

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.04.006

点火具爆炸压力的理论计算与试验研究^{*}

曹卫国^① 黄丽媛^① 梁济元^① 郑俊杰^{①②} 刘向阳^③ 苗楠^④ 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)

③盐城进出口检验检疫局(江苏盐城,224002)

④东北大学工业爆炸及防护研究所(辽宁沈阳,110004)

[摘 要] 为了研究不同质量的点火具自身爆炸特性以及对粉尘爆炸下限浓度的影响,采用 20 L 球爆炸测试装置对不同质量的点火具进行了试验,与理论计算结果进行了对比;并对过 200 目筛、中位径为 32 μm 的煤粉进行了爆炸下限浓度研究。结果表明:试验结果和理论计算结果基本一致,爆炸压力随点火具质量的增加而呈现线性上升;随着点火具质量的增加,煤粉的爆炸压力逐渐增加,爆炸下限浓度逐渐降低,当点火具质量由 0.24 g 增加至 2.40 g 时,煤粉的爆炸下限浓度由 40 ~ 50 g/m³ 下降到 30 ~ 40 g/m³,引爆煤粉的危险性进一步增大。

[关键词] 点火具质量 20 L 球 煤粉爆炸 爆炸压力 爆炸下限浓度

[分类号] O389 X932

引言

粉尘爆炸是煤炭、冶金、粮食和采矿加工等行业最常见的安全隐患^[1-3]。其中,煤粉爆炸现象更为严重。我国煤炭产量占全世界煤炭总产量的 37% 左右,但事故死亡人数却占全世界煤矿死亡总人数的 70% 左右^[4]。随着煤粉喷吹工艺在冶金、火电等行业的全面推广^[5],煤粉爆炸逐渐成为威胁制粉系统安全运行的最大隐患。

近年来,国内外相关研究人员开始研究煤粉爆炸的危害性。Proust 等人^[6-7]用标准 20 L 球爆炸装置对粉尘爆炸进行了相关的实验研究和分析;蒯念生等人^[8]研究了点火具能量的大小对粉尘爆炸压力的影响;潘峰等人^[9]也从煤粉的着火温度、爆炸压力和爆炸指数等方面进行了研究。前人的研究成果主要是侧重于质量分数、粒径等粉尘本身性质的改变对爆炸危险性的影响,对点火能量的大小与爆炸危险性的相互关系研究较少。

本文采用 20 L 球爆炸测试系统,以不同质量的点火具为试验对象,通过理论计算与试验数据相对比,分别得出点火具自身产生的爆炸压力与质量的相互关系;并研究了不同点火具质量对煤粉爆炸下限浓度的影响,以期对粉尘爆炸的预防以及煤粉爆

炸危险性的认识起到指导作用。

1 试验

1.1 测试装置

20 L 球爆炸测试系统见文献[1],主要由粉尘的分散系统、点火系统以及测试系统等几个部分组成。球体的体积为 20.0 L,储粉罐的体积为 0.6 L。爆炸后压力通过 PLC 传感器采集后转变成计算机可以识别的信号并保存。采用不同质量的点火具和煤粉浓度(g/cm³)设计相应的爆炸试验,通过分析不同条件下的压力曲线得到相应的爆炸压力。

1.2 试验方法

将点火具固定在 20 L 球的中心位置,称量一定质量的煤粉(测试点火具爆炸压力时,煤粉质量为 0)放入储粉罐内,加压至 2.00 MPa,对球体抽真空至 -0.06 MPa,打开气粉两相阀,高压气体将煤粉通过喷嘴分散到容器中,开阀后 60 ms,点火具在容器中心被引爆。通过改变相关的条件,得到一系列数据。分析不同条件爆炸后的压力曲线,得到相应的试验结果。

1.3 试验样品

点火具:由活性铝粉、硝酸钡和过氧化钡组成。其中,活性铝粉质量分数为 40%,硝酸钡质量分数

* 收稿日期:2013-05-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51174047);国家自然科学基金青年基金项目(11102091);江苏省 2013 年度普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ13_0216);高等学校博士学科点专项科研基金 博导类(20113219110010)

作者简介:曹卫国(1984~),男,博士,主要从事粉尘爆炸、粉尘火焰传播、危险品分类等方面的研究。E-mail:caoweiguoiem@163.com

通信作者:潘峰(1971~),男,博士,副教授,主要从事爆炸品分类、粉尘爆炸、抗爆门等方面的研究。E-mail:panfengiem@163.com

为 30%, 过氧化钡质量分数为 30%。

煤粉: 由东北大学工业爆炸及防护研究所提供, 经粉碎、过 200 目筛, 采用激光粒度仪进行粒径分析, 煤粉的中位径为 $32\mu\text{m}$, 如图 1 所示。试验前, 在 50°C 的烘箱内干燥 48 h。

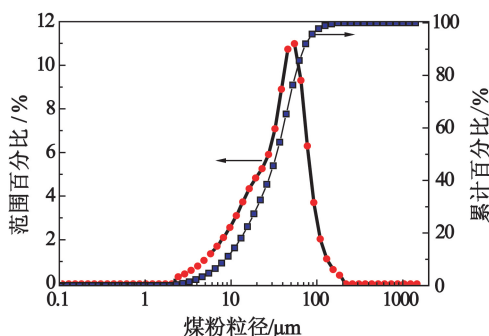


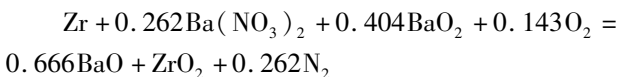
图 1 煤粉的粒径分布图

Fig. 1 Size distribution of coal dust

2 结果与讨论

2.1 不同质量点火具爆炸压力理论计算

点火具中, 活性钡粉、硝酸钡和过氧化钡质量之比为 4 : 3 : 3, 化学反应方程式为:



反应生成的能量:

$$\Delta H_1 = \sum_B v_B \Delta H_m^\theta \quad (1)$$

式中: v_B 表示参加反应的各物质的化学计量数; ΔH_1 表示化学反应的焐变, kJ/mol ; ΔH_m^θ 为各物质的反应焐: $\Delta H_m^\theta (\text{Ba}(\text{NO}_3)_2) = -728.0 \text{ kJ/mol}$; $\Delta H_m^\theta (\text{BaO}_2) = -634.3 \text{ kJ/mol}$; $\Delta H_m^\theta (\text{BaO}) = -548.1 \text{ kJ/mol}$; $\Delta H_m^\theta (\text{ZrO}_2) = -1100.6 \text{ kJ/mol}$ 。

因此:

$$\Delta H_1 = \sum_B v_B \Delta H_m^\theta = 0.666 \times (-548.1) + (-1100.6) - 0.262 \times (-728.0) - 0.404 \times (-634.3) = 1018.6 \text{ kJ/mol}$$

$$n(\text{Zr}) = \frac{m \times 0.4}{91.22} = \frac{m}{228.05} \quad (2)$$

$$\Delta H = n(\text{Zr}) \Delta H_1 = \frac{m \times 0.4}{91.22} \times 1018.6 = -4.467 m(\text{kJ}) \quad (3)$$

式(2)、(3)中: m 为点火具的总质量, g ; ΔH 为点火具放出的总热量, kJ 。

爆炸过程是恒容绝热过程, 假设爆炸初始温度为室温 $T_0 = 298\text{K}$ 。

反应前:

$$n_1(\text{N}_2) = \frac{p_0 V}{RT_0} \times 0.78 = \frac{101.3 \times 20}{8.314 \times 298} \times 0.78 =$$

$$0.6378 \text{ mol}$$

$$n_1(\text{O}_2) = \frac{p_0 V}{RT_0} \times 0.21 = \frac{101.3 \times 20}{8.314 \times 298} \times 0.21 =$$

$$0.1717 \text{ mol}$$

反应后:

$$\text{生成的氮气: } n_2(\text{N}_2) = 0.262n(\text{Zr}) = 0.262 \times$$

$$\frac{0.4m}{91.22} = 0.001148m(\text{mol})$$

$$\text{消耗的氧气: } n_2(\text{O}_2) = 0.143n(\text{Zr}) = 0.143 \times$$

$$\frac{0.4m}{91.22} = 0.000629m(\text{mol})$$

气体爆炸的恒容绝热反应过程可以简化为恒温恒容反应过程和恒容升温反应过程, 如图 2 所示。

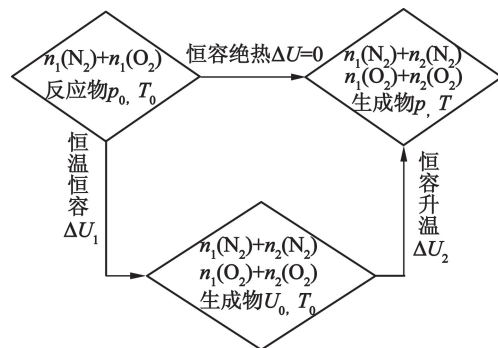


图 2 煤粉恒温绝热反应示意图

Fig. 2 Process of thermostatic adiabatic reaction of coal dust

根据热力学第一定律, 恒容封闭系统中可燃气体燃爆前后的热力学能量不变。由状态函数的性质可知:

$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 = 0 \quad (4)$$

此反应过程可以分为绝热恒温反应和恒容升温反应, 分别通过反应焐和比热进行计算:

$$\Delta U_1 = \Delta H - \sum n_1 RT_0 \quad (5)$$

$$\Delta U_2 = \sum n_2 C_{v,m} \Delta T \quad (6)$$

式(5)、(6)中: n_1 为生成的 N_2 和消耗的 O_2 物质的量之差, mol ; n_2 为反应后 N_2 和 O_2 物质的量之和, mol 。

$$\text{恒温恒容反应时: } n_1 = n_2(\text{N}_2) - n_2(\text{O}_2) = 0.000519m(\text{mol})$$

$$\Delta U_1 = \Delta H - \sum n_1 RT_0 = -4.467m \times 1000 - 0.000519RT_0 m(\text{J})$$

恒容升温反应时:

$$\begin{aligned} \Delta U_2 &= \int_{298}^T n(\text{O}_2) C_{v,m}(\text{O}_2) dT + \int_{298}^T n(\text{N}_2) \cdot \\ &C_{v,m}(\text{N}_2) dT \\ &= \int_{298}^T (0.1717 - 0.000629m) \times [(a_1 + b_1 T + c_1 T^2) \\ &- R] dT + \int_{298}^T (0.6378 + 0.001148m) \times [(a_2 + b_2 T \\ &+ c_2 T^2) - R] dT \end{aligned}$$

式中: $a_1=28.17$; $b_1=6.297\times10^{-3}$; $c_1=-0.7494\times10^{-6}$; $a_2=27.32$; $b_2=6.226\times10^{-3}$; $c_2=-0.9502\times10^{-6}$ [10]。

由式(4)得:

$$\int_{298}^T \{ (0.1717 - 0.000629m) \times [(a_1 + b_1T + c_1T^2) - R] + (0.6378 + 0.001148m) \times [(a_2 + b_2T + c_2T^2) - R] \} dT = 4.467m \times 1000 + 0.000519RT_0m$$

又因为 $p = \frac{nRT}{V} =$

$$\frac{(0.6378 + 0.1717 + 0.000519m) \times 8.314 \times T}{20} \text{ (kPa)},$$

因此点火具爆炸产生的表压 p_i 可以用容器中的绝对压力 p 与大气压力 p_0 之差来表示,即 $p_i = p - p_0$ 。

文献[6]和[8]通过大量的实验得出 20 L 球爆炸的点火具有效能量约为总能量的 50%,理论计算结果 p_i 如表 1 所示。

2.2 不同质量点火具爆炸压力试验结果

在 20 L 球中分别对质量为 0.24 g、0.48 g、0.96g、1.20 g、1.92 g 和 2.40 g 的点火具进行试验,得出爆炸压力,与理论计算结果相比较,如表 1 所示。

从表 1 看出,点火具爆炸压力的理论计算值和试验值基本一致,爆炸压力和质量呈线性关系,从理论和试验中得出了点火具自身爆炸产生的压力大小。

2.3 点火具质量对煤粉爆炸下限浓度的影响

试验环境温度 25 ℃,点火具质量分别为0.24g、1.20g 和 2.40g,煤粉爆炸产生的压力 p_c 见图 3。

由图 3 可见,不同点火条件下,煤粉在 10 ~ 60 g/m³ 浓度内,爆炸压力均随着浓度的增加而不断上升;同一浓度条件下,煤粉的爆炸压力随着点火具质量的增加而增加。以 $\Delta p_c \geq 0.05 \text{ MPa}$ [11] 作为煤粉爆炸的临界压力 p_{cri} ,当点火具质量为 0.24g 时,煤粉的爆炸下限浓度为 40 ~ 50 g/m³;当点火具质量增加到 1.20g 时,煤粉的爆炸下限浓度为 30 ~ 40 g/m³,煤粉的爆炸下限浓度降低,煤粉被点燃的爆炸危险性进一步增加;继续增加点火具质量到 2.40 g,此时煤粉的爆炸下限浓度仍为 30 ~ 40 g/m³,可以

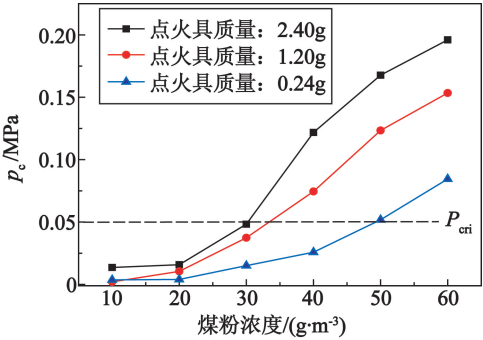


图 3 不同点火具质量下煤粉浓度和爆炸压力关系
Fig. 3 Relationship between dust concentration and explosion pressure with different ignition quality

看出此点火条件下煤粉的爆炸压力比点火具质量为 0.24g 时的爆炸压力明显上升。当煤粉浓度低于 30 g/m³ 时,煤粉均未发生爆炸。随着煤粉浓度的增加,压力有所上升,但未达到 0.05MPa;这主要是因为煤粉浓度过低,单位体积内参与燃烧的颗粒较少,不足以使煤粉由燃烧转为爆轰,不能形成有效的爆炸[12];同理,当煤粉的浓度足够大时,单位体积内参与燃烧的颗粒较多,能够使燃烧进一步持续下去,形成爆轰。

图 4 为煤粉浓度 40 g/m³,不同点火具质量下的爆炸压力—时间曲线图。随着点火具质量的增加,煤粉的爆炸压力上升,在达到最大爆炸压力前,爆炸压力变化率也随着点火具质量的增加而明显提高,到达最大爆炸压力后缓慢下降,逐渐达到平衡。

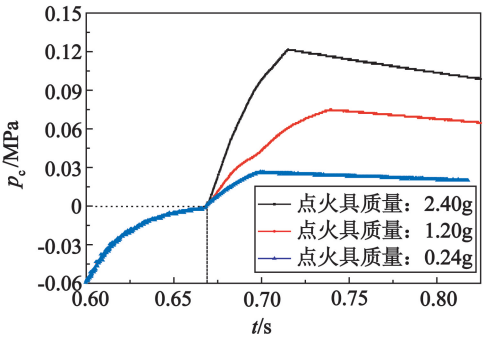


图 4 不同点火具质量下煤粉爆炸压力—时间曲线

Fig. 4 Relationship between explosion pressure of coal dust and time with different ignition quality

表 1 不同质量点火具的爆炸压力

		Tab. 1	Explosion pressure of igniter with different quality								
类别	质量/g	0.24	0.48	0.72	0.96	1.20	1.44	1.68	1.92	2.16	2.40
理论计算值	p_i /MPa	0.010	0.020	0.030	0.040	0.049	0.059	0.070	0.080	0.090	0.100
试验值	p_i /MPa	0.009	0.019	—	0.039	0.049	—	—	0.080	—	0.106

3 结论

1) 通过理论计算和试验数据可知, 点火具自身的爆炸压力与点火具自身质量呈线性关系, 当点火具质量为 2.40 g 时, 点火具的爆炸压力达到 0.1 MPa。

2) 煤粉的爆炸下限浓度随着点火具质量的增大而呈现下降趋势, 这说明随着点火具质量的增大, 单位体积内引燃煤粉的颗粒数增加, 爆炸压力变化率逐渐增大, 煤粉爆炸的危险性进一步加剧。

参考文献

- [1] 潘峰, 马超, 曹卫, 曹卫, 曹卫, 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.
Pan Feng, Ma Chao, Cao Weiguo, et al. Research on explosion risk of corn starch dust[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(7): 46-51.
- [2] 靳宝祥. 粉尘爆炸种种[J]. 劳动保护, 2002(7): 36.
- [3] 高聪, 李化, 苏丹, 等. 密闭空间煤粉的爆炸特性[J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(2): 164-168.
Gao Cong, Li Hua, Su Dan, et al. Explosion characteristics of coal dust in a sealed vessel[J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(2): 164-168.
- [4] 郝全明, 李晓明. 浅谈煤矿重特大爆炸事故[J]. 煤, 2011, 20(1): 43-44, 47.
- [5] 杜兵, 蒯念生, 黄卫星. 煤粉—惰性介质混合体系爆炸特性实验研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2012, 44(增1): 229-234.
Du Bing, Kuai Niansheng, Huang Weixing. Experiment based investigations on explosion behaviors of coal dust-inertant mixture[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2012, 44(Sup. 1): 229-234.

- [6] Proust Ch, Accorsi A, Dupont L. Measuring the violence of dust explosions with the “20L 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.
- [7] Proust Ch. A few fundamental aspects about ignition and flame propagation in dust clouds[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006, 19(2-3): 104-120.
- [8] 蒯念生, 黄卫星, 袁旌杰, 等. 点火能量对粉尘爆炸行为的影响[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(4): 432-438.
Kuai Niansheng, Huang Weixing, Yuan Jingjie, et al. Influence of ignition energy on dust explosion behavior[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(4): 432-438.
- [9] Cao Weiguo, Huang Liyuan, Zhang Jianxin, et al. Research on characteristic parameters of coal-dust explosion[J]. Procedia Engineering, 2012(45): 442-447.
- [10] 天津大学物理化学教研室. 物理化学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2001: 211-212.
- [11] 国家技术监督局. GB/T 16425—1996 粉尘云爆炸下限浓度测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
State Bureau of Technical Supervision. GB/T 16425—1996 Determination for minimum explosive concentration of dust cloud[S]. Beijing: China Standard Press, 1996.
- [12] 秋珊珊, 曹卫, 黄丽媛, 等. 石松子粉粉尘爆炸试验研究[J]. 爆破器材, 2012, 41(3): 16-18.
Qiu Shanshan, Cao Weiguo, Huang Liyuan, et al. Experimental research on lycopodium dust explosion[J]. Explosive Materials, 2012, 41(3): 16-18.

Computational and Experimental Studies of Explosion Pressure of Igniter

Cao Weiguo^①, Huang Liyuan^①, Liang Jiyuan^①, Zheng Junjie^{①②}, LIU Xiangyang^③,
Miao Nan^④, 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)

③Yancheng Entry-Exit Inspection And Quarantine Bureau (Jiangsu Yancheng, 224002)

④Industrial Explosion and Protection Institute, Northeastern University (Liaoning Shenyang, 110004)

[ABSTRACT] In order to study intrinsic explosibility of igniters in different quantity and the influence on minimum explosive concentration of coal dust, 20 L sphere explosion test units were employed, and then the experiment results were compared with the theoretical calculations. Moreover, coal powders of less than 200 mesh, whose median diameters were 32 μm , were used as dust samples for minimum explosive concentration evaluation. The experimental results show agreement with the theoretical calculations. The explosion pressure has a linear increase with the increasing of ignition quality. With the ignition quality increasing, the explosion pressure of coal dust increases and the minimum explosive concentration decreases conversely. When the ignition quantity increased from 0.24 g to 2.40 g, the minimum explosive concentration reduces from 40-50 g/m^3 to 30-40 g/m^3 , which indicated that the risk of such dust was further increased.

[KEY WORDS] ignition quality, 20 liter sphere, coal dust explosion, explosion pressure, minimum explosive concentration