

DOI: 10.11883/bzycj-2017-0388

# 基于交互正交实验的玉米淀粉粉尘云最低着火温度的影响因素研究\*

王庆慧<sup>1</sup>, 袁 帅<sup>1</sup>, 卫园梦<sup>1</sup>, 王丹枫<sup>2</sup>

(1. 东北石油大学机械科学与工程学院, 黑龙江 大庆 163318;

2. 大庆油田有限责任公司第三采油厂, 黑龙江 大庆 163113)

**摘要:** 采用 Godbert-Greenwald (G-G) 恒温炉装置, 运用交互正交实验方法, 研究了粉尘质量浓度、分散压力、CaCO<sub>3</sub> 质量分数及其交互作用对玉米淀粉粉尘云最低着火温度 (minimum ignition temperature of dust cloud, MITC) 的影响规律。通过直观分析法和方差分析法考察了各因素及其交互作用对玉米淀粉粉尘云最低着火温度影响, 2 种分析方法得出的结论一致。结果表明: CaCO<sub>3</sub> 质量分数和粉尘质量浓度对玉米淀粉粉尘云最低着火温度影响高度显著; 分散压力与粉尘质量浓度对玉米淀粉粉尘云最低着火温度的影响存在交互作用, 分散压力与粉尘质量浓度的交互作用对玉米淀粉粉尘云最低着火温度的影响显著。

**关键词:** 粉尘云最低着火温度; 粉尘质量浓度; 分散压力; 惰性介质; 交互正交实验; 直观分析; 方差分析

中图分类号: O389; X932

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

在研磨、筛选、清粉、刷麸、干燥等工艺过程常会产生大量的粮食粉尘, 这些微小可燃性粉尘常以云团状态存在, 遇到烘干机、燃烧炉等热表面可能被引燃, 造成火灾或者粮食粉尘爆炸事故。目前, 粮食和饲料工业仍是粉尘爆炸事故最为频发的行业<sup>[1]</sup>, 如 2010 年 2 月 24 日河北省某公司发生了一起重大玉米淀粉粉尘爆炸事故, 共造成 68 人伤亡<sup>[2]</sup>。粉尘云最低着火温度 (minimum ignition temperature of dust cloud, MITC) 是能使火焰在粉尘云内部维持传播的最低环境温度, 它是一种重要的粉尘爆炸敏感性参数, 应用于电气防爆设备的选型和防爆工艺设计<sup>[3]</sup>, 所以研究 MITC 对预防和减弱粉尘爆炸具有重要的实际意义。学者们对 MITC 进行了大量的实验和理论研究工作: 如, Wu 等<sup>[4]</sup> 采用 BAM 加热测试装置测定了 3 种煤粉尘云在不足组分的氧气环境中的最低着火温度, 实验表明相对于传统惰性气体 N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>, 降低氧含量能明显提高高挥发性煤粉的 MITC; Addai 等<sup>[5]</sup> 采用改装的 G-G 恒温炉装置对硫酸铵、氧化镁和砂子在抑制粉尘云燃烧效果进行比较, 实验表明这 3 种惰性介质对提高 MITC 的强弱依次为氧化镁最强、硫酸铵次之、砂子最弱; Miao 等<sup>[6]</sup> 发现 CaCO<sub>3</sub> 在降低合金粉尘云的燃烧敏感度方面要明显强于其在降低纯铝、纯镁粉尘云的燃烧敏感度方面; 李刚等<sup>[7]</sup> 利用建立的粉尘云着火温度测定装置, 研究了水分、粒径、灰分对粮食伴生粉尘的 MITC 的影响, 实验表明, 粮食伴生粉尘的 MITC 与以上 3 种因素均成正比; 苑春苗等<sup>[8]</sup> 基于非均相着火理论和牛顿运动定律建立了 MITC 与粉尘粒径、质量浓度、分散压力相关的理论模型, 并通过实验验证了模型的可靠性, 发现镁粉的 MITC 与其质量浓度和分散压力均成反比, 与粉尘粒径成正比; 叶亚明等<sup>[9]</sup> 利用 G-G 恒温炉, 研究了外界因素对锰粉尘云最低着火温度的影响, 结果表明, 随着喷粉压力、质量浓度的升高, 锰粉尘云最低着火温度都呈现先降低后升高的趋势, 惰性介质 SiO<sub>2</sub> 的质量浓度越高, 粒径越小, 越有利于抑制锰粉尘云的燃烧。

以上粉尘云最低着火温度的研究主要集中在粉尘质量浓度、粉尘粒径、分散压力、惰性介质质量浓度等单因素对其影响的方面, 没有考虑多因素交互对粉尘云最低着火温度的影响。本文中在前人的基

\* 收稿日期: 2017-10-30; 修回日期: 2017-12-06

第一作者: 王庆慧(1964—), 男, 博士, 副教授, wangqinghui84@163.com;

通信作者: 袁 帅(1991—), 男, 硕士研究生, m1881070136@163.com。

基础上,采用 G-G 恒温炉装置,运用交互正交实验设计方法着重考察粉尘质量浓度、分散压力、 $\text{CaCO}_3$  质量分数等因素及其交互作用对玉米淀粉粉尘云最低着火温度的影响,试图找出影响玉米淀粉粉尘云最低着火温度的主要因素,以期为预防和减弱粮食行业粉尘爆炸提供实验依据,指导安全生产。

## 1 实验

### 1.1 样品预处理

试样为食用玉米淀粉,过 200 目标准筛,然后使用 BT-9300S 激光粒度分析仪对玉米淀粉进行了粒度分析,发现玉米淀粉的中位粒径  $D_{50}=17.16\ \mu\text{m}$ 。目前常用的惰性粉尘有碳酸盐、磷酸盐、二氧化硅、氯化烷、水等,为了提高实验的精确度,本文中采用分析纯级别的  $\text{CaCO}_3$ ,其纯度不低于 99.0%,经激光粒度分析仪对  $\text{CaCO}_3$  粉尘粒度进行分析,发现  $\text{CaCO}_3$  粉尘的中位粒径  $D_{50}=2.06\ \mu\text{m}$ 。玉米淀粉和  $\text{CaCO}_3$  的粒度分布数据见表 1。由表 1 可知:玉米淀粉的粒径主要集中在  $3.90\sim 105.24\ \mu\text{m}$ ,说明玉米淀粉是大小不一的非均质混合物;而  $\text{CaCO}_3$  主要分布在  $0.43\sim 6.41\ \mu\text{m}$ ,粒度分布相对比较集中,有利于研究惰性粉尘对粉尘云最低着火温度的影响。为减少粉尘表面水分蒸发对实验结果的影响,在实验前将玉米淀粉和  $\text{CaCO}_3$  放入真空干燥箱内干燥 12 h(干燥温度为  $70\ ^\circ\text{C}$ ),为防止试样暴露于空气中受潮,干燥后将试样放入密封袋进行密封,保存于存有干燥剂的干燥器中,备用。实验室温度为  $25\ ^\circ\text{C}$ ,湿度为  $35\%\sim 38\%$ 。玉米淀粉的工业成分质量分数和元素成分质量分数见表 2。

表 1 粒度分布

Table 1 Size distribution

样品	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{25}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{75}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$	$D_{100}/\mu\text{m}$
玉米淀粉	3.90	8.53	17.16	29.95	45.03	105.24
$\text{CaCO}_3$	0.43	0.97	2.06	3.85	6.41	13.77

表 2 玉米淀粉的工业分析与元素分析

Table 2 Proximate and ultimate analysis of corn starch

元素成分质量分数/%					工业成分质量分数/%		
C	H	N	S	O	固定碳	挥发份	灰分
45.80	4.80	0.30	0.07	49.03	14.50	83.10	2.40

### 1.2 实验设备及实验步骤

粉尘云最低着火温度是指粉尘呈云团状时,以热对流为主要方式的外界环境使粉尘的温度发生突变时的最低环境温度,而粉尘云中空气与其携带的玉米淀粉粉尘存在相对运动,强制对流换热为其能量交换形式<sup>[10]</sup>。粉尘云最低着火温度常用测试装置有 2 种:一种是 BAM 炉(德国工程师协会推荐);另一种是 IEC3IH 推荐的 G-G 炉;这 2 种装置的主要区别是前者是水平放置,后者是竖立放置,由于水平放置时,首先燃烧的是可燃性粉尘分解出来的挥发分,而不是粉尘云本身,所以 BAM 炉测定的结果往往低于 G-G 炉测定的结果<sup>[11]</sup>,本文中采用 IEC3IH 推荐的 G-G 炉。

G-G 炉是由东北大学工业爆炸及防护研究所研制,如图 1 所示。该装置的主要技术参数:工作压力

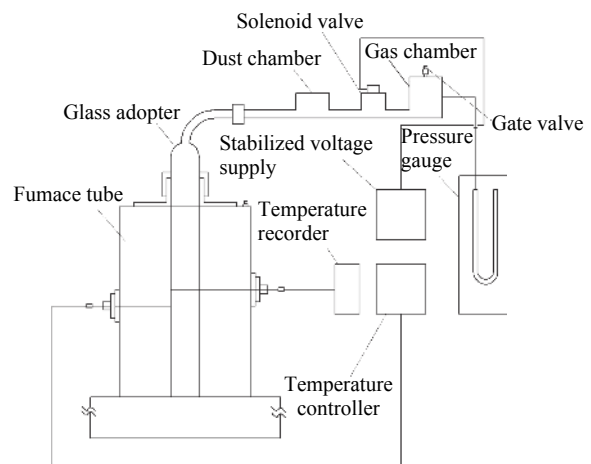


图 1 粉尘云最低着火温度测定装置示意图

Fig. 1 A sketch of the device for testing the minimum ignition temperature of dust cloud

低于 0.16 MPa, 温度范围为 20~1 000 °C, 炉管容积为 236 mL。适用标准为《粉尘云最低着火温度测定方法》GB/T 16429-1996<sup>[12]</sup>。实验时, 首先通过电阻丝以 100 °C 的温度梯度逐渐将加热炉炉壁温度加热到设定温度, 然后利用压缩空气携带粉尘一同喷入加热炉内, 最后观察加热炉下端口是否有火焰喷出, 实验的整个过程是在开启的通风柜内完成。该装置着火判定的依据是, 在加热炉管下面若有明显火焰喷出, 则判定为着火, 若只有火星而没有火焰, 或火焰滞后 3 s 以上, 则判定为未着火。通过改变分散压力、粉尘质量、CaCO<sub>3</sub> 与玉米淀粉质量配比即 CaCO<sub>3</sub> 质量分数, 能使粉尘云着火的最低炉壁温度即在此条件下的粉尘云最低着火温度<sup>[3]</sup>。

## 2 粉尘云最低着火温度交互正交实验设计

对于多因素多水平的实验, 要耗费大量的人力、物力、财力和时间, 例如三因素三水平实验至少要做  $3^3=27$  次实验, 如果考虑两两因素交互作用, 即为六因素三水平, 则需要做  $3^6=729$  次实验。

### 2.1 因素和水平的选择

选取分散压力  $A$ 、质量浓度  $B$ 、CaCO<sub>3</sub> 质量分数  $C$  这 3 个因素进行研究, 因素和水平见表 3。

表 3 因素与水平

Table 3 Factors and levels

水平	$A/\text{MPa}$	$B/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$C/\%$
1	0.04	0.741	10
2	0.06	1.111	30
3	0.08	1.481	50

### 2.2 实验方案

为研究分散压力、粉尘质量浓度、CaCO<sub>3</sub> 质量分数及其交互作用对玉米淀粉粉尘云最低着火温度的影响, 选用交互正交表  $L_{27}(3^3)$ <sup>[13]</sup>, 交互正交实验方案如表 4 所示, 选择粉尘云最低着火温度  $\theta_{\min}$  作为实验指标, 表 4 中第 9、10、12、13 列为空白列, 用于分析误差, 共有 27 种实验方案, 实验结果见表 4。

## 3 实验结果与讨论

对正交实验结果的分析有 2 种方法: 一种是直观分析法, 另一种是方差分析法。

### 3.1 直观分析法

直观分析法又称极差分析法, 它通过计算各因素下的极差  $R$  来判定, 极差的大小反映了因素对实验指标影响的强弱程度, 极差越大, 影响越强, 相反, 极差越小, 影响越弱。各因素的  $R$  可通过下式计算得到:

$$R = \max\{k_{ij}\} - \min\{k_{ij}\} \quad (1)$$

式中:  $i$  为水平数,  $j$  为因素数,  $k_{ij}$  为因素  $j$  在水平  $i$  下各实验结果的平均值。具有交互作用的  $R$  为相应列的极差之和, 各因素及其交互作用的直观分析结果见表 5。

从表 5 可以看出: CaCO<sub>3</sub> 质量分数的  $R$  最大, 为 29.1, 表明 CaCO<sub>3</sub> 质量分数对玉米淀粉粉尘云最低着火温度的影响程度最高; 分散压力的  $R$  最小, 为 3.6, 表明分散压力对玉米淀粉粉尘云最低着火温度的影响程度最低; 各因素及其交互作用对玉米淀粉粉尘云最低着火温度的影响由强到弱依次为:  $C$ 、 $B$ 、 $A \times B$ 、 $A \times C$ 、 $B \times C$ 、 $A$ , 即 CaCO<sub>3</sub> 质量分数、粉尘质量浓度、分散压力与粉尘质量浓度的交互、分散压力与 CaCO<sub>3</sub> 质量分数的交互、粉尘质量浓度与 CaCO<sub>3</sub> 质量分数的交互、分散压力。

### 3.2 方差分析法

方差分析通过将总离差平方和分解为各因素的离差平方和与误差离方平方和, 构造  $F$  统计量, 生成方差分析表, 对因素效应和交互效应的显著性作检验<sup>[14]</sup>, 显著性水平  $\alpha$  常用 0.01、0.05、0.1。在前面的直

观分析中,通过各因素极差的大小来评估实验指标影响的强弱,属于定性分析,其中的极差大小没有一个客观的标准,方差分析弥补了极差分析的不足。

将各因素分析结果列于方差分析表中,如表 6 所示,表 6 中  $S_s$  为离差平方和、 $d_f$  为自由度、 $M_s$  为均方、 $F$  为  $F$  统计量,  $e$  为误差项。

表 4 交互正交实验方案和实验结果

Table 4 Interactive orthogonal experimental details and results

实验序号	<i>A</i>	<i>B</i>	$(A \times B)_1$	$(A \times B)_2$	<i>C</i>	$(A \times C)_1$	$(A \times C)_2$	$(B \times C)_1$	$(B \times C)_2$				$\theta_{\min}/^\circ\text{C}$	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	475.0
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	480.0
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	500.0
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	465.0
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	473.0
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	485.0
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	453.0
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	463.0
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	482.0
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	477.0
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	487.0
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	513.0
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	467.0
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	470.0
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	495.0
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	435.0
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	443.0
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	480.0
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	480.0
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	485.0
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	490.0
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	455.0
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	463.0
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	487.0
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	445.0
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	457.0
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	482.0

表 5 实验结果直观分析

Table 5 Intuitive analysis of experimental results

分析因素	$k_{1j}$	$k_{2j}$	$k_{3j}$	<i>R</i>	分析因素	$k_{1j}$	$k_{2j}$	$k_{3j}$	<i>R</i>
<i>A</i>	475.1	474.1	471.6	3.6	$(A \times C)_1$	476.2	472.7	471.9	4.3
<i>B</i>	487.4	473.3	460.0	27.4	$(A \times C)_2$	472.4	476.0	472.3	3.7
$(A \times B)_1$	468.7	476.0	476.1	7.4	$(B \times C)_1$	473.6	475.9	471.3	4.6
$(A \times B)_2$	474.6	470.7	475.6	4.9	$(B \times C)_2$	475.8	472.4	473.6	3.3
<i>C</i>	461.3	469.0	490.4	29.1					

表 6 方差分析  
Table 6 Variance analysis

差异源	$S_s$	$d_f$	$M_s$	$F$	显著性
A	60.518 518 52	2	30.259 259 26	1.278 060 227	
B	3 390.296 296	2	1 695.148 148	71.597 966 37	***
A×B	447.703 703 7	4	111.925 925 9	4.727 414 939	**
C	4 098.296 296	2	2 049.148 148	86.549 863 12	***
A×C	174.370 370 4	4	43.592 592 59	1.841 220 18	
B×C	157.925 925 9	4	39.481 481 48	1.667 579 194	
e	189.407 407 4	8	23.675 925 93		

$F_{\alpha}(d_f, 8)$  为分布临界值, 如表 7 所示, 其中  $\alpha$  为预定的显著性水平, 常用的有 3 种, 即  $\alpha=0.1$ ,  $\alpha=0.05$ ,  $\alpha=0.01$ 。若某因素的  $F$  统计值大于  $F_{0.01}(d_f, 8)$ , 说明在置信度  $p=99\%$  时, 该因素水平的改变对结果影响高度显著 ( $p=99\%$ ), 若某因素的  $F$  统计值大于  $F_{0.05}(d_f, 8)$ , 说明该因素水平的改变对结果影响显著 ( $p=95\%$ ), 若某因素的  $F$  统计值大于  $F_{0.1}(d_f, 8)$ , 说明该因素水平的改变对结果影响一定显著 ( $p=90\%$ ), 若某因素的  $F$  统计值小于  $F_{0.1}(d_f, 8)$ , 说明该因素水平的改变对结果影响不显著。由表 6~7 可知,  $F_A < F_{0.1}(2, 8)$ , 说明因素 A 对玉米淀粉粉尘云最低着火温度的影响不显著; 同理, 因素 A 与因素 C 的交互、因素 B 与因素 C 的交互对玉米淀粉粉尘云最低着火温度的影响不显著;  $F_B > F_{0.01}(2, 8)$ , 说明因素 B 对玉米淀粉粉尘云最低着火温度的影响高度显著 ( $p=99\%$ ), 记为\*\*\*, 同理因素 C 对玉米淀粉粉尘云最低着火温度的影响高度显著 ( $p=99\%$ ), 记为\*\*\*,  $F_{0.05}(4, 8) < F_{A \times B} < F_{0.01}(4, 8)$ , 说明因素 A 与因素 B 的交互对玉米淀粉粉尘云最低着火温度的影响显著 ( $p=95\%$ ), 记为\*\*。由显著性分析可知, 各因素及其交互作用对玉米淀粉粉尘云最低着火温度的影响程度按 C、B、A×B、A×C、B×C、A 的顺序, 依次降低, 即 CaCO<sub>3</sub> 质量分数、粉尘质量浓度、分散压力与粉尘质量浓度的交互、分散压力与 CaCO<sub>3</sub> 质量分数的交互、粉尘质量浓度与 CaCO<sub>3</sub> 质量分数的交互、分散压力对玉米淀粉粉尘云最低着火温度的影响程度依次降低, 与直观分析的结果基本一致。所以, 在粮食和饲料行业生产过程中, 在粉尘云无法杜绝的情况下, 通过向粮食粉尘中添加惰性粉尘来降低可燃性粉尘着火敏感性是可行的。

表 7 F 分布临界值

Table 7 Critical values for the F-distribution

$F_{0.05}(2, 8)$	$F_{0.01}(2, 8)$	$F_{0.1}(2, 8)$	$F_{0.05}(4, 8)$	$F_{0.01}(4, 8)$	$F_{0.1}(4, 8)$
4.46	8.65	3.11	3.84	7.01	2.81

## 4 结 论

利用 Godbert-Greenwald 炉, 研究了分散压力、粉尘质量浓度、CaCO<sub>3</sub> 质量分数对玉米淀粉粉尘云最低着火温度的影响, 针对目前粉尘云最低着火温度受多因素多水平影响的实验研究, 采用的交互正交实验方法不仅解决了单因素轮换法实验次数多的缺点, 而且考虑了因素间的交互作用是否对粉尘云最低着火温度有显著性影响。结果表明:

(1) 分别采用直观分析法和方差分析法研究了各因素及其交互作用对玉米淀粉粉尘云最低着火温度的影响强弱, 这 2 种方法得到的结论一致, 即 CaCO<sub>3</sub> 质量分数、粉尘质量浓度、分散压力与粉尘质量浓度的交互、分散压力与 CaCO<sub>3</sub> 质量分数的交互、粉尘质量浓度与 CaCO<sub>3</sub> 质量分数的交互、分散压力对玉米淀粉粉尘云最低着火温度的影响程度依次降低。

(2) 惰性粉尘 CaCO<sub>3</sub> 对粉尘云最低着火温度的影响最显著 ( $p=99\%$ ), 粉尘质量浓度对粉尘云最低着

火温度的影响高度显著( $p=99\%$ ),分散压力对玉米淀粉粉尘云最低着火温度的影响不显著( $p=90\%$ )。

(3)分散压力与粉尘质量浓度的交互作用对粉尘云最低着火温度的影响显著( $p=95\%$ )。

所以,在粮食生产过程中,可以通过降低粉尘质量浓度和在生产工艺初期向粮食粉尘添加惰性物质,降低粮食粉尘的爆炸敏感度,进而减少粉尘爆炸事故,同时,应重点防范粉尘质量浓度与分散压力的耦合场所。

### 参考文献:

- [1] YAN X, YU J. Dust explosion incidents in China [J]. *Process Safety Progress*, 2012, 31(2): 187–189. DOI: 10.1002/prs.11482.
- [2] 多英全, 刘垚楠, 胡馨升. 2009~2013年我国粉尘爆炸事故统计分析研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2015, 11(2): 186–190. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2015.02.030.  
DUO Yingquan, LIU Yaonan, HU Xinsheng. Statistical analysis on dust explosion accidents occurring in China during 2009–2013 [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2015, 11(2): 186–190. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2015.02.030.
- [3] 钟英鹏, 徐冬, 李刚, 等. 镁粉尘云最低着火温度的实验测试 [J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(4): 429–433. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)04-0429-05.  
ZHONG Yingpeng, XU Dong, LI Gang, et al. Measurement of minimum ignition temperature for magnesium dust cloud [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(4): 429–433. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)04-0429-05.
- [4] WU D, NORMAN F, VERPLAETSEN F, et al. Experimental study on the minimum ignition temperature of coal dust clouds in oxy-fuel combustion atmospheres [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 307: 274–280. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.12.051.
- [5] ADDAI E K, GABAL D, KRAUSE U. Experimental investigations of the minimum ignition energy and the minimum ignition temperature of inert and combustible dust cloud mixtures [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 307: 302–311. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.01.018.
- [6] MIAO N, ZHONG S, YU Q. Ignition characteristics of metal dusts generated during machining operations in the presence of calcium carbonate [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 40: 174–179. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.12.022.
- [7] 李刚, 刘晓燕, 钟圣俊, 等. 粮食伴生粉尘最低着火温度的实验研究 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2005, 26(2): 145–147. DOI: 10.3321/j.issn:1005-3026.2005.02.012.  
LI Gang, LIU Xiaoyan, ZHONG Shengjun, et al. Experimental investigation on minimum ignition temperature (MIT) of dust concomitant with grain [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2005, 26(2): 145–147. DOI: 10.3321/j.issn:1005-3026.2005.02.012.
- [8] YUAN C, LI C, LI G, et al. Ignition temperature of magnesium powder clouds: a theoretical model [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 239-240(4): 294–301. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.08.081.
- [9] 叶亚明, 胡双启, 胡立双, 等. 锰粉尘云最低着火温度的实验研究 [J]. *科学技术及工程*, 2016, 16(8): 296–299. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2016.08.051.  
YE Yaming, HU Shuangqi, HU Lishuang, et al. Experimental research on minimum ignition temperature of manganese dust cloud [J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(8): 296–299. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2016.08.051.
- [10] 苑春苗. 惰化条件下镁粉爆炸性参数的理论与实验研究 [D]. 沈阳:东北大学, 2009: 63–65.
- [11] 王信群, 黄冬梅, 梁晓瑜. 火灾爆炸理论与预防控制技术 [M]. 北京:冶金工业出版社, 2012: 93–101.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会. 粉尘云最低着火温度测定方法: GB/T 16429-1996 [S]. 北京:中国标准出版社, 1996.
- [13] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理 [M]. 北京:化学工业出版社, 2005: 214–215.
- [14] 刘文卿. 实验设计 [M]. 北京:清华大学出版社, 2005: 71–76.

## On factors affecting minimum ignition temperature of corn starch dust cloud based on interactive orthogonal experiment

WANG Qinghui<sup>1</sup>, YUAN Shuai<sup>1</sup>, WEI Yuanmeng<sup>1</sup>, WANG Danfeng<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Science and Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang, China;

2. No.3 Oil Production Plant, Daqing Oilfield Limited Company, Daqing 163113, Heilongjiang, China)

**Abstract:** In order to evaluate the explosion sensitivity of corn starch dust cloud accurately, to carry out the dust explosion-proof work effectively, and to ensure safe production of grain industry, a series of experiments were performed by using a standard Godbert-Greenwald constant temperature oven device to explore the influence laws of the following factors on the minimum ignition temperature of corn starch dust cloud. These influencing factors include dust concentration, diffusing pressure, the mass fraction of  $\text{CaCO}_3$ , and their interactions. The sensitivities of the minimum ignition temperature of corn starch dust cloud to these influencing factors were investigated on the basis of the interactive orthogonal design method. And the results are close through both the range analysis and the analysis of variance. The mass fraction of  $\text{CaCO}_3$  and the dust concentration have highly significant effects on the minimum ignition temperature of maize starch cloud. The interaction between the spraying pressure and the dust concentration has significant effects on the minimum ignition temperature of maize starch cloud.

**Keywords:** minimum ignition temperature of dust cloud; dust concentration; diffusing pressure; inert media; interactive orthogonal experiment; range analysis; analysis of variance

(责任编辑 张凌云)