

文章编号: 1001-1455(2010)02-0164-05

密闭空间煤粉的爆炸特性*

高 聪, 李 化, 苏 丹, 黄卫星
(四川大学化学工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 利用 ISO 6184/1 和 IEC 推荐的 20 L 球型爆炸测试装置, 对 4 种规格的煤粉进行了系统的粉尘爆炸实验, 探讨了煤粉的爆炸规律。得到了样品的爆炸下限浓度、最大爆炸压力, 最大爆炸压力上升速率变化规律; 分析了浓度、粒径、点火能量对煤粉爆炸猛烈度的影响。结果表明, 粒径越小的煤粉, 爆炸下限越小, 而且在指定浓度下爆炸越猛烈。随着浓度的增大, 最大爆炸压力和上升速率先增后减。样品 3, 峰值爆炸压力对应的浓度为 400~1 000 g/m³, 爆炸压力最大值为 0.54 MPa; 点火头能量的增大在一定程度上促使反应更充分, 从而爆炸强度更强。由于煤粉组成的特点, 实验数据一定程度上说明了爆炸过程中气相燃烧的重要作用。

关键词: 爆炸力学; 爆炸过程; 密闭空间; 煤粉; 粉尘爆炸; 爆炸强度; 点火能量; 爆炸下限

中图分类号: O381; X932 国标学科代码: 130·3599; 620·30 文献标志码: A

1 引言

粉尘爆炸是化工、煤炭、冶金、木器加工等行业最常见的安全隐患。粉尘爆炸具有规模大且易发生 2 次爆炸的特点, 所释放的能量比一般可燃气体和液体蒸汽要大很多, 事故导致的人员伤亡和财产损失极为严重。因此, 了解粉尘爆炸特性对预防和控制粉尘爆炸, 对降低、消除工业灾害有重要意义。

对粉尘爆炸的研究主要有实验研究、理论分析和数值研究(包括数学模型的建立和爆炸过程模拟)3 大方面, 对粉尘云形成过程、点火机理、火焰传播过程、爆炸参数、防范措施、数学模型进行了大量的探讨^[1-3]。R. K. Eckhoff^[4]对粉尘爆炸及其防护技术进行了系统的探讨。由于粉尘爆炸是一个复杂的非定常气-固两相动力学过程, 爆炸机理目前尚不明确^[5-6]。爆炸过程受到粒径分布、浓度、湿度、温度、压力、爆炸场所几何特征以及粉尘本身化学组成等多种因素的影响, 要建立可靠的预测模型以及利用 CFD 软件对爆炸过程进行准确模拟, 尚需大量的实验积累。

研究者们开发了多种实验装置, 按形状分主要有管状、筒状、球型 3 种, 对粉尘爆炸特性进行了广泛的研究测试, 获得了一大批宝贵的实验数据^[7-14]。目前, 粉尘爆炸测试装置已有国际标准, ISO 6184/1 推荐采用的粉尘爆炸参数测试装置为 1 m³ 和 20 L 装置。爆炸测试所用粉末有玉米粉、豆粉、铝粉、镁粉、煤粉等。由于工业安全实际需要, 对煤粉爆炸特性的研究一直以来都是粉尘爆炸研究的热点。如 K. L. Cashdollar^[12]对高低挥发份煤粉的爆炸参数进行了测试, 并研究了抑制剂的影响。邓照帆等^[13]对多种烟煤的爆炸特性及防爆措施进行了研究。浦以康等^[14]利用不同形状与体积的封闭容器对高炉喷吹用煤粉进行了系统全面的研究, 详细探讨了煤粉浓度、粒度及气体介质中含氧量、湍流度和初始点火能量对爆炸特性的影响。已有的对煤粉爆炸的基本规律及影响因素的研究较少涉及灰分较高的煤粉。

本文中采用 ISO 6184/1 推荐的 20 L Siwek 球型爆炸测试装置, 对 4 种规格的高灰分煤粉进行爆炸测试, 以研究其爆炸参数及其变化规律。

2 实验

测试系统由装置爆炸球、控制系统、数据采集系统 3 部分组成, 其中爆炸球设计压力为 2.5 MPa, 容积为 20 L, 其结构示意图如图 1 所示。

* 收稿日期: 2009-01-09; 修回日期: 2009-05-25

作者简介: 高 聪(1986—), 男, 硕士研究生。

控制系统用来控制系统进气、触发采样、开阀喷粉、点火过程。整个实验过程在不到 1 s 的时间内全部完成,中间进气、喷粉、触发采样、点火等动作的时间控制均以 ms 为单位。数据采集系统用于记录爆炸过程中压力的变化。数据采集系统的硬件主要包括压力传感器、数据采集卡、接线卡和计算机。实验采用化学点火头,由锆粉、硝酸钡、过氧化钡按照 4:3:3 的比例混合制成。将系统压力先抽空至 -60 kPa,煤粉在 2 MPa 的压缩空气驱动下喷入罐体,喷粉后罐体内压力为常压,经过 60 ms 的点火延迟,点火触发爆炸,爆炸参数由数据采集系统自动记录下来。为获得较好的重复性,点火延迟时刻应避免湍流强度的上升期,点火延迟时间通常大于 50 ms^[3],因而点火延迟时间均为 60 ms,保证了粉尘云的均匀性和实验的重复性。

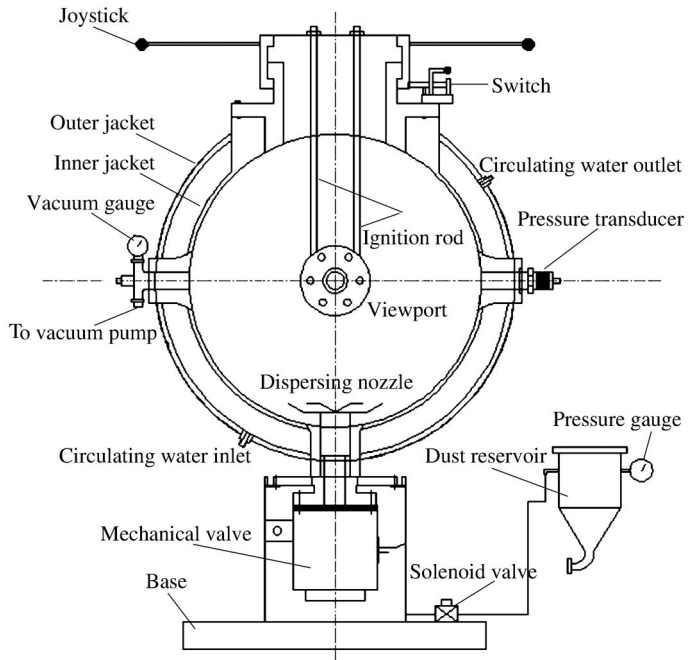


图 1 20 L 球型爆炸测试装置结构简图

Fig. 1 Structure drawing of the 20 liter spherical explosion vessel

3 实验数据及讨论

3.1 煤粉样品

实验煤样成分工业分析结果: 固定碳, 37.01%; 挥发分, 20.12%; 灰分, 41.76%; 水分, 1.11%。

将这种煤样研磨成煤粉, 利用标准金属筛筛分得到 4 种粒径范围的煤粉, 1~4 号煤粉的粒径分别为 < 550、< 125、< 75、< 43 μm。利用 JL1166 粒度分析仪对 2、3、4 号煤粉样品进行粒度分析得到的粒度分布如图 2 所示, 图中 *f*、*F* 分别表示煤粉粒径的频度分布和累计分布。

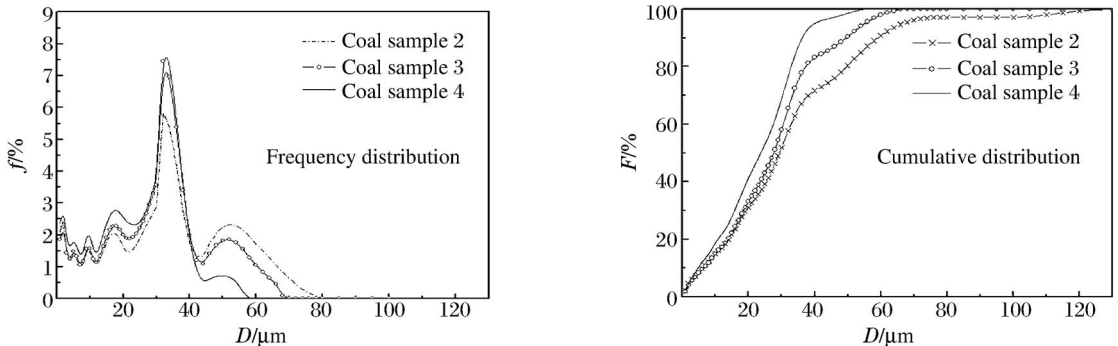


图 2 煤粉样品粒度分布曲线

Fig. 2 Diameter distribution curves of the coal dust samples

3.2 煤粉粉尘爆炸典型曲线

实验获得的典型爆炸压力曲线见图 3。所测煤粉为 3 号粉, 粒径小于 75 μm, 浓度为 400 g/m³, 点火能量为 10 kJ。图中点火延迟时间为 60 ms, 初始爆炸压力为常压。最大爆炸压力为 0.49 MPa, 最大爆炸压力上升速率为 17.29 MPa/s。

3.3 煤粉粉尘爆炸下限

测试粉尘爆炸下限, 采用能量为 2 kJ 的点火头, 从一个可爆的煤粉浓度开始实验, 逐步降低浓度值, 直到爆炸不发生为止; 为确保无爆炸发生, 需要在该浓度值上重复实验 3 次以上。采用二分法寻找

爆炸下限。理论上,爆炸的判据是火焰传播到罐壁,但是实际上不易测得。通常采用爆炸压力来界定,压力达到 50 kPa,则认为爆炸发生^[15]。由图 4 可以看出,煤粉越细,爆炸下限越小,煤粉爆炸的可能性越大。

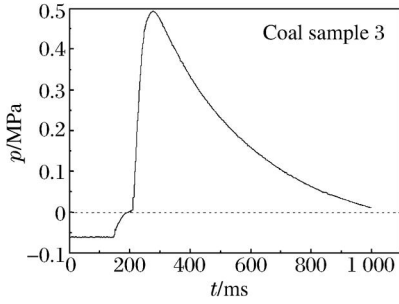


图 3 煤粉粉尘爆炸压力曲线

Fig. 3 Explosion pressure time curve

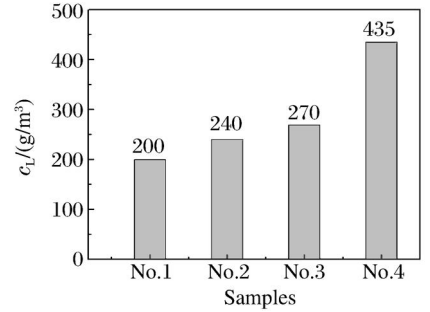


图 4 实验煤粉爆炸下限

Fig. 4 Lower explosion limits

3.4 煤粉爆炸猛烈度的实验分析

3.4.1 煤粉粒径对爆炸猛烈度的影响

利用 10 kJ 点火头在 300 g/m³ 的浓度下分别对 4 个煤粉样进行实验,测试数据如表 1 所示。1 号粉因粒径较大,和其他 3 个样品相比,最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率均较小,最大爆炸压力仅为 0.26 MPa。而 2、3、4 号样品,粒径小于 125 μm,由图 2 可以看出,3 个粉样分布范围较窄。最大爆炸压力 p_{max} 都大于 0.4 MPa,最大爆炸压力上升速率 $(dp/dt)_{max}$ 较接近。

表 1 浓度为 300 g/m³ 的煤样爆炸数据

Table 1 Explosion data for the coal dust samples with the concentration of 300 g/m³

煤样	p_{max}/MPa	$(dp/dt)_{max}/(\text{MPa/s})$
1 号	0.26	10.52
2 号	0.44	11.27
3 号	0.45	15.03
4 号	0.48	15.03

粉尘爆炸是气体和固体表面间发生非均相反应,最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率不仅与粉尘颗粒表面的燃烧速率有关,还与颗粒的比表面积、氧气向颗粒表面的扩散速率、反应热的传递速率、火焰的传播速度和有效的燃烧放热量有关^[14]。当颗粒直径较大时,随着燃烧的快速传播,颗粒内部因缺氧而不能完全燃烧,从而减慢了燃烧热的释放和传递,随着粒度的减小,颗粒比表面积随之增大,氧气向颗粒表面扩散的时间将缩短,颗粒因缺氧而不能完全燃烧的现象随之减弱,燃烧热释放加快。因此,在其他条件相同的情况下,煤粉越细,爆炸强度越强。当煤粉足够细的时候,粒径大小不再是爆炸猛烈程度的制约因素,燃烧已经能充分发展,压力变化趋势不太明显。

3.4.2 煤粉浓度对其爆炸猛烈度的影响

为了研究煤粉浓度对爆炸猛烈度的影响,选用 3 号煤粉,在 10 kJ 的点火能量下进行测试,结果如图 5 所示。左边第 1 个数据点对应的浓度为 150 g/m³,爆炸压力仅为 0.2 MPa,随着浓度的增加,爆炸压力逐渐上升。400~1000 g/m³ 的浓度范围对应爆炸压力峰值区。当浓度为 700 g/m³ 时,对应的爆炸压力最大,为 0.54 MPa。随着浓度的继续增大,爆炸压力下降,变化速度较缓慢。最大爆炸压力上升速率表现出类似的变化趋势。煤粉浓度较低的时候,罐内处于富氧状态,爆炸压力的制约因素是煤粉浓度,随着煤粉浓度的增加,放热量越来越大,爆炸压力更高。存在一个最佳的浓度范围,在此范围内,煤粉和氧气充分反应,使爆炸压力达到峰值。当煤粉浓度超过此范围后,由于氧气不足,反应不充分,释放的能量少

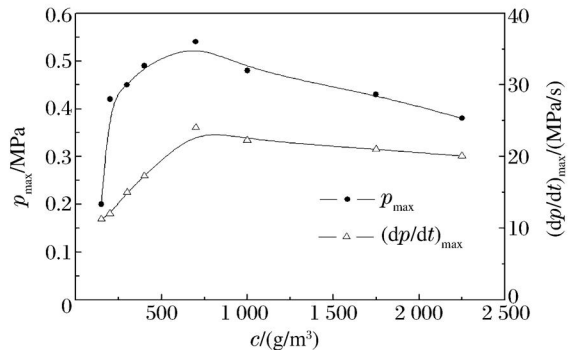


图 5 爆炸特性参数随煤粉浓度的变化曲线

Fig. 5 Explosibility-mass concentration curves of coal dust

再加上煤粉对热量的吸收, 爆炸压力出现减小的趋势。实验中虽然没有对该煤样的爆炸上限浓度进行测定, 但实际存在这样一个浓度, 超过这个浓度时, 不发生爆炸^[4,6]。在峰值区前后, 爆炸压力值的限制因素分别是煤粉浓度和氧气含量。在实际工况中, 即使浓度处于较高水平, 但是如果设备发生泄露, 空气进入, 即补充了氧气, 改变了控制因素, 爆炸压力仍然会比较大。

3.4.3 点火头能量对煤粉爆炸猛烈度的影响

以2号煤粉为例, 在400、600 g/m³浓度下, 分别用1、2、5、10 kJ的点火头引爆。装置中点火头空白实验(不加粉尘的情况)引起的升压情况及爆炸实验结果如图6所示, 以600 g/m³的浓度为例, 1、2 kJ的点火能量对应的最大爆炸压力变化约0.3 MPa, 2、5 kJ的点火能量对应的最大爆炸压力相差约80 kPa, 5、10 kJ的点火能量对应的最大爆炸压力相差小于50 kPa。对比空白实验数据, 说明点火能量的增大使煤粉爆炸更充分, 从而释放出更多的能量。点火头能量是影响煤粉爆炸猛烈度的一个重要因素。当点火能量很低时, 释放的能量不足以点燃煤粉, 爆炸不发生。在煤粉充分反应前, 点火能量越大, 煤粉的爆炸猛烈度将越强。当点火能量已经高到足以使煤粉燃烧爆炸充分发展后, 点火头能量的增加对爆炸强度的影响不明显。

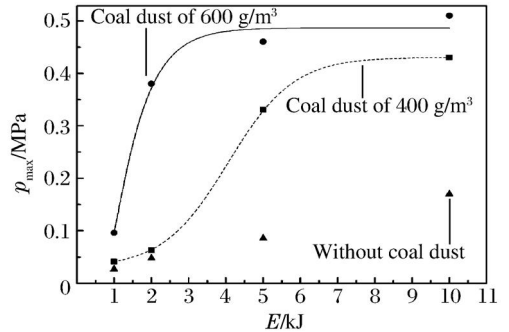


图6 爆炸参数与点火能量的关系

Fig. 6 Explosibility data varying with ignition energy

4 结 论

在20 L球型爆炸测试装置的大量实验数据的基础上, 研究了煤粉的爆炸特性, 分析了煤粉粉尘爆炸过程, 得出了实验煤样的爆炸下限, 对煤粉粉尘爆炸的压力变化规律、煤粉粉尘爆炸猛烈程度及其影响因素作了探讨, 得出以下结论: 煤粉粒径越小, 爆炸下限越低, 越容易发生爆炸, 因此在工业生产中, 对于粒度很小的可燃粉末, 应予以特别重视。本文煤粉灰分含量较高, 挥发份含量适当, 固定碳含量相对较低, 但是从实验数据来看, 其爆炸参数尤其是爆炸压力仍然保持较高水平, 这在一定程度上证明了煤粉爆炸过程中气相燃烧的重要作用。

在工业实际中, 加强控制点火源, 监控粉尘场所粉尘浓度; 对涉及到的粉尘的燃烧爆炸特性进行评测, 做到心中有数, 对于安全生产具有重要意义。

参考文献:

- [1] 李运芝, 袁俊明, 王保民. 粉尘爆炸研究进展[J]. 太原师范学院学报: 自然科学版, 2004, 3(2): 79-82.
LI Yur zhi, YUAN Jur ming, WANG Bao min. Developing of dust exploding study[J]. Journal of Taiyuan Normal University: Natural Science Edition, 2004, 3(2): 79-82.
- [2] Eckhoff R K. Current status and expected future trends in dust explosion research[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2005, 18(4-6): 225-237.
- [3] 胡俊, 浦以康, 万士昕. 粉尘等容燃烧容器内扬尘系统诱导湍流特性的实验研究[J]. 实验力学, 2000, 15(3): 341-348.
HU Jun, PU Yi kang, WAN Shi xin. Experimental investigation on dispersion induced turbulence in closed explosion vessels[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2000, 15(3): 341-348.
- [4] Eckhoff R K. Dust Explosions in the Process Industries[M]. 3rd Edition. Amsterdam: Gulf Professional Publishing, 2003.
- [5] 王海福, 冯顺山. 防爆学原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004: 26.
- [6] 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: 48-62.
- [7] Going J E, Chatrathi K, Cashdollar K L. Flammability limit measurements for dusts in 20 L and 1 m³ vessels[J].

Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2000, 13(3-5): 209-219.

- [8] Dastidar A, Amyotte P, Going J, et al. Inerting of coal dust explosions in laboratory- and intermediate scale chambers[J]. Fuel, 2001, 80(11): 1593-1602.
- [9] Proust Ch, Accorsi A, Dupont L. Measuring the violence of dust explosions with the “20 l sphere” and with the standard “ISO 1 m³ vessel”: Systematic comparison and analysis of the discrepancies[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2007, 20(4-6): 599-606.
- [10] Chawla N, Amyotte P R, Pegg M J. A comparison of experimental methods to determine the minimum explosible concentration of dusts[J]. Fuel, 1996, 75(6): 654-658.
- [11] Randeberg E, Eckhoff R K. Measurement of minimum ignition energies of dust clouds in the < 1 mJ region[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 140(1-2): 237-244.
- [12] Kenneth L. Cashdollar. Coal dust explosibility[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1996, 9(1): 65-76.
- [13] 邓煦帆, 谢林, 钟圣俊, 等. 烟煤粉爆炸性及防爆方法研究[J]. 粉体技术, 1997, 3(1): 3-8.
DENG Xufan, XIE Lin, ZHONG Shengjun, et al. Study on explosibility and explosion protection measures for bituminous dusts[J]. Powder Science and Technology, 1997, 3(1): 3-8.
- [14] 浦以康, 胡俊, 贾复. 高炉喷吹用烟煤煤粉爆炸特性的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(4): 303-312.
PU Yikang, HU Jun, JIA Fu. Experimental studies of explosion characteristics of bituminous coal dust-air mixtures injected in blast furnace[J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(4): 303-312.
- [15] 罗光华, 施光明, 张宗国, 等. 安全工程实验指导书[M]. 成都: 四川大学化工学院, 2006: 20-37.

Explosion characteristics of coal dust in a sealed vessel*

GAO Cong, LI Hua, SU Dan, HUANG Weixing

(School of Chemical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: Dust explosion experiments aiming at 4 kinds of coal dust were carried out in a 20-liter spherical vessel to explore the mechanism of dust explosion. The lower explosion limit, the maximum explosion pressure and the maximum explosion pressure rising rate were obtained for the coal dust samples. Influences of coal dust concentration, particle diameter and ignition energy on coal dust explosion intensity were analyzed. Results show that the lower explosion limit decreases with the decrease of particle size. For a given concentration, the coal dust with smaller particle size causes higher explosion pressure. Dust concentration has a significant effect on explosion intensity. The maximum explosion pressure and its rising rate increase first and then decrease with the increase of dust concentration. For sample 3, the peak explosion pressure is corresponding to the concentration range from 400 to 1 000 g/m³, and the maximum explosion pressure is 0.54 MPa. To some extent, higher ignition energy causes more sufficient reaction and results in more intensive explosion. Due to the features of coal dust sample components, experimental data indicate that gas phase combustion plays an important role during the explosion process.

Key words: mechanics of explosion; explosion process; sealed vessel; coal dust; dust explosion; explosion intensity; ignition energy; lower explosion limit

* Received 9 January 2009; Revised 25 May 2009

Corresponding author: HUANG Weixing, hwx58@vip.163.com

(责任编辑 张凌云)