

文章编号:1006-9941(2020)12-1178-06

## 乙醇气液两相云雾最低着火温度

孙楚彦,孙航,张奇

(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:** 最低着火温度(minimum ignition temperature, MIT)是判定燃料空气炸药是否发生窜火现象的重要依据。借鉴粉尘最低着火温度的研究方法,以 Godbert-Greenwald(G-G)加热炉为主要试验仪器,搭建了气液两相云雾的最低着火温度测试系统,建立云雾瞬态浓度粒度测试装置。选取乙醇为实验试剂,在加热炉中心位置处云雾浓度为  $7000 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、燃料分散压力为  $0.06\sim 0.10 \text{ MPa}$  的实验条件下,测试了乙醇气液两相云雾的粒度分布情况变化规律,并分析讨论了粒度分布情况和云雾流速对最低着火温度的影响。结果表明,液滴直径和云雾流速都是影响最低着火温度的重要因素,但在不同的燃料分散压力情况下表现出不同的重要性。在浓度保持  $7000 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  的条件下,随着燃料分散压力从  $0.06 \text{ MPa}$  增大到  $0.10 \text{ MPa}$ ,液滴直径由  $146.58 \mu\text{m}$  减小到  $70.97 \mu\text{m}$ ,乙醇的最低着火温度的先从  $468 \text{ }^\circ\text{C}$  降低到  $464 \text{ }^\circ\text{C}$ ,再升高到  $476 \text{ }^\circ\text{C}$ ,最终保持在  $475 \text{ }^\circ\text{C}$ 。当压力小于  $0.07 \text{ MPa}$  时,影响最低着火温度的主要因素是液滴直径,最低着火温度随液滴直径减小而降低。当压力大于  $0.07 \text{ MPa}$  时,影响最低着火温度的主要因素是云雾流速,流速不变,最低着火温度也保持不变。

**关键词:** 乙醇云雾; Godbert-Greenwald 加热炉; 最低着火温度; 液滴直径; 云雾流速

**中图分类号:** TJ55; O389

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2019315

### 1 引言

燃料空气炸药(FAE)燃料在抛撒过程中分散为云雾,其介质为气液两相混合状态。除了燃料的分散压力,中心装药的温度是判定窜火现象是否发生的重要指标。当该温度高于最低着火温度,则发生窜火;该温度低于最低着火温度,则不发生窜火。

目前,关于气液两相云雾的最低着火温度,以及云雾的浓度、粒径和流速对于最低着火温度的具体影响,国内外研究仍然处于空白阶段。目前仅以 Godbert-Greenwald 加热炉为主要仪器的粉尘云最低着火温度实验研究较为充分<sup>[1-6]</sup>。Godbert-Greenwald 炉是较为成熟的粉尘云最低着火温度的实验仪器,能

够精确有效地测试出多种粉尘的最低着火温度规律,满足一定剂量的可燃液体最低着火温度的实验测试。

粉尘云的粉尘粒径为确定值,在实验过程中不发生变化。然而,燃料分散形成气液两相云雾的粒径不固定,云雾的浓度、分散压力均对液滴粒径产生影响,有较大研究难度。因此,对于气液两相云雾,不仅要研究其最低着火温度,还要确定云雾的浓度和分散压力,以确定粒径分布情况,进而研究粒径对最低着火温度的影响规律<sup>[7-15]</sup>。

为此,本研究建立了以 Godbert-Greenwald 加热炉为基本实验仪器的云雾瞬态浓度粒度测试系统,采用光全散射法(消光法)作为云雾瞬态浓度与粒度分布的测量方法,选用乙醇为实验试剂,通过实验测量得出乙醇气液两相云雾在加热炉中心位置浓度为  $7000 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、燃料分散压力  $0.06\sim 0.10 \text{ MPa}$  条件下的粒度分布情况,并分析讨论了粒度分布、云雾流速对最低着火温度的影响。

### 2 实验部分

#### 2.1 试剂

主要试剂:乙醇(家用乙醇 95% 酒精消毒液,

收稿日期: 2019-12-09; 修回日期: 2020-01-06

网络出版日期: 2020-11-06

基金项目: 国家自然科学基金资助(11772057)

作者简介: 孙楚彦(1994-),男,研究生,主要从事燃料与爆炸安全研究。e-mail: 657501299qq.com

通信联系人: 张奇(1956-),男,教授,主要从事燃烧与爆炸安全研究。e-mail: qzhang@bit.edu.cn

引用本文: 孙楚彦,孙航,张奇. 乙醇气液两相云雾最低着火温度[J]. 含能材料, 2020, 28(12):1178-1183.

SUN Chu-yan, SU Hang, ZHANG Qi. Experimental Study on the Minimum Ignition Temperature of Vapor-Liquid Two-Phase Ethanol/Air Mixtures[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2020, 28(12):1178-1183.

500 mL, 瑞康医用科技)

初始环境温度为 20 °C, 环境压力为 0.1 MPa。

## 2.2 实验仪器

实验仪器由 Godbert-Greenwald 恒温炉测试装置、云雾瞬态浓度粒度测试系统、五孔喷嘴三部分组成。

Godbert-Greenwald 恒温炉测试装置由加热炉、温度控制与检测系统、喷射控制系统组成。Godbert-Greenwald 恒温炉测试装置示意图如图 1 所示。

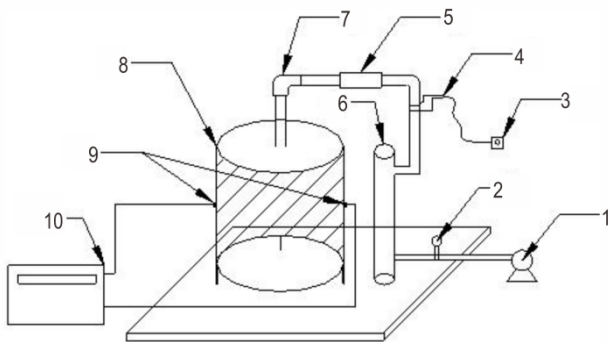


图 1 Godbert-Greenwald (G-G) 恒温炉测试装置<sup>[1]</sup>

1—空气压缩机, 2—压力调节阀, 3—扩散开关, 4—电磁阀, 5—装样室, 6—空气储存器, 7—观察玻璃管, 8—加热炉, 9—热电偶, 10—加热控制器

Fig.1 Godbert-Greenwald (G-G) furnace<sup>[1]</sup>

1—air compressor, 2—pressure gauge, 3—diffusion switches, 4—solenoid valve, 5—dust chambers, 6—gas tank, 7—glass adapter, 8—heating furnaces, 9—thermocouples, 10—temperature controller

云雾瞬态浓度粒度测试系统由 Godbert-Greenwald 恒温炉测试装置改造而来。本实验除了测试最低着火温度外, 还需考察气液两相云雾的参数(如浓度、粒度等)对于最低着火温度的影响。对于云雾的浓度和粒度, 须采用消光法进行实验测量。而本实验中的加热炉炉体部分不透明, 无法使激光穿透, 难以直接使用消光法获得云雾的浓度和粒度参数。为了构造消光法的使用条件, 使用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)透明管设置视窗, 代替加热炉。参照加热炉内空腔, PMMA 管设计为中空, 具体参数如下: 管长 22 cm, 内管直径 3.6 cm, 外管直径 5 cm。在此基础上布置消光法所需的激光单元、光学传感器、信号转换装置, 并连接计算机进行数据采集与处理, 构建了云雾瞬态浓度粒度测试系统, 如图 2 所示。

设计了一种五孔喷嘴, 布置于钟罩形状的观察玻璃管下方。该喷嘴以厚度为 0.2 mm 的铝片为材料, 喷嘴直径为 4 cm, 开孔直径为 2 mm。其位置与结构

示意图如图 3 所示。

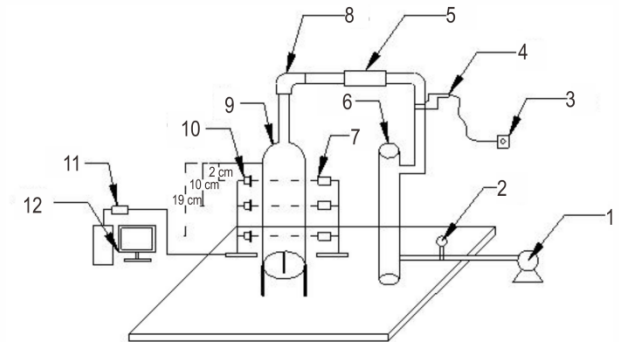


图 2 云雾瞬态浓度、粒度测试系统硬件构成示意图

1—空气压缩机, 2—压力调节阀, 3—扩散开关, 4—电磁阀, 5—装样室, 6—空气储存器, 7—激光单元, 8—观察玻璃管, 9—PMMA 管, 10—光照度传感器, 11—信号转换, 12—计算机数据采集

Fig.2 Measurement system of instantaneous concentration and particle size

1—air compressor, 2—pressure gauge, 3—diffusion switches, 4—solenoid valve, 5—dust chambers, 6—gas tank, 7—laser units, 8—glass adapter, 9—pmma tube, 10—light sensors, 11—signal conversion, 12—data acquisition

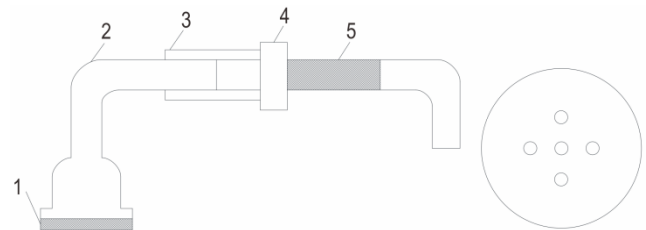


图 3 喷嘴位置与结构示意图

1—喷嘴, 2—观察玻璃管, 3—橡胶头, 4—调节旋钮, 5—装样室

Fig.3 Nozzle position and structure

1—nozzle, 2—glass adapter, 3—rubber, 4—knob, 5—dust chamber

## 2.3 实验过程

### 2.3.1 实验条件的确定

#### 2.3.1.1 乙醇云雾的液相浓度的确定

首先布置好云雾瞬态浓度粒度测试系统, 启动空气压缩机, 向空气储存器里压入一定压力的气体。然后向装样室中加入一定量的乙醇, 按动扩散开关, 使乙醇云雾喷入亚克力管中。当云雾穿过光路后, 基于云雾对光的吸收和散射, 引起光强度值衰减, 传感器得到光强衰减前后的强度值, 通过信号转换, 将光强度数据发送到检测系统, 检测系统经过计算得出云雾的液相浓度。因此, 固定液相浓度不变, 调整燃料分散压力与乙醇的加入量, 实验测得保持乙醇云雾液相浓度基本不变的实验参数, 共计五组。

### 2.3.1.2 乙醇云雾的液滴直径的确定

确定了乙醇云雾的液相浓度之后,以实现该浓度的燃料分散压力、乙醇加入量等参数为实验条件,重复实验过程,使用云雾瞬态浓度粒度测试系统计算得出云雾的液滴粒径分布情况。云雾在 10 cm 处发生燃烧,同时考虑云雾场均匀性的原因,实验分别选取距离亚克力管上侧管口 2 cm、10 cm、19 cm 的三个位置,测量得到 PMMA 管的不同位置的索特平均直径(Sauter mean diameter, SMD, 与该颗粒群的颗粒形状、总体积、总表面积相同,且粒度均匀的一个假想颗粒群的粒径)、 $D_{10}$ (颗粒累积分布为 10% 的粒径)分布、液滴直径频度(落在某个尺寸范围内的颗粒体积或颗粒重量占总量的百分率)分布。

### 2.3.2 乙醇云雾最低着火温度的确定

使用 Godbert-Greenwald 恒温炉测试装置,在保持乙醇云雾的液相浓度基本不变的情况下,实验测试最低着火温度。进行实验时,通过加热控制器将加热炉升高到一定温度,然后由空气压缩机向空气储存器输入实验所需的燃料分散压力的空气,通过电磁阀控制压力排放,将装样室内的样品喷至加热炉内部的空腔中。通过观察加热炉底部的高度抛光版或顶部的观察玻璃板,来判断是否着火。对于某一恒定温度,重复实验 20 次。如果能够观察到明显的火焰,则可以判定为着火;如果没有明显的火焰出现,则判定为不着火。

### 2.3.3 乙醇云雾流速的确定

使用高速摄像装置,以云雾瞬态浓度粒度测试系统为实验装置,在保持乙醇云雾的液相浓度基本不变的情况下,对乙醇云雾的流动状况进行拍摄。将拍摄的照片进行分析处理,计算出云雾流速。

## 3 结果与讨论

### 3.1 实验条件的确定

#### 3.1.1 乙醇云雾的液相浓度的确定

实验测得保持乙醇液相浓度为  $7000 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  的 5 组燃料分散压力、乙醇加入量、实际喷入量参数,结果如表 1 所示。在燃料分散压力为 0.06~0.10 MPa、实际喷入量为 1.56~1.60 mL 时,乙醇在加热炉中心位置处的液相浓度稳定在  $7000 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  左右,其变化可忽略不计,可认为在该条件下乙醇的浓度不变。据此,以表 1 中各参数作为实验条件,对乙醇云雾的液滴粒径分布情况、乙醇的最低着火温度和乙醇云雾的流速进行实验测量。

表 1 乙醇云雾浓度保持不变的燃料分散压力、乙醇加入量、实际喷入量参数

Table 1 Parameters of conditions for keeping the concentration of ethanol cloud constant

No.	pressure /MPa	volume of addition/mL	spray volume /mL	concentration / $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
1	0.06	3	1.58	7053.6
2	0.07	2.9	1.59	7098.2
3	0.08	2.4	1.56	6964.3
4	0.09	2.2	1.57	7008.9
5	0.10	2	1.60	7142.9

### 3.1.2 乙醇云雾液滴粒径分布情况

以表 1 的五组参数进行实验,实验测得亚克力管的不同位置的索特平均直径,结果如表 2 所示。由表 2 可知,保持乙醇的液相浓度不变,随着燃料分散压力增大,云雾的索特平均直径减小。据此,以表 2 中 10 cm 位置处的 SMD 作为粒径参数,对乙醇的最低着火温度变化规律进行讨论。

表 2 表 1 参数条件下乙醇云雾的索特平均直径

Table 2 SMD of ethanol cloud obtained with parameters in Table 1

No.	particle size at 2 cm	particle size at 10 cm	particle size at 19 cm
	location / $\mu\text{m}$	location / $\mu\text{m}$	location / $\mu\text{m}$
1	96.78	146.58	151.00
2	84.14	121.30	128.76
3	78.12	82.31	94.04
4	70.36	76.45	66.32
5	59.01	70.97	53.45

以表 1 的五组参数进行实验,实验测得亚克力管的不同位置的  $D_{10}$  与液滴直径频度分布,结果如图 4 所示。由图 4 可知,乙醇云雾的  $D_{10}$  随燃料分散压力的增大而减小。乙醇云雾的  $D_{10}$  与液滴直径频度分布补充说明了乙醇云雾的粒径分布情况,证明乙醇云雾的索特平均直径有研究与参考价值,可以作为最低着火温度变化规律的讨论依据。

### 3.2 乙醇云雾的最低着火温度

以表 1 的五组参数进行实验,实验测得不同液滴直径下乙醇云雾的最低着火温度,结果如表 3 所示。由于乙醇云雾在加热炉内的实际着火位置靠近加热炉中心,所以取距离上侧管口 10 cm 的索特平均直径为最低着火温度的自变量。将着火温度的最低点(即最低着火温度, MIT)连接并绘制曲线,结果如图 5 所示;



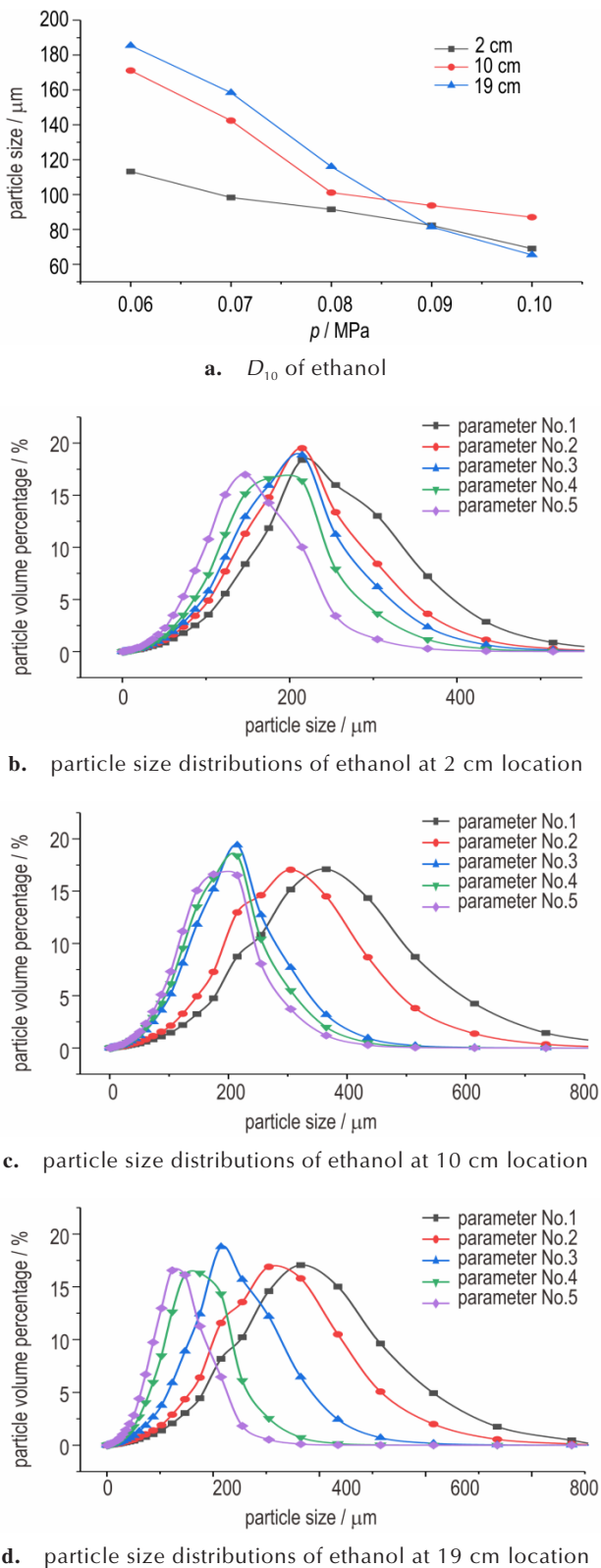


图4 表1参数条件下乙醇云雾的 $D_{10}$ 与液滴直径频度分布曲线

Fig.4  $D_{10}$  and particle size distributions of ethanol obtained with parameters in Table 1

将MIT曲线以下标示为安全区,对于中心位置处浓度在 $7000 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右、燃料分散压力在 $0.06\sim 0.10 \text{ MPa}$ 范围内的乙醇云雾,可以通过索特平均直径和温度值两个坐标来绘制坐标点,进而判断在该条件下是否发生燃烧。若坐标点在安全区以外,则发生燃烧;若坐标点在安全区以内,则不会发生燃烧。

表3 不同索特平均直径下乙醇云雾的最低着火温度

Table 3  $T_{\min}$  of ethanol cloud with different SMD

No.	particle size at 10 cm location/ $\mu\text{m}$	$T_{\min} / ^\circ\text{C}$
1	146.58	468
2	121.30	464
3	82.31	476
4	76.45	475
5	70.97	475

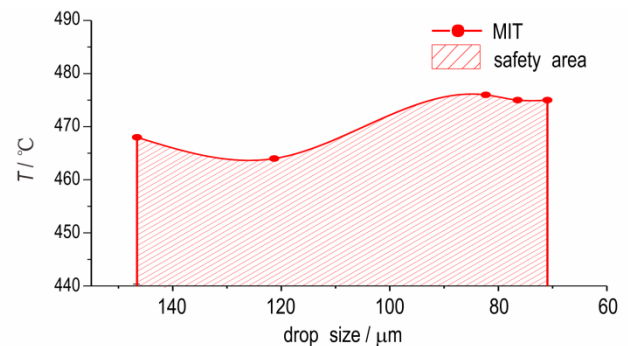


图5 不同索特平均直径下乙醇最低着火温度

Fig.5 MIT of ethanol with different SMD

由表3、图5可以看出,在浓度保持 $7000 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的条件下,随着压力从 $0.06 \text{ MPa}$ 增大到 $0.10 \text{ MPa}$ 时,液滴直径由 $146.58 \mu\text{m}$ 减小到 $70.97 \mu\text{m}$ ,乙醇的最低着火温度先从 $468 \text{ }^\circ\text{C}$ 降低到 $464 \text{ }^\circ\text{C}$ ,再升高到 $476 \text{ }^\circ\text{C}$ ,最终保持在 $475 \text{ }^\circ\text{C}$ 。液滴粒径对最低着火温度有重要影响,不同粒径对应不同的最低着火温度。

在浓度保持 $7000 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的条件下,乙醇云雾液滴的索特平均直径处于 $70.97\sim 82.31 \mu\text{m}$ 时,最低着火温度保持在 $475 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。

进一步分析可知,影响液滴云雾点火温度因素有云雾液滴直径、装置内空气的流速和云雾中气化燃料的量。在本实验中采用亚克力管在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 环境温度下进行实验,无法模拟加热炉中的高温环境,而 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 下亚克力管中云雾气化燃料的量同加热炉中有显著区别,因此本文暂不涉及。

改变燃料分散压力时,除了乙醇液滴直径的大小会发生改变,装置内空气的流速也将发生明显变化。云雾流速会改变云雾在加热炉和亚克力管中的停留时

间,从而影响最低着火温度变化规律。因此有必要实验测量 1 条件下的云雾流速。

### 3.3 乙醇云雾流速的确定

对乙醇云雾的云雾流速进行研究,使用高速摄像装置,拍摄了表 1 各条件下的云雾流动过程,计算出云雾流速,结果如表 4 所示。

表 4 表 1 参数条件下乙醇云雾的流动速度

Table 4 Flowing velocity of ethanol cloud with parameters in Table 1

No.	pressure / MPa	flowing velocity / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
1	0.06	7.7
2	0.07	8.0
3	0.08	15.2
4	0.09	15.4
5	0.10	15.7

由表 4 可以看出,在燃料分散压力较低(0.06, 0.07 MPa)时,云雾的流速在  $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  左右;在压力较高(0.08~0.1 MPa)时,云雾的流速为  $15.2\sim 15.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,增加了近一倍。

这一结果也说明,云雾流速对于最低着火温度有重要影响。具体来说,在不考虑浓度的条件下,当压力小于 0.07 MPa 时,云雾流速较低,在加热炉停留时间较长,此时影响最低着火温度的主要因素是液滴直径,其规律为:直径越小,最低着火温度越低。当压力大于 0.07 MPa 时,云雾流速较高,在加热炉停留时间较短,此时影响最低着火温度的主要因素是云雾流速而不是液滴直径。当压力由 0.07 MPa 增加至 0.08 MPa 时,云雾流速由  $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  升高至  $15.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,云雾在加热炉内停留的时间降低,因此需要更多热量才能发生燃烧,最低着火温度从  $464\text{ }^{\circ}\text{C}$  升高到  $476\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;而当压力高于 0.08 MPa 时,由于云雾流速稳定在  $15.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  左右,所以最低着火温度也稳定在  $475\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这进一步地解释了图 5 中乙醇最低着火温度先降低再升高,最终保持不变的变化规律。

## 4 结论

(1)保持乙醇的液相浓度不变,随着燃料分散压力增大,云雾的平均液滴直径减小。

(2)在浓度保持  $7000\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  的条件下,随着燃料分散压力从 0.06 MPa 增大到 0.10 MPa,索特平均直径由  $146.58\text{ }\mu\text{m}$  减小到  $70.97\text{ }\mu\text{m}$ ,乙醇的最低着火温度先从  $468\text{ }^{\circ}\text{C}$  降低到  $464\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,再升高到  $476\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最终

保持在  $475\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(3)在浓度保持  $7000\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  的条件下,乙醇云雾液滴的索特平均直径处于  $70.97\sim 82.31\text{ }\mu\text{m}$  时,最低着火温度保持在  $475\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右。

(4)在浓度保持  $7000\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  的条件下,当燃料分散压力小于 0.07 MPa 时,影响最低着火温度的主要因素是液滴直径;当燃料分散压力大于 0.07 MPa 时,影响最低着火温度的主要因素是云雾流速。

### 参考文献:

- [1] 国家技术监督局. GB/T 16426-1996: 粉尘云最低着火温度测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.  
State Bureau of Technical Supervision. GB/T16426-1996: Determination of the minimum ignition temperature of dust cloud [S]. Beijing: China Standard Press, 1996.
- [2] Central office of International Electrotechnical Commission. IEC1241-2-1-1994. Methods for determining the minimum ignition temperatures of dust. Part 2: Dust cloud in a furnace at a constant temperature[S]. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 1994: 23-27.
- [3] Ulrich Krause, Mike Wappler, Sven Radzewitz, et al. On the minimum ignition temperature of dust clouds[C]//P. Amyotte. Proceedings of sixth International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosion, Vol. I, Halifax, NS, Canada: Dalhousie University, 2006: 68-76.
- [4] Griesche G, Brandt D. Influencing factors for the ignition temperature of dust-air mixtures [J]. *Dust Explosion Prevention and Protection*, 1976, 31(8): 504-207.
- [5] Conti R S, Cashdollar K, Hertzberg M. Thermal and electrical ignitability of dust cloud[R]. Bureau of Mines Reports of Investigation RI 8798, Pittsburgh PA, USA, 1983.
- [6] Hensel W. Methods for the determination of the ignition temperature of dust/air mixtures a hot surface a comparison [R]. Annual reports of the Federal Institute for Materials Research and Testing, 1984: 86-88.
- [7] 王景鑫,张奇,陈腾飞. 粒径对庚烷液雾爆炸场影响的数值模拟[J]. 含能材料, 2018, 26(3): 230-237.  
WANG Jing-xin, ZHANG Qi, CHEN Teng-fei, Numerical simulation of the influence of particle size on explosion parameters of n-heptane/air mixtures [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(3): 230-237.
- [8] 沈世磊,张奇,陈嘉琛,等. 流动状态下铝粉爆炸过程的数值模拟[J]. 含能材料, 2015, 23(11): 230-237.  
SHEN Shi-lei, ZHANG Qi, CHEN Jia-chen, et al. Simulation of aluminum dust explosion under flow state [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(11): 230-237.
- [9] 沈世磊,张奇,马秋菊,等. 浓度及湍流对铝粉爆炸特性的影响[J]. 兵工学报, 2016, 37(3): 455-461.  
SHEN Shi-lei, ZHANG Qi, MA Qiu-ju, et al. Effect of turbulence on explosion characteristics of aluminum dust/air [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(3): 455-461.
- [10] 王悦,白春华,李斌,等. 密闭空间瞬态液雾粒径及浓度测量实验研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(9): 1665-1670.  
WANG Yue, BAI Chun-hua, LI Bin, et al. The experimental

- study of transient droplets particle size and concentration in confined spaces[J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(9): 1665-1670.
- [11] Sanchirico R, Sarli V D, Russo P, et al. Effect of the nozzle type on the integrity of dust particles in standard explosion tests [J]. *Powder Technology*, 2015, 279.
- [12] LIU Xue-ling, ZHANG Qi. Influence of turbulent flow on the explosion parameters of micro- and nano-aluminum powder-air mixtures [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 299: 603-617.
- [13] LIU Xue-ling, ZHANG Qi, MA Qiu-ju, et al. Limiting explosion concentration of hydrogen-oxygen-helium mixtures related to the practical operational case [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2014, 29.
- [14] ZHANG Qi, LI Wei. Ignition Characteristics for Methane-Air Mixtures at Various Initial Temperatures [J]. *Process Safety Progress*, 2013, 32(1).
- [15] Bradley D, Lawes M, LIAO Shi-yong, et al. Laminar mass burning and entrainment velocities and flame instabilities of i-octane, ethanol and hydrous ethanol/air aerosols [J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(6).

## Experimental Study on the Minimum Ignition Temperature of Vapor-Liquid Two-Phase Ethanol/Air Mixtures

SUN Chu-yan, SU Hang, ZHANG Qi

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

**Abstract:** The minimum ignition temperature is an important basis to determine whether the fuel air explosive has the phenomenon of fire channeling. The mixture of flammable liquid and air forms gas-liquid two-phase cloud. At present, the research on the minimum ignition temperature and the specific influence of cloud concentration, particle size and velocity on the minimum ignition temperature are still in a blank stage. In this paper, the research method of dust minimum ignition temperature is used for reference. With Godbert-Greenwald (G-G) heating furnace as the main test instrument, the minimum ignition temperature test system of gas-liquid two-phase cloud is established. On this basis, the cloud instantaneous concentration particle size test device is established. With ethanol as the experimental reagent, the particle size distribution of ethanol gas-liquid two-phase cloud was measured under the experimental conditions of  $7000 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  cloud concentration at the center of the heating furnace and 0.06–0.10 MPa fuel dispersion pressure. The effects of particle size distribution and cloud velocity on the minimum ignition temperature were analyzed and discussed. Under the concentration of  $7000 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ , with the increase of pressure from 0.06 MPa to 0.10 MPa, the particle size decreased from  $146.58 \mu\text{m}$  to  $70.97 \mu\text{m}$ , the lowest ignition temperature of ethanol first decreased from  $468 \text{ }^\circ\text{C}$  to  $464 \text{ }^\circ\text{C}$ , then increased to  $476 \text{ }^\circ\text{C}$ , and finally kept at  $475 \text{ }^\circ\text{C}$ . When the pressure is less than 0.07 MPa, the main factor affecting the MIT is the particle size, which decreases with the drop diameter. When the pressure is greater than 0.07 MPa, the main factor affecting the MIT is the flowing velocity. Since the velocity is constant, the minimum ignition temperature also stays stable.

**Key words:** ethanol cloudy; Godbert-Greenwald furnace; minimum ignition temperature; particle size; flowing velocity

**CLC number:** TJ55; O389

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2019315

(责编:姜梅)