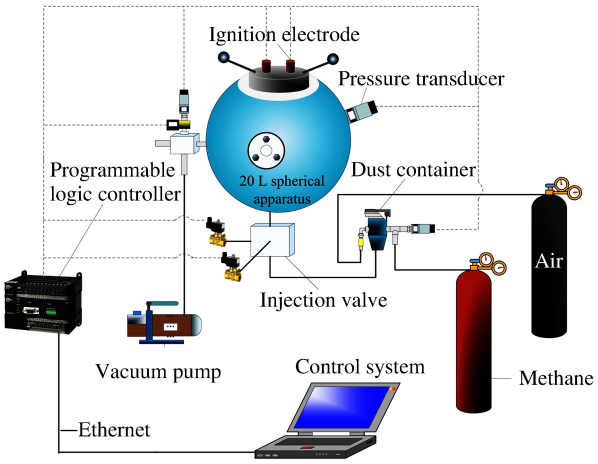


图 1　改进的标准 20 L 球形粉尘爆炸装置流程图

Fig. 1　Flow of modified standard 20 L spherical apparatus

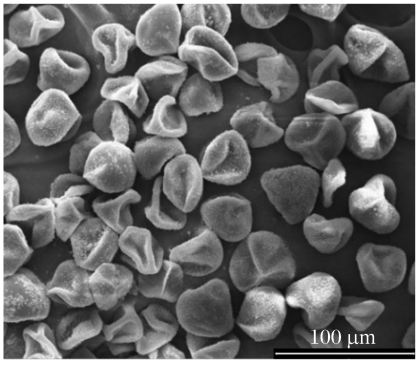


图 2　石松子粉尘扫描电镜结构图

Fig. 2　Scanning electron microscope photo of lycopodium dust

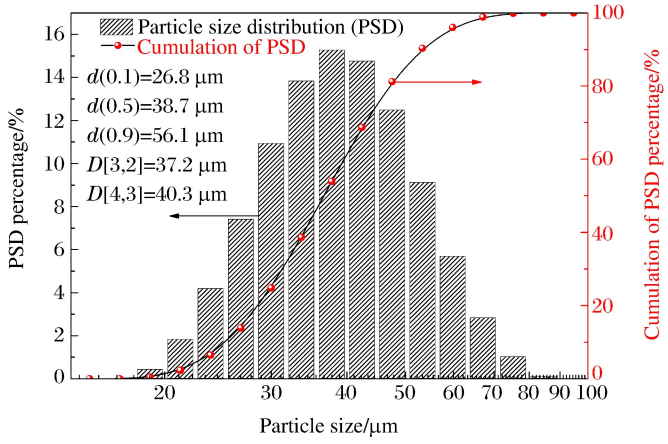


图 3　石松子粉尘粒径分布(D[50]=39 μm)

Fig. 3　Particle size distribution of lycopodium dust with D[50]=39 μm

2 结果与分析

2.1 甲烷对石松子粉尘最大爆炸压力的影响

图 4 为甲烷体积分数为 0%、2%、4%、6%、8%、10%和 12%时，石松子粉尘爆炸压力随粉尘质量浓度的变化。由图 4 可知，当粉尘质量浓度为 250 g/m^{3}时，向粉尘中添加体积分数为 2%、4%、6%和 8%的甲烷后，粉尘爆炸压力显著提高。这是因为低质量浓度的石松子粉尘爆炸属于贫燃料燃烧过程，其爆炸压力主要由反应物的数量控制，甲烷的加入：一方面，提高了反应物的数量；另一方面，加速粉尘分解，诱导粉尘燃烧更完全，释放出更多热量。当粉尘质量浓度升高至 750～1 250 g/m^{3}时，加入甲烷后，粉尘爆炸压力降低。这是因为高质量浓度石松子粉尘爆炸属于富燃料燃烧，其爆炸压力主要由体系中的氧气控制，甲烷的加入不仅提高了体系中的燃料含量，还降低了体系中的氧气含量，诱导体系中可燃介质的不完全燃烧，使燃烧释放出的热量减少。

图 5 为两相体系爆炸压力(平均值)随甲烷体积分数的变化。图中空心数据点为不同体积分数纯甲烷气体的爆炸压力，半实心圆形图标代表各甲烷体积分数对应的甲烷/石松子粉两相混合体系的最大爆炸压力，灰色区域上边界线对应的压力值为单相石松子粉尘最大爆炸压力。由图 5 可知，单相石松子粉最大爆炸压力为 681.2 kPa，对应的最佳爆炸质量浓度为 750 g/m^3。当甲烷体积分数分别为 2%、4%、6%时，两相体系最大爆炸压力分别为 632.4、656.4、679.6 kPa，对应的最佳爆炸质量浓度分别为 750、500 和 250 g/m^3。因此，两相体系的最大爆炸压力并未随甲烷含量的增加而显著提高。这是因为，对某一粉尘，其最大爆炸压力的定义为所有质量浓度下爆炸压力的最大值。尽管甲烷的加入能够提高低质量浓度粉尘的爆炸压力，但也会降低高质量浓度粉尘的爆炸压力，在所有质量浓度范围内，石松子粉尘最大爆炸压力受甲烷影响并不明显。当甲烷体积分数超过 8%时，如图 4(b)所示，两相体系的最大爆炸压力为单相甲烷爆炸压力，对应的最

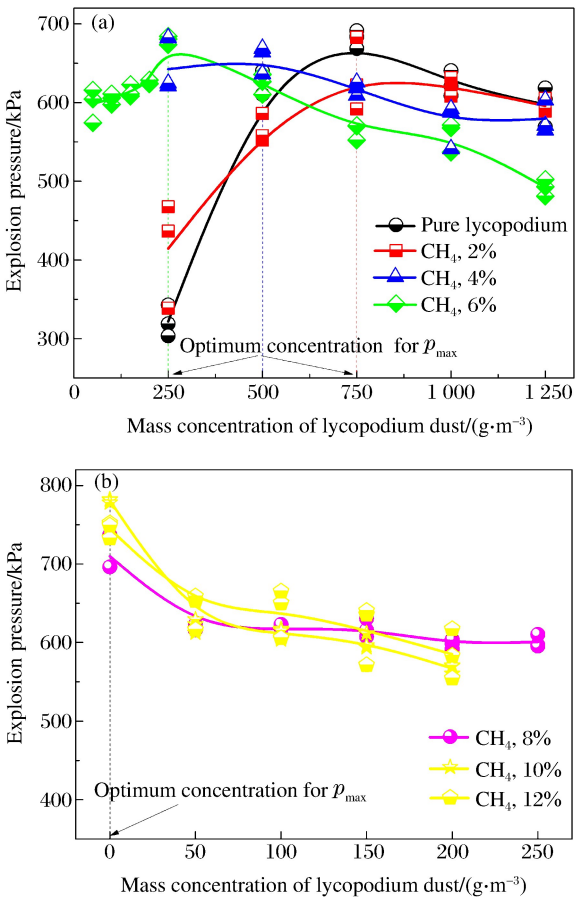


图 4 甲烷体积分数为 0%、2%、4%、6%、8%、10%和 12%时石松子粉尘爆炸压力

Fig. 4 Explosion pressure of lycopodium dust at the methane mass fractions of 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10% and 12%

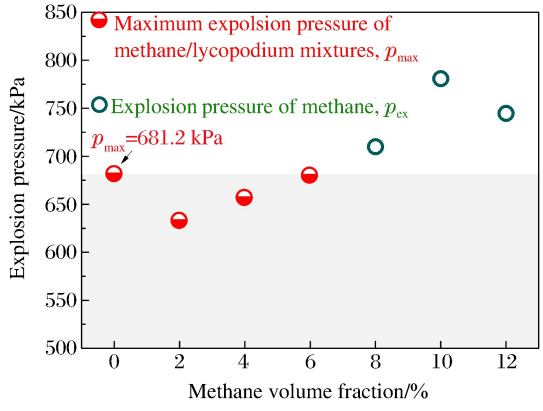


图 5 甲烷/石松子混合体系爆炸压力

Fig. 5 Explosion pressure of hybrid mixtures of methane and lycopodium dust

佳爆炸质量浓度为 0 g/m³。此时，体系中的甲烷体积分数接近或大于当量体积分数(9.5%)，该体系中的石松子粉尘更多的是作为吸热体来吸收甲烷燃烧放出的热量，因此向该体系中添加任何质量浓度的石松子都将降低体系爆炸压力。由图 5 还可以发现，单相石松子及两相混合体系的最大爆炸压力均小于单相甲烷的最大爆炸压力。

由前述可知，甲烷对石松子粉尘最佳爆炸质量浓度有显著影响。基于不同甲烷体积分数条件下的石松子粉尘最佳爆炸质量浓度，得出石松子粉尘最佳爆炸质量浓度 ρ_o 随甲烷体积分数的变化规律如图 6 所示。由图 6 可知，体系中加入体积分数为 2% 的甲烷时，石松子粉尘最佳爆炸质量浓度保持在 750 g/m³，即低体积分数甲烷对石松子粉尘最佳爆炸质量浓度的影响并不明显。随着甲烷体积分数进一步提高，石松子粉尘最佳爆炸质量浓度明显降低。因此，甲烷能够显著提高粉尘的爆炸敏感性和危险性。

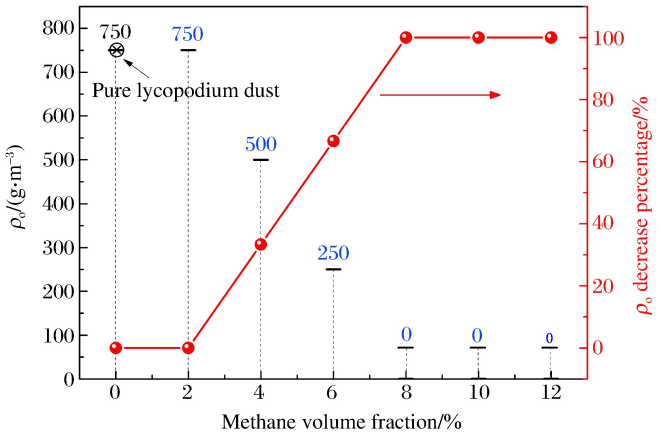


图 6　甲烷/石松子混合体系的最佳爆炸质量浓度随甲烷体积分数的变化

Fig. 6　Optimum mass concentration of methane/lycopodium mixtures varying with methane volume fraction

2.2　甲烷对石松子粉尘最大爆炸升压速率的影响

图 7 为石松子粉尘最大爆炸升压速率随甲烷体积分数的变化规律，图中数据均为 3 次实验的平均值。由图 7 可以看出，当甲烷体积分数为 0% 时，单相石松子粉尘最大爆炸升压速率 $(dp/dt)_{max}$ 为 18.81 MPa/s。石松子粉尘最大爆炸升压速率随甲烷体积分数的增大呈现升高趋势。当甲烷体积分数为 6% 且石松子粉尘质量浓度为 250 g/m³ 时，甲烷/石松子体系的最大爆炸升压速率达到极值，高达 28.21 MPa/s，与单相石松子粉尘相比提升了 50%。当甲烷体积分数在 8%～12% 范围内时，体系最大爆炸升压速率均为单相甲烷对应的爆炸升压速率(101.08、126.94 和 71.7 MPa/s)，远大于两相体系最大爆炸升压速率。即在该甲烷体积分数范围内，石松子粉尘作为吸热体存在，向甲烷中添加任何质量浓度的石松子粉尘均将诱导体系最大爆炸升压速率降低。

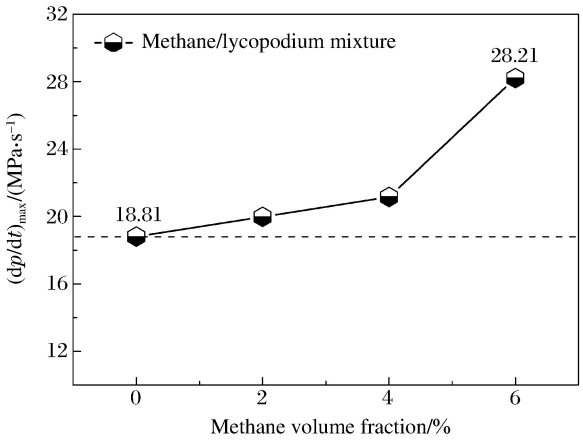


图 7　石松子粉尘最大爆炸升压速率随甲烷体积分数的变化

Fig. 7　Maximum explosion pressure rise rate of lycopodium dust at different methane volume fractions

石松子粉尘燃烧需要经过吸热、分解、与空气混合、引燃、火焰传播等过程，甲烷的加入：一方面，能够改变石松子粉尘燃烧过程中的限速反应，进而改变粉尘燃烧的动力学特征，加快粉尘燃烧速度；另一方面，气相甲烷与体系中的氧气首先发生氧化反应并释放出热量，该热量作用于体系中石松子粉尘，加速石松子粉尘热解，进而提高粉尘燃烧速度，燃烧速度的提高导致升压速率的升高。因此，甲烷的加入导致石松子粉尘爆炸升压速率明显升高，且该升高幅度随甲烷含量的增加而增大。

2.3 甲烷/石松子粉两相体系爆炸强度评估

爆炸指数 K_{st} 是直接评估粉尘爆炸强度的另一个重要参数。根据 NFPA68[17] 和 ASTM E1226[18] 标准,可通过立方根定律计算出甲烷、石松子粉尘及甲烷/石松子粉混合体系爆炸指数,结果见表 1,表中数据均为平均值。由表 1 可知,两相体系爆炸指数随甲烷含量的增加而增大,当甲烷体积分数 φ 为 6%且石松子粉尘质量浓度 ρ 为 250 g/m^3 时,甲烷/石松子粉两相体系爆炸指数最高,为 7.66 MPa·m·s^{-1}。

表 1 甲烷、石松子粉尘及甲烷/石松子混合体系爆燃指数

Table 1 Explosive deflagration indices of methane, lycopodium and methane/lycopodium mixtures

φ/%	ρ/(g·m^{-3})	$(dp/dt)_{max}$/(MPa·s^{-1})	$K_{st}(K_G)$/(MPa·m·s^{-1})
0(pure dust)	750	18.81	5.11
2	750	19.98	5.42
4	500	21.16	5.74
6	250	28.21	7.66
10(pure CH_4)	0	126.94	34.46

结合前述分析可知:单相石松子粉尘和甲烷/石松子两相混合体系的最大爆炸压力、最大爆炸升压速率、爆炸指数均低于单相甲烷的;3 种可爆体系爆炸强度高低顺序为:单相甲烷爆炸强度>甲烷/石松子混合体系爆炸强度>单相石松子粉尘爆炸强度。因此,工业生产过程中应尽量避免可燃粉体中混入可燃气体,以降低粉尘爆炸危险性。

3 结 论

基于改进的标准 20 L 球形爆炸装置,系统实验研究了甲烷/石松子粉尘两相体系爆炸强度的变化规律。根据实验结果,得到以下结论:(1)甲烷的添加能够显著提高低质量浓度石松子粉尘的爆炸压力而降低高质量浓度石松子粉尘的爆炸压力,但甲烷对石松子粉尘的最大爆炸压力没有显著影响。(2)石松子粉尘的最大爆炸升压速率却随甲烷含量的增加而升高,最佳爆炸质量浓度随甲烷含量的增加而显著降低,即甲烷诱导石松子粉尘爆炸强度和敏感性增大。(3)石松子、甲烷/石松子和甲烷 3 种体系的爆炸强度满足如下关系:单相甲烷爆炸强度>甲烷/石松子混合体系爆炸强度>单相石松子粉尘爆炸强度。因此,工业生产过程中应尽量避免可燃粉体中混入可燃气体,以降低粉尘爆炸危险性。

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] ABUSWER M, AMYOTTE P, KHAN F. A quantitative risk management framework for dust and hybrid mixture explosions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013,26(2):283-289.

[4] CASHDOLLAR K L. Coal dust explosibility[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1996,9(1):65-76.

[5] DUFAUD O, PERRIN L, TRAORE M, et al. Explosions of vapour/dust hybrid mixtures: A particular class[J]. Powder Technology, 2009,190(1/2):269-273.

[6] SANCHIRICO R, BENEDETTO A D, GARCIA-AGREDA A, et al. Study of the severity of hybrid mixture explosions and comparison to pure dust-air and vapour-air explosions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2011,24(5):648-655.

[7] BARTKNECHT W. Dust explosions: Course, prevention, protection[M]. Springer Science & Business Media, 2012:25-56.

[8] DENKEVITS A, HOESS B. Hybrid H_2/Al dust explosions in Siwek sphere[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015,36:509-521.

[9] AMYOTTE P, ABUSWER M, DI BENEDETTO A, et al. Determination of hybrid mixture explosion severity[C]// Proceedings of the 13th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries. Brugge, Be, 2010,2:149-156.

[10] AMYOTTE P, LINDSAY M, DOMARATZKI R, et al. Prevention and mitigation of dust and hybrid mixture explosions[J]. Process Safety Progress, 2010,29(1):17-21.

[11] LIU Yi, SUN Jinhua, CHEN Dongliang. Flame propagation in hybrid mixture of coal and methane[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2007,20(4/5/6):691-697.

[12] 喻健良,闫兴清.高静态动作压力下粉尘爆炸泄放标准的可靠性[J].东北大学学报(自然科学版),2015,36(9):1316-1320.
YU Jianliang, YAN Xingqing. Reliability of dust explosion venting standards under elevated static activation overpressures[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015,36(9):1316-1320.

[13] YAN Xingqing, YU Jianliang, GAO Wei. Duct-venting of dust explosions in a 20 L sphere at elevated static activation overpressures[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014,32(1):63-69.

[14] 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.

[15] DASTIDAR A G, AMYOTTE P R. Explosibility boundaries for fly ash/pulverized fuel mixtures[J]. Journal of Hazardous Materials, 2002,92(2):115-26.

[16] GARCIA-AGREDA A, DI BENEDETTO A, RUSSO P, et al. Dust/gas mixtures explosion regimes[J]. Powder Technology, 2011,205(1):81-86.

[17] National Fire Protection Association, NFPA68. Standard on explosion protection by deflagration venting[S]. Quincy, MA: Batterymarch Parck, 2007:10-11.

[18] E 1226. Standard tests method for explosibility of dust clouds[S]. American Society for Testing Materials, 2010:1-2.

Explosion severity parameters of hybrid mixture of methane and lycopodium dust

YU Jianliang, SUN Huili, JI Wentao, YAN Xingqing,
ZHANG Xinyan, CAI Linfeng

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

Abstract: A modified 20 L standard spherical dust explosion vessel was used to systematically study the explosion characteristics of the methane/lycopodium hybrid mixtures. The explosion pressure (p_{ex}), the explosion pressure rise rate $(dp/dt)_{ex}$ and the explosive deflagration index (K_{st}) of the single-phase methane, the single-phase lycopodium dust, and the methane/lycopodium hybrid mixtures were measured under the same initial conditions. The results showed that methane could obviously enhance the explosion pressure p_{ex} of low-concentration lycopodium dust but reduce the p_{ex} of high-concentration lycopodium dust. It was proved that methane had no significant effects on the maximum explosion pressure p_{max} of lycopodium dust. But it could significantly increase the maximum explosion pressure rise rate $(dp/dt)_{max}$. By evaluating the K_{st}, it was found that the explosive deflagration index of the methane/lycopodium hybrid mixtures was higher than that of single-phase lycopodium dust. However, the explosive deflagration indices of both methane/lycopodium hybrid mixtures and single-phase lycopodium dusts were lower than that of single-phase methane. Therefore, the coexistence of combustible gas and combustible dust in industrial production process should be avoided to reduce the risk of dust explosions.

Keywords: dust explosion; hybrid mixtures; explosion severity; methane; lycopodium

（责任编辑　张凌云）