

文章编号: 1006-9941(2015)07-0663-07

正癸烷云雾气液两相浓度对其燃爆参数的影响

王悦, 白春华, 李斌, 刘雪岭, 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: 为研究正癸烷云雾在相同粒径条件下气液两相浓度对燃爆参数的影响, 用测量液雾粒径与浓度的光学测量系统和 20 L 二次脉冲气动喷雾多相爆炸测试系统, 测量了基于相同索特平均直径 D_{32} , 不同气液两相浓度的正癸烷云雾, 实验研究了其燃爆参数。结果表明, 在 D_{32} 为 38.11 μm , 点火能为 40.32 J 的条件下, 正癸烷气液两相云雾燃爆下限总浓度为 199.29 $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 对应的液相质量浓度为 151.34 $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 气相体积浓度为 0.77% (V/V)。在可燃浓度范围内, 最大爆温峰值与最大爆压峰值分别为 812 $^{\circ}\text{C}$ 和 0.97 MPa。在 D_{32} 为 38.11 μm 的条件下, 正癸烷云雾液相浓度对燃爆下限影响较小, 而影响正癸烷云雾燃爆下限的主导因素是气相浓度。

关键词: 粒径分布; 云雾浓度; 燃爆参数; 正癸烷**中图分类号:** TJ55; O38**文献标志码:** A**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.07.011

1 引言

可燃液体的气液两相在其生产、储存、运输、液体发动机燃烧及武器应用等方面广泛存在, 特别是燃料空气炸药 (FAE) 终点作用的云雾爆轰更有着突出的研究意义。对于云雾的形成和燃爆方面的实验研究主要集中在液体雾化^[1-3]、液滴的尺寸及时空分布^[4]、颗粒的燃烧及颗粒在气流作用下的变形和剥离^[5]、燃料-空气混合物的起爆能量^[6]、爆燃转爆轰^[7-9]、爆轰波结构^[10-11]、爆轰威力^[12]等方面。Gabrijel^[13]在扇形激波管中研究了平均直径为 388 μm 的煤油液滴与空气混合物形成的云团的爆轰, 实验中使用数万焦耳的点火能量, 实验结果发现爆轰速度、爆轰淬灭和直接起爆能量均与所形成液体云雾的间隙有关。Bar-Or^[14]在扇形激波管中研究了液滴直径为 400 μm 的癸烷、煤油、庚烷, 发现低挥发性燃料癸烷和煤油具有较长的反应区, 即该反应区由液滴的破碎过程确定, 且爆轰速度明显低于理论计算的气体爆轰的 CJ 值, 高挥发性燃料庚烷爆轰速度接近气体爆轰的 CJ 值。中国工程物理研究院陈军等人^[15]利用激光散射的方法对 FAE 爆炸抛撒后远场云雾液滴索特平均直径 D_{32} 在不同空间位

置随时间的变化过程进行了实验研究, 得出散射光强以及 D_{32} 与时间变化的关系, 即云雾区的液滴 D_{32} 在固定点随时间的增加呈减小趋势, 云雾区液滴 D_{32} 随爆心距离的增加而增加。

气相预混爆炸和液相扩散燃烧的同时发生使这种动态的气液两相云雾燃爆性能的研究非常复杂。其影响因素包括燃料的物理化学性质, 如燃料的表面张力、动力粘度、密度、沸点及瞬态的液滴大小、尺寸分布、浓度分布、环境温度、初始压力、湍流速度、点火时间和点火能量等。目前, 大多数液雾的燃爆与爆轰研究一般在密闭多相燃爆装置中进行, 通常以实验设计的计量浓度来表征点火时刻的浓度而忽略实际液雾喷射过程中的蒸发汽化、过程损耗等问题, 同时对于液滴直径大多采用实际测量到的等效平均粒径来表示, 但大多数实际喷雾所形成的液滴尺寸是不均匀的, 液滴是以其粒径分布状态存在; 为了研究云雾瞬态粒径分布、气液两相浓度及其不同浓度下的燃爆性能, 本工作利用液雾粒径与浓度光学测量系统和 20 L 二次脉冲气动喷雾多相爆炸测试系统, 在相同 D_{32} 条件下, 对不同浓度的正癸烷气液两相的燃爆参数进行了实验研究。

2 实验部分

2.1 实验装置

20 L 二次脉冲气动喷雾多相爆炸测试系统 (自行开发设计) 包括: 20 L 圆柱爆炸罐体、二次脉冲气动喷

收稿日期: 2014-06-24; 修回日期: 2014-10-04

基金项目: 国家自然科学基金资助 (11372044)

作者简介: 王悦 (1975-), 女, 博士, 讲师。主要从事安全监控与事故再现。e-mail: 726572905@qq.com

雾系统、4-40 J 多级可调火花放电点火子系统(EPT-1 点火试验台和火花点火装置)、高速数据采集处理存储子系统(NI PXI-5922 高速数字化仪和瞬态爆炸参数测试软件)、时序触发控制中心子系统,其中 EPT-1^[16-17] 点火试验台和 NI PXI-5922 高速数字化仪^[18-19] 为标准装置。如图 1 所示,20 L 圆柱爆炸罐体包括三对透明光学检测窗口,位置分别为罐体高度 1/5,1/2,4/5 处;罐体内径为 300 mm,高为 312 mm,壁厚 10 mm;二次脉冲气动喷雾系统包括高压气泵、高压气室、电磁阀、单向阀、储液室、半球型多孔喷头;多孔均布空心球体(球体直径 25 mm;开孔个数为 42 个;开孔的孔径为 2 mm)放置于喷头腔体内部起到提高雾化质量的作用。时序触发控制中心子系统可同时控制气动雾化系统、点火系统、数据采集系统、粒径及浓度光学测量系统按不同触发时间、时长精确触发各子系统,时间精度级别 1 ms。

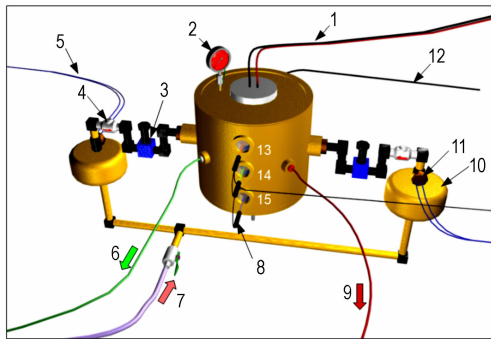


图 1 20 L 二次脉冲气动喷雾多相爆炸测试系统

1—点火电缆, 2—压力表, 3—储液室, 4—单向阀, 5—电磁阀连接触发控制中心电缆, 6—压力传感器数据传输电缆, 7—高压气泵气体输入管段, 8—多波长激光发射器, 9—温度传感器数据传输电缆, 10—高压气室, 11—电磁阀, 12—数字光照强度检测传感器电缆, 13—罐体上部 1/5 透明视窗, 14—罐体 1/2 透明视窗(点火位置), 15—罐体下部 4/5 透明视窗

Fig. 1 Double pulse pneumatic spray multiphase explosion test system

1—ignition source, 2—pressure gage, 3—liquid storage chamber, 4—non-return valve, 5—connection synchronized trigger system, 6—pressure sensor transmission cables, 7—connect high pressure pump, 8—the laser, 9—combustion temperature data recorder, 10—air compression chamber, 11—solenoid valve, 12—light intensity sensor cable, 13—the position 1/5 of the vessel, 14—the position 1/2 of the vessel, 15—the position 4/5 of the vessel

液雾粒径与浓度光学测量系统包括:20 L 圆柱罐体、激光发射单元、光照强度检测单元、信号转换及高速数据采集处理(计算机)子系统、二次脉冲气动喷雾系统、时序触发控制子系统,如图 2 所示。该系统(自

行开发)以光全散射法原理设计,其基本理论是 Mie 光散射理论^[20-21]。随着大量试验的积累和验证,其测量粒径范围可达几纳米到 300 μm ^[22]。数字光照强度检测传感器具有较宽动态响应范围,可见光强度测量范围 0 ~ 65535 Lux,可快速获取入射与出射光照强度数据。粒径分布与浓度光学测量系统设有三种可见光波长,分别为 447,543,638 nm,功率 50 mW 的激光发射单元,并分别对应三个数字光照强度检测单元。根据实验要求,该测量系统可拓展达 16 组激光发射单元和数字光照强度检测单元。

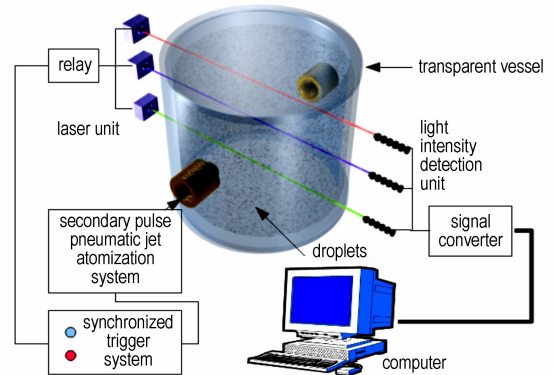


图 2 测量液雾粒径与浓度的光学测量系统

Fig. 2 Optical measurement system of measuring particle size and concentration of liquid spray

2.2 实验过程

云雾粒径分布与浓度测量实验过程:为获得相同索特平均直径 D_{32} 与不同正癸烷液雾浓度趋势结果,利用液雾粒径与浓度光学测量系统,通过调节气动压力和设计喷雾剂量,进行了粒径与浓度的测量实验。实验条件为:初始温度 21 $^{\circ}\text{C}$,初始压力 0.1 MPa,电磁阀开启时长 50 ms(喷雾时长),粒径及浓度光学测量系统时间采样点为 80 ms。测试步骤为:首先打入高压气体并加入初始设计喷雾计量的液体,然后同步触发气动喷雾与粒径及浓度光学测量系统,获取液滴的索特平均直径 D_{32} 与液雾浓度数据,最后提取储液室残余液体量,记录处理数据。

云雾燃爆实验过程:基于上述正癸烷相同粒径、不同液雾浓度的测量与统计结果,在 20 L 二次脉冲气动喷雾多相爆炸测量系统中进行云雾燃爆参数测试实验。实验条件为:初始温度 21 $^{\circ}\text{C}$,初始压力 0.1 MPa,电磁阀开启时长 50 ms,点火延迟时长 80 ms,点火能量 40.32 J。实验步骤为:首先打入高压气体并加入初始设计喷雾计量的液体,然后同步触发气动喷雾与点火系统,记录处理燃爆超压与燃爆温度实验数据。

3 结果与讨论

3.1 粒径分布与浓度结果

为准确获得实际雾化的正癸烷浓度,引入两个参数:设计喷雾剂量和喷雾损耗剂量。设计喷雾剂量(DSD)为实验初始准备阶段注入喷雾系统两个储液室的总癸烷液体剂量;喷雾损耗剂量(LSD)包括喷雾完成后,两个储液室残余剂量与粒径及浓度光学测量系统所测量实时液相浓度 10% 的总和,其中,液雾浓度 10% 是考虑到喷雾过程导致液雾罐壁的残余量。正癸烷雾化的总实际浓度是由设计喷雾剂量(DSD)与喷雾损耗剂量(LSD)之差获得,而其中实时气相浓度是由正癸烷雾化的总实际浓度与粒径及浓度光学测量系统所测量的实时液相浓度之差获得。表 1 列出了在 80 ms 时间节点,正癸烷气液两相浓度及索特平均直径 D_{32} 的实验结果,其中 $D_{32} = 38.11 \mu\text{m}$ 为不同所

有实时液相浓度下 D_{32} 的平均值,并将其近似作为粒径 D_{32} 的标准参考数值。如图 3 所示,正癸烷气液两相浓度与设计喷雾计量浓度之间具有线性趋势。

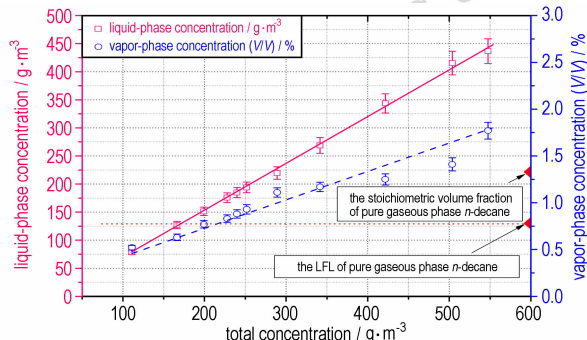


图 3 正癸烷气液两相浓度趋势图(其中纯气相正癸烷燃爆下限体积浓度来自文献[23])

Fig. 3 Vapor-liquid two-phase concentration trend of the *n*-decane(in which the explosion lower limit volume concentration of pure gas phase *n*-decane is from the literature[23])

表 1 正癸烷气液两相浓度实验数据(80 ms, $D_{32} = 38.11 \mu\text{m}$)

Table 1 Experiment data of the vapor-liquid two-phase concentration of the *n*-decane (80 ms, $D_{32} = 38.11 \mu\text{m}$)

| pneumatic pressure /MPa | pressure of 80 ms time node in the vessel /MPa | design spray dose (DSD) /g · m ⁻³ | loss spray dose (LSD) /g · m ⁻³ | total actual concentration of <i>n</i> -decane /g · m ⁻³ | mean value | | | |
|-------------------------|--|--|--|---|-------------------------------------|--|--|---------------------------------|
| | | | | | mean $D_{32}^{(1)}$ / μm | actual concentration of liquid/g · m ⁻³ | actual ⁽²⁾ concentration of vapor/g · m ⁻³ | actual concentration of vapor/% |
| 0.8 | 0.104 | 730.00 | 182.50 | 547.50 | 38.60 | 436.67 | 110.83 | 1.77 |
| 0.75 | 0.104 | 671.60 | 167.90 | 503.70 | 38.83 | 415.33 | 88.37 | 1.41 |
| 0.7 | 0.103 | 554.80 | 133.15 | 421.65 | 36.79 | 343.67 | 77.98 | 1.25 |
| 0.6 | 0.103 | 474.50 | 132.86 | 341.64 | 36.21 | 268.67 | 72.97 | 1.17 |
| 0.5 | 0.103 | 401.50 | 112.42 | 289.08 | 39.53 | 219.67 | 69.41 | 1.11 |
| 0.5 | 0.103 | 365.00 | 113.15 | 251.85 | 35.86 | 194.00 | 57.85 | 0.93 |
| 0.5 | 0.103 | 328.50 | 88.70 | 239.81 | 38.91 | 184.84 | 54.97 | 0.88 |
| 0.5 | 0.103 | 292.00 | 64.24 | 227.76 | 38.17 | 175.67 | 52.09 | 0.83 |
| 0.5 | 0.103 | 255.50 | 56.21 | 199.29 | 40.07 | 151.34 | 47.95 | 0.77 |
| 0.45 | 0.102 | 219.00 | 52.56 | 166.44 | 39.10 | 127.00 | 39.44 | 0.63 |
| 0.45 | 0.102 | 146.00 | 35.04 | 110.96 | 37.14 | 78.47 | 32.49 | 0.52 |

Note: 1) Mean D_{32} is the average value of D_{32} for up, middle and down position of the vessel; 2) Actual concentration of vapor is obtained through conversion of actual concentration of vapor (g · m⁻³) under the initial environmental conditions of test.

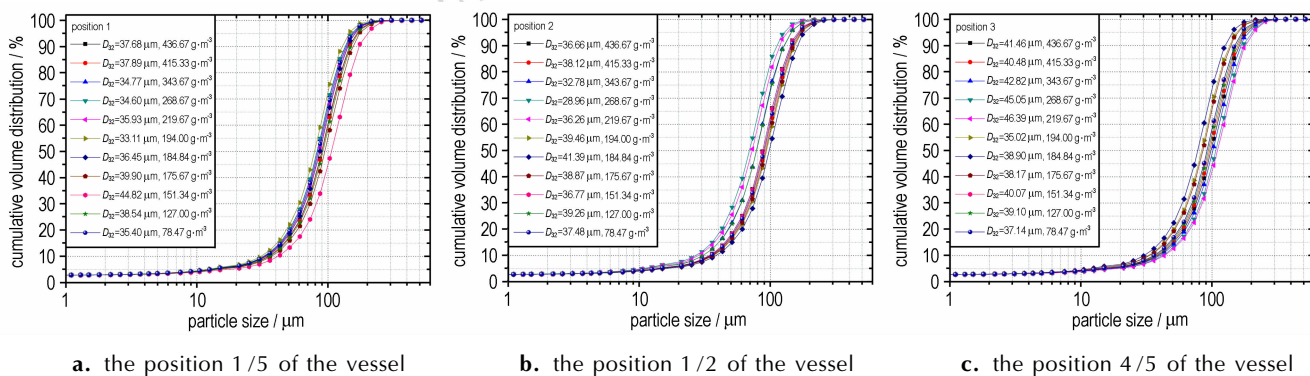


图 4 正癸烷云雾不同液相浓度下粒径分布图(80 ms, $D_{32} = 38.11 \mu\text{m}$)

Fig. 4 Particle size distribution of *n*-decane sprays at the different liquid phase concentration(80ms, $D_{32} = 38.11 \mu\text{m}$)

当云雾液滴的索特平均直径 D_{32} 大于 $10 \mu\text{m}$ 时, 云雾受重力沉降作用不可忽略, 使得处于罐体上、中、下部的液雾浓度分布不均, 通过同步测量罐体上中下三个位置液雾浓度, 并取平均值表征液雾实际平均浓度。位置 1 选定于罐体上部 1/5; 位置 2 选定于罐体 1/2 (点火位置); 位置 3 选定于罐体下部 1/5 (参看图 1 中 13、14、15 和图 2)。不同实时液相浓度下三个位置正癸烷粒径分布结果如图 4 所示。

3.2 燃爆参数实验结果

在正癸烷云雾平均粒径 D_{32} 为 $38.11 \mu\text{m}$, 点火能 40.32 J 条件下, 表 2 列出了正癸烷液相质量浓度在 $78.47 \sim 436.67 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 同时对应的气相体积浓度在 $0.52\% \sim 1.77\%$ 区间燃爆超压与燃爆温度实验结果。

在燃爆实验过程中, 正癸烷液雾液相质量浓度 $151.34 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 对应的气相体积浓度 0.77% (即: 总浓度为 $199.29 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$) 条件下, 发生一次点火成功, 两次失败, 结果见表 2; 同时, 在正癸烷液雾液相质量浓度 $127.00 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 对应的气相体积浓度 0.63% (即: 总浓度为 $166.44 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$) 条件下, 连续发生三次点火失败; 因此在正癸烷云雾 D_{32} 为 $38.11 \mu\text{m}$, 点火能量 40.32 J 条件下, 气液两相燃爆下限确定为液相质量浓度 $151.34 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、气相体积浓度 0.77% (即: 总浓度为 $199.29 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$) (其中点火能量 40.32 J 的确定基于国际经典点火能公式 $E=CU^2/2$ 算法^[24])。

正癸烷云雾不同气液两相浓度下爆压峰值趋势如图 5 所示。由图 5 可知, 在正癸烷云雾 $D_{32}=38.11 \mu\text{m}$, 点火能 40.32 J 条件下, 其爆压峰值从 0.52 MPa 逐渐

上升到 0.97 MPa ; 对应的气相体积浓度从 0.77% 到 1.41% , 液相质量浓度从 $151.34 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 到 $415.33 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$; 随后爆压峰值从 0.97 MPa 下降到 0.90 MPa , 对应的气相体积浓度从 1.41% 到 1.77% , 液相质量浓度从 $415.33 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 到 $436.67 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。在实验燃爆区间内, 最大爆压峰值 0.97 MPa 出现在气相体积浓度 1.41% , 对应的液相质量浓度为 $415.33 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ (即: 总浓度为 $503.70 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$)。

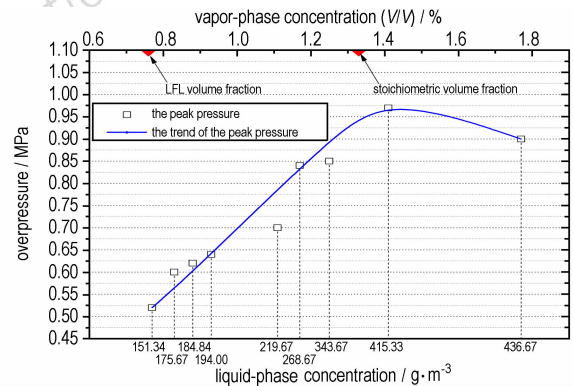


图 5 正癸烷云雾不同气液两相浓度下爆压峰值趋势图 (80 ms , $D_{32}=38.11 \mu\text{m}$, 纯气相正癸烷燃爆下限体积浓度来自文献[23])

Fig. 5 The trend of detonation pressure peak of *n*-decane sprays at the different vapor-liquid two phase concentration (80 ms , $D_{32}=38.11 \mu\text{m}$, in which the explosion lower limit volume concentration of pure gas phase *n*-decane is from the literature[23])

正癸烷云雾不同气液两相浓度下爆温峰值趋势如图 6 所示。由图 6 可知, 在燃爆区间内, 正癸烷爆温峰

表 2 正癸烷云雾爆压峰值和爆温峰值实验数据 (40.32 J , $D_{32}=38.11 \mu\text{m}$)

Table 2 Experimental data of detonation pressure peak and detonation temperature peak of *n*-decane sprays (40.32 J , $D_{32}=38.11 \mu\text{m}$)

| total concentration of <i>n</i> -decane/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ | <i>n</i> -decane liquid-phase concentration/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ | <i>n</i> -decane vapor-phase concentration/% | experiment times (F/S) | maximum pressure /MPa | maximum temperature / $^{\circ}\text{C}$ |
|---|---|--|------------------------|-----------------------|--|
| 547.50 | 436.67 | 1.77 | 3(S) | 0.90 | 723 |
| 503.70 | 415.33 | 1.41 | 3(S) | 0.97 | 786 |
| 421.65 | 343.67 | 1.25 | 3(S) | 0.85 | 736 |
| 341.64 | 268.67 | 1.17 | 3(S) | 0.84 | 733 |
| 289.08 | 219.67 | 1.11 | 3(S) | 0.70 | 777 |
| 251.85 | 194.00 | 0.93 | 3(S) | 0.64 | 807 |
| 239.81 | 184.84 | 0.88 | 3(S) | 0.62 | 812 |
| 227.76 | 175.67 | 0.83 | 3(S) | 0.60 | 784 |
| 199.29 | 151.34 | 0.77 | 1(S) 2(F) | 0.52 | 630 |
| 166.44 | 127.00 | 0.63 | 3(F) | - | - |
| 110.96 | 78.47 | 0.52 | 3(F) | - | - |

Note: In experiment times (F/S) in the table, where F stands for "fail", S stands for "success"; in which 3 (S) represents the results of three experiments are successfully ignited. maximum pressure and Maximum temperature lists the maximum in the three tests; in which 3 (F) stands for the results of the experiment three times are not successful ignition.

值出现了双峰现象,燃爆峰值的首峰温度(最大峰值温度)为812℃,出现在气相体积浓度0.88%,对应的液相质量浓度184.84 g·m⁻³(即:总浓度为239.81 g·m⁻³);次峰温度786℃,出现在气相体积浓度1.41%,对应的液相质量浓度415.33 g·m⁻³(即:总浓度为503.70 g·m⁻³)。

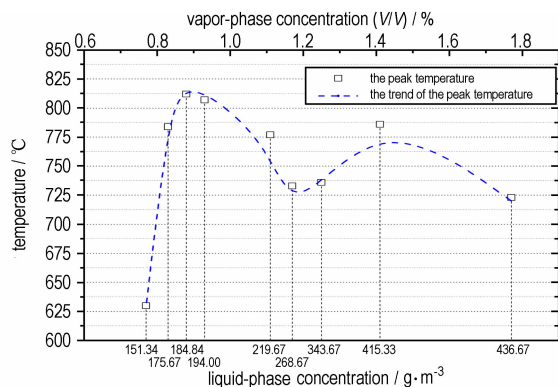


图6 正癸烷云雾不同气液两相浓度下爆温峰值趋势图(80 ms, $D_{32}=38.11 \mu\text{m}$)

Fig. 6 The trend of detonation pressure peak of *n*-decane sprays at the different gas-liquid two-phase concentration (80 ms, $D_{32}=38.11 \mu\text{m}$)

3.3 气液两相实时浓度和 D_{32} 差值范围分析

正癸烷云雾实时浓度和粒径随着时间变化而变化,同时罐体内部不同位置的浓度在同一时刻也不尽相同。为此实验结果应考察液相实时浓度的差值范围。在本实验中,考虑到液雾粒径受重力影响,不同位置的浓度在同一时刻浓度规律为:位置1(罐体上部1/5)<位置2(罐体1/2)<位置3(罐体下部1/5),三个浓度测量位置如图1和图2所示。因此,分别以位置1和2的平均浓度设定为差值下限,位置2和3的

表3 正癸烷液相平均粒径的差值范围($D_{32}=38.11 \mu\text{m}$)

Table 3 The average particle size difference range of liquid phase *n*-decane ($D_{32}=38.11 \mu\text{m}$)

| liquid-phase concentration/g·m ⁻³ | position 1 $D_{32}/\mu\text{m}$ | position 2 $D_{32}/\mu\text{m}$ | position 3 $D_{32}/\mu\text{m}$ | mean value $D_{32}/\mu\text{m}$ | mean value of all experimental data $D_{32}/\mu\text{m}$ | relative error /% |
|--|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|-------------------|
| 436.67 | 37.68 | 36.66 | 41.46 | 38.60 | 38.11 | 1.29 |
| 415.33 | 37.89 | 38.12 | 40.48 | 38.83 | 38.11 | 1.89 |
| 343.67 | 34.77 | 32.78 | 42.82 | 36.79 | 38.11 | 3.46 |
| 268.67 | 34.60 | 28.96 | 45.08 | 36.21 | 38.11 | 4.99 |
| 219.67 | 35.93 | 36.26 | 46.39 | 39.53 | 38.11 | 3.73 |
| 194.00 | 33.11 | 39.46 | 35.02 | 35.86 | 38.11 | 5.90 |
| 184.84 | 36.45 | 41.39 | 38.90 | 38.91 | 38.11 | 2.10 |
| 175.67 | 39.90 | 38.87 | 35.72 | 38.17 | 38.11 | 0.16 |
| 151.34 | 44.82 | 36.77 | 38.62 | 40.07 | 38.11 | 5.14 |
| 127.00 | 38.54 | 39.26 | 39.50 | 39.10 | 38.11 | 2.60 |
| 78.47 | 35.40 | 37.48 | 38.54 | 37.14 | 38.11 | 2.55 |

平均浓度设定为差值上限。由于正癸烷气相的实时浓度是由正癸烷总浓度与液相的实时浓度之差获得;同时考虑到喷雾导致10%的罐体壁面的损耗,实际正癸烷气相浓度的差值范围也可得出。由图3所示,正癸烷气液两相在80 ms点火时刻不同实时浓度差值范围分别为:0.02%~0.09%和4~30.33 g·m⁻³。

云雾燃爆的实验研究由于多元变量的因素,导致系统性研究趋于复杂,其中会涉及液相粒径,气、液实时浓度这三组重要参数。因此本实验研究基于锁定液相 D_{32} 平均粒径的条件下,研究气液两相浓度变化对燃爆参数的影响趋势。平均粒径 $D_{32}=38.11 \mu\text{m}$ 是所有实验数据的一个平均值。它作为一个常量是为整个实验提供一个参考标准数值。但实际上,实验结果中的 D_{32} 和常量 $38.11 \mu\text{m}$ 存在差值范围,表3列出了正癸烷液相平均粒径的差值范围,其中最大相对误差为5.90%。可见,液体瞬态雾化环境下,由于蒸发、凝结、湍流、沉降及损耗等多种因素,无法在不同浓度、相同时刻,获得完全相等的粒径大小及粒径分布状态,这是导致误差出现的原因。

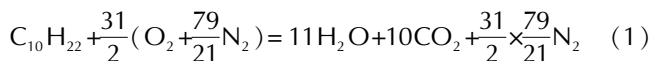
3.4 讨论

在可燃液体气动雾化过程中,由于环境、液雾粒径的不同,蒸发速率也不尽相同,从喷雾发生起,液体蒸发气化过程已同步发生。罐体内存在空气、液体蒸气、液滴混合物;在本实验研究中,雾化时长50 ms,并延迟至80 ms点火,以降低气动对罐体内部湍流影响;因此,点火时,实际同步发生了正癸烷蒸气预混燃爆和液滴扩散燃烧。

由文献[23-25]可知,正癸烷燃爆极限范围在0.78%~7.8%。由表2可知,本次实验测得的可燃范围为0.77%~1.77%(云雾中气相浓度范围),即

获得的燃爆下限 0.77% 与文献中的 0.78% 相近, 因此可以得出正癸烷云雾在平均粒径 $D_{32} = 38.11 \mu\text{m}$ 条件下, 液相浓度对燃爆下限影响较小, 而气相浓度为燃爆下限的主要影响因素的结论。

正癸烷蒸气与空气混合化学反应方程如式(1)所示, 其中 C_{st} 为癸烷当量体积分数:



$$C_{st} = \frac{1}{1 + \frac{31}{2}(1 + \frac{79}{21})} \approx 1.33\%$$

理论上, 正癸烷蒸气与空气混合爆压峰值的最大值应出现在当量体积分数为 1.33% 处, 但在实际化学反应过程中, 由于所有的 C、H 元素不可能完全氧化生成 CO_2 和 H_2O 。在化学反应达到平衡状态时, CO 、 H_2 和 OH 也包含其中。因此, 燃爆最大超压峰值的体积分数总是比当量体积分数浓度出现地稍晚^[26-27]。本实验在癸烷气相浓度为 1.41% 时, 获得的最大爆压峰值, 即也出现在当量浓度稍后位置。结果说明正癸烷云雾中对应的气相浓度大小也是最大爆压峰值的决定因素。

由文献[25-27]可知, 纯气相可燃物与空气混合最大爆压峰值与最大爆温峰值同步出现; 但在本实验中, 并没有同步发生, 最大爆温峰值出现在正癸烷液相 $184.84 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、气相 0.88% (即: 总浓度为 $239.81 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$), 而最大爆压峰值 0.97 MPa 出现在液相 $415.33 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、气相 1.41% (即: 总浓度为 $503.70 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$); 这说明正癸烷云雾液滴群扩散燃烧过程中, 由于蒸发所引起的热交换与热传递的发生, 其对燃烧温度有明显的影响。

4 结 论

(1) 正癸烷在 D_{32} 为 $38.11 \mu\text{m}$, 点火能 40.32 J 条件下, 气液两相燃爆下限总浓度为 $199.29 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中液相质量浓度为 $151.34 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 气相体积浓度为 0.77%; 表明正癸烷云雾液相浓度对燃爆下限影响较小, 而气相浓度为燃爆下限主要影响因素。

(2) 正癸烷气液两相云雾最大爆压峰值为 0.97 MPa, 出现在正癸烷气相体积浓度 1.41%, 即当量浓度稍后位置, 表明最大爆压峰值也是由云雾中对应的气相浓度大小所决定; 而最大燃温峰值为 $812 \text{ }^\circ\text{C}$, 出现在正癸烷气相体积浓度 0.88%, 说明正癸烷云雾液滴群扩散燃烧过程对燃烧温度有显著的影响。

(3) 正癸烷气液两相云雾燃爆温度出现双峰现象, 首峰最高温度 $812 \text{ }^\circ\text{C}$, 出现在总浓度为 $239.81 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ (其中: 气相体积浓度 0.88%, 液相质量浓度在 $184.84 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$); 次峰最高温度 $786 \text{ }^\circ\text{C}$, 出现在总浓度为 $503.70 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ (气相体积浓度 1.41%, 对应的液相质量浓度在 $415.33 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$)。

参考文献:

- [1] Fraser R P. Liquid fuel atomization [C] // Proceedings of the Combustion Institute. Sixth Symposium (international) on Combustion. Elsevier; Elsevier on behalf of The Combustion Institute, 1957, 6(1): 687-701.
- [2] 赵林双, 杜志明. 气体发生剂高压燃气驱动液体高速喷雾的试验研究[J]. 含能材料, 2007, 15(5): 451-454.
ZHAO Lin-shuang, DU Zhi-ming. High-speed liquid Jet driven by burned gas of gas generating compositions[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailliao)*, 2007, 15(5): 451-454.
- [3] 刘光烈. 多相爆轰试验管结构设计及试验验证[J]. 含能材料, 1997, 5(1): 35-38.
Liu Guang-lie. Design of multiphase detonation tube and Its experimental verification [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailliao)*, 1997, 5(1): 35-38.
- [4] 李丽, 李先, 杨丽侠, 等. 激光全息摄影技术在液体发射药喷雾场测试中的应用[J]. 含能材料, 2004, 12(2): 97-100.
LI Li, LI Xian, YANG Li-xia, et al. Application of laser holography to the atomized field of liquid propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailliao)*, 2004, 12(2): 97-100.
- [5] Hsiang L P, Faeth G M. Drop properties after secondary breakup [J]. *International of Multiphase Flow*, 1993, 19(5): 721-735.
- [6] YAO Gan-bing, ZHANG Bo, XIU Guang-li, et al. The critical energy of direct initiation and detonation cell size in liquid hydrocarbon fuel/air mixtures[J]. *Fuel*, 2013, 113: 331-339.
- [7] LIU Qing-ming, BAI Chun-hua, Dai Wen-xi, et al. Deflagration-to-detonation transition in isopropyl nitrate mist/air mixtures[J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2011, 47(4): 448-456.
- [8] LIU Qing-ming, BAI Chun-hua, Dai Wen-xi, et al. Deflagration-to-detonation transition in nitromethane mist/aluminum dust/air mixtures[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(1): 106-117.
- [9] LIU Qing-ming, BAI Chun-hua, Dai Wenxi, et al. Explosions and deflagration-to-detonation transitions in epoxypropane/air mixtures[J]. *Safety Science*, 2011, 49(6): 926-932.
- [10] Douglas C W, Stamps A, Scott E, et al. Observations of the cellular structure of fuel-air detonations [J]. *Combustion and Flame*, 2006, 144(1-2): 289-298.
- [11] 徐晓峰, 解立峰, 彭金华, 等. 碳氢燃料爆轰波胞格结构的实验研究[J]. 含能材料, 2003, 11(2): 57-60.
XU Xiao-feng, XIE Li-feng, PENG Jin-hua, et al. Experimental studies on the cellular structure of detonation waves of hydrocarbon fuels[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailliao)*, 2003, 11(2): 57-60.
- [12] 贵大勇, 刘吉平, 冯顺山. 几种典型燃料空气炸药威力性能研究[J]. 含能材料, 2002, 10(3): 121-124.
GUI Da-yong, LIU Ji-ping, FENG Shun-shan. Research of power performance of several typical fuel air explosives[J]. *Chinese*

- Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailliao)*, 2002, 10 (3): 121–124.
- [13] Gaboriel Z, Nicholls J A. Cylindrical heterogeneous detonation wave[J]. *Acta Astronautica*, 1978, 5 (11-12): 1051–1061.
- [14] Bar-Or R, Sichel M, Nicholls J A. The propagation of cylindrical detonations in monodispersed sprays, 18th International Symposium on Combustion [C]//The Combustion Institute. Waterloo: Elsevier Inc 1981:1599–1606.
- [15] 陈军, 吴国栋, 韩肇元, 等. FAE 爆炸抛撒后云雾液滴尺寸的测量[J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23(1): 74–77.
CHEN Jun, WU Guo-dong, HAN Zhao-yuan, et al. Measurement on mean size of liquid droplets of FAE dispersed by explosives[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(1): 74–77.
- [16] LIU Xue-ling, ZHANG Qi. Influence of initial pressure and temperature on flammability limits of hydrogen-air[J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2014, 39: 6774–6782.
- [17] LIU Xue-ling, ZHANG Qi, MA qiu-ju, et al. Limiting explosible concentration of hydrogen – oxygen-helium mixtures related to the practical operational case[J]. *J Loss Prev Process Ind*, 2014, 29: 240–244.
- [18] ZHANG Qi, LI Wei. Ignition characteristics for methane-air mixtures at various initial temperatures[J]. *Process Saf Prog*, 2013, 32: 37–41.
- [19] ZHANG Qi, LI Wei, Lin D, et al. Influence of nitromethane concentration on ignition energy and explosion parameters in gaseous nitromethane/air mixtures[J]. *J Hazard Mater* 2011, 185: 756–762.
- [20] Ma L, Hanson R K. Measurement of aerosol size distribution functions by wavelength-multiplexed laser extinction[J]. *Appl Phys B*, 2005, 81: 567–576.
- [21] SUN Xiao-gang, TANG Hong, DAI Jingmin. Retrieval of particle size distribution in the dependent model using the moment method[J]. *Optical Society of America*, 2007, 15: 15–24.
- [22] Noviek V J. Use of series light extinction cells to determine aerosol number concentration[J]. *Aerosol Science and Technology*, 1988, (9): 251–262.
- [23] Wilbur A, Affens. Flammability properties of hydrocarbon fuels [J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 1966, 11(2): 197–202.
- [24] Lewis B, vonElbe G, Combustion Flames and Explosions of Gases[M], New York: Academic Press, 1951.
- [25] Zabetakis M G, Scott G S, Jones G W. Limits of flammability of paraffin hydrocarbons in air[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 1951, 43(9): 2120–2124.
- [26] ZHANG Qi, LI Wei, TAN Ru-mei, et al. Combustion parameters of gaseous epoxypropane/air in a confined vessel[J]. *Fuel*, 2013, 105: 512–517.
- [27] LIU Xue-ling, HUANG Ying, WANG Yue, et al. Critical explosible oxygen concentration of methanol-saturated vapor/O₂/N₂ mixtures at elevated temperatures and pressures[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2014, 53: 5617–5621.

Influence of the Gas-liquid Two-phase Concentrations of *n*-Decane Sprays on its Explosion Parameters

WANG Yue, BAI Chun-hua, LI Bin, LIU Xue-ling, ZHANG Qi

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

Abstract: To study the influence of the vapor-liquid two-phase concentrations of *n*-decane sprays under the same particle size condition on explosion parameters, the *n*-decane sprays with different concentration of vapor-liquid two-phase based on Sauter mean diameter D_{32} were studied by an optical measurement system of particle size and concentration of liquid spray and a 20 L double pulse pneumatic spray multiphase explosion test system. The explosion parameters were measured. Results show that under the conditions of D_{32} as 38.11 μm and ignition energy as 40.32 J, the low flammability limit(LFL) total concentration of vapor-liquid two-phase *n*-decane sprays is 199.29 $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, corresponding liquid-phase mass concentration is 151.34 $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and vapor-phase volume concentration is 0.77% (V/V). The maximum detonation temperature peak and maximum detonation pressure peak in the flammable range of concentration is 812 $^{\circ}\text{C}$ and 0.97 MPa respectively. Under the condition of D_{32} as 38.11 μm , the influence of liquid-phase concentration of *n*-decane sprays on the LFL is smaller, whereas the dominant factor affecting the LFL of *n*-decane sprays is vapor-phase concentration.

Key words: particle size distribution; concentration of sprays; explosion parameters; *n*-decane

CLC number: TJ55; O38

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.07.011