

石松子粉最小点火能试验研究^{*}

黄丽媛^① 曹卫国^① 徐 森^① 张建新^② 秋珊珊^{①②} 潘 峰^{①②}

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] 采用 1.2 L 哈特曼管最小点火能测试装置,研究了中位径为 32 μm 的石松子粉的最小点火能量随粉尘浓度、点火延时以及喷粉压力之间的变化规律。试验结果表明:在环境温度(25 ± 5)℃,环境湿度为 30% ± 5% 的条件下,石松子粉的最佳着火浓度 750 g/m³,最佳点火延时为 90 ms,最佳喷粉压力为 0.8 MPa,此时石松子粉的最小点火能达到极小值。在相同的实验条件下有电感的点火方式比无电感的点火方式所需的能量要小。在有电感存在的情况下,石松子粉的最小点火能为 10 mJ;在无电感存在的情况下,石松子粉的最小点火能为 15 mJ,说明石松子粉对电火花较敏感。

[关键词] 石松子粉 哈特曼管 最小点火能 点火延时 喷粉压力

[分类号] X932

引言

最小点火能是指能引起一定浓度可燃物燃烧或爆炸所需要的最低能量值^[1-2],也是判定粉尘对电火花敏感程度的一个重要指标^[3]。目前对粉尘最小点火能的研究较多,李新光^[4]和 Proust^[5-6]等人曾研究了不同的粉尘爆炸测试装置对最小点火能测试结果的影响。南京理工大学的研究小组也曾对小麦淀粉、玉米淀粉和膨化硝铵炸药的粉尘爆炸问题有所研究^[7-10]。

石松子粉是粉尘爆炸相关试验中常用的标准物质^[11]。本文选用中位径为 32 μm 的石松子粉为实验样品,采用 1.2 L 哈特曼管最小点火能测试装置,研究了其最小点火能量随粉尘浓度、点火延时以及喷粉压力之间的变化规律。旨在为常见农产品等的粉尘爆炸研究提供相关参数,同时为此类产品在实际应用中的爆炸预防、防护隔离和风险评估起指导作用。

1 试样、设备和测试方法

1.1 样品试验前处理

试验中所用样品由东北大学提供,通过粉碎、筛分等程序,利用粒度分析仪测试,得知石松子粉的中位径为 32 μm,如图 1 所示。试验前在 60℃ 的温度下先干燥 20 h,放在室温下保存,环境湿度不大于 30%。

1.2 最小点火能测试装置

最小点火能测试装置如图2所示,主要结构包

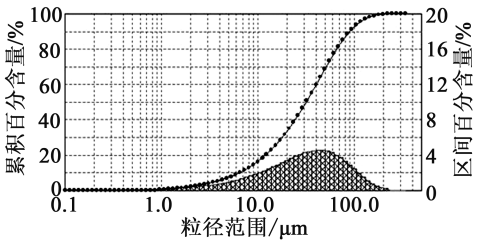
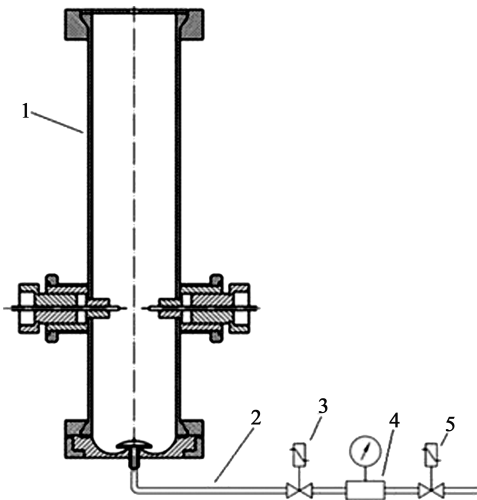


图1 石松子粉粒径分布示意图



1-哈特曼管;2-粉尘分散系统;3-进气系统;
4-储气室;5-电磁阀

图2 MIE 测试装置

括哈特曼管、粉尘分散系统、进气系统、储气室、电磁阀等几个部分。

试验过程中,将粉尘均匀分散在哈特曼管底部,

^{*} 收稿日期:2012-07-05

作者简介:黄丽媛(1989 ~),女,硕士,主要从事粉尘爆炸相关研究。E-mail:liyuanh200713254@163.com

通讯作者:潘峰(1971 ~),男,博士,副教授,主要从事含能材料和应用化学研究。E-mail:panfengiem@163.com

通过进气装置将压缩空气充入储气罐,然后开启电磁阀。压缩空气将粉尘分散到哈特曼管中,形成粉尘云,通过电火花发生器点火,测试最小点火能。

1.3 最小点火能试验方法^[11-13]

哈特曼管的两个电极固定座钻有小孔,电极可以移动。高压电极与电容器相连,试验过程中可以选择有电感和无电感两种放电方式,当高压发生器从电容器电路中断开后,由电磁阀控制储气罐释放压缩空气,使粉尘扩散形成粉尘云,延迟一定时间后,将高压电极推到规定位置,使电容器放电产生电火花。电容电火花能量可采用式(1)计算:

$$E = \int I(t)U(t)dt \tag{1}$$

式中: E 为电火花能量,J; $I(t)$ 为电路放电时电流,A; $U(t)$ 为电路放电时电压,V。

当电容电火花的能量小于 100 mJ 时,电火花的能量可采用式(2)计算:

$$E = 0.5CU^2 \tag{2}$$

式中: C 为电容量,F; U 为电路放电时电压,V。

2 最小点火能测试

所有试验环境温度 $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$,环境湿度 30% $\pm 5\%$,放电方式分别选择有电感和无电感两种方式,试验结果分别见图 3~图 5。

2.1 粉尘浓度对最小点火能的影响

试验过程中喷粉压力为 0.7 MPa,点火延时为

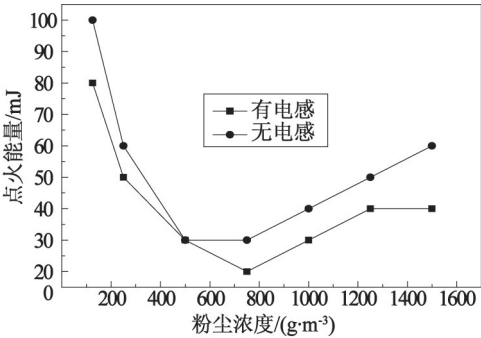


图 3 粉尘浓度和最小点火能关系图

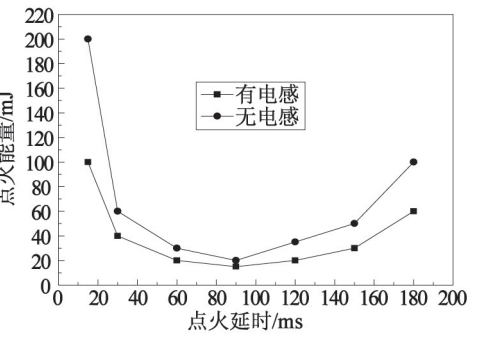


图 4 点火延时和最小点火能关系图

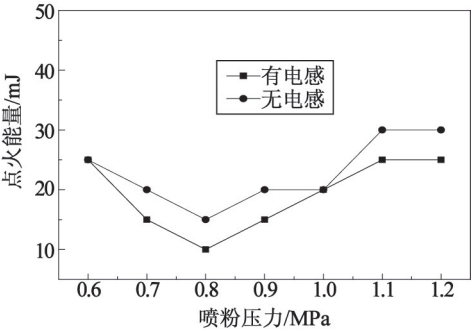


图 5 喷粉压力和最小点火能关系图

60ms。

在相同的试验条件下,对浓度为 125、250、500、750、1000、1250、1500 g/m³ 的粉尘进行了最小点火能试验见图 3。

由图 3 中试验结果可知,放电方式的不同对粉尘的最小点火能有一定的影响,相同浓度下,有电感的放电方式比无电感放电方式点燃粉尘所需的能量更小。这是因为在回路中加入电感,虽然消耗了电路的一部分能量,但是延长了电火花的放电时间,属于长火花放电,增加了电火花与粉尘的接触时间,粉尘反而更容易点燃;回路中无电感的情况下,电容不经过任何电子器件就直接放电,放电火花明亮,但放电时间短,属于短火花放电,虽然短火花能量较长火花放电损失较少,但由于与粉尘接触时间短,粉尘的最小点火能反而增加。

浓度范围在 125~750 g/m³ 之间,随着粉尘浓度的增加,单位体积内被电火花直接点燃的颗粒增加,粉尘最小点火能随着粉尘浓度的增加而逐渐减小。在有电感存在的情况下,石松子粉的最小点火能从 80 mJ 降低至最小值 20 mJ;在无电感存在的情况下,粉尘最小点火能由 100 mJ 降低至最小值 30 mJ。

此时继续增大粉尘浓度,石松子粉的最小点火能开始上升。一方面,由于哈特曼管属于半封闭系统,悬浮的粉尘颗粒过多,导致哈特曼管供氧不足,导致最小点火能逐渐增大;另一方面,过多的粉尘会吸附在放电电极的尖端,导致哈特曼管尖端放电的能量减小,最终导致粉尘最小点火能增大。

2.2 点火延时对最小点火能的影响

试验过程中喷粉压力为 0.7 MPa,粉尘浓度为 750 g/m³。

在相同的试验条件下,改变点火延时,在点火延时为 15、30、60、90、120、150、180 ms 的试验条件下进行了粉尘最小点火能测试,试验结果如图 4 所示。

不同的放电方式对粉尘的最小点火能有一定的

影响,相同的点火延时,有电感的放电方式比无电感放电方式点燃粉尘所需的能量更小。

试验过程中,压缩空气使粉尘扩散形成粉尘云,随着点火延时的增加(点火延时在 15 ~ 90 ms 之间),粉尘云在电极附近形成合适的浓度,因此,被电火花点燃的粉尘颗粒数增加,粉尘最小点火能在点火延时为 90 ms 时达到最小值(有电感的放电方式为 15 mJ,无电感的放电方式为 20 mJ),增大或者减小点火延时,粉尘的最小点火能增大,当点火延时小于 30 ms 时,最小点火能增幅较大,两种放电方式均超过 100 mJ,这主要是由于点火延时太短,粉尘云还没有完全形成;同样,当点火延时超过 150 ms 以后,最小点火能增幅也较大,这主要是由于点火延时太长,粉尘云沉降等原因导致最小点火能增大。

2.3 喷粉压力对最小点火能的影响

试验过程中,粉尘浓度为 750 g/m^3 ,点火延时为 90 ms。

在相同的试验条件下,改变喷粉压力,在喷粉压力为 0.6、0.7、0.8、0.9、1.0、1.1、1.2 MPa 的试验条件下进行了粉尘最小点火能测试,试验结果如图 5 所示。放电方式的不同对粉尘的最小点火能有一定的影响,但与图 3 和图 4 相比,影响相对较小。

试验过程中,压缩空气使粉尘扩散形成粉尘云,喷粉压力与哈特曼管中局部粉尘云浓度形成有关。喷粉压力在 0.6 ~ 0.8 MPa 之间时,随着喷粉压力的增加,粉尘最小点火能逐渐降低,当喷粉压力为 0.8 MPa 时,粉尘最小点火达到最小值(有电感的放电方式为 10 mJ,无电感的放电方式为 15 mJ),此时,粉尘云在电极附近形成局部浓度最佳。继续增大喷粉压力,粉尘的最小点火能增大,这主要是由于喷粉压力过大,电极点火时错过局部最佳粉尘浓度。

3 结论

1) 在环境温度为 $(25 \pm 5) ^\circ\text{C}$,环境湿度为 30% $\pm 5\%$ 的条件下,石松子粉的最佳着火浓度为 750 g/m^3 ,最佳点火延时为 90 ms,最佳喷粉压力为 0.8 MPa,此时石松子粉的最小点火能达到极小值。在有电感存在的情况下,石松子粉的最小点火能为 10 mJ;在无电感存在的情况下,石松子粉的最小点火能为 15 mJ,说明石松子粉对电火花较敏感。

2) 电火花附近粉尘云浓度的变化直接影响粉尘最小点火能。当局部浓度过低时,电火花引燃的粉尘颗粒不足以使燃烧传递下去;当粉尘局部浓度达到最佳时,电火花直接引燃粉尘的颗粒数目增多,能够突破火焰正常传播下去所需要的临界值,使粉

尘燃烧继续进行下去;当粉尘局部浓度过高时,哈特曼管中的氧含量急剧下降,同时粉尘浓度过大导致电极尖端放电困难,在一定程度上抑制整个燃烧过程的形成和持续。

参考文献

- [1] 张增亮. 最小点火能的影响因素及计算误差分析研究[J]. 中国安全科学学报, 2004, 15(5): 88-91.
- [2] Marmo L., Cavallero D. Minimum Ignition Energy of Nylon Fibres [J]. J. Loss. Prevent. Proc., 2008, 21 (5): 512-517.
- [3] Ryo O., Maslaharu N., Shuzo F., et al. Minimum Ignition Energy of Hydrogen-air Mixture; Effects of Humidity and Spark Duration [J]. J. Electrostat., 2007, 65 (2): 87-93.
- [4] 李新光, 董洪光, Radandt S., 等. 粉尘云最小点火能测试方法的比较与分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2004, 25(1): 44-47.
- [5] Proust Ch., Accorsi A., Dupont L. Measuring the Violence of Dust Explosions with the "20L Sphere" and with the Standard "ISO 1m³ Vessel" Systematic Comparison and Analysis of the Discrepancies [J]. J. Loss. Prevent. Proc., 2007, 20 (4-6): 599-606.
- [6] Proust Ch. A few Fundamental Aspects about Ignition and Flame Propagation in Dust Clouds [J]. J. Loss. Prevent. Proc., 2006, 19 (2-3): 104-120.
- [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] 曹卫国. 小麦淀粉粉尘爆炸特性参数的研究[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(2): 213-216.
- [9] 饶国宁, 陈网桦, 方卿, 等. 膨化硝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.
- [10] 秋珊珊. 石松子粉粉尘爆炸试验研究[J]. 爆破器材, 2012, 41(3): 16-18.
- [11] American Society for Testing Material. E1491 Standard Test Method for Minimum Autoignition Temperature of Dust Clouds [S]. Pennsylvania: Standards Press of America, 2006.
- [12] American Society for Testing Material. E1515 Standard Test Method for Minimum Explosible Concentration of Combustible Dusts [S]. Pennsylvania: Standards Press of America, 2007.
- [13] American Society for Testing Material. E2019 Standard Test Method for Minimum Ignition Energy of a Dust could in Air [S]. Pennsylvania: Standards Press of America, 2005.

- [C]. 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, USA, Sacramento, 2006.
- [13] Mallery M., Kozlowski T. Performance Analysis of Linear Shaped Charge for Aerospace Applications [C]. 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, USA, Tucson, 2005:1-12.
- [14] Whalley I. Development of the STARS II Shroud Separation System [C]. 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. USA, Salt Lake City, 2001.
- [15] McGill L. J. Tomahawk Booster Separation System Ground Test Failure Investigation and Results [C]. 38th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. 2000.
- [16] 张华, 郭宝义. 双向线型聚能爆炸切割器的研制[J]. 矿业快报, 2001(20):21-22.
- [17] 王飞, 王连来, 刘广初. 线性切割器正交优化设计与数值模拟研究[J]. 爆破器材, 2006, 35(2):23-26.
- [18] 崔云航, 万文乾, 田七, 等. 线型聚能装药优化设计[J]. 火工品, 2006(4):42-46.
- [19] Lim S. Steady State Equation of Motion of A Linear Shaped Charges Liner [J]. Int. J. Impact Eng., 2012, 44:10-16.
- [20] Jamali A., Nariman-zadeh N., Darvizeh A., et al. Multi-objective Evolutionary Optimization of Polynomial Neural Networks for Modelling and Prediction of Explosive Cutting Process [J]. Eng. Appl. Artif. Intel., 2009, 22(4-5):676-687.
- [21] 北京大学数学力学系数学专业概率统计组. 正交设计——一种安排多因素试验的数学方法[M]. 北京: 人民教育出版社, 1976.
- [22] Л. П. 奥尔连科. 爆炸物理学[M]. 孙承伟, 译. 3 版. 北京: 科学出版社, 2011:922-1079.

Study on the Orthogonal Optimization Design of the Parameters of Linear Shaped Charge Cutting the Protective Door

WU Shuangzhang, GU Wenbin, LI Xufeng, XU Haoming

Engineering Institute of Engineer Corps, PLA University of Science & Technology (Jiangsu Nanjing, 210007)

[ABSTRACT] The different projects of the main structure parameters of some linear shaped charge(LSC) were designed with $L_{27}(3^{13})$ orthogonal table by the orthogonal optimization method. To obtain better main structure parameters of LSC, all projects were simulated numerically by means of ANSYS/LS—DYNA program. The maximum jet velocity and the maximum prebreakup jet length of the different projects were obtained as 5622.13 m/s and 151.41 mm respectively. The optimal projects were achieved by analyzing the simulation results. Various factors dominating the jet velocity is $\delta \rightarrow 2\alpha \rightarrow a \rightarrow b$, and the best projects from the orthogonal table is $2\alpha_3 - \delta_3 - a_3 - b_3$. For the jet length, the various dominant factors is $\delta \rightarrow a \rightarrow 2\alpha \rightarrow b$, and the best projects from the orthogonal table is $2\alpha_1 - \delta_1 - a_2 - b_2$.

[KEY WORDS] linear shaped charge, orthogonal optimization design, jet velocity, jet length

(上接第 11 页)

Experimental Research on Minimum Ignition Energy of Lycopodium

HUANG Liyuan^①, CAO Weiguo^①, XU Sen^①, ZHANG Jianxin^②, QIU Shanshan^{①②}, PAN Feng^{①②}

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 obtain the changing regularity of the minimum ignition energy with dust concentration, ignition delay and dusting pressure, lycopodium with the median diameter of $32\mu\text{m}$ was experimentally studied by 1.2 L Hartmann tube minimum ignition test device. The results have shown that the optimum ignition concentration is 750 g/m^3 and the optimum ignition delay is 90ms, the best dusting pressure is 0.8MPa under the temperature of $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$ and ambient humidity of $30\% \pm 5\%$, just when minimum ignition energy of lycopodium reaches its minimum value. Energy required for inductance ignition is smaller than the non-inductive under the same experimental conditions. The minimum ignition energy of lycopodium is 10 mJ in the presence of inductance, while it is 15 mJ with non-inductive, implying that lycopodium is sensitive to the electric spark.

[KEY WORDS] lycopodium, Hartmann tube, minimum ignition energy, ignition delay, dusting pressure