

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.02.002

# 激波驱动下硝酸异丙酯的分散变化规律研究\*

张子龙 宋先钊 杨子凡 刘其闽 李 斌  
南京理工大学化学与化工学院(江苏南京,210094)

**[摘 要]** 研究液滴的分散过程对于阻止火灾蔓延、提高内燃机效率、改进云雾爆轰武器和提高云雾爆轰控制技术有着重要的作用。通过高速摄影技术以及压力测量系统,着重研究液态燃料硝酸异丙酯(IPN)的分散过程,分析液膜厚度和激波强度对 IPN 液膜分散的影响。IPN 液膜初始阶段以水平方向的分散为主;随后,以竖直方向的分散为主。水平方向,液膜抛洒先进入减速阶段,随着液膜厚度  $H$  的增加,液膜分散效果变差,分散需要的时间更长,其分散表征与石油醚相似。IPN 液膜分散所需能量要高于石油醚。激波强度超过某个值之后,超压比  $\varepsilon$  随液膜厚度  $H$  呈线性变化,可以为液膜分散提供足够的能量。当  $H < 12\text{ mm}$  时,IPN 液膜的分散变化过程主要受激波强度影响;当  $H > 12\text{ mm}$  时,IPN 液膜的分散变化过程主要受液膜厚度影响。

**[关键词]** 液态燃料;硝酸异丙酯;液膜;激波;抛洒;分散;云雾

**[分类号]** TQ560

## Study on Dispersion and Variation of Isopropyl Nitrate Driven by Shock Wave

ZHANG Zilong, SONG Xianzhao, YANG Zifan, LIU Qimin, LI Bin

School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

**[ABSTRACT]** The study of droplet dispersion process plays an important role in preventing fire spread, improving the efficiency of internal combustion engine and improving cloud detonation weapon and cloud detonation control technology. Through high-speed photography and pressure measurement system, the dispersion process of liquid fuel isopropyl nitrate (IPN) was emphatically studied, and the influence of liquid film thickness and shock wave intensity on the dispersion of IPN was analyzed. The initial stage of IPN liquid film is dominated by horizontal dispersion, followed by vertical dispersion. In horizontal direction, liquid film sprinkling first enters the deceleration stage. With the increase of thickness of liquid film  $H$ , the dispersion effect of liquid film becomes worse, and the dispersion takes longer time. Its dispersion characterization is similar to that of petroleum ether. The energy required for IPN liquid film dispersion is higher than that of petroleum ether. When the shock wave intensity exceeds a certain value, the overpressure ratio  $\varepsilon$  changes linearly with the thickness of liquid film  $H$ , which can provide sufficient energy for liquid film dispersion. When  $H < 12\text{mm}$ , the dispersion change process of IPN liquid film is mainly affected by shock wave intensity. While when  $H > 12\text{mm}$ , the dispersion change process of IPN liquid film is mainly affected by thickness of liquid film.

**[KEYWORDS]** liquid fuel; isopropyl nitrate; liquid film; shock wave; throwing; dispersion; clouds

## 引言

液体在高速气流作用下会发生变形和分裂,分散形成众多微小液滴,从而雾化。根据雾化的过程,一般分为一次雾化和二次雾化。喷射出的液体进入初始流场中,由于液滴与气体的相对运动而产生不

稳定的表面波,这些波逐渐变化发展,最终发生破碎并分离出液滴,该过程称为一次雾化;随后,这些分离的液滴在周围气体流场的激励下,进一步分裂形成微观液滴,称为二次雾化<sup>[1-5]</sup>。

液滴分散雾化过程的研究对于消防、内燃机、军事等领域都具有重要意义。例如,为了阻止火灾的蔓延,利用爆炸产生作用力将抑爆剂进行抛撒,从而

\* 收稿日期:2021-07-14

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(11802136);江苏省大学生创新创业训练计划(202010288041Y)

第一作者:张子龙(2000-),男,本科生,主要从事二相流、云雾爆轰研究。E-mail:zhangzilong0815@163.com

通信作者:李斌(1984-),男,博士,副研究员,主要从事多相流、云雾爆轰研究。E-mail:libin@njust.edu.cn

产生大范围的惰性物质分布区;利用激波将液体燃料分散雾化,可以提高以液体燃料为推进剂的发动机的燃烧效率,从而能够减少能源的浪费;而在国防军事方面,分散雾化过程具有更为重要的应用价值,在近现代局部战争中充分体现出了优越性。

作为一种敏化剂,硝酸异丙酯(IPN)不仅在民用工业上能很好地改进燃料的燃烧性能,而且在军事上可以敏化某些液体碳氢燃料,改善其爆轰性能。同时,由于 IPN 本身在一定外界能量的作用下具有爆炸危险性,故研究其燃烧爆炸属性能对正确使用这类物质提供重要依据,对发展先进的云雾爆轰武器和云雾爆轰控制技术具有重要意义<sup>[6-7]</sup>。

本文中,主要研究 IPN 液膜在激波作用下的抛洒及分散过程。通过改进过的竖直激波抛洒装置,以激波马赫数  $Ma$  以及液膜厚度  $H$  为变量,辅以压力测试系统以及高速摄影系统,对高速摄影系统捕获的图像以及压力传感器的数据进行分析,对液膜变化过程进行宏观研究,以探求其表现变化规律。

## 1 实验过程

### 1.1 实验设计

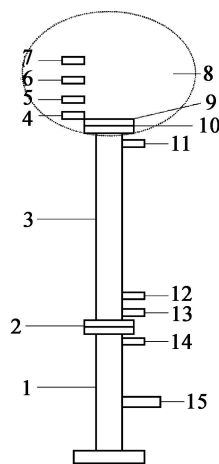
采用改进过的竖直激波抛洒装置。如图 1 所示,实验装置主要由高压区、激波区、膜片、法兰以及精度为 1% 的压力传感器组成。高压气体通过电磁阀进入装置高压区内,随后冲破高压区上方激波膜片,产生激波,通过改变激波膜片的厚度,产生不同强度的激波。

除激波强度外,液膜厚度也为变量之一。实验中,称量纸承载液膜放置在激波区出口处;称量纸上方为可更换法兰,其正中央开有一直径为 10 mm 的圆孔;通过更换不同厚度的法兰,改变液膜的厚度。根据有关文献以及前期预备实验发现,液膜厚度以 4 mm 为差值变化时,液膜会表现出明显的变化差异。因此,主要研究 4 种不同的液膜厚度(分别为 8、12、16 mm 以及 20 mm)的圆柱状液膜。

通过高速摄影系统的参数确定时间  $t$ 。使用的高速摄影系统每 0.2 ms 拍摄一张照片,因此以 0.2 ms 作为时间间隔对高速摄影结果进行分析。

### 1.2 实验步骤

将高压气体入口通过电磁阀连至高压空气瓶。每次实验前,打开高压区上方的膜片法兰螺栓,更换不同马赫数  $Ma$  的激波膜片。分析云爆武器实际应用时产生激波的  $Ma$ ,将激波管出口处激波的  $Ma$  设置为:  $1.44 \pm 0.04$ 、 $1.53 \pm 0.08$  及  $1.62 \pm 0.11$ 。



1 - 高压区;2 - 激波膜片;3 - 激波区;4 - 压力传感器 P5;5 - 压力传感器 P6;6 - 压力传感器 P7;7 - 压力传感器 P8;8 - 摄影区;9 - 可更换法兰;10 - 称量纸;11 - 压力传感器 P4;12 - 压力传感器 P3;13 - 压力传感器 P2;14 - 压力传感器 P1;15 - 高压气体入口。

图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental device diagram

安装好膜片后,将实验装置连接真空泵,抽真空检查装置气密性。若气密性不良,检查漏气处;气密性良好,则继续实验。

由于 IPN 的黏度太低,每次实验时以一张称量纸盛装液体。液膜厚度  $H$  为 8、12、16 mm 以及 20 mm。加注完液体后,开始实验。

## 2 结果与分析

### 2.1 液膜运动规律的分析

分析图 2 ~ 图 3 中的典型图片。重点关注其宏观运动规律和水平及竖直方向的分散程度。

有关研究表明,液膜分散雾化过程是气动力控制过程<sup>[8]</sup>,气动破碎是液滴破碎的主要形式<sup>[9]</sup>。但在本实验条件下,液膜还会受到激波的作用。激波与液膜作用过程中存在入射、反射与透射现象。透射激波影响液膜左侧破碎云团形状,入射激波和反射激波影响液膜右侧破碎云团形状。激波从管口出来后形成不稳定的狭长射流<sup>[10]</sup>,而流体界面的不稳定变化是一个复杂的过程,包括尖钉、气泡的形成<sup>[11]</sup>。由图 2 可以发现:在  $Ma = 1.53 \pm 0.08$  激波作用下,0 ~ 1 ms 时,液膜会在激波产生的射流作用下以锥型向上突起,并会出现不规则的尖钉;此时液膜发生初次分散,这些尖钉在不稳定射流作用下失稳并且破碎成球形液滴<sup>[12]</sup>。1 ~ 3 ms 为液膜的扩散阶段,在此阶段内液膜上端会逐渐变平,并且在射流

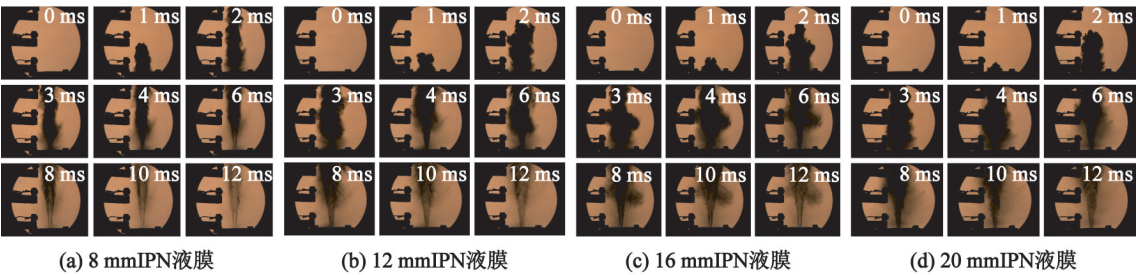


图2  $Ma = 1.53 \pm 0.08$  激波作用下 IPN 液膜的高速摄影图像

Fig. 1 High speed photographic images of IPN liquid films under shock wave with  $Ma = 1.53 \pm 0.08$

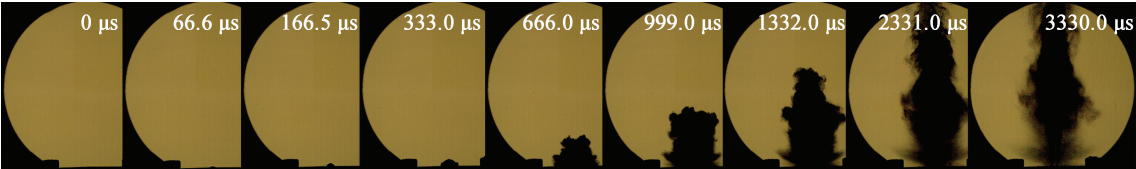


图3  $Ma = 1.62 \pm 0.11$  激波作用下 12 mm 厚的石油醚液膜的高速摄影图像<sup>[8]</sup>

Fig. 3 High speed photographic images of 12 mm-thick petroleum ether liquid film under shock wave with  $Ma = 1.62 \pm 0.11$ <sup>[8]</sup>

以及激波的作用下呈现出变粗、变长的趋势;在 2 ms 时,液柱下方均出现了明显的丝状分散痕迹,并带有明显的液丝,在液柱两侧也出现了明显的尖钉现象,这些尖钉破碎成球形液滴并变为水平方向的云雾扩散。4 ~ 8 ms 阶段内,液柱的形状已无明显变化,已破碎的液膜在激波作用下再次分散,在这个过程中会形成更多的丝状云雾,并且由液膜下方逐渐发展到液膜上方。这些丝状云雾会随着激波作用时间的延长而逐渐消失。这些丝状云雾应该是 IPN 部分气化时的残留效应,但随着激波的不断作用,其最终完全气化,这与有关石油醚<sup>[8]</sup>研究结果类似,如图 3 所示。石油醚液膜在分散初期也会出现明显的尖钉效应,在分散后期也会出现液丝;并且,随着液膜厚度的增加,液膜整体变形明显变慢,丝状云雾的量随之增加,且持续时间更长,分散效果变差。

对高速摄影图像进行处理,得到了不同时间的竖直方向云雾高度  $h$ 、水平方向云雾宽度  $l$ 、竖直方向高度变化  $\Delta h_1$  和水平方向宽度变化率  $\Delta l_2$ ,如图 4 所示。令  $\delta = \Delta h_1 / \Delta l_2$ ,  $\delta$  随时间的变化情况如图 5 所示。

云雾抛撒过程可分为 3 个阶段,分别是加速运动阶段、减速运动阶段和湍流运动阶段<sup>[13]</sup>。将 8、12、16 mm 以及 20 mm 的液膜运动图像进行比较,并结合图 4 可发现:在 1 ms 的时间内,水平、竖直方向均出现明显的云雾抛洒,可以认为在水平和竖直方向上均出现了分散现象。在运动初期,  $\Delta l_2$  要明显大于  $\Delta h_1$ ,液膜呈现水平方向快速分散的现象。但随着激波作用时间的增加,  $\Delta l_2$  会逐渐减小,  $\Delta h_1$  逐渐增大,由此可以发现,水平方向先进入到减速运

动阶段。

液滴与激波碰撞后,液滴的抛撒是一个多阶段的渐进过程<sup>[14]</sup>。分析图 4 ~ 图 5 可以发现,  $\Delta h_1$ 、 $\Delta l_2$  以及  $\delta$  均存在多个峰值与谷值。对照图 2 可知,此时会有丝状云雾的出现;并随着峰、谷的不断出现,会有更细小的丝状云雾的出现。此时发生了液滴的再次分散现象,最外侧的液滴在激波作用下不断被分散,最终变成混合气体。 $\delta$  由 0 开始,逐渐增大;随着液膜厚度增大,  $\delta = 1$  所需的时间增长,即  $\Delta h_1 = \Delta l_2$  时所需的时间增长。

液膜的竖直及水平方向的变化距离均与液膜厚度负相关、与激波强度正相关。对云雾高度  $h$  以及宽度  $l$  与时间  $t$  的关系进行拟合,所得关系式分别如表 1 ~ 表 2 所示。

由表 1 ~ 表 2 发现,在 4 种液膜厚度的情况下,竖直方向与水平方向的液膜运动距离与时间呈 4 次方关系,并且  $R^2$  均大于 0.98,这说明拟合关系式相关性较佳。水平方向上,8 mm 及 12 mm 液膜厚度时,  $l$  与  $t^4$  有很好的相关性;当液膜厚度增加到 16 mm 及以上时,  $l$  与  $t^4$  相关性变差。在  $h$ 、 $l$  与  $t$  的关系式中,当液膜厚度为 8 mm 时,  $t^4$  系数最大;液膜厚度为 20 mm 时,  $t^4$  系数最小;当液膜厚度为 12 mm 和 16 mm 时,  $t^4$  系数接近。总体来看,  $t^4$  系数在液膜厚度从 8 mm 到 12 mm 以及大于 16 mm 时呈现出快速下降的趋势,在 12 mm 到 16 mm 之间变化不大。

2.2 入射激波与反射激波的变化分析

所选用的测试系统中共设有 8 个压力传感器。以传感器 P4 为例,研究入射激波以及与液膜接触后的反射激波的压力变化。对压力数据进行处理后得



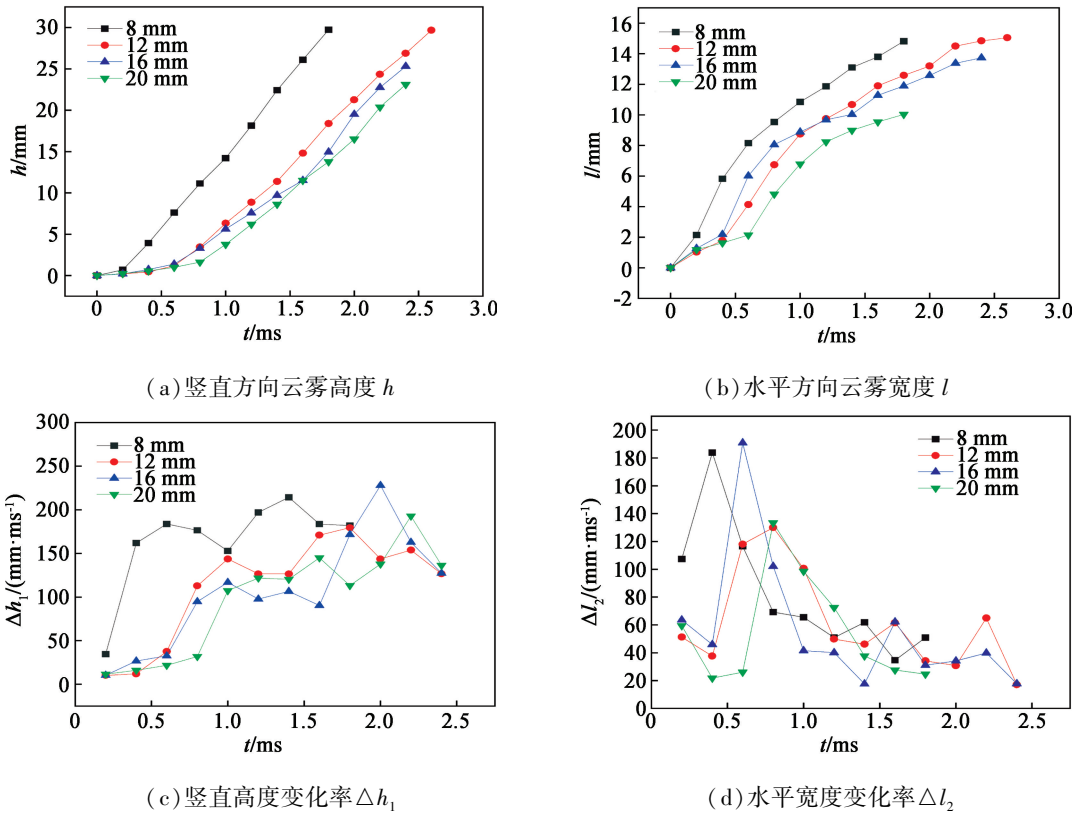


图 4 高速摄影图像得到的各参数随时间的变化曲线

Fig. 4 Changes of parameters obtained from high speed photographic images with time

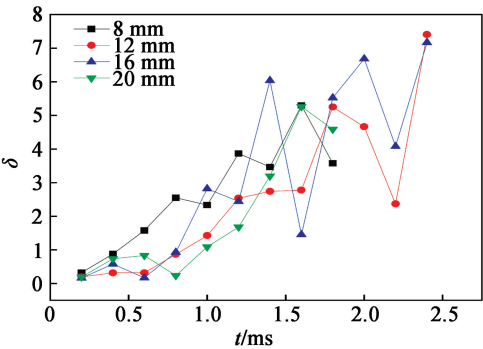


图 5  $\delta$  随时间的变化曲线

Fig. 5 Changes of  $\delta$  with time

表 1 云雾高度  $h$  与时间  $t$  的拟合式

Tab. 1 Fitting formulas between cloud height  $h$  and time  $t$

$H/\text{mm}$	拟合式	$R^2_h$
8	$h = 2.836\ 7t^4 - 13.054\ 0t^3 + 21.698\ 0t^2 + 3.410\ 2t - 0.220\ 2$	0.999 0
12	$h = 0.147\ 3t^4 - 3.026\ 1t^3 + 12.831\ 0t^2 - 4.183\ 8t + 0.179\ 6$	0.999 4
16	$h = -0.299\ 3t^4 + 0.831\ 9t^3 + 3.944\ 6t^2 + 0.626\ 2t - 0.090\ 2$	0.996 9
20	$h = -1.051\ 6t^4 + 3.552\ 3t^3 + 1.599\ 9t^2 - 0.415\ 4t + 0.087\ 2$	0.998 2

表 2 云雾宽度  $l$  与时间  $t$  的拟合式

Tab. 2 Fitting formulas between cloud width  $l$  and time  $t$

$H/\text{mm}$	拟合式	$R^2_l$
8	$l = 1.923\ 3t^4 - 5.137\ 7t^3 - 0.817\ 0t^2 + 15.292\ 0t - 0.217\ 3$	0.996 3
12	$l = 1.180\ 8t^4 - 6.596\ 0t^3 + 10.096\ 0t^2 + 3.556\ 8t - 0.158\ 8$	0.994 3
16	$l = 1.306\ 6t^4 - 5.746\ 9t^3 + 5.414\ 7t^2 + 8.037\ 6t - 0.337\ 6$	0.985 3
20	$l = 0.371\ 5t^4 - 5.371\ 5t^3 + 11.774\ 0t^2 - 0.622\ 1t + 0.264\ 4$	0.988 1

到表 3。表 3 中： $p_4$  为入射激波压力； $p'_4$  为反射激波压力； $\Delta p$  为超压； $\varepsilon$  为超压比， $\varepsilon = \Delta p/p_4$ 。

由表 3 可知：当激波强度为  $Ma = 1.44 \pm 0.04$  时， $\varepsilon \approx 2$ ；当激波强度为  $Ma = 1.62 \pm 0.11$  时， $\varepsilon \approx 3$ ；激波强度增大，超压比  $\varepsilon$  增大。张晓娜等<sup>[15]</sup> 对燃料抛撒的分散过程进行了研究，提出入射激波、反射激波等相互作用对云雾状态造成影响。且当激波以传感器作用于普通密度物质时，激波在作用面会发生大量的透射、反射和绕射，初始激波的形态和强度会发生较大的变化<sup>[16]</sup>。对此现象，考虑是由于入射激

表 3 传感器 P4 测得的入射激波压力与  
反射激波压力

Tab. 3 Incident shock pressure and reflected shock pressure measured by Sensor P4					
$H/\text{mm}$	$Ma$	$p_4/\text{kPa}$	$p'_4/\text{kPa}$	$\Delta p/\text{kPa}$	$\varepsilon$
8	$1.44 \pm 0.04$	149	464	315	2.1
	$1.53 \pm 0.08$	166	562	397	2.4
	$1.62 \pm 0.11$	200	725	525	2.6
12	$1.44 \pm 0.04$	146	440	294	2.0
	$1.53 \pm 0.08$	171	533	363	2.1
	$1.62 \pm 0.11$	208	774	565	2.7
16	$1.44 \pm 0.04$	150	462	312	2.1
	$1.53 \pm 0.08$	176	596	420	2.4
	$1.62 \pm 0.11$	209	799	590	2.8
20	$1.44 \pm 0.04$	148	476	328	2.2
	$1.53 \pm 0.08$	178	569	391	2.2
	$1.62 \pm 0.11$	203	814	611	3.0

波强度的不足所导致,激波与液膜接触后,发生透射、投射和反射,激波强度发生衰减,无法为液膜分散提供足够能量。当激波强度较低时, $\varepsilon$  会在一个范围附近波动;当激波强度较高时,激波衰减后仍能提供足够的能量, $\varepsilon$  更大。分析认为,激波强度在超过  $Ma = 1.53 \pm 0.08$  之后, $\varepsilon$  会逐渐有随着  $H$  变化发生线性变化的趋势。当激波强度为  $Ma = 1.62 \pm 0.11$  时, $\Delta p$  会随着  $H$  的改变呈现线性变化; $\varepsilon_{\min} \approx 2.6, \varepsilon_{\max} \approx 3.0, \varepsilon$  会随着  $H$  的增加而增大。

石油醚是云爆武器的另一种典型燃料。有关石油醚<sup>[8]</sup>研究表明,4~16 mm 厚的石油醚液膜的反射超压为 654.7 kPa。在激波强度相同的情况下,IPN 的超压要明显小于石油醚,说明相同条件下,激波作用在 IPN 液膜后能量衰减更多。这表明,同等条件下,IPN 液膜分散过程所需的能量更大。

2.3 液体云雾超压的研究

通过位于液膜上方的间距为 10 cm 的压力传感器测量液膜分散形成的云雾的压力变化,对压力数据进行处理得到表 4。表 4 中, $p_5 \sim p_8$  分别为对应传感器 P5~P8 测得的压力。

由于传感器 P5 与法兰直接接触,会因设备振动等原因产生一定误差,对此在讨论时忽略传感器 P5 的值,分析其他 3 个传感器(P6、P7、P8)的压力变化情况。当以传感器与液膜的距离为变量进行研究时发现,云雾形成的压力与传感器距液膜的距离呈负相关;以激波马赫数为变量研究时发现,云雾形成的压力与激波马赫数呈正相关。

表 4 传感器 P5~P8 测得的压力  
Tab. 4 Pressure measured by Sensor P5-Sensor P8

$H/\text{mm}$	$Ma$	$p_5/\text{kPa}$	$p_6/\text{kPa}$	$p_7/\text{kPa}$	$p_8/\text{kPa}$
8	$1.44 \pm 0.04$	7.7	6.4	2.4	1.1
	$1.53 \pm 0.08$	9.4	7.7	2.6	1.3
	$1.62 \pm 0.11$	9.9	10.3	3.8	1.9
12	$1.44 \pm 0.04$	5.5	6.8	2.4	0.7
	$1.53 \pm 0.08$	8.1	6.8	2.2	0.7
	$1.62 \pm 0.11$	9.0	9.4	3.1	0.5
16	$1.44 \pm 0.04$	6.8	6.4	2.9	1.1
	$1.53 \pm 0.08$	6.4	7.7	3.1	1.5
	$1.62 \pm 0.11$	9.0	8.6	4.0	2.4
20	$1.44 \pm 0.04$	6.0	6.8	1.7	1.5
	$1.53 \pm 0.08$	9.0	9.4	2.6	1.1
	$1.62 \pm 0.11$	9.4	10.7	4.1	1.9

8 mm 液膜产生的压力仅次于 20 mm 液膜产生的压力;12 mm 的液膜所产生的压力均较小。由于压力传感器所测数据是云雾压力的最大值,考虑此现象是因为液膜厚度及激波强度两种因素共同影响导致的。结合图 4 发现,在相同时间间隔内, $h$  以及  $l$  均与  $H$  负相关。理论上,此时云雾压力应与液膜厚度正相关,但仍需考虑激波强度带来的影响。

$\delta$  可以作为分散程度的判据。单位时间内, $\delta$  越大,表示液膜分散得越快。通过图 5 可以得到,激波强度为  $Ma = 1.53 \pm 0.08$  时, $\delta_8 > \delta_{20} > \delta_{16} > \delta_{12}$ 。故 8 mm 液膜分散得最快,20 mm 液膜次之。在 8~20 mm 液膜厚度的范围内,8 mm 厚的液膜主要是受激波强度的影响,分散得更彻底,分散效果更好。20 mm 液膜的分散过程主要是受液膜厚度的影响,随着液膜厚度的增加,透射激波强度减小,反射激波强度增大,液滴的二次破碎情况减弱。液滴粒径增大<sup>[17]</sup>,液膜分散效果变差,分散程度逐渐减弱。激波能量主要用于一次分散雾化过程,故而距液膜 10 cm 处形成的分散云雾仍具有较大的压力。但由于初次分散雾化产生的液滴体积及速度均较大,方向不定,粒子间相互碰撞而使其能量降低,致使距液膜 20 cm 处的云雾压力与 16 mm 液膜相比下降更多。因此,随着液膜厚度的增加,激波强度的影响逐渐降低,液膜厚度的影响逐渐增高。当液膜厚度为 12 mm 时, $\delta$  最小,说明其分散的过程最慢、效果最差。基于此现象以及表 1~表 2 有关内容认为:IPN 液膜厚度  $H = 12$  mm 时,激波强度及液膜厚度的影响均最小,液膜分散效果最差; $H < 12$  mm 时,液膜的变化过程主要受激波强度影响; $H > 12$  mm 时,液膜的

变化过程主要受液膜厚度影响。

### 3 结论

1) IPN 液膜在激波作用下水平与竖直方向上均发生分散。初始阶段,以水平方向的分散为主;随后,以竖直方向的分散为主。水平方向,液膜抛洒先进入减速阶段,随着液膜厚度的增加,液膜分散效果变差,分散时间变长,其分散表征与石油醚相似。

2) IPN 液膜分散所需能量要高于石油醚,在  $Ma$  为  $1.53 \pm 0.08$  与  $1.62 \pm 0.11$  之间存在一个激波强度,在这个激波强度下,超压比  $\varepsilon$  随液膜厚度  $H$  呈线性变化的趋势,可以为液膜分散提供足够的能量。

3) IPN 液膜分散过程中,  $H = 12$  mm 时,液膜分散过程的主要影响因素发生变化。 $H < 12$  mm 时,液膜的变化过程主要受激波强度影响; $H > 12$  mm 时,液膜的变化过程主要受液膜厚度影响。

### 参 考 文 献

- [1] THEOFANOUS T G. Aerobreakup of newtonian and viscoelastic liquids [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2011, 43: 661-690.
- [2] LOWE A, KOURMATZIS A, MASRI A R. Turbulent spray flames of intermediate density: stability and near-field structure [J]. Combustion and Flame, 2017, 176: 511-520.
- [3] GOUNDER J D, KOURMATZIS A, MASRI A R. Turbulent piloted dilute spray flames: flow fields and droplet dynamics [J]. Combustion and Flame, 2012, 159(11): 3372-3397.
- [4] XIAO F, WANG Z G, SUN M B, et al. Simulation of drop deformation and breakup in supersonic flow [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(2): 2417-2424.
- [5] LIANG C, FEIGL K A, TANNER F X. Axisymmetric simulations of drop deformation and breakup for validation of a modified Taylor analogy breakup model [J]. Atomization and Sprays, 2017, 27(5): 439-455.
- [6] 宋述忠, 彭金华, 陈网桦, 等. 硝酸异丙酯与空气混合物的爆轰性能研究[J]. 爆破器材, 2002, 31(1): 4-6.
- [7] SONG S Z, PENG J H, CHEN W H, et al. Study on ignition and detonation properties of nitric ether-air mixture [J]. Explosive Materials, 2002, 31(1): 4-6.
- [8] 李易昭. 云爆弹云雾生长规律及浓度测试方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016: 1-3.
- [9] 徐启明. 激波与燃料相互作用实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021: 31-39.
- [10] XU Q M. Experimental study on the interaction between shock wave and fuel [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021: 31-39.
- [11] 丁珏. 液体的爆炸抛撒理论模型及全过程数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2001: 134.
- [12] 彭旭, 李斌, 王顺尧, 等. 激波冲击作用下液膜破碎的气液两相流[J]. 物理学报, 2020, 69(24): 244702.
- [13] PENG X, LI B, WANG S Y, et al. Gas-liquid two-phase flow of liquid film breaking process under shock wave [J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(24): 244702.
- [14] 唐维军, 沈隆钧, 张景琳. 流体力学界面不稳定性研究[G]//《中国工程物理研究院科技年报》编辑部. 中国工程物理研究院科技年报(2000). 绵阳:《中国工程物理研究院科技年报》编辑部, 2000: 380.
- [15] 石艺娜, 秦承森. 液体“尖钉”拉伸破碎的射流不稳定性分析[C]//中国力学学会. 中国力学学会学术大会 2007 论文摘要集(下). 北京: 中国力学学会, 2007.
- [16] CHEN C J, MA X, MA J Q. Study on concentration and turbulence of solid-liquid FAE in dispersal process [J]. Defence Technology, 2018, 14(6): 657-660.
- [17] 吴德义. 爆炸冲击波作用下液体抛撒不同阶段运动规律分析[J]. 爆破器材, 2005, 34(2): 4-7.
- [18] WU D Y. Study on specialty of liquid dispersal with blast [J]. Explosive Materials, 2005, 34(2): 4-7.
- [19] 张晓娜, 岳树元, 章利特, 等. 激波驱动的气固两相流力学特性研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2008, 23(5): 538-545.
- [20] ZHANG X N, YUE S Y, ZHANG L T, et al. Study of the mechanics of gas-solid two-phase flow driven by shock waves [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics A, 2008, 23(5): 538-545.
- [21] 李斌. 激波驱动下液体与固体颗粒的抛撒研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012: 14-18.
- [22] LI B. Experimental study on the dispersion of liquid and solid particles induced by shock wave [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012: 14-18.
- [23] 王海洋, 解立峰, 李斌, 等. 激波抛撒水膜成雾参数实验研究[J]. 实验流体力学, 2013, 27(2): 50-55.
- [24] WANG H Y, XIE L F, LI B, et al. Experimental study on parameters of water particles in the cloud from liquid film induced by shock wave [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2013, 27(2): 50-55.