DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0497-06

乙醚云雾场燃爆参数实验研究*

王 悦[1],白春华[2]

(1.新疆工程学院安全工程系,新疆 乌鲁木齐 830091;
2.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:基于自行研发的 20 L 二次脉冲气动喷雾多相爆炸测试系统和全散射粒径测量系统,对乙醚液体燃料瞬态雾化云雾场的燃爆参数进行实验研究。通过调节气动压力、设计喷雾剂量,得到了粒径相同、质量浓度不同的乙醚云雾燃爆超压、温度及点火延迟时间等燃爆参数。结果表明,在索特平均直径为 22.90 μm 的条件下:乙醚云雾与空气混合物的燃爆下限为 80.26 g/m^3,燃爆上限为 417.34 g/m^3;最大超压峰值为 0.78 MPa,其出现在云雾质量浓度为 278.23 g/m^3 时;最大爆温峰值为 1 260 ℃,其出现在云雾质量浓度为 228.29 g/m^3 时;点火延迟时间在燃爆极限范围内呈 U 型分布。

关键词:爆炸力学;燃爆参数;气动压力;乙醚云雾;索特平均直径

中图分类号:O381 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

近年来,对于云雾燃爆的实验研究主要集中在气-液两相混合物的起爆能量[1]、爆燃转爆轰及爆轰波结构[2-7]等方面。云雾燃爆涉及燃料的物化性能、液滴大小、云雾质量浓度、环境等多种影响因素,当前对密闭容器云雾等粒径条件下,不同质量浓度的云雾燃爆性能的研究还较少,尤其是乙醚云雾此方面的研究更少。乙醚自燃温度为 160 ℃,闪点为−45 ℃,可在无火焰或火花的热表面环境下点燃。乙醚在气相状态下与空气混合的燃爆极限为(1.9～36.0)%(体积分数)。由于乙醚易于生产、成本低,同时具有高挥发、低闪点等特性,在军事、燃油替代等领域得到了广泛应用。本文中,通过自行研发的 20 L 二次脉冲气动多相爆炸测试系统和全散射粒径测量系统,对索特平均直径相同、质量浓度不同的乙醚云雾燃爆参数进行实验研究。

1 实验装置

1.1 概 述

多相爆炸测试系统包括:20 L 球型爆炸罐体、双喷头二次脉冲气动雾化子系统、100 J 无级可调火花放电点火子系统[8]、高速数据采集处理存储子系统[9-10]、时序触发控制中心。如图 1 所示,20 L 球型爆炸罐体内径为 337 mm,罐体包括一对透明光学检测窗口。时序触发控制中心可同时控制气动雾化、点火、数据采集、全散射粒径测量等子系统按实验要求,不同时间精确触发,精度级别 1 ms。全散射粒径测量系统光路通过罐体透明光学检测窗口,并穿过球罐中心;激光发射单元光学波长分别为 447、543、638 nm,功率为 50 mW。

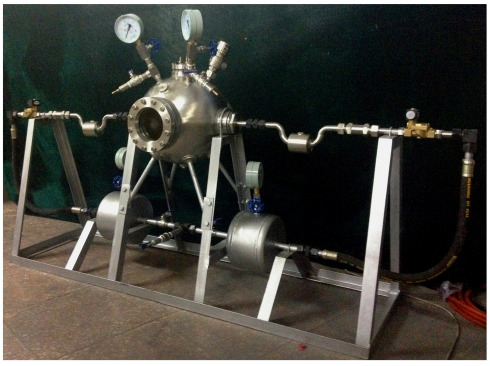
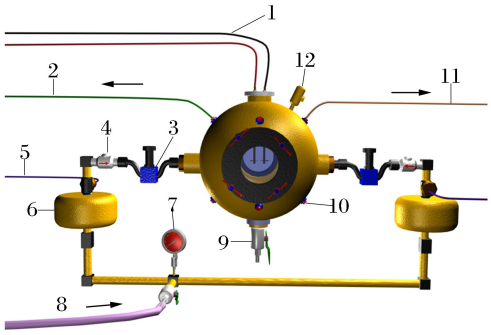


图 1(a) 20 L 二次脉冲气动喷雾多相爆炸测试系统照片图

Fig. 1(a) Photo of 20 L pulse pneumatic spray multiphase explosion test system

* **收稿日期**:2014-11-18;**修回日期**:2015-02-06
基金项目:国家自然科学基金项目(11372044)
第一作者:王 悦(1975—),女,博士,讲师,726572905@qq.com。



1. Ignition source;
2. Pressure sensor data transmission cables;
3. Liquid storage chamber;
4. Non-return valve;
5. Solenoid valve;
6. Air compression chamber;
7. Pressure gage;
8. High-pressure pump tube;
9. Air evacuation valve;
10. Reserved pressure sensor;
11. Temperature sensor data transmission cables;
12. Air relief valve

图 1(b) 20 L 二次脉冲气动喷雾多相爆炸测试系统示意图

Fig. 1(b) Schematic diagram of 20 L pulse pneumatic spray multiphase explosion test system

1.2 二次脉冲雾化系统

为实现瞬态大张角雾化效果，自行研制了双喷头二次脉冲气动雾化子系统。其组成包括：空气泵、电磁阀、高压气室、储液室、气液输送管段(内直径为 20 mm)、球型腔体喷头(内直径为 40mm，前半球表面上布置 11 圈直径为 1.0～1.5 mm 的小孔 119 个)、多孔均布空心小球(小球直径为 25 mm；开孔 42 个，孔径为 3 mm)。气动雾化喷腔结构如图 2 所示。

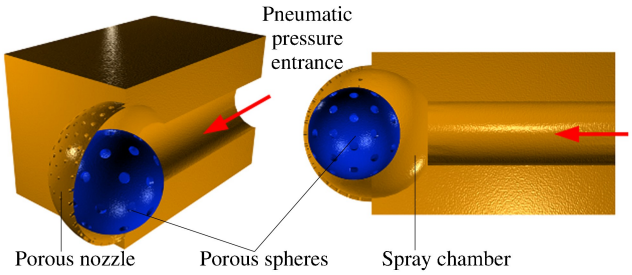


图 2 气动雾化喷腔结构模型

Fig. 2 Structural model of pneumatic atomizing chamber

由于在气液输送管段高速高压瞬态脉动喷射作用下，形成以环状流为主的流型结构，即气相在管道中心形成高速流动的气芯，液相以液膜形式沿管壁周围向前运动，如图 3 所示。在喷雾腔室加装均布带孔小球，上述流型进入气液参混扩散区后(喷雾腔室)，一部分气体进入小球形成高压气腔，并由小球前半部分小孔排出产生二次气动；另部分气体沿小球外部形成漩涡，加强气液掺混；最终由多孔小球排出的带压气体推动气液掺混区的液体沿喷头喷出，形成大张角圆锥体结构的悬浮云雾。

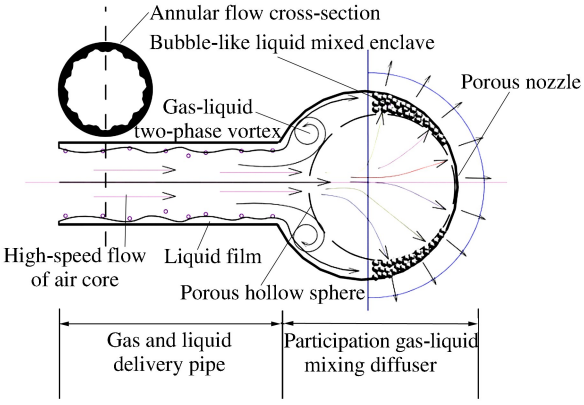


图 3 二次脉冲气动雾化系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of secondary pulse-pneumatic jet atomization system

1.3 粒径测量系统

为实时测量云雾粒径及质量浓度，自行研发了全散射粒径测量系统，并同步使用实时喷雾激光粒度仪 HELOS-VARIO 进行了实验数据比较测试，结果见表 1，表中 n 为测量次数。2 套系统所测得特征直径 D_{10}、D_{50}、D_{90} 和索特平均直径 D_{32} 的误差分别为 2.85%、4.65%、1.27%、0.24%。结果证明，研发的全散射粒径测量系统能够满足实验测量要求。

表 1　2 种测量系统的测量结果

Table 1　Measured results by two measuring systems

测量系统	n	测量结果	$D_{10}/\mu m$	$D_{50}/\mu m$	$D_{90}/\mu m$	$D_{32}/\mu m$
实时喷雾激光粒度仪	30	最大值	26.50	52.33	78.88	22.45
		最小值	22.52	43.63	65.24	18.45
		平均值	24.51	47.98	72.06	20.45
全散射粒径测量系统	30	最大值	28.68	55.63	79.89	23.12
		最小值	21.74	44.81	66.07	17.88
		平均值	25.21	50.22	72.98	20.50

2　实验过程

实验工况为：初始环境温度，21 ℃；喷雾时长，50 ms；点火时刻，100 ms；点火能量，40.32 J。首先，通过调节气动压力和设计喷雾剂量，在实验环境恒定的条件下进行等粒径、不同质量浓度的实验数据收集；然后，通过统计获得一组等粒径、不同质量浓度的实验数据，进行云雾燃爆参数测试实验，即同步触发气动喷雾、高速摄像机及点火系统；最后，记录燃爆超压、温度、点火延迟等实验数据。

3　结果与分析

3.1　粒径分布与质量浓度

索特平均直径为 22.90 μm，由乙醚云雾不同质量浓度 ρ 数据统计结果（见表 2）可知：(1)在喷雾时长50 ms作用下，400～800 kPa 不同气动压力 p_p 雾化过程完成后 100 ms，罐体内部压力 p_v 仅上升 2～4 kPa，满足后期常压燃爆实验环境要求；(2)由实验测量发现，喷雾损耗剂量 m_l 不可忽视，其占设计喷雾剂量 m_d 的 15%～25%；(3)索特平均直径 22.90 μm 为不同质量浓度下实测粒径 D_{32} 的平均值，其偏差小于 5%。

表 2　乙醚云雾质量浓度和粒径实验数据

Table 2　Experimental data of particle size and mass concentration of diethyl ether mist

p_p/MPa	p_v/MPa	$m_d/(g \cdot m^{-3})$	$m_l/(g \cdot m^{-3})$	平均值	
				$D_{32}/\mu m$	$\rho/(g \cdot m^{-3})$
0.80	0.104	713.40	142.68	23.16	570.72
0.75	0.104	642.06	96.31	23.30	545.75
0.70	0.103	570.72	114.14	22.07	456.58
0.60	0.103	535.05	117.71	22.10	417.34
0.50	0.103	499.38	124.85	21.73	374.54
0.50	0.103	428.04	107.01	23.72	321.03
0.50	0.103	356.70	78.47	21.52	278.23
0.50	0.103	285.36	57.07	23.35	228.29
0.50	0.103	214.02	53.51	22.90	160.52
0.45	0.102	142.68	35.67	24.04	107.01
0.45	0.102	107.01	26.75	23.55	80.26
0.40	0.102	71.34	14.27	23.36	57.07

3.2　燃爆参数

在点火能为 40.32 J、乙醚云雾索特平均直径为 22.90 μm 的条件下，由图 4 可知，乙醚云雾燃爆极限范围为 80.26～417.34 g/m^3。

乙醚气相燃爆极限浓度范围在 1.9%～36%（体积分数）[11]。在本实验研究中，按标准状态气相换算云雾体积浓度为2.42%～12.60%（体积分数）。可见实验获得的云雾燃爆下限 80.26 g/m^3（2.42%）比文献中乙醚纯气相燃爆下限 1.9%高；同时，云雾燃爆上限 417.34 g/m^3（12.60%）比文献中乙醚气相

燃爆上限 36%低，因此可以得出：(1)在乙醚云雾索特平均直径为 22.90 μm 的条件下，云雾浓度对乙醚云雾燃爆上、下限有较大影响；(2)燃爆上限的下降是由于随云雾液滴浓度的增大，液滴群吸热汽化并燃烧所需的能量逐渐增加，发生了淬火现象所致。

乙醚气相与空气混合(乙醚当量体积分数 $C_{st}\approx3.39\%$)化学反应方程如下：

$$C_2H_5OC_2H_5+6\left(O_2+\frac{79}{21}N_2\right)=4H_2O+5CO_2+6\times\frac{79}{21}N_2$$

理论上，上述方程说明乙醚气相与空气混合燃爆超压峰值 p 的最大值应出现在乙醚当量体积分数为 3.99%[12-13]的位置。而实验获得最大超压出现在乙醚云雾质量浓度为 278.23 g/m³(6.89%(体积分数))时，这说明由于云雾液相颗粒群主要以扩散燃烧模式并促使了对应于最大燃爆超压的乙醚云雾质量浓度推迟来临。

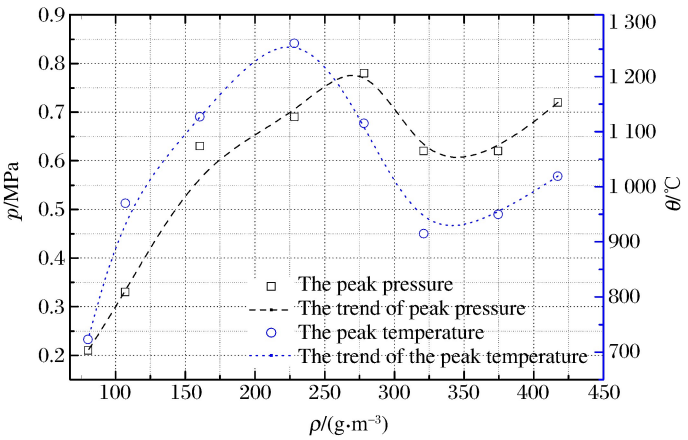


图 4 不同质量浓度的乙醚云雾燃爆超压、温度变化趋势

Fig. 4 Peak overpressure and temperature of diethyl ether mist with different mass concentrations

气相可燃物与空气混合燃爆超压和温度 θ 变化趋势同步[14]，但在本实验中，最大火焰扩散温度出现在乙醚云雾质量浓度为 228.29 g/m³ 时；而最大燃爆超压出现在乙醚云雾质量浓度为 278.23g/m³ 时；这表明乙醚云雾液相颗粒群蒸发扩散燃烧过程对温度、压力同步发生了影响，即最大燃爆温度对应的乙醚云雾质量浓度低于最大燃爆超压对应的乙醚云雾质量浓度。

3.3 点火延迟时间

对于云雾场燃爆通常由点火时刻到火焰传播发生，存在不同的点火延迟时间 $t_{i,d}$，如图 5 所示云雾点火超压过程示意图。这是由于：(1)放电火花点火过程发生的放热过程及液滴群吸热过程存在一定的时间；(2)不同物化性能的云雾也是影响点火延迟时间的重要因素；(3)对于不同浓度的云雾场，点火延迟时长也不尽相同。通过高速摄像机以 10 000 fps 的速度拍摄不同乙醚云雾点火延迟时间及火焰发展过程，如图 6 所示，由不同质量浓度下点火延迟时间及趋势可知，在乙醚云雾质量浓度为 228.29 g/m³ 时其点火延迟时长最短，约为 15 ms；最长点火延迟时长 26 ms 发生在乙醚云雾燃爆上限 417.34 g/m³。乙醚云雾与空气混合点火延迟时长在燃爆极限范围内呈 U 型分布。

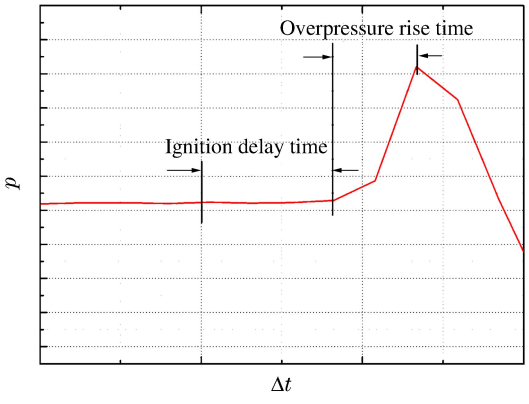


图 5 云雾点火超压过程示意图

Fig. 5 Diagrammatic overpressure process on ignition of the mist

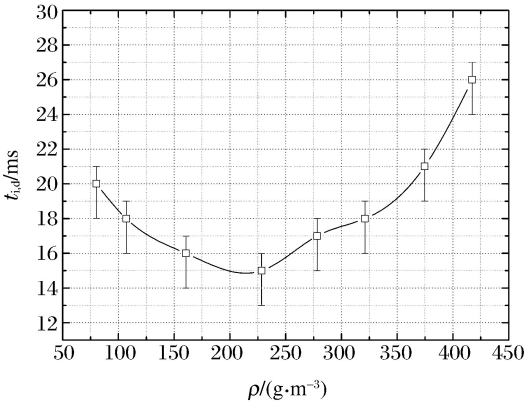


图 6 不同质量浓度的乙醚液雾的点火延迟时间

Fig. 6 Ignition delay time of diethyl ether mist with different mass concentrations

如图 7 所示，实验观测得到火焰由球罐下半部向整个罐体传播，分析可得：(1)在雾化完成后，液滴的沉降效应导致球罐下半部浓度随时间而升高；(2)双喷头二次脉冲气动雾化方法，减缓了气动对罐体内部湍流强度，从而使湍流效应弱于液滴群沉降效应。

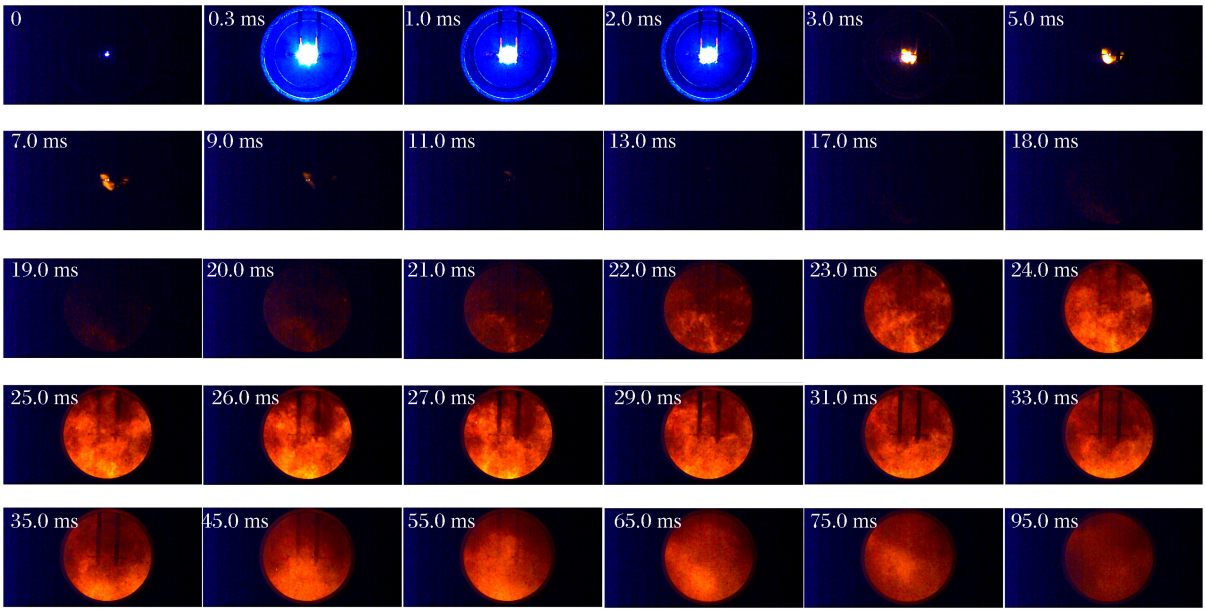


图 7　质量浓度为 278.23 g/m^3 的乙醚云雾点火及火焰传播过程

Fig. 7　Ignition and flame propagation process of diethyl ether mist with the mass concentration of 278.23 g/m^3

4　结　论

建立了 20 L 二次脉冲气动喷雾多相爆炸测试系统和全散射粒径测量系统，通过不同气动压力与设计喷雾剂量的协调，获得了乙醚云雾在索特平均直径为 22.90μm 的条件下不同质量浓度实验数据，并在点火能为 40.32 J、常温常压条件下进行了燃爆超压、温度及点火延迟时间等燃爆参数的实验研究，得到结论如下：

(1)乙醚云雾与空气混合物燃爆质量浓度极限范围为 80.26～417.34 g/m^3。

(2)乙醚云雾与空气混合物燃爆最大超压 0.78 MPa，出现在乙醚云雾质量浓度为 278.34 g/m^3 时。乙醚云雾燃爆最大温度 1 260 ℃，出现在乙醚云雾质量浓度为 228.29 g/m^3 时。

(3)乙醚云雾与空气混合物点火延迟时长在燃爆极限范围内呈 U 型分布，最短点火延迟时长 15 ms 发生在乙醚云雾质量浓度为 228.29 g/m^3 时；最长点火延迟时长 26 ms 发生在乙醚云雾燃爆质量浓度上限417.34 g/m^{3}时。

参考文献：

[1]　白春华，梁慧敏，李建平. 云雾爆轰[M]. 北京：科学出版社，2012：1.

[2]　姚干兵，解立峰，刘家骢. 液体碳氢燃料云雾爆轰特性的实验研究[J]. 爆炸与冲击，2006，26(6)：543-549.
Yao Ganbing，Xie Lifeng，Liu Jiacong. Experimental study on detonation characteristics of liquid fuel-air mixtures [J]. Explosion and Shock Waves，2006，26(6)：543-549.

[3]　沈晓波，鲁长波，李斌，等. 液体燃料云雾爆轰参数实验[J]. 爆炸与冲击，2012，32(1)：108-112.
Shen Xiaobo，Lu Changbo，Li Bin，et al. An experimental study of detonation parameters of liquid fuel drops cloud [J]. Explosion and Shock Waves，2012，32(1)：108-112.

[4]　Liu Qingming，Bai Cunhua，Dai Wenxi，et al. Deflagration-to-detonation transition in isopropyl nitrate mist/air mixtures[J]. Combustion，Explosion，and Shock Waves，2011，47(4)：448-456.

[5]　Liu Qingming，Bai Chunhua，Jiang Li，et al. Deflagration-to-detonation transition in nitromethane mist/aluminum

dust/air mixtures[J]. Combustion and Flame, 2010,157(1):106-117.

[6] Moen I. Transition to detonation in fuel-air explosive clouds[J]. Journal of Hazardous Materials, 1993,33(2):159-192.

[7] Stamps D W, Slezak S E, Tieszen S R. Observations of the cellular structure of fuel-air detonations[J]. Combustion and Flame, 2006,144(1):289-298.

[8] Zhang Qi, Li Wei, Zhang Shixi. Effects of spark duration on minimum ignition energy for methane/air mixture[J]. Process Safety Progress, 2011,30(2):154-156.

[9] Liu Xueling, Zhang Qi. Influence of initial pressure and temperature on flammability limits of hydrogen-air[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014,39(12): 6774-6782.

[10] Liu Xueling, Zhang Qi, Ma Qiuju, et al. Limiting explosible concentration of hydrogen-oxygen-helium mixtures related to the practical operational case[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014,29:240-244.

[11] Bai Chunhua, Zhang Bo, Xiu Guangli, et al. Deflagration to detonation transition and detonation structure in diethyl ether mist/aluminum dust/air mixtures[J]. Fuel, 2013,107(9):400-408.

[12] Zhang Qi, Li Wei, Tan Rumei, et al. Combustion parameters of gaseous epoxypropane/air in a confined vessel [J]. Fuel, 2013,105(2):512-517.

[13] Zhang Qi, Li Wei, Zhang Shixi. Effects of spark duration on minimum ignition energy for methane/air mixture [J]. Process Safety Progress, 2011,30(2):154-156.

[14] Liu Xueling, Huang Ying, Wang Yue, et al. Critical explosible oxygen concentration of methanol-saturated vapor/O_2/N_2 mixtures at elevated temperatures and pressures[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014,53(13):5617-5621.

Experimental research on explosion parameters of diethyl ether mist

Wang Yue[1], Bai Chunhua[2]

(1. *Department of Safety Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi* 830091, *Xinjiang, China*;
2. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: The Mei extinction detection system and the self-developed 20 L pulse pneumatic spray multiphase explosion test system were applied to experimentally investigate the explosion parameters of the diethyl ether mist/air mixtures. By regulating pneumatic pressure and designing spray dose, the explosion parameters of the diethyl ether mist/air mixtures with the same particle size and different mass concentrations were obtained including explosion overpressure, explosion temperature and ignition delay time. The results show that when the Sauter mean diameter of diethyl ether mist is 22.90 μm, the lower explosion limit of diethyl ether mist/air mixtures is 80.261 g/m^3, the upper explosion limit is 417.34 g/m^3, the highest peak overpressure is 0.78 MPa which occurs with the mass concentration as 278.23 g/m^3, the highest peak temperature is 1 260 ℃ which occurs with the mass concentration as 228.29 g/m^3, and the ignition delay time takes on a U-shaped distribution in the explosion limit range.

Key words: mechanics of explosion; explosion parameter; pneumatic pressure; diethyl ether mist; Sauter mean diameter

(责任编辑 张凌云)