

文章编号:1004-5309(2023)-0077-08

DOI:10.3969/j.issn.1004-5309.2023.02.02

气液共存工况下蒸气最小点火能微量测试方法研究

王 宇¹, 丁 炯^{1,2}, 杨遂军^{1,2}, 王志宇^{1,2}, 叶魏涛^{1,2}, 叶树亮^{1,2*}

(1. 中国计量大学工业与商贸计量技术研究所, 杭州, 310018;

2. 浙江省化工产品安全测试技术与仪器工程实验室, 杭州, 310018)

摘要:针对传统最小点火能测试方法不适用于液体化学品气液共存工况的问题,提出了一种微量液体的蒸气最小点火能测试方法。首先设计了小容积实验装置及对应测试流程,通过样品实验确定了敏感电极间隙,并研究了样品量与搅拌对最小点火能测试的影响;测试了样品在不同温度条件下的最小点火能,结合电火花点火机理分析了样品温度与蒸气最小点火能的内在联系,为最小点火能最低值测定提供了指导;最后验证了微量方法的准确性及重复性。实验结果表明:微量测试方法能够有效测试气液共存工况下液体蒸气的最小点火能,且最小点火能测试值略高于高温蒸气工况,样品最小点火能的相对标准差小于6.0%,重复性良好,为液体化学品的静电燃爆危险性评估提供了技术支撑。

关键词:液体蒸气;最小点火能;气液共存;测试方法;微量液体

中图分类号: X932

文献标识码: A

0 引言

静电放电通常发生于液体化学品取样、倾倒、过滤等常见气液共存工况中。当液体化学品与塑料容器等不良导体发生摩擦时会积累电荷,带有足够电荷的可燃蒸气与金属等良性导体接触时会发生静电放电^[1],在一定情况下可能点燃蒸气,引发连锁爆炸反应,造成严重的火灾安全事故。研究液体化学品的静电燃爆危险性是预防此类事故发生的必要前提。

静电燃爆危险性可以通过最小点火能进行评估^[2],其被描述为点燃可燃气体(蒸气)、粉尘或云雾与空气混合物所需最小静电火花能量^[3]。诸多学者对液体化学品的最小点火能测试开展了大量研究,测试方法主要分为两类:一是加热液体形成蒸气,与

空气进行预混合,输入到抽真空后的爆炸室中^[2-4];或利用分压法,在爆炸室中进行气体配比与混合^[5,6]。在此基础上,对爆炸室中的混合气体进行静电点火来测试最小点火能。为了控制蒸气浓度以及避免蒸气遇冷液化,该方法需要在高于液体化学品沸点的温度中进行。二是通过爆炸室中的雾化装置将液体分散成云雾,对云雾进行静电点火来测试最小点火能^[7,8]。该方法可在常温下进行,但是为了满足云雾均匀扩散的要求,测试容器容积一般为20 L,样品用量大,测试危险性较高。

对于温度低于液体化学品沸点且气液存在明显分界的气液共存工况,如油品储运、锂离子电池电解液泄漏等,第一类测试方法需要高于液体化学品沸点的实验温度,第二类方法测试样品为微小液滴,两者的最小点火能测试工况与气液共存工况明显不

收稿日期:2022-11-25;修改日期:2023-02-13

基金项目:浙江省属高校基本科研业务费专项资金(2021YW15)

作者简介:王宇(1998—),男,汉族,浙江宁波人,硕士研究生,研究方向为化工产品安全测试技术与仪器。

通讯作者:叶树亮,博士,教授,E-mail:itmt_paper@126.com

同^[9]。从安全防护的角度出发,生产者期望获得更为精确的最小点火能测试值,从而避免过度防护带来的生产成本提升或生产效率降低。并且由于蒸气浓度受液体化学品状态、空气流动等因素影响,测量存在较高的不确定性,依据气体浓度进行的最小点火能测试方法并不适用于气液共存工况,这给气液共存工况下液体化学品的静电燃爆危险性评估带来了困难。

本文旨在提出一种针对气液共存工况的液体蒸气最小点火能测试方法,并设计相应的实验装置及测试流程。通过样品实验确定最优参数与操作方法,获取样品温度与蒸气最小点火能的关系曲线,并结合电火花点火机理研究样品温度对蒸气最小点火能的影响,最后验证测试方法的准确性及重复性,实现液体化学品最小点火能的微量、安全测试。

1 最小点火能测试方法设计

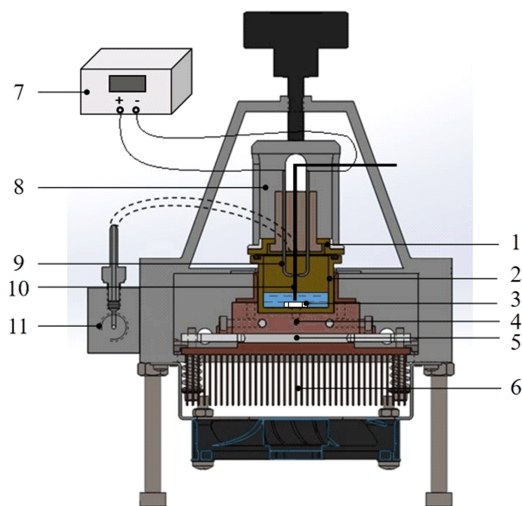
微量液体蒸气最小点火能测试方法以样品理论敏感温度为初始条件,通过金属浴恒温加热 10 mL 测试室中的微量液体样品来模拟一定温度条件下的气液共存工况。利用静电火花对测试室中的气体混合物进行点火,通过示波器与电流探头获取放电波形,最后计算发生燃爆时的火花能量。

1.1 实验装置设计

液体蒸气最小点火能测试装置的结构如图 1 所示,样品杯盖与样品杯通过压紧支架以一定压力贴合,形成闭合但不完全密封的测试室,内径与内高分别为 25 mm 和 20 mm,容积为 10 mL,不完全密封的结构是为了确保测试室内压力为环境大气压^[10]。点火电极座位于样品杯盖中央,点火电极距离杯底高为 12 mm,由自制火花能量发生模块提供 0.1 mJ ~ 100 mJ 的火花能量。热电偶穿过样品杯盖进入测试室中,测温点浸入待测样品但不与杯底接触。压力传感器通过导气管与杯盖相连,用以观察测试室内的燃爆压力变化。加热座、帕尔贴元件与散热器共同构成了温度控制模块,为被测样品提供 0 °C ~ 150 °C 的温度环境。

1.2 测试流程设计

实验以被测样品的理论敏感温度为初始实验温度,逐步升高或降低目标温度,直至测得不同温度条件下的最小点火能最低值。实验开始时,在样品杯内加入一定量的待测样品,闭合样品杯,控制样品温度达到目标温度后,等待一定时间使样品蒸气浓度



1-样品杯盖;2-样品杯;3-磁力搅拌子;4-加热座;5-帕尔贴元件;6-散热器;7-火花能量发生模块;8-压紧支架;9-点火电极;10-热电偶;11-压力传感器

图 1 最小点火能测试装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

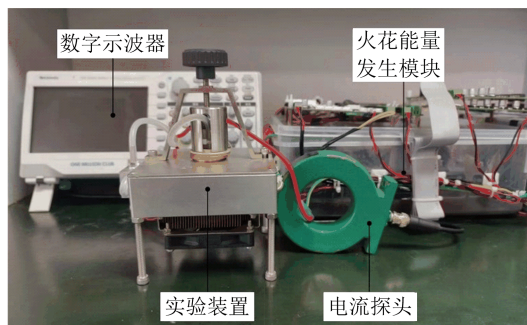


图 2 最小点火能测试系统实物图

Fig. 2 Picture of experimental system

达到稳定。然后发送点火命令,利用压力传感器采集测试室内压力数据,通过压力变化幅度判断是否点燃。参考闪点测试标准^[10],以点火后压力值上升 20 kPa 为点火成功的依据。

点火时,选择能稳定点燃样品蒸气的储能电容与充电电压为火花放电的初始条件,以 0.5 kV 为步长降低火花放电的充电电压,直至 5 次点火都未点燃且测得放电电流波形,则认为上一次点燃的火花能量为该实验条件下的最小点火能。当充电电压降低导致电极间隙无法击穿时,放电电流波形不会出现,此时更换容值更小的储能电容重复上述实验。

1.3 样品理论敏感温度计算

研究表明^[11],在距离液面同一高度的横截面上,各点的蒸气浓度可视为均匀一致,且在靠近液面

处样品蒸气接近于该液面温度下的饱和蒸气压。因此样品的理论敏感温度可以根据样品的敏感蒸气浓度和饱和蒸气压近似计算得到。

由气体爆炸极限理论可知,当混合气中可燃气体含量为化学计量比时,燃烧最快或爆炸最剧烈^[9],通过样品的完全燃烧化学方程式可计算出其最易被点燃的敏感蒸气浓度 c_s 。

而样品在一定温度下的饱和蒸气压 p 可以根据安托因方程计算得到:

$$p = k \cdot 10^{(A - \frac{B}{T+C})} \quad (1)$$

式中: p 为饱和蒸气压(kPa); T 为样品温度($^{\circ}\text{C}$); k 为压力值单位换算系数, $k = 0.133$; A, B, C 分别为样品安托因系数。

根据道尔顿分压定律,样品在温度点 T 时的饱和蒸气浓度 c 为此时的饱和蒸气压 p 与容器总压强 p_0 之比:

$$c = \frac{p}{p_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: p 为样品在温度点 T 时的饱和蒸气压; p_0 为测试室内压力,不完全密封的测试室结构确保了该值与环境大气压一致。

当样品饱和蒸气浓度 c 与敏感蒸气浓度 c_s 一致时,对应的样品温度 T 即为敏感样品温度。由式(2)可计算出敏感蒸气浓度 c_s 对应的饱和蒸气压 p ,最后,通过式(1)逆变换计算出样品处于饱和蒸气压 p 时的样品理论敏感温度 T ,公式为:

$$T = \frac{B}{A - \lg\left(\frac{c_s \cdot p_0}{k}\right)} - C \quad (3)$$

1.4 火花能量计算

火花能量发生模块利用高压继电器控制小电容充放电的原理产生火花能量,通过选择不同储能电容与充电电压来改变火花能量大小。为了获得更为准确的测量结果,本文采用功率积分法获取火花能量值^[12,13],利用非接触式电流探头 Tektronix A621 测量放电回路电流 $I(t)$,通过火花电荷变化计算放电回路电压 $U_c(t)$ ^[13],最后使用功率-时间曲线积分计算火花能量,避免了电流波形与电压波形的相位误差以及接触测量导致的火花能量流失。火花能量发生电路如图 3 所示。

充放电过程中的总电荷量 Q 视为恒定,放电继电器的闭合将导致回路总电容发生变化,放电初始电压 U_p 可由充电电压 U_0 计算得到:

$$Q = U_0(C_i + C_{P1}) = U_p(C_i + C_{P1} + C_{P2}) \quad (4)$$

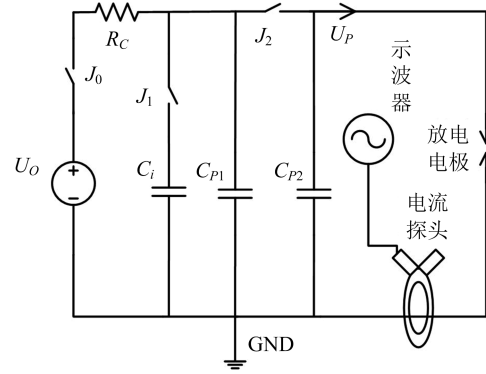


图 3 火花能量发生电路

Fig. 3 Circuit of spark energy generation

$$U_p = \frac{C_i + C_{P1}}{C_i + C_{P1} + C_{P2}} U_0 \quad (5)$$

式中: U_0 为充电电压,范围 0 kV~15 kV; C_i 为储能电容,容值可选 2.5 pF, 5 pF, 11 pF, 23.5 pF, 110 pF 和 500 pF。低静电火花能量的计算需要考虑线路分布电容的影响,按位置不同将线路分布电容分为充电回路分布电容 C_{P1} 与放电回路分布电容 C_{P2} ,依据 Sheng 等^[14]提出的方法测量得到。

随着时间释放的火花电荷 $Q_s(t)$ 可通过放电电流 $I(t)$ 对时间积分得到:

$$Q_s = \int I(t) dt \quad (6)$$

Q 与 $Q_s(t)$ 二者相减得到总电容 C 中的残余电荷 $Q_r(t)$,以此计算出总电容 C 两端电压随时间变化的函数 $U_c(t)$:

$$U_c(t) = \frac{Q_r(t)}{C} = \frac{Q - Q_s(t)}{C} = U_p - \frac{\int I(t) dt}{C} \quad (7)$$

式中:总电容 C 为储能电容与线路分布电容之和, $C = C_i + C_{P1} + C_{P2}$ 。

最后,通过功率-时间积分得到火花能量 E_s :

$$E_s = \int U_c(t) I(t) dt = \int \left(U_p - \frac{\int I(t) dt}{C} \right) I(t) dt \quad (8)$$

2 实验与结果分析

气液共存工况下液体蒸气最小点火能影响因素众多,本文主要选取了样品温度、电极间隙、样品量与搅拌进行实验研究。其中,样品温度与蒸气浓度、蒸气温度紧密关联,样品量体现了蒸气浓度与气液比的影响,通过搅拌增强混合气体流动性与均匀性。

实验环境控制在温度 25 ℃、湿度 50% 左右,且每次达到样品目标温度后恒温等待 1 min 再进行点火。具体实验结果与分析如下。

2.1 实验样品

实验样品采购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司,包括:乙醇($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$),纯度 99.5%;二甲苯(C_8H_{10}),纯度 98.5%;正癸烷($\text{C}_{10}\text{H}_{22}$),纯度 99%;正十二烷($\text{C}_{12}\text{H}_{26}$),纯度 99%。

2.2 敏感电极间隙确定

在正式测试前需要先确定实验系统的敏感电极间隙,最小点火能随着电极间隙的增大呈先下降后上升的趋势,存在一个敏感电极间隙^[15]。对于可燃气体及液体蒸气的最小点火能测试,敏感电极间隙通常选择 1.0 mm~2.0 mm^[16]。本文以乙醇、二甲苯、正十二烷为代表物质,在样品量为 2 mL,样品温度分别为 25 ℃、50 ℃和 100 ℃的条件下,测试它们在不同电极间隙下的最小点火能,结果如图 4 所示。

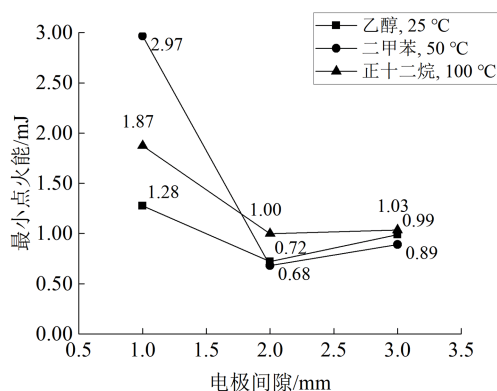


图 4 不同电极间隙条件下的样品最小点火能

Fig. 4 Minimum ignition energy under different electrode gaps

由图 4 数据可知,乙醇、二甲苯和正十二烷在电极间隙为 2.0 mm 时分别测得最小点火能最低值为 0.72 mJ、0.68 mJ 和 1.00 mJ,因此本实验系统的敏感电极间隙为 2.0 mm。

2.3 样品量影响抑制

微量的测试方法保证了样品温度均匀性,样品量主要影响点火电极距离液面的高度。为了研究样品量对最小点火能测试的影响,在电极间隙为 2.0 mm,样品量为 1 mL、2 mL、3 mL 的条件下,测试乙醇、二甲苯和正癸烷的最小点火能,结果如图 5 所示。

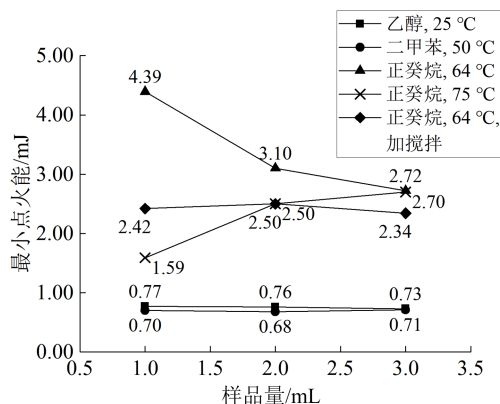


图 5 不同样品量条件下的样品最小点火能

Fig. 5 Minimum ignition energy under different sample volumes

由图 5 可知,当样品温度一定时,对于乙醇和二甲苯,样品量变化带来的影响并不明显。而对于正癸烷,当样品温度为 64 ℃时,最小点火能随样品量的增加而降低;当样品温度为 75 ℃时,最小点火能随样品量的增加而升高。

二甲苯与正癸烷的分子质量都远大于空气平均分子质量,但样品量变化只对正癸烷有明显影响,由此可知气体密度不同引起的蒸气沉积现象并不是引起最小点火能变化的主要原因。样品量的影响可能是由蒸气浓度的热分层引起的^[17]。在环境温度为 26 ℃,样品杯为空且热电偶不接触杯底的条件下,控制加热座温度一定,测试样品杯内不同高度位置的温度分布,实验结果如图 6 所示。

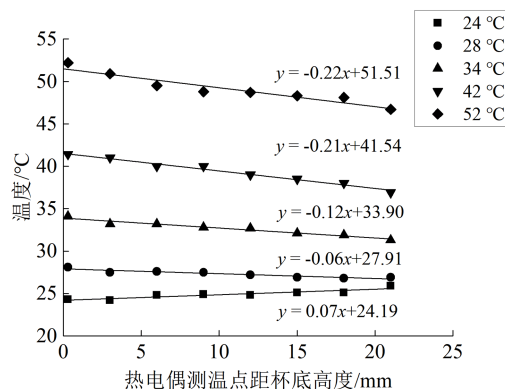


图 6 样品杯内不同高度位置温度分布

Fig. 6 Temperature distribution at different heights

由图 6 可知,当加热座温度高于环境温度时,随着热电偶测温点距离杯底高度的增加,温度呈下降趋势,且加热座温度与环境温度之差越大,下降趋势

越明显,杯内垂直方向存在一定温度梯度。

在样品实验过程中,当杯内蒸气浓度趋于稳定时,各位置蒸气浓度趋近所处温度条件下的饱和蒸气浓度。而杯内温度梯度的存在意味着蒸气浓度存在分层,越接近液面,蒸气浓度越接近样品温度下的饱和蒸气浓度。若样品温度高于环境温度,随着距离液面高度的增加,蒸气浓度会逐渐下降,此时样品量的增加会使液面与电极间距减小,电极位置样品蒸气浓度上升。

乙醇与二甲苯的样品温度与环境温度之差尚不足以形成明显的蒸气浓度分层,因此样品量的影响并不明显。而正癸烷的样品温升幅度较大,蒸气浓度分层的影响开始显现,随着样品量增加,点火位置蒸气浓度上升,蒸气浓度接近敏感浓度时测得最小点火能降低,一旦超过敏感浓度则测得最小点火能升高。正癸烷测试结果恰好说明其敏感蒸气浓度对应样品温度介于 64 °C 与 75 °C 之间。

当正癸烷样品温度为 64 °C 时加入样品搅拌措施,不同样品量条件下测得的最小点火能较为接近,最大差值为 0.16 mJ,相较于未加搅拌情况下的最大差值 1.67 mJ 有了明显下降。搅拌措施的加入使

得正癸烷蒸发更为充分,带动样品蒸气与空气均匀混合,不同高度位置蒸气浓度趋于一致,接近样品温度条件下的饱和蒸气浓度,因此不同样品量条件下测得的最小点火能趋于一致。由此可知,在实验中加入搅拌措施可以有效抑制样品量变化带来的影响,在此前提下可使用微量样品进行最小点火能测试。

2.4 样品温度与蒸气最小点火能关系研究

确定了样品量与搅拌对最小点火能测试的影响后,进一步研究样品温度与蒸气最小点火能的对应关系。样品温度同时影响着样品蒸气浓度与蒸气温度:一方面,样品蒸气浓度随着样品温度的升高而上升;另一方面,点火初始温度的升高会使气体更易被点燃^[18]。在电极间隙 2.0 mm,样品量 2 mL 且加入样品搅拌的条件下,分别测试乙醇、二甲苯、正癸烷和正十二烷在不同样品温度条件下的蒸气最小点火能,结果如图 7 所示。

由图 7 可知,随着样品温度的升高,四种样品的蒸气最小点火能先下降后上升,样品温度与最小点火能关系曲线呈 U 形。每种样品都存在一个敏感温度,在该温度下最小点火能测试值最低,样品蒸气

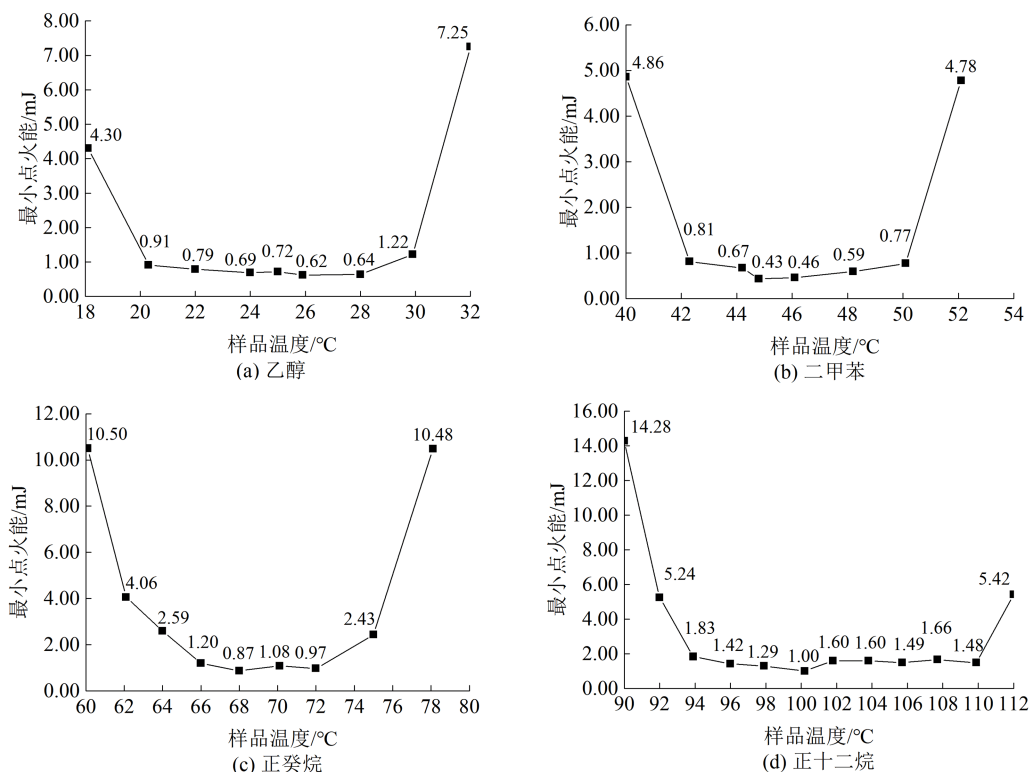


图 7 四种样品于不同温度条件下的最小点火能

Fig. 7 Minimum ignition energy of four samples at different temperatures

最易被点燃。由图 7(c)可知,正癸烷的敏感样品温度为 68 ℃,与 2.3 节推论相符。

样品温度与蒸气最小点火能的关系曲线呈 U 形主要是由蒸气浓度变化所引起的。样品蒸气浓度随着样品温度的升高而上升。根据链式反应理论,静电火花能量的输入会使电极间隙附近产生一定数量的自由基,当样品蒸气或氧气过多时,自由基与不参与反应的样品蒸气或氧气相撞而消耗,抑制了链式反应的传播,而当样品蒸气与氧气的比例可以完全反应时,点火所需的静电火花能量最低^[19]。

将四种样品的实际敏感温度及对应最小点火能进行汇总,并根据式(3)计算出样品理论敏感温度,结果如表 1 所示。

表 1 样品敏感温度及最小点火能汇总

Table 1 Summary of sample sensitive temperatures and minimum ignition energy

样品名称	理论敏感温度/℃	实际敏感温度/℃	最小点火能/mJ	温度偏差/℃
乙醇	23.4	25.9	0.62	2.5
二甲苯	39.9	44.8	0.43	6.2
正癸烷	58.2	68.0	0.87	9.8
正十二烷	88.5	100.2	1.00	11.7

由表 1 可知,四种样品的实际敏感温度皆高于理论敏感温度,且随着样品温度升高,二者偏差有所增大。该偏差主要是由样品蒸气温度上升造成的,根据电火花点火热理论^[9],在静止混合气体中,电极间火花加热气体的区域可近似视为球形,对于该球形区域内的混合气体,温度从初始温度 T_o 升至引燃温度 T_i 的能量是由电火花提供的,即最小点火能,其计算公式如下:

$$E_{\min} = KV\rho c_p(T_i - T_o) \quad (9)$$

式中: K 为经验系数, V 为球形区域体积, ρ 为燃烧反应过程总质量浓度, c_p 为混合气平均比定压热容。由式(9)可知,在蒸气浓度一定情况下,随着点火初始温度的升高,最小点火能下降。已知点火初始温度一定时,蒸气浓度与最小点火能关系曲线呈 U 形。当初始点火温度与蒸气浓度同时上升时,U 形曲线最低点右移,即样品实际敏感温度升高。

因此,为了确定样品蒸气在可点燃温度范围内

的最小点火能最低值,应以样品理论敏感温度为初始测试条件,逐步升高实验目标温度,直至测得点火能最低值,此时的样品温度即为实际敏感温度。

2.5 样品实验数据对比

为了验证微量测试方法的准确性,将本文测得的乙醇和二甲苯最小点火能实验数据与文献数据进行对比与分析。根据现有文献^[2],乙醇与二甲苯蒸气的最小点火能及实验条件如表 2 所示。需要注意的是,为了控制蒸气浓度以及避免蒸气液化,现有蒸气最小点火能测试方法的实验温度必须高于液体样品沸点。

表 2 乙醇与二甲苯最小点火能文献数据

Table 2 Literature data of ethanol and xylene

样品名称	实验温度/℃	蒸气浓度/%	最小点火能/mJ
乙醇	80.0	7.8	0.45
二甲苯	140.0	2.6	0.27

本文在气液共存工况下使用乙醇和二甲苯进行最小点火能测试,其实际敏感温度及对应最小点火能如表 3 所示,并且根据式(1)和式(2),计算出样品处于实际敏感温度时的理论蒸气浓度。

表 3 乙醇与二甲苯最小点火能实验数据

Table 3 Experimental data of ethanol and xylene

样品名称	实际敏感温度/℃	理论蒸气浓度/%	最小点火能/mJ
乙醇	25.9	8.1	0.62
二甲苯	44.8	2.6	0.43

根据表 3,乙醇与二甲苯处于实际敏感温度时的理论蒸气浓度分别为 8.1%与 2.6%,与表 2 文献中的蒸气浓度相当接近。但乙醇与二甲苯在气液共存工况下的最小点火能测试值相比于高温蒸气工况分别高了 0.17 mJ 和 0.16 mJ,造成该偏差的原因之一在于实验温度不同。根据式(9),乙醇与二甲苯在待测实验温度条件下的最小点火能 $E_{\min 2}$ 可由已知实验温度下的最小点火能 $E_{\min 1}$ 近似计算得到:

$$E_{\min 2} = \frac{T_i - T_2}{T_i - T_1} E_{\min 1} \quad (10)$$

式中: T_1 为已知实验温度, T_2 为待测实验温度, T_i

为样品引燃温度,单位皆为℃。根据表 2 数据进行计算,在初始温度为 25.9℃时,乙醇最小点火能为 0.54 mJ;在初始温度为 44.8℃时,二甲苯最小点火能为 0.35 mJ,计算结果略低于表 3 实验数据,都相差 0.08 mJ。这部分偏差的产生原因可能是本文在火花能量计算中考虑了分布电容的影响。

2.6 测试方法重复性验证

最后,为了验证微量测试方法的重复性,在电极间隙 2.0 mm,样品量 2 mL 且加入搅拌的条件下,分别测试乙醇在 26℃和二甲苯在 46℃时的蒸气最小点火能,并且计算测试结果标准差与平均值之比,即相对标准差,以此评价测试方法重复性,实验结果如表 4 所示。

表 4 乙醇与二甲苯最小点火能重复性测试
Table 4 Repeatability test of ethanol and xylene

样品名称	最小点火能/mJ					相对标准差/%
	组 1	组 2	组 3	组 4	组 5	
乙醇	0.62	0.71	0.69	0.66	0.71	5.7
二甲苯	0.51	0.46	0.50	0.46	0.51	5.3

由表 4 可知,在 5 次测试中乙醇和二甲苯最小点火能测试结果的相对标准差皆小于 6.0%,这表明微量液体的蒸气最小点火能测试方法具有较好的重复性。

3 结论

针对液体化学品气液共存工况,提出了一种微量液体的蒸气最小点火能测试方法。使用自制的小容积实验装置,通过样品实验确定了 2.0 mm 的敏感电极间隙,并且利用样品搅拌措施抑制了样品量变化对最小点火能测试的影响。

测试了样品在不同温度条件下的蒸气最小点火能,实验结果表明,蒸气最小点火能随样品温度升高呈先下降后上升趋势,应以样品理论敏感温度为初始条件,逐步升高实验温度,直至测得最小点火能最低值。近似浓度条件下,乙醇与二甲苯的蒸气最小点火能测试值高于文献值约 0.08 mJ。样品最小点火能测试结果的相对标准差小于 6.0%,重复性良好。本文所提出的微量方法适用于气液共存工况下的液体蒸气最小点火能测试,为液体化学品的静电燃爆危险性评估提供了方法指导与数据支撑。

参考文献

[1] 聂磊. 静电火灾的成因与认定[J]. 火灾科学, 1997, 6 (1): 1-6.

[2] 谭迎新, 张景林, 张小春. 蒸汽爆炸最小点火能测试敏感条件的确定[J]. 太原机械学院学报, 1994, 15(2): 120-125.

[3] 赵琳. 可燃气体(或蒸气)最小点火能与物质结构的构效关系研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2014.

[4] GB/T 14288-93, 可燃气体与易燃液体蒸气最小静电点火能测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.

[5] Izato Y I, Suzuki T, Iki H, Miyake A. Determining the minimum ignition energy of toluene vapor containing hydrogen towards a risk assessment for liquid organic hydride storage in hydrogen refueling stations[J]. Fuel, 2022, 310(Part A): 122236.

[6] ASTM E582-21, Standard test method for minimum ignition energy and quenching distance in gaseous mixtures[S]. 2021.

[7] 刘雪岭, 张奇. 正烷烃液体云雾最小点火能实验研究[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(12): 1252-1255, 1320.

[8] 郑秋雨, 孙永强, 王旭, 蓝真亮. 可燃液体雾滴粒径分布对其引燃性的影响[J]. 安全与环境学报, 2018, 18 (5): 1779-1783.

[9] 张英华, 黄志安, 高玉坤. 燃烧与爆炸学(第二版)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015: 80-86, 104-111.

[10] ASTM D7094-12, Standard test method for flash point by modified continuously closed cup (MCCCFP) tester [S]. 2012.

[11] 杨宏伟, 费逸伟. 固定顶油罐内气体空间油气浓度分布[J]. 石化技术, 2004, 11(4): 15-17.

[12] Randeberg E, Olsen W, Eckhoff R K. A new method for generation of synchronised capacitive sparks of low energy[J]. Journal of Electrostatics, 2006, 64(3-4): 263-272.

[13] Bane S P M. Spark ignition: experimental and numerical investigation with application to aviation safety[D]. California Institute of Technology, Pasadena, California, 2010.

[14] Sheng H R, Wang Z Y, Yang S J, Ye S L. Measurement of the effect of parasitic capacitance in minimum ignition energy spark generation circuits[J]. Journal of Electrostatics, 2022, 119: 103752.

- [15] Lesmana H, Zhu M M, Zhang Z Z, Gao J, Wu J Z, Zhang D K. An experimental investigation into the effect of spark gap and duration on minimum ignition energy of partially dissociated NH_3 in air[J]. Combustion and Flame, 2022, 241: 112053.
- [16] 张增亮, 张景林, 蔡康旭. 最小点火能的影响因素及计算误差分析研究[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(5): 88-91.
- [17] 弓燕舞, 林文胜, 张荣荣, 顾安忠, 鲁雪生. 热分层对蒸汽爆炸过程影响的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(6): 925-928.
- [18] 王彝, 刘小琴, 谢传欣. 温度对烃类可燃气体最小点火能的影响[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(2): 90-93.
- [19] 李俊, 鲁长波, 安高军, 熊春华, 解立峰. 高闪点喷气燃料最小点火能试验研究[J]. 消防科学与技术, 2016, 35(11): 1521-1524.

Study on the test method of minimum ignition energy of vapor under the gas-liquid coexistence condition with trace liquid

WANG Yu¹, DING Jiong^{1,2}, YANG Suijun^{1,2},
WANG Zhiyu^{1,2}, YE Weitao^{1,2}, YE Shuliang^{1,2}

(1. Institute of Industry and Trade Measurement Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Zhejiang Engineering Laboratory of Chemicals Safety Testing Technology and Instruments, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problem that the traditional test method of minimum ignition energy is not suitable for liquid chemicals under the gas-liquid coexistence condition, a method for measuring the minimum ignition energy of vapor with trace liquid was proposed. Firstly, a small-volume experimental device and the corresponding test flow were designed. The sensitive electrode gap was determined by sample experiment, and the influence of sample volume and stirring on the minimum ignition energy test was studied. The minimum ignition energy of samples at different temperatures was measured, and the internal relationship between sample temperature and the minimum ignition energy of vapor was analyzed in combination with the spark ignition mechanism, which provided guidance for determining the lowest value of the minimum ignition energy. Finally, the accuracy and repeatability of the method of trace liquid were verified. The results show that the method of trace liquid can effectively test the minimum ignition energy of liquid vapor under the condition of gas-liquid coexistence. And the test value of the minimum ignition energy is slightly higher than that under the condition of high-temperature vapor. The relative standard deviation of the minimum ignition energy of samples is less than 6.0%, with good repeatability. This method provides technical support for the electrostatic explosion risk assessment of liquid chemicals.

Keywords: Liquid vapor; Minimum ignition energy; Gas-liquid coexistence; Test method; Trace liquid