文章编号: 1001-1455(2014)02-0161-06

采用 Logistic 统计法分析片状铝粉的最小点火能*

李 磊,刘庆明,高克平
(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081)

摘要: 在 1.28 L MIKE3 管内对不同浓度的片状铝粉-空气混合物进行最小点火能测试;基于统计分析的 Logistic 回归模型,采用用以概率表示粉尘云最小点火能的计算方法,借助 SPSS 统计分析软件计算得到各浓度下片状铝粉点火概率随能量的分布曲线。研究结果表明:片状铝粉的最小点火能随浓度的增大先迅速减小后保持在一定的能量范围内,其爆炸敏感度比普通球状铝粉更高;与采用其他方法的计算结果相比,以概率表示特定物质的最小点火能更符合实际情况。

关键词: 爆炸力学;最小点火能;Logistic 回归;片状铝粉;粉尘爆炸;MIKE3 管
中图分类号: O381 **国标学科代码**: 1303510 **文献标志码**: A

可燃固体粉尘-空气混合物的最小点火能(minimum ignition energy, MIE)是表征粉尘易燃易爆危险性的主要参数,对于精细化工、采矿和航空、兵器等工业的生产安全都是极其重要的指标。因此,系统研究粉尘云的最小点火能及其影响因素,更精确地测试最小点火能,并获得比较符合实际的数据,能够为工业粉尘防爆提供一定的理论参考依据。

目前各国标准关于粉尘云最小点火能的计算分析方法还有差异,有的给出的是一个能量范围,也有的给出一个特定的能量值,但都是把特定能量下点火成功与否当作确定的事件。S. P. M. Bane 等[1-2]在研究混和气体点火能的实验中提出,可以把点火结果看作一个概率事件,利用统计方法进行计算,给出的最小点火能以概率形式表示,这在点火能的研究方面是比较新颖的。S. Bernard 等[3]从一般统计规律和对数统计规律等 2 方面研究了粉尘云最小点火能的表示方法,认为可以提供一个特定点火成功概率下的能量值。M. Ngo[4]系统地运用 Logistic 回归分析方法对可燃气混合物的最小点火能进行了研究,得到不同浓度的丙烷-空气混合物最小点火能的概率分布曲线,进一步验证了这种计算分析方法的可行性。上述研究表明:作为一种表征临界状态的参数,确定的最小点火能量能否点燃粉尘并使其维持燃烧是一个概率问题,但总体来说关于这方面的研究还不系统,需要进一步的研究。

此外,关于金属粉尘的燃爆特性研究也是该领域的热点问题。片状铝粉作为一种新型燃料已被成功应用于燃料-空气炸药等领域[5-6]。与一般球状铝粉相比,这种铝粉的比表面积更大,更利于点火和爆炸的传播,因此确定片状铝粉粉尘云的最小点火能对分析燃料的爆炸敏感度和产品安全性都很重要。本文中,基于 Logistic 统计分析方法对片状铝粉不同点火成功概率下的最小点火能进行研究。

1 实验装置与原理

1.1 实验测试装置

选用 MIKE3 管为测试装置,如图 1 所示。INERIS 在 Hartmann 管的基础上研制出符合 EN 标准[7]的 MIKE3 管。C. Cesana 等[8]对如何运用 MIKE3 管测试最小点火能做了详细介绍,并组织世界

* **收稿日期**: 2012-09-12; **修回日期**: 2012-12-24
基金项目: 国家重点基础研究计划(973 计划)项目(2011CB706900);
爆炸科学与技术国家重点实验室重点课题基金项目(YBKT11-03)
作者简介: 李 磊(1988—),男,硕士研究生。

范围内的 31 个实验室对该装置进行了校核，结果表明，MIKE3 管是点火能测试的可靠装置；A. Janes 等[9]比较了 Hartmann 管和 MIKE3 管的区别，通过实验得出，在所测能量处于 1～10 mJ 的范围或大于 100 mJ时，利用 MIKE3 管可以更准确地表述物质的最小点火能。

图 1 中，钨电极直径为 3 mm，电极尖端角度约为 30°；电磁阀控制高压气体喷入实验装置中；压力表用以显示喷粉压力的大小；石英玻璃管直径为 72 mm，高为 314.5 mm，体积为 1.28 L，底部装有用以扩散粉尘的半球状扩散器。图 2 为实验装置的点火电路，电容放电产生的电流和电压分别用电流线圈和高压探头进行测试，实验过程中电极间隙保持 6 mm 不变。

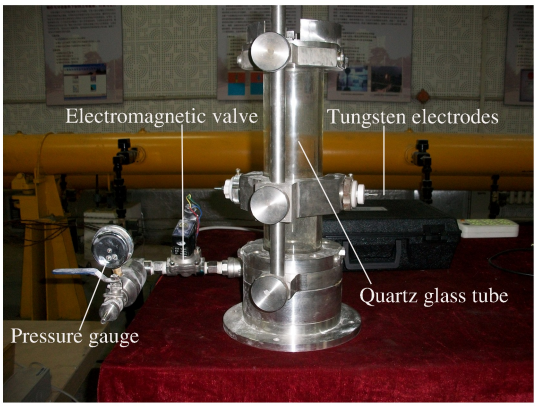


图 1 粉尘爆炸测试装置——MIKE3 管

Fig. 1 Dust explosion test apparatus－MIKE3 tube

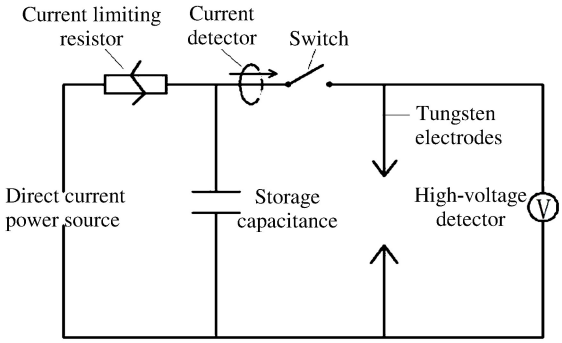


图 2 粉尘爆炸测试装置点火电路

Fig. 2 Ignition circuit of dust explosion test apparatus

大量实验表明[10]：由于电容放电不能完全放净以及电路中的能量损失等原因，真正作用于点火的能量小于电容的储存能量，而粉尘能否点燃在很大程度上依赖于点火能量的大小[11-12]，因此为了精确确定点燃粉尘的点火能量，本文中采用电压与电流乘积的积分形式对其进行计算：

$$E=\int_0^t I(t)V(t)\mathrm{d}t \tag{1}$$

式中：E 为点火能量；$I(t)$为电容放电时测得的电火花电流；$V(t)$为测得的电火花电压；t 为从电容开始放电到放电结束的时间。

1.2 最小点火能分析方法

本文中运用 Logistic 回归分析方法研究粉尘云的最小点火能。根据 Logistic 回归模型[13-14]，可将点火成功概率 p 的 Logit 变换 $L(p)$表示为最小点火能 E_m 的一次函数，即：

$$L(p)=\ln\frac{p}{1-p}=\beta_0+\beta_1 E_\mathrm{m} \tag{2}$$

式中：β_0 和 β_1 为系数，可利用 SPSS 软件计算得到。一定的点火成功概率 p 对应的最小点火能为：

$$E_\mathrm{m}=\left(\ln\frac{p}{1-p}-\beta_0\right)\Big/\beta_1 \tag{3}$$

式(3)的缺点在于，当 $p=1$ 时无法得到 E_m 的数值，因此对应一定点火成功概率的最小点火能量存在置信上限[4] E_ucl和置信下限 E_lcl：

$$\begin{cases} E_\mathrm{ucl}=E_\mathrm{m}+Z_{\alpha/2}\sqrt{\dfrac{\sigma_{00}+2E_\mathrm{m}\sigma_{01}+E_\mathrm{m}^2\sigma_{11}}{\beta_1^2}} \\ E_\mathrm{lcl}=E_\mathrm{m}-Z_{\alpha/2}\sqrt{\dfrac{\sigma_{00}+2E_\mathrm{m}\sigma_{01}+E_\mathrm{m}^2\sigma_{11}}{\beta_1^2}} \end{cases} \tag{4}$$

式中：σ_{00}和 σ_{11}分别为 β_0 和 β_1 的方差；σ_{01}为 β_0 和 β_1 的协方差；$Z_{\alpha/2}$为标准正态分布曲线的上α/2分位点，当置信度为 0.95 时，$\alpha=1-0.95=0.05$，$\alpha/2=0.025$，由标准正态分布表可以查出 $Z_{\alpha/2}=1.960$；$\sigma_{01}=\eta(\sigma_{00}\sigma_{11})^{1/2}$，$\eta$ 为相关系数，σ_{00}、σ_{11}和 η 可通过 SPSS 软件得出。

2　结果分析与比较

最小点火能测试使用的片状铝粉平均粒径为 10～16 μm，盖水面积为 0.7 m^2/g，活性铝成分不小于 82%。实验前将片状铝粉前在真空干燥箱中恒温干燥 24 h，各次实验的称量质量分别为 0.4、0.7、1.0、1.3、1.6 和 1.9 g。由于粉尘在喷扬扩散过程中存在壁面吸附、向管外飘逸等原因，又对喷粉效率进行了校核。

为保证较高的喷扬效率并使粉尘与空气充分混合，具体实验条件设置如下：喷粉压力为 0.7 MPa，喷粉时间为 110 ms，点火延迟时间为 130 ms。对于同一浓度的片状铝粉粉尘，最多重复喷扬、点火 10 次，如果均未发生燃烧和爆炸，则认为该点火能量不能引起点火。

2.1　Logistic 回归模型确定最小点火能

根据实验数据，利用 SPSS 软件可以得到铝粉称量质量为 1 g 时，$\beta_0=-6.499$，$\beta_1=1.407$，代入式(3)可以得出点火成功概率为 10%的最小点火能是 3.06 mJ。其他浓度的结果分析均同理。图 3 给出了称量质量分别为 1.0 g(实际浓度为 657.89 g/m^3)和 1.6 g(实际浓度为 570.18 g/m^3)的片状铝粉的点火实验结果，计算所得的点火成功概率曲线及能量值(置信度为 95%的置信区间)的分布曲线。

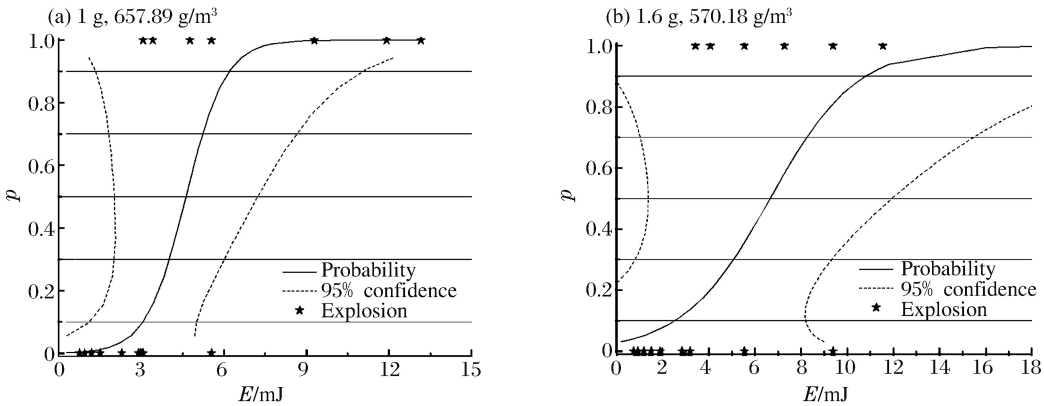


图 3　不同浓度片状铝粉点火试验结果及最小点火能概率分布曲线

Fig. 3　Result of ignition test under various concentrations of falke aluminium dust and probability distribution of the minimum ignition energy

2.2　浓度对最小点火能的影响

表 1 给出了实验所用不同质量铝粉粉尘及其实际浓度、基于 Logistic 回归模型并通过 SPSS 软件求得的 β_0、β_1 的值以及点火成功概率分别为 $p=5\%$，10%和 50%时的最小点火能，其中：m 为称量质量，ρ 为实际质量浓度。

表 1　不同浓度片状铝粉的最小点火能计算结果

Table 2　Calculation result of minimum ignition energy under various concentration of falke aluminium dust

m/g	ρ/(g·m^{-3})	β_0	β_1/mJ^{-1}	E_m/mJ		
				$p=5\%$	$p=10\%$	$p=50\%$
0.4	192.98	−11.527	0.569	15.08	16.40	20.26
0.7	412.05	−59.748	8.069	7.04	7.133	7.40
1.0	657.89	−6.499	1.407	2.53	3.06	4.62
1.3	578.95	−4.894	0.786	2.48	3.44	6.22
1.6	570.18	−3.547	0.533	1.13	2.55	6.65
1.9	631.58	−4.125	0.652	1.81	2.96	6.33

图 4 为铝粉-空气混合物的最小点火能(E_m)随浓度(ρ)的变化曲线。由图 4 可以看出,当粉尘云浓度很小时最小点火能较大,随着粉尘云浓度逐渐增大,所需的最小点火能迅速减小,最后基本稳定在很小的能量范围内。具体以 $p=10\%$ 的对应曲线为例,当片状铝粉的浓度为 570.18 g/m^3 时,其最小点火能最小(2.55 mJ);随粉尘浓度继续增大最小点火能的数值稳定在 3 mJ 左右不变。与普通球状铝粉15 mJ的最小点火能[14]相比,片状铝粉的点火和爆炸敏感度极高,这是因为片状铝粉颗粒的比表面积较大,在很大的浓度范围内均容易点火引发爆炸。上述实验现象也与 K. Choi 等[15]的研究结果一致。

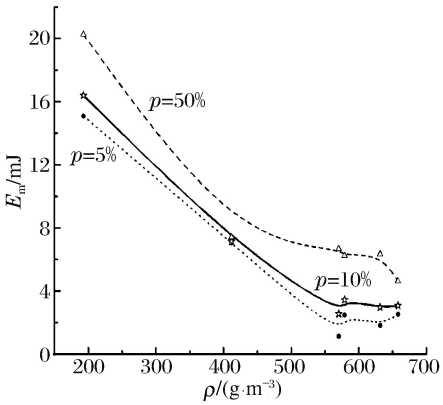


图 4 最小点火能随浓度的变化曲线

Fig. 4 Changes of the minimum ignition energy with concentration

2.3 不同最小点火能计算方法的比较

结合本次实验所得结果,对 3 种最小点火能计算标准分别进行了的计算和分析。

按照国标 GB/T16428-1996[16],国际电工协会标准 IEC:1994[17],美国材料试验协会标准 E2019-02[18]等 3 个标准,在给定的粉尘浓度下,以一个能可靠点燃粉尘云的能量值开始,通过调节电容和充电电压,逐次减半降低电火花能量,依次找到点火 20 次内均未出现着火的最大能量值 E_1 和点火 20 次内均出现着火的最小能量值 E_2,得到粉尘最小点火能是一个范围 $E_1<E_m<E_2$。以质量浓度为 570.18 g/m^3 的片状铝粉为例,测得其最小点火能范围为2.89 mJ$<E_m<$3.06 mJ。

按照欧盟标准 EN13821:2002[7],根据在各浓度下点火试验中均未出现点火的最大能量值 E_n 和出现过点火的最小能量值 E_i 确定最小点火能的一个统计值,即:

$$E_m=\exp\left[\ln E_i-\frac{n_i(\ln E_i-\ln E_n)}{n_{tot}+1}\right] \tag{5}$$

式中:n_i 为能量 E_i 在不同浓度下点火成功的次数,n_{tot}为实验中所用不同粉尘浓度的总次数。

根据本次实验中进行的 6 组不同浓度的片状铝粉点火情况,如表 2 所示,其中 p^* 为该实验中的点火成功概率,取 $E_n=1.88$ mJ,$E_i=4.06$ mJ,$n_i=2$,$n_{tot}=6$,代入式(5)计算得 $E_m=3.258$ mJ。

表 2 不同浓度片状铝粉点火实验结果

Table 2 Result of igintion test with different concentrations

E/mJ	点火成功与否						p^*
	192.98 g/m^3	412.05 g/m^3	570.18 g/m^3	578.95 g/m^3	631.58 g/m^3	657.89 g/m^3	
4.06	N	N	Y	N	N	Y	1/3
1.88	N	N	N	N	N	N	0

根据本文中所用的 Logistic 回归模型,得到片状铝粉质量浓度为 570.18 g/m^3 时的点火成功概率分布图(如图 3 所示),$p=10\%$对应的最小点火能 $E_m=2.55$ mJ。

在实际应用中,出于不同的目的对所用物质燃爆性能的实现期望也有不同。例如从工业生产安全的角度讲,要尽可能避免粉尘爆炸事故的发生,这就可以根据较低的点火成功概率(如 5%)来制定生产过程的防护标准和安全措施;而作为弹药和推进剂等产品的主要组分,则希望引爆的可靠性更高,其最小点火能的参考标准就可以取点火成功概率大于 50%甚至更高的条件。

从对比情况来看,上述 3 种方法给出的最小点火能的量级和规律完全一致,而运用 Logistic 回归模型得到的最小点火能以特定点火成功概率为前提,更符合实际情况,也能满足各种生产安全防护需要。

3　结　论

在容积为 1.28 L 的 MIKE3 管内对不同浓度的片状铝粉-空气混合物进行最小点火能测试实验，利用 SPSS 软件计算得到各浓度下片状铝粉粉尘在不同点火成功概率条件下的最小点火能，结果表明：

(1) 粉尘云点火成功与否应当做概率事件并应用统计分析方法进行研究，基于 Logistic 回归模型建立的粉尘云最小点火能计算方法能更准确地描述特定概率下的最小点火能；

(2) 粒径为 10～16 μm 的片状铝粉-空气混合物的最小点火能随铝粉浓度的增大迅速减小，当粉尘浓度高到一定程度后其最小点火能稳定在某一数值；

(3) 片状铝粉的最小点火能比普通球状铝粉小得多，其燃爆敏感度和危险性更强；

(4) 按不同计算标准得到的铝粉粉尘云最小点火能结果基本一致，且按 Logistic 回归模型得到的最小点火能更符合实际情况。

参考文献：

[1] Bane S P M, Zigeler J L, Boettcher P A, et al. Investigation of spark ignition in hydrogen, hexane and kerosene: experiment and simulation[C]// 8th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions. Yokohama, Japan, 2010.

[2] Bane S P M, Shepherd J E, Kwon E, et al. Statistical analysis of electrostatic spark ignition of lean H_2-O_2-air mixtures[C]// 3rd International Conference on Hydrogen Safety. Ajaccio, Corsica, France, 2009:16-18.

[3] Bernard S, Lebecki K, Gillard P, et al. Statistical method for the determination of the ignition energy of dust cloud experimental validation[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2010,23(1):404-411.

[4] Ngo M. Determination of the minimum ignition energy(MIE) of premixed propane/air[D]. Norway: Department of Physics and Technology University of Bergen, 2009.

[5] 白春华，梁慧敏，李建平，等. 云雾爆轰[M]. 北京：科学出版社，2012:17-50.

[6] 蒋丽，白春华，刘庆明. 气/固/液三相混合物燃烧转爆轰过程实验研究[J]. 爆炸与冲击，2010,30(6):588-592.
Jiang Li, Bai Chun-hua, Liu Qing-ming. Experimental study on DDT process in 3-phase suspensions of gas/solid particle/liquid mist mixture[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(6):588-592.

[7] European Committee for Standardization (CEN). European standard EN 13821:2002, Potentially explosive atmospheres-explosion prevention and protection-determination of minimum ignition energy of dust/air mixtures[S]. Brussels: CEN, 2002.

[8] Cesana C, Siwek R. Mike 3: Minimum ignition energy 3.3[S]. Birsfelden, Switzerland: Kühner AG, 2003.

[9] Janes A, Chaineaux J, Carson D, et al. MIKE 3 versus HARTMANN apparatus: Comparison of measured minimum ignition energy (MIE)[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008,152(1):32-39.

[10] Kamenskihs V, Ng H D, Lee J H S. Measurement of critical energy for direct initiation of spherical detonations in stoichiometric high-pressure H_2-O_2 mixtures[J]. Combustion and Flame, 2010,157(9):1795-1799.

[11] Nifuku M, Katoh H. Incendiary characteristics of electrostatic discharge for dust and gas explosion[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2001,14(6):547-551.

[12] 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 Nian-sheng, Huang Wei-xing, Yuan Jing-jie, et al. Influence of ignition energy on dust explosion behavior [J]. Explosion and Shock Waves, 2012,32(4):432-438.

[13] 何宁，吴黎兵，腾冲. 统计分析系统 SAS 与 SPSS[M]. 北京：机械工业出版社，2008:155-157.

[14] 周国泰，吕海燕，张海峰，等. 危险化学品安全技术全书[M]. 北京：化学工业出版社，1997:827-828.

[15] Choi K, Sakurai N, Yanagida K, et al. Ignitability of aluminous coating powders due to electrostatic spark[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2010,23(1):183-185.

[16] 国家技术监督局. GB/T 16428-1996，粉尘云最小着火能测定方法[S]. 北京：中国标准出版社，1997.

[17] International Electrotechnical Commission. IEC international standard CEI 61241-2-3, electrical apparatus for use in the presence of combustible dust, Part 2: Test methods, Section 3: Method of determining minimum ignition

energy of dust/air mixtures[S]. Geneva: IEC, 1994.

[18] American Society for Testing and Materials. Standards: E2019-02, standard test method for minimum ignition energy of a dust cloud in air[S]. West Conshohocken: ASTM, 2002.

Logistic regression analysis on minimum ignition energy of flake aluminum*

Li lei, Liu Qing-ming, Gao Ke-ping

(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology*, *Beijing Institute of Technology*, *Beijing* 100081, *China*)

Abstract: The minimum ignition energies of flake aluminum dust-air mixtures with different mass concentrations were tested in a 1.28-L MIKE3 tube. According to the logistic regression model based on statistical analysis, the minimum ignition energy of the dust cloud was presented by the probability of ignition success. And the ignition probability-energy curves of the flake aluminum dust with different mass concentrations were calculated by means of the SPSS statistical analysis software. The investigated results display that as the mass concentration of the aluminum dust in the mixture increases, the minimum ignition energy first decreases quickly and then keep in a certain energy range. And the explosion sensitivity of the flake aluminum is higher than ordinary spherical one. Compared with the results calculated by other standard methods, the minimum ignition energy presented by the probability of ignition success is more consistent with the engineering test.

Key words: mechanics of explosion; minimum ignition energy; logistic regression; flake aluminum dust; dust explosion; MIKE3 tube

---

* Received 12 September 2012; Revised 24 December 2012

Supported by the National Basic Program of China (973 Program)(2011CB706900)

Corresponding author: Liu Qing-ming, qmliu@bit.edu.cn

(责任编辑 王小飞)

本刊关于稿件、版权等的声明

在投稿、稿件处理、发表等过程中,作者需注意如下问题:

1. 稿件是作者独立取得的原创性研究成果,无抄袭,无一稿多投,未在国内外公开发表过。

2. 稿件无政治错误,不涉及保密和拟申请专利的内容,已经过作者单位保密审查。

3. 作者署名和排序无异议,单位署名和排序无争议,且无知识产权纠纷。在稿件处理过程中,如有作者或单位署名变更,需有全体作者亲笔签名和全部单位盖章同意的书面声明。

4. 稿件由编辑部组织审稿。自收稿之日时,编辑部将在 4 个月内反馈处理结果。若超过 4 个月未答复的,作者有权另行处理稿件,但需事先通知编辑部。

5. 对录用的稿件,在尊重稿件内容的基础上,编辑部有权作必要的修改和删减,按规定进行标准化和规范化。

6. 稿件录用后,稿件的所有出版权归编辑部。

7. 稿件发表后,编辑部赠送样刊,并一次性付给作者稿酬及版权转让费。

爆炸与冲击

2014 年 3 月 25 日