

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.06.004

梧桐树粉尘爆炸特性研究*

马汉翔 毛浩清 张 军 马泽文 何中其
南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 以梧桐树粉尘为例,研究了可作为工业粉状炸药添加剂的木粉粉尘的爆炸特性。运用哈特曼管测试了粉尘云的最小点火能,得出样品1[#]、样品2[#]和样品3[#]的最小点火能分别为70、90 mJ和150 mJ。将响应面法中的Box-Behnken试验设计应用于粉尘爆炸压力的测试,用20 L爆炸球进行试验,并从试验结果中拟合回归方程,由此判断出粉尘浓度对爆炸压力的影响最大,其次是点火能量,再次是粉尘粒径。对爆炸压力的试验条件进行优化,试验测得压力值为0.795 9 MPa,试验值与预测值之间的误差仅为1.28%,证明了该模型非常有效。

[关键词] 梧桐树粉尘;最小点火能;响应面法;爆炸压力

[分类号] X932

Explosion Characteristics of Chinese Parasol Tree Dust

MA Hanxiang, MAO Haoqing, ZHANG Jun, MA Zewen, HE Zhongqi
School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] Dust of Chinese parasol was used as an additive agent of industrial powder explosives to study its explosion characteristics. Hartmann tube was used in testing the minimum ignition energy of dust cloud, and the values of Sample 1[#], Sample 2[#] and Sample 3[#] were confirmed as 70 mJ, 90 mJ, and 150 mJ respectively. Box-Behnken experimental design of response surface methodology was applied to measure the dust explosion pressure by using 20 L spherical test device. Regression equation was fitted from experimental results. It is concluded that dust concentration has the greatest influence on explosion pressure, followed by ignition energy and dust particle size. Experimental conditions of explosion pressure were optimized and tested to be 0.795 9 MPa. Error between the experimental and predicted values is only 1.28%, which shows the feasibility of this model.

[KEYWORDS] dust of Chinese parasol tree; minimum ignition energy; response surface methodology; explosion pressure

引言

木粉是工业粉状炸药中最为常见的添加剂之一,不仅能够作为固体可燃剂,还因多孔隙的特性,对工业炸药起到了敏化作用。加入木粉后,粉状工业炸药的爆轰感度会有显著提高。随着木粉生产与使用规模的扩大,由其引发的粉尘爆炸事故得到了人们的普遍关注。国内外科研人员对木粉的燃爆特性进行了一些研究。陈国华等^[1]研究发现,随着粉尘浓度的提高,红木的粉尘云最低着火温度先下降后上升,随着粉尘粒径的减小,粉尘云最低着火温度度不断下降。Medina等^[2]研究了挪威云杉木粉干燥

前与干燥后的爆炸特性,发现干燥后的云杉木粉的危险性大大提高,干燥后的云杉木粉显示出与劣质煤相似的燃爆特性。Todaka等^[3]研究了咖啡渣与麻疯树籽的含油量对爆炸下限和最小点火能的影响,含油率的提高使粉尘的爆炸下限和最小点火能下降。Medina等^[4]在标准的1 L密闭爆炸容器内测试了凯琳莱煤、哥伦比亚煤、英国南方松和挪威云杉的粉尘爆炸压力和最大火焰传播速度,尽管两种木粉与煤粉的成分差异很大,但是它们的燃爆特性与煤粉很接近。

国外的学者在该领域的研究比较充分,主要是对一些大量生长于欧洲的树木粉尘进行了研究。我国大部分地区为亚热带,树木的类型与欧洲差异较

* 收稿日期:2017-05-25
作者简介:马汉翔(1991-),男,硕士,主要从事爆炸防护研究。E-mail:550753554@qq.com
通信作者:何中其(1978-),男,博士,讲师,主要从事爆炸防护研究。E-mail:hqz555@163.com

大。梧桐树作为中国分布最广的树种,也可被大量用作工业炸药的添加剂。故此,以梧桐树粉尘为研究对象,以期对相关生产企业提供安全指导。

1 试验部分

1.1 粉尘试样

所用的梧桐树粉样品试验前经过粉碎、筛分、干燥等处理。其粒径分布由 Mastersizer 2000 激光粒度仪测定,如表 1 所示。

表 1 样品粒径
Tab.1 Particle size of samples

	μm		
样品编号	1 [#]	2 [#]	3 [#]
D_{50}	41	58	121

1.2 环境条件

实验室的环境温度为 $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$,环境湿度为 $(30 \pm 5)\%$ 。

1.3 最小点火能测试

利用哈特曼管测最小点火能。该装置主要包括由石英制成的燃烧管道、粉尘分散系统、进气系统和电磁阀等^[5]。

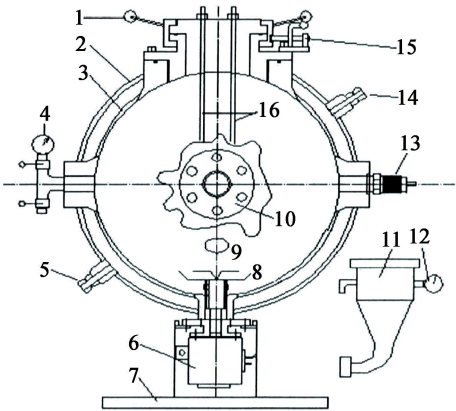
梧桐树粉尘的最小点火能依据 ASTM E2019 标准^[6]进行测试。先设定一个静电火花能量,随后逐渐降低点火能量,最小点火能 E_{\min} 介于连续 10 次试验均未出现着火的最大能量值 E_1 和连续 10 次试验至少有一次出现着火的最小能量值 E_2 之间,选取 E_2 作为木粉的最小点火能。采用有电感的放电方式,喷粉压力为 0.7 MPa,点火延迟为 60 ms。

1.4 粉尘云的最大爆炸压力测试

粉尘云的爆炸下限和最大爆炸压力皆由 20 L 球爆炸装置进行测试。该装置由压力传感器、分散系统、点火系统和控制及数据采集系统等组成,如图 1 所示。不锈钢球体的侧面设有观察口,可透过有机玻璃观察球体内是否出现火光。

1.5 基于响应面法的粉尘云爆炸压力试验

利用响应面中的 Box-Behnken 试验设计法对梧桐树粉尘云的爆炸压力进行测试,设计需要用到专业的试验设计软件 Design-Expert^[7]。响应面法能够对比分析粉尘粒径、粉尘浓度与点火能量对爆炸压力的影响程度^[8],软件 Design-Expert 可优化试验条件,并在该试验条件下再次试验,得出最大爆炸压力。这一步骤主要分为 3 个阶段:



1 - 操作柄;2 - 外壁;3 - 内壁;4 - 真空表;5 - 冷却水入口;6 - 快速开启阀;7 - 底座;8 - 粉尘分散阀;9 - 进气口;10 - 观察窗;11 - 储气室(储粉室);12 - 压力表;13 - 压力传感器;14 - 冷却水出口;15 - 安全锁;16 - 电极。

图 1 20 L 爆炸球测试装置

Fig. 1 20 L spherical explosive device

1) 选择试验设计法。响应面中使用最多的是中心组合试验设计和 Box-Behnken 试验设计^[9],选取 Box-Behnken 试验设计法进行试验。

2) 分析。对非线性数据进行拟合和方差分析,计算出响应面函数,再评估拟合精度和模型及各项的显著性^[10]。

3) 优化。在优化阶段,使用者根据自身需求预测出试验最优值(本文中的最优值为最大爆炸压力),软件能提供最优的试验参数,把最优的参数设定为实际试验参数^[11]。

选择响应面中的 Box-Behnken Design (BBD) 进入设计界面,设定因素数量和响应值个数(即爆炸压力)^[12],同时设定试验因素的高低值。粉尘粒度的高值为 400 目,低值为 200 目;粉尘质量浓度的高值为 800 g/m³,低值为 200 g/m³;点火能量的高值为 10 kJ,低值为 2 kJ。因素 A 为粉尘粒径,B 为质量浓度,C 为点火能量,响应值是爆炸压力,每个因素下皆为 3 水平,软件能自动给出试验条件,3 因素的试验值可为真实值,也可为编码值。

设置界面如图 2 所示。

2 试验结果与讨论

2.1 最小点火能

由图 3 可知,不同中位粒径的木粉的最小点火能随质量浓度变化的趋势有相似之处,皆为先下降后上升。样品 3[#] 在 125 ~ 750 g/m³ 的质量浓度区间内,最小点火能下降,当质量浓度高于 750 g/m³ 时,

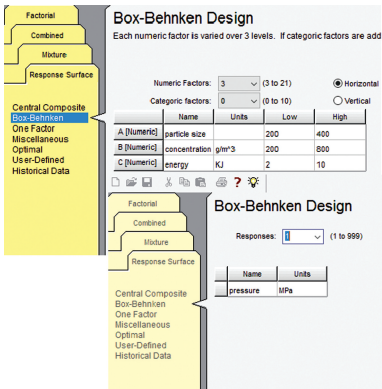


图2 响应面法的 Box-Behnken 设计界面

Fig. 2 Box-Behnken design surface of response surface method

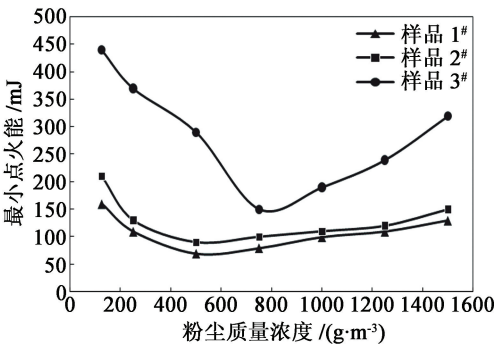


图3 质量浓度对最小点火能的影响

Fig. 3 Effect of mass concentration on the minimum ignition energy

最小点火能开始上升。样品 1[#]和样品 2[#]在 125 ~ 500 g/m³ 的质量浓度区间内,最小点火能下降,当质量浓度高于 500 g/m³ 时,最小点火能开始上升。样品 1[#] ~ 样品 3[#]的最小点火能分别为 70、90 mJ 和 150 mJ。

粉尘质量浓度低,意味着有限空间内悬浮的颗粒数量少,颗粒与颗粒之间的距离远,颗粒燃烧时热传递变得更加困难,只有通过增大外界能量的方法才能确保爆炸发生;若浓度过高,会导致有限空间内氧气变得稀缺,木粉颗粒难以充分燃烧;此外,过量的粉尘颗粒极易附着于电极尖端,这就会大幅削减哈特曼管尖端放电的能量,致使最小点火能增大。

在相同质量浓度条件下,粉尘粒径减小,颗粒数目增加,粉尘云的分散性变得更好,由此增加了颗粒参与燃烧反应的比表面积,强化了燃烧热的释放,使粉尘颗粒能被较低的能量所点燃。

2.2 响应面法的结果与分析

依据 Box-Behnken 设计法得出的试验方案进行粉尘云爆炸压力爆炸试验,软件给出了 17 个需要进行测试的点^[13],测试结果如表 2。填入数据完毕,选择 Analysis 按钮进入响应面分析界面,按照试验

要求做好相关设置后,选择 ANOVA 按钮查阅方差分析结果,如表 3 所示。表 3 中, $P < 0.05$ 表明差异显著; $P < 0.01$ 表明差异非常显著。

表 2 影响因素的响应面设计与结果

Tab. 2 Response surface design and results of influencing factors

序号	粒径 A/目	质量浓度 B/(g · m ⁻³)	点火能量 C/kJ	爆炸压力 p ₁ /MPa
1	300	200	10	0.288 5
2	400	800	6	0.723 1
3	300	200	2	0.178 1
4	300	800	2	0.676 9
5	200	800	6	0.681 1
6	300	500	6	0.576 2
7	400	500	10	0.679 4
8	300	800	10	0.786 9
9	400	200	6	0.253 6
10	200	200	6	0.189 9
11	300	500	6	0.588 7
12	400	500	2	0.557 8
13	200	500	10	0.632 4
14	300	500	6	0.585 1
15	200	500	2	0.506 5
16	300	500	6	0.589 3
17	300	500	6	0.590 1

表 3 回归模型的方差分析结果

Tab. 3 Variance analysis of regression model of response surface test

方差来源	平方和 (SS)	自由度 (DF)	均方 (MS)	F	P
A	4.883×10^{-3}	1	4.88×10^{-3}	281.260 0	<0.000 1
B	4.744×10^{-1}	1	4.74×10^{-1}	27 326.58	<0.000 1
C	7.479×10^{-3}	1	7.48×10^{-3}	430.830 8	<0.000 1
AB	1.110×10^{-4}	1	1.11×10^{-4}	6.374 994	<0.000 1
AC	4.440×10^{-5}	1	4.44×10^{-5}	2.555 035	0.040 0
BC	2.750×10^{-5}	1	2.75×10^{-5}	1.584 672	0.154 0
A ²	3.500×10^{-4}	1	3.50×10^{-4}	20.187 56	0.248 4
B ²	5.524×10^{-2}	1	5.52×10^{-2}	3 182.034	0.002 8
C ²	8.750×10^{-5}	1	8.75×10^{-5}	5.041 637	<0.000 1
模型	5.432×10^{-1}	9	6.04×10^{-2}	3 476.484	<0.000 1
残差	1.220×10^{-4}	7	1.74×10^{-5}		
失拟项	6.810×10^{-5}	3	2.27×10^{-5}	1.700 029	0.303 8
纯误差	5.340×10^{-5}	4	1.34×10^{-5}		
总离差	5.433×10^{-1}	16			

由表 3 可知,模型的 P 值小于 0.000 1,模型可信度极高^[14]。在本模型中,单因素 A 、 B 、 C 的 P 值远远小于 0.01,说明粉尘粒径、质量浓度和点火能量这 3 个单因素都对爆炸压力存在非常显著的影响。模型的二次项 A^2 的 P 值为 0.248 4 ($P > 0.05$),证明该二次项对爆炸压力的影响并不显著; B^2 、 C^2 的 P 值皆小于 0.01,说明两者对爆炸压力的影响是非常显著的。 AB 项(粒径与质量浓度的交互项)的 P 值小于 0.01,说明其对爆炸压力影响非常显著^[15]; AC 项(粒径与点火能量的交互项)的 P 值为小于 0.05,说明其对爆炸压力的影响是显著的; BC 项(即质量浓度与点火能量的交互项)的 P 值为 0.154 0 ($P > 0.05$),证明了 BC 项未对响应值造成显著影响。模型失拟项(表示模型预测值与实际值不拟合的概率)的 P 值为 0.303 8,这表明失拟项对模型的影响并不显著,证实了模型完全与试验结果匹配,可以依据此模型对梧桐树粉尘的爆炸压力进行预测。

模型的相关系数 $R^2 = 0.998\ 1$,校正后的系数 $R_{adj} = 0.995\ 8$,说明模型能够解释试验数据 99.58% 的信息量,变异系数(CV)为 2.106%,小于 15% 的临界值,印证了该模型对实测数据有极好的解释性。由方差分析模型得多元二次回归方程

$$p_1 = 0.590 + 0.026A + 0.240B + 0.058C -$$
$$5.425 \times 10^{-3}AB - 1.085 \times 10^{-3}AC - 1.012 \times$$
$$10^{-4}BC - 6.270 \times 10^{-3}A^2 - 0.120B^2 + 0.014C^2。$$

(1)

在回归方程中,可由响应变量的一次项系数的绝对值来判定 3 因素对爆炸压力的影响程度^[16]。由式(1)可知 3 个因素对粉尘爆炸压力的影响程度由强到弱依次为:粉尘浓度、点火能量、粉尘粒径。在 Design-Expert 软件的优化设置中选择计算最大值的功 能,软件将给出试验因素的具体取值,在该条件下进行试验来验证模型预测的结论是否可靠。软件给出的试验因素的具体取值:粒度为 400 目,质量浓度为 788 g/m³,点火能量为 10 kJ,软件由回归方程预测的最大爆炸压力为 0.806 1 MPa。依据软件给出的试验因素取值进行粉尘云最大爆炸压力的测试,图 4 为按照优化条件进行试验的爆炸压力图,测得压力值为 0.795 9 MPa,预测值的误差仅为 1.28%,充分证明了该模型的有效性。

3 结 论

1)样品 1#、样品 2#和样品 3#的最小点火能分别

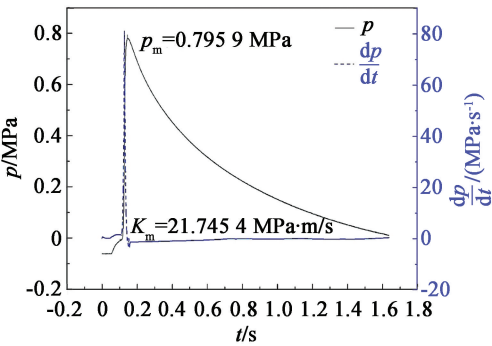


图 4 优化条件下试验得出的
粉尘云爆炸压力

Fig. 4 Explosion pressure of dust cloud under
the optimized conditions

为 70、90 mJ 和 150 mJ。

2)从回归方程的响应变量的一次项系数判断出 3 个因素对爆炸压力的影响程度由强到弱依次为:粉尘浓度、点火能量、粉尘粒径。

3)用软件对爆炸压力的试验条件进行优化,在优化后的条件下进行试验,测得压力值为 0.795 9 MPa,试验值与预测值之间的误差仅为 1.28%。

4)与以往的单因素试验法不同,研究了粉尘浓度、粉尘粒径与点火能量同时对爆炸压力施加影响的情况,把响应面试验法成功应用于粉尘爆炸测试领域,为防治粉尘爆炸提供了参考。

参 考 文 献

[1] 陈国华,江湖一佳,王新华. 红木粉爆炸特性实验研究[J]. 消防科学与技术,2016,35(9): 1200-1203.
CHEN G H, JIANG H Y J, WANG X H. Study on characteristics of mahogany wood dust explosion[J]. Fire Science and Technology, 2016,35(9): 1200-1203.

[2] MEDINA C H, SATTAR H, PHYLAKTU H N, et al. Explosion reactivity characterisation of pulverised torrefied spruce wood [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 36: 287-295.

[3] TODAKA M, KOWHAKUL W, MASAMOTO H, et al. Thermal analysis and dust explosion characteristics of spent coffee grounds and jatropa [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 44: 538-543.

[4] MEDINA C H, PHYLAKTU H N, ANDREWS G E, et al. Explosion characteristics of pulverised torrefied and raw Norway spruce (Picea abies) and Southern pine (Pinus palustris) in comparison to bituminous coal [J]. Biomass and Bioenergy, 2015, 79: 116-127.

[5] 黄丽媛,曹卫国,徐森,等. 石松子粉最小点火能试验研究[J]. 爆破器材, 2012, 41(5): 9-11, 16.

- [illegible]