

# 石松子粉粉尘爆炸试验研究<sup>\*</sup>

秋珊珊<sup>①②</sup> 曹卫国<sup>①</sup> 黄丽媛<sup>①</sup> 张建新<sup>②</sup> 潘 峰<sup>①②</sup>

①南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

②国家民用爆破器材质量监督检验中心(江苏南京,210094)

[摘 要] 该论文采用 20 L 球形爆炸测试装置对粒径在 75  $\mu\text{m}$  以下的石松子粉的粉尘爆炸下限浓度、爆炸压力和爆炸指数随粉尘浓度的变化规律等进行了研究。研究表明:石松子粉粉尘爆炸下限浓度在 20 ~ 40  $\text{g}/\text{m}^3$  之间,在粉尘浓度相对较低的 60 ~ 500  $\text{g}/\text{m}^3$  时,粉尘的爆炸压力和爆炸指数随着粉尘浓度的提高而急速上升,在浓度为 500  $\text{g}/\text{m}^3$  时达到最大,此时最大爆炸压力为 0.69 MPa,爆炸指数为 17.20  $\text{MPa} \cdot \text{m}/\text{s}$ ;继续增加粉尘浓度,爆炸压力和爆炸指数略有下降,但仍维持在较高值;并判定石松子粉粉尘爆炸危险性分级为 I 级。

[关键词] 石松子粉 粉尘爆炸 爆炸下限浓度 最大爆炸压力 爆炸指数

[分类号] X932

## 引言

对粉尘爆炸问题的关注起源于 1795 年意大利都灵地区一处面粉仓库爆炸的报道<sup>[1]</sup>,由于它具有极大的破坏力和烧毁程度,这些年来一直成为国内外学者重点研究的方向<sup>[2-4]</sup>。然而尽管世界各国在粉尘爆炸的基础研究及控制除尘技术领域取得了很多进展<sup>[3,5]</sup>,仍然没有能完全控制住由于粉尘爆炸引起的惨剧<sup>[6]</sup>。随着粉体超细化技术的飞速发展,对有关药物制剂粉尘爆炸危险等级进行正确分类对指导其安全生产和运输很有必要。笔者所在的研究小组近期一直关注农业和粮食加工产品中涉及到的粉尘爆炸问题<sup>[7]</sup>,考虑到导致粉尘爆炸发生的要素之一即是合适的粉尘浓度<sup>[1,8,9]</sup>,本文选择中药制剂中常用的植物石松子粉为目标物,采用 20 L 球形爆炸测试装置,研究粉尘云浓度对其关键爆炸性能参数:爆炸下限(LEL)、最大爆炸压力( $p_{\text{max}}$ )和最大爆炸指数( $K_{\text{st}}$ )等<sup>[1]</sup>的影响,旨在为有粉尘产生的工业生产中的爆炸预防、防护隔离和爆炸危险性的分级以及风险评估起到指导作用。

## 1 试样、设备和测试方法

### 1.1 试验所需样品及前处理

石松子粉由东北大学提供,试验前在 60℃ 的温度下干燥 20 h,过 200 目筛备用(粒径小于 75  $\mu\text{m}$ )。采用的化学点火具(总质量为 2.40 g),含活性铝粉 40%、硝酸钡 30% 和过氧化钡 30% 均为化学纯,上海凌峰化学试剂有限公司生产。点火总能量为 10 kJ。

### 1.2 20 L 球形爆炸测试装置

装置见图 1<sup>[7]</sup>,包括球体、压力传感器、气源、喷粉装置、点火装置、数据记录系统等几个部分。

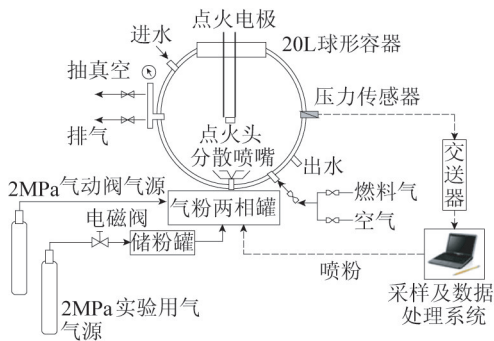


图 1 20 L 球形爆炸测试装置

容器内的压力变化过程经压力传感器采集后转变成电信号,由数据采集系统采集并保存。采用不同石松子粉浓度设计一系列爆炸试验,通过对压力—时间曲线分析,得到不同浓度条件下的爆炸压力和爆炸指数,依据各种爆炸性能参数——粉尘浓度曲线得到石松子粉的爆炸下限浓度、最大爆炸压力和最大爆炸指数。

### 1.3 试验方法<sup>[10-12]</sup>

依据气体状态方程  $pV = nRT$  计算当爆炸室压力  $p$  达到  $10^5$  Pa 时,所需要的粉尘质量。将称好的粉尘放入储粉罐内,开启阀门,高压气体将石松子粉通过粉尘分散系统分散到容器中。开阀后 60 ms,化学点火头在容器中心被引爆。从一个可靠的、能产生爆炸的粉尘浓度开始试验,通过降低或者增加粉尘的浓度,得到一系列数据。分析爆炸后产生的

\* 收稿日期:2012-03-25

作者简介:秋珊珊(1981~),女,博士,工程师,主要研究危险货物运输及粉尘爆炸。E-mail:ppshanshanqiu@gmail.com

通讯作者:潘峰(1971~),男,博士,副教授,主要从事民用爆炸物品安全运输,粉尘爆炸等方面研究。E-mail:panfengiein@163.com

压力—时间曲线,得到爆炸下限浓度、最大爆炸压力和压力上升速率 $(dp/dt)_m$ ,根据式(1):

$$K_{ST} = (dp/dt)_m \times V^{0.33} \tag{1}$$

计算出  $K_{ST}$  值。最后依据粉尘爆炸危险性分级标准<sup>[7]</sup>对石松子粉粉尘的爆炸危险性进行分级。

2 试验结果及分析

环境温度 25 ℃,化学点火头能量 10 kJ。

2.1 确定爆炸下限

图 2 为粉尘浓度和爆炸下限的关系。由图 2 可知,在试验环境温度和点火能量固定的情况下,球内不放置石松子粉时,得到的爆炸压力为 0.1 MPa,对应的是化学点火头爆炸后自身产生的压力。在 10 ~ 70 g/m<sup>3</sup> 的浓度范围内,石松子粉的爆炸压力随着浓度的增大而增大,粉尘的爆炸危险性也相应增大,且在浓度为 70 g/m<sup>3</sup> 时达到 0.25 MPa;当石松子粉的浓度分别为 10 g/m<sup>3</sup> 和 20 g/m<sup>3</sup> 时,对应的爆炸压力为 0.12 MPa 和 0.13 MPa,该压力值未超过化学点火头爆炸压力(0.1 MPa)的 1.5 倍(0.15 MPa),此时过量的空气作为惰性介质参与燃烧反应,消耗一部分反应热,起到了冷却作用,阻碍火焰自行传播,粉尘不能发生爆炸<sup>[8]</sup>;当石松子粉的浓度提高到 30 g/m<sup>3</sup> 时,爆炸压力为 0.16 MPa,该值与 0.15 MPa 接近,表明此时粉尘处于爆炸与未爆炸的临界点;当浓度继续提高到 40 g/m<sup>3</sup> 时,爆炸压力增大到 0.18 MPa,该值超过 0.15 MPa,表明粉尘已发生了爆炸。

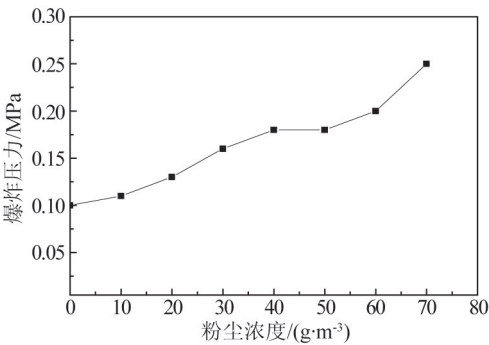


图 2 粉尘浓度和爆炸下限关系

2.2 爆炸压力和粉尘浓度的关系

将粉尘浓度从 60 g/m<sup>3</sup> 逐步提高至 1250 g/m<sup>3</sup> 进行爆炸压力的试验,见图 3。随着 20 L 球形爆炸装置中粉尘浓度的提高(粉尘浓度范围在 60 ~ 500 g/m<sup>3</sup> 之间),单位体积内有效粉尘爆炸颗粒增加,石松子粉的爆炸压力从 0.2 MPa 迅速提高,在浓度为 500 g/m<sup>3</sup> 时达到最大值  $p_{max}$  0.69 MPa。同玉米淀粉粉尘爆炸的研究结果(LEL 为 50 ~ 60 g/m<sup>3</sup>,达到  $p_{max}$  时玉米淀粉粉尘浓度为 750 g/m<sup>3</sup>) 相比<sup>[7]</sup>,相同

试验温度和点火能量下,石松子粉的爆炸压力更易达到最值,这可能与两种粉体主要化学组分不同有关。此时继续增大粉尘浓度,石松子粉的爆炸压力开始下降,但降幅较慢。一方面,由于球中悬浮的粉尘量过多,球内空气不足,单位体积内有效粉尘爆炸颗粒减少;另一方面,爆炸产生的热量和冲击波会被过量的粉尘部分吸收,此时反应放出的热量小于损耗的热量,一定程度上阻碍了火焰的蔓延<sup>[8]</sup>,最终导致所测的粉尘爆炸压力下降。

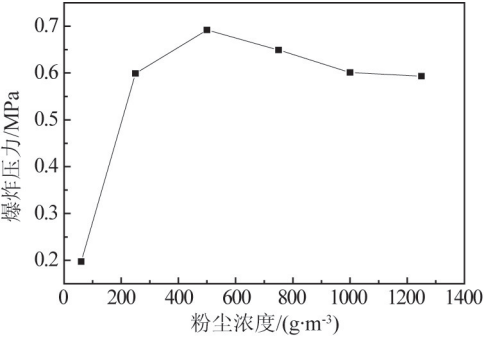


图 3 爆炸压力随粉尘浓度变化关系

2.3 爆炸指数和粉尘浓度的关系

图 4 反映了爆炸指数随粉尘浓度的关系,由图 4 可知,粉尘浓度为 60 g/m<sup>3</sup> 时,石松子粉的爆炸指数为 3.29 MPa · m/s,随着石松子粉浓度的增加,和爆炸压力变化结果相似,爆炸指数不断升高,当粉尘浓度达到 500 g/m<sup>3</sup> 时,此时的爆炸指数达到最大值。进一步提高石松子粉浓度,爆炸指数开始降低,并在较高的水平上趋于平稳,这是因为过多未参与反应的粉尘导致爆炸压力上升速率趋于缓慢。

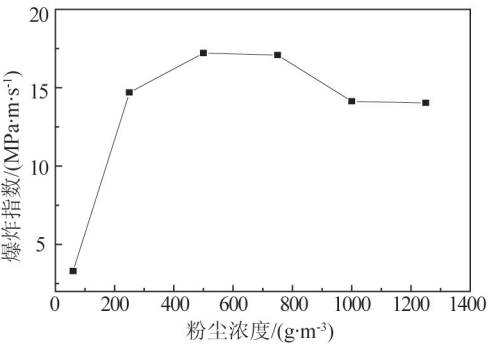


图 4 爆炸指数随粉尘浓度变化关系

3 石松子粉粉尘爆炸危险性分级的确定

图 5 为爆炸压力和爆炸指数的时间曲线,石松子粉浓度为 500 g/m<sup>3</sup>。由图 5 可见,爆炸压力和爆炸指数在点火 0.6 s 后急剧增大,并迅速达到最大值,  $p_{max}$  为 0.69 MPa、 $(dp/dt)_m$  为 63.39 MPa · m/s。通过爆炸压力计算公式计算并修正得到  $K_{st}$  为 17.20 MPa · m/s。依据粉尘爆炸危险性分级标准可判定石松子粉粉尘爆炸危险性分级为 I 级。

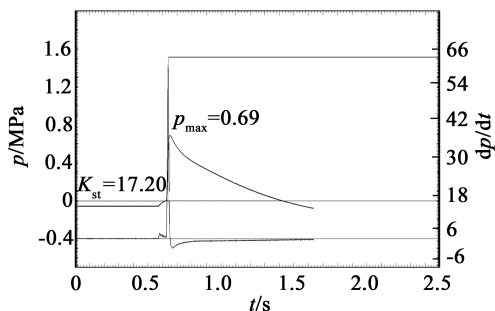


图 5 爆炸压力和爆炸指数的时间曲线

#### 4 结 论

1) 当环境温度(25 ℃)和点火能量(10 kJ)一定时,石松子粉的爆炸极限为 20 ~ 40 g/m<sup>3</sup>。当粉尘浓度控制在 60 ~ 500 g/m<sup>3</sup> 范围内,石松子粉爆炸压力和爆炸指数随着粉尘浓度的提高而显著增加,在粉尘浓度为 500 g/m<sup>3</sup> 时达到最大,此时对应的  $p_{\max}$  和  $K_{st}$  分别为 0.69 MPa 和 17.20 MPa · m/s。

2) 单位体积内的有效粉尘颗粒直接影响粉尘爆炸性能参数。一方面,只有单位体积内的粉尘颗粒数达到有效数值时,才能将火焰和冲击波的传播速率迅速提高至临界值,进而使得由化学点火头引燃的粉尘迅速转变到爆轰过程,爆炸程度逐渐增强,对应的爆炸性能参数值也因此迅速提高到最高;另一方面,当单位体积内有效粉尘颗粒过量时,反应容器内空气供应不足,导致化学反应不完全,将会在一定程度上抑制爆炸过程。

3) 石松子粉爆炸危险性分级为 I 级,具有较大的粉尘爆炸的危险性。

#### 参 考 文 献

[1] Amyotte P. R., Eckhoff R. K. Dust Explosion Causation, Prevention and Mitigation; An Overview[J]. Journal of Chemical Health and Safety, 2010, 17(1): 15-28.

[2] Kuai N. S., Li J. M., Chen Z., et al. Experiment - based Investigations of Magnesium Dust Explosion Characteristics[J]. J. Loss Prevent. Proc., 2011, 24(4): 302-313.

[3] Eckhoff R. Current Status and Expected Future Trends in Dust Explosion Research[J]. J. Loss Prevent. Proc., 2005, 18(4): 225-237.

[4] 饶国宁, 陈网桦, 方卿, 等. 膨化硝酸铵炸药粉尘爆炸性的初步实验研究[J]. 爆破器材, 2009, 38(2): 11-12.

[5] Frank W. L. Dust Explosion Prevention and the Critical Importance of Housekeeping[J]. Process Saf. Prog., 2004, 23(3): 175-184.

[6] 秦建玉, 李生才. 2011 年 1-2 月国内安全生产事故统计分析[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(2): 253-256.

[7] 潘峰, 马超, 曹卫国, 等. 玉米淀粉粉尘爆炸危险性研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(7): 46-51.

[8] 李恩科, 石焱. 粮食粉尘爆炸及防治技术的研究进展[J]. 环境科学与管理, 2008, 32(4): 92-95.

[9] 陆大才. 可燃粉尘燃烧爆炸因素及其预防分析[J]. 消防技术与产品信息, 2010(7): 57-62.

[10] Pennsylvania: Standards Press of America. American Society for Testing Material. E1491 Standard Test Method for Minimum Autoignition Temperature of Dust Clouds[S]. 2006.

[11] Pennsylvania: Standards Press of America. American Society for Testing Material. E1515 Standard Test Method for Minimum Explosible Concentration of Combustible Dusts[S]. 2007.

[12] Pennsylvania: Standards Press of America. American Society for Testing Material. E1226 Standard Test Method for Pressure and Rate of Pressure Rise for Combustible Dusts[S]. 2005.

#### Experimental Research on Lycopodium Dust Explosion

QIU Shanshan<sup>①②</sup>, CAO Weiguo<sup>①</sup>, HUANG Liyuan<sup>①</sup>, ZHANG Jianxin<sup>②</sup>, PAN Feng<sup>①②</sup>

①School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

②National Quality Supervision and Inspection Center for Industrial Explosive Materials (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] In order to investigate the explosion characteristics in terms of the lower explosion limit, the explosion pressure and the explosion index with the variability of the dust concentration of the lycopodium with grain size less than 75 μm, the dust explosion was experimentally studied using a 20 L sphere explosion test unit. The results showed that the lower explosion limit of lycopodium was in the range of 20 ~ 40 g/m<sup>3</sup>. On one hand, the dust explosion pressure and the explosion index increased significantly with the dust concentration when the concentration was in the relative low range 60 ~ 500 g/m<sup>3</sup>, in which the maximum explosion pressure of 0.69 MPa and the maximum explosion index of 17.20 MPa · m/s were obtained when the concentration reached 500 g/m<sup>3</sup>. On the other hand, the concentration higher than 500 g/m<sup>3</sup> had no impact on these two values. Furthermore, both of the values decreased slightly but still stayed at the relatively high level. Accordingly the classification of lycopodium dust explosion hazard is rated to Level I.

[KEY WORDS] lycopodium, dust explosion, lower explosive limit, maximum explosion pressure, explosion index