

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2021.04.008

激波诱导油液柱变形、破碎及其雾化过程研究

黄 勇^{1,2}, 赵庆贤², 刘龙飞³, 解立峰¹, 陈 群⁴

(1. 南京理工大学 化学与化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164; 3. 常熟理工学院 材料工程学院, 江苏 常熟 215500; 4. 常州大学 石油化工学院, 江苏 常州 213164)

摘要:为进一步了解柴油爆炸抛撒云雾形成过程以及爆炸性能,开展了激波作用-10#柴油液柱实验。采用阴影成像技术记录油柱的变形、破碎行为和雾化过程,建立了油柱变形与破碎模型,并根据无量纲参数公式计算了油柱破碎模式,分析了激波作用后油柱变形和破碎雾化的特征。结果表明:激波遇到油柱会发生绕射现象,激波诱导的高速气流将继续作用油柱,油柱继而发生弓箭形变形并最终导致其破碎、雾化。柴油柱在153 μs 时完成变形发生爆炸破碎,形成大量雾滴颗粒。雾滴在气动力、空气阻力等作用下继续运动形成云雾团,激波波速越大,油柱破碎越剧烈,雾化粒径也越小。

关键词:柴油柱;激波;破碎;雾化

中图分类号:X 932

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2021)04-0055-08

Study of Deformation, Breakup and Atomization of Diesel Fuel Column by Shock Wave

HUANG Yong^{1,2}, ZHAO Qingxian², LIU Longfei³, XIE Lifeng¹, CHEN Qun⁴

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. School of Environmental & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 3. School of Materials Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China; 4. School of Petrochemical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: In order to further understand the formation process of diesel fuel explosion and dispersion cloud, the experiments of -10# diesel fuel column by shock wave were carried out. The deformation, breakup behavior and atomization process of diesel fuel column were recorded by shadow imaging

收稿日期:2021-01-02。

基金项目:江苏省安全生产重特重大事故防治关键技术科技项目(jiangsu-0014-2017AQ);江苏省博士后科研资助项目(1701150B)。

作者简介:黄勇(1978—),男,江苏南京人,博士,高级工程师。E-mail: huangyong001@cczu.edu.cn

引用本文:黄勇,赵庆贤,刘龙飞,等.激波诱导油液柱变形、破碎及其雾化过程研究[J].常州大学学报(自然科学版),2021,33(4):55-62.

technology. A comprehensive model of the deformation and breakup of diesel fuel column was developed. The breakup mode of diesel fuel column was calculated according to the dimensionless parameter formula, and the characteristics of the deformation, breakup and atomization of diesel fuel column by shock wave are analyzed. It is shown that the shock wave will be diffracted when encountering diesel fuel column. The high-speed air flow induced by shock wave continues to act on diesel fuel column, then diesel fuel column undergoes bow shaped deformation and eventually leads to its breakup and atomization. At $153\ \mu\text{s}$, a large number of droplet particles are formed. Under the action of aerodynamic force and air resistance, the droplets continue to move to form cloud clusters. The larger the shock wave velocity is, the stronger the breakup of diesel fuel column is, and the smaller the atomized particle size is.

Key words: diesel fuel column; shock wave; breakup; atomization

液体燃料的抛撒、破碎和雾化效果是决定其爆炸后果的重要因素,通过研究其破碎和雾化情况可以掌握液体燃料爆炸性能和机理,因此国内外很多专家学者对液体燃料的抛撒、破碎和雾化过程进行了深入研究。

液体抛撒爆炸破碎可以分为首次破碎和二次破碎两个阶段^[1]。首次破碎是在被抛撒液体刚开始破碎的阶段发生,指由于气体动力作用而在连续相液体表面产生扰动、变形,导致大块的液体最后破裂成较小的带形、丝状等不规则液体单元,液体单元的尺寸通常在毫米或厘米量级。液体的二次破碎是指从首次破碎中产生的液滴颗粒在气动力作用下减速、变形和破碎的过程,通常表现为首次破碎后产生的不规则形状的液体颗粒在气动力作用下破碎为更小尺寸的细小雾滴^[2]。

不像首次破碎受到湍流扰动、不稳定性的发展或气动阻力的作用,影响二次破碎的因素并不多。HINZE^[3]指出二次破碎的破碎形式与 Weber 数(We)、Ohnesorge 数(Oh)两个无量纲量有关。 We 指液滴所受气动阻力和表面张力之比, Oh 表示液滴的黏性力和表面张力之比。HSIANG 等^[4-7]通过大量实验研究了液滴的变形和二次破碎过程,提出液体在 $Oh < 0.01$ 时破碎模式随 We 的增加而变化,主要有振荡变形、袋形破碎、多模式破碎和剥落破碎等,这与 HINZE 等^[3]提出的破碎模式相似。耿继辉等^[8]开展了激波诱导液滴变形和破碎的实验,详细分析了激波与液滴相互作用以及液滴加速、变形和破碎过程,研究发现初始液滴形状对变形和破碎过程有很大的影响,并且在低 We 数条件下,液滴变形到最大的时间将增大。吴德义^[9]研究了在爆炸冲击波作用下液体的密度、表面张力等对液体二次破碎的影响,研究表明液体密度较小,其抛撒初速度增大;液体表面张力较低,液体二次破碎加剧,雾化程度加强。

在液滴研究的基础上,一些学者对激波及高速气流作用较大体积、不同自由形状的液柱、液膜、液体环等进行了研究。例如,DOMBROWSKI 等^[10]在 1963 年提出了液膜解体的物理机理,他们认为液膜的破碎解体主要是由液膜表面增长的长波引起的;HESPEL 等^[11]通过简化气流速度等实验条件的方法研究了液膜、液片的雾化情况,并分别运用高速摄像技术和图像分析技术得到了液膜等破碎解体以及颗粒度情况,他们认为液层的厚度对雾化质量有重要影响。蔡庆军等^[12]对轴对称液体环抛撒过程进行了细致研究,不仅自主设计了轴对称液体抛撒实验装置,还对轴对称液体环的形成、变形和破碎等过程和物理机制进行了分析和研究。

本文开展激波作用—10#柴油液柱实验,采用阴影成像技术记录油柱的变形、破碎行为和雾化过程,建立了油柱变形与破碎模型,分析了激波作用后油柱变形和破碎雾化的特征,为进一步开展其爆炸抛撒云雾形成过程及其爆炸性能和机理研究提供了科学依据。

1 实验介绍

1.1 样 品

实验样品为-10#柴油,其理化性能见表 1。

表 1 柴油样品理化性能

Table 1 Chemical properties of diesel fuel sample

样品	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	运动黏度/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	黏度系数/($\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$)	表面张力/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)
-10#柴油	794.1	3.934×10^{-6}	3.124×10^{-3}	3.164×10^{-4}

1.2 实验装置和测试仪器

1.2.1 实验装置

实验装置主要有水平激波管、油杯、出油管、高压空气瓶、膜片等,如图 1 所示。由于柴油燃料表面张力较小,在自由下落情况容易发生变形,很难实现规则的球状或柱状,因此实验中上、下两根不锈钢出油管之间留有 3 mm 高的空隙形成形状规则的油柱,出油管上管的内径为 3 mm,下管的内径为 5 mm,油柱底面直径与高相等。

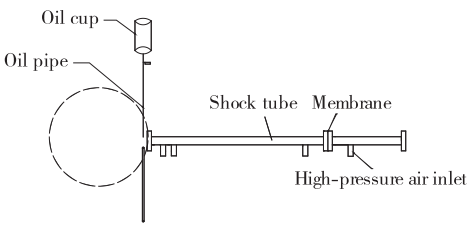


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic of experimental device

水平激波管为长 1 000 mm 的圆管,内径为 32 mm,中后部有一个法兰和气体接口。油杯及其连接的出油管竖直固定在激波管口部前方 15 mm 处。

高压空气瓶的作用是向激波管提供高压驱动空气。当高压气体入口处的电磁阀打开后,高压空气急速进入激波管中使法兰夹固的膜片瞬间破裂产生空气激波。空气激波以超声速率先运动至水平激波管管口,而激波之后的气流以亚声速向出口方向运动。

1.2.2 测试系统

1) 压力测试系统

压力测试系统包括 PCB 公司的 113B21 系列的压电式压力传感器、482A20 型多通道信号调理器、四通道数据采集卡及配套的连接线。

压力传感器 P_1 、 P_2 安装在离激波管出口 6,3 cm 处的管壁上,且传感器受压面与激波管壁相齐平。压力传感器不仅可以测定激波及其高速气流的压力,而且可以根据激波通过两个传感器的时间差计算其速度。由此计算得到本实验激波运动至管口速度的马赫数 M_s 为 1.75。激波诱导的高速气流的速度 u_g 和密度 ρ_g 可根据激波基本关系式计算:

$$u_g = \frac{2a_0(M_s - 1/M_s)}{k_g + 1} \tag{1}$$

$$\rho_g = \rho_0 \frac{k_g + 1}{2} \left[\frac{M_s^2}{1 + \frac{k_g - 1}{2} M_s^2} \right] \tag{2}$$

式中: a_0 为常态下的声速; k_g 为气体的绝热指数; ρ_0 为标准状态下空气密度。

由式(1)、式(2)可得 $u_g = 333.93 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\rho_g = 2.746 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

2) 成像系统

成像系统的作用是将激波作用油柱过程及其油柱变形、破碎和雾化等情况反映和记录出来。

成像系统由水平激波管、压力传感器、信号调理器、时序控制器、光源控制器、高压闪光电源、凹面反

射镜和单反照相机等组成,如图 2 所示。采用的实验光源为自制的高压放电火花光源,最高电压可达到 10 000 V;光源控制器为 EL-1 型,可控制光源最小持续时间为 $1\ \mu\text{s}$;时序控制器为合肥天焱科技有限限制的 MF-8C 型控制器,延迟时间控制范围为 $1\sim 10\ 000\ \mu\text{s}$;凹面反射镜的直径为 50 cm。实验时提前启动单反相机“Bulb”开关,当瞬间光源经视场中凹面反射镜反射后被单反照相机接收,获得激波作用油柱及其油柱变形、破碎等瞬间过程。

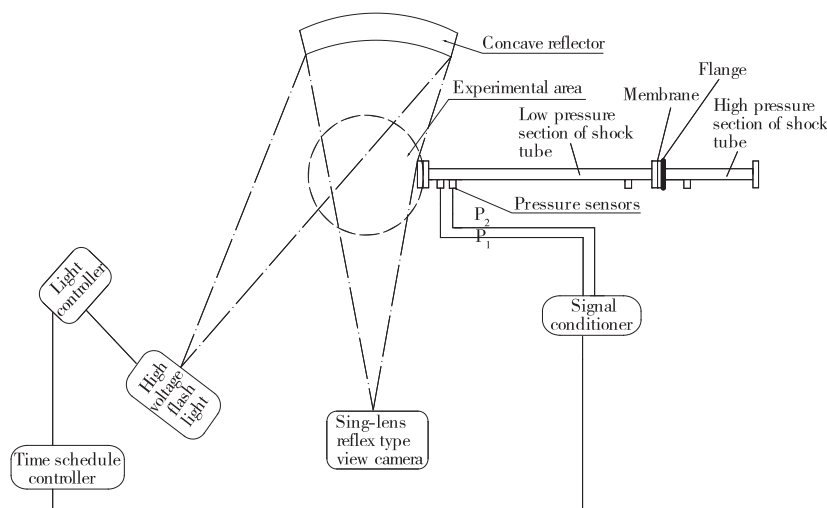


图 2 成像系统俯视图示意图

Fig.2 Vertical schematic of imaging system

1.3 实验方法

首先设置好高压空气瓶的输出压力和激波成像系统,再将实验样品倒入油杯中使其竖直从出油管中连续流动,最后开启高压气体入口处的电磁阀,高压气体瞬间破膜产生激波作用油柱,同时成像系统记录下该时刻的激波作用油柱情况。

2 实验结果与分析

激波在前进中,遇到一些柱、球等几何体时会发生绕射现象,而对于薄物体,则可以认为这时产生的扰动是对原平面激波的微扰^[13]。图 3 是激波作用柴油柱的照片,图 3 显示,该时刻激波已绕射至油柱左侧,而高速气流则刚运动到管口,此时油柱未发生明显变形,因此可以确定激波发生了绕射现象。但是在超声速条件下,激波作用到油柱时会在油柱表面形成不均匀的压力分布,后面的高速气流继续作用油柱,压力分布发生变化,油柱继而发生变形并最终导致其破碎、雾化。

激波及诱导的高速气流与油柱的相互作用其实是两种不相混流体之间的交界面上形成的扰动是否发展的问题。高速气流运动伴随着较高的加速度,因而出现与加速度反向的惯性力,只要有物质界面存在,就会有 Rayleigh-Taylor(R-T)不稳定性。对于柱状液体,高速气流作用时还会存在切向速度的差异,也会形成 Kelvin-Helmholtz(K-H)不稳定性。因此,作用在油柱表面的不稳定扰动波发展到一定

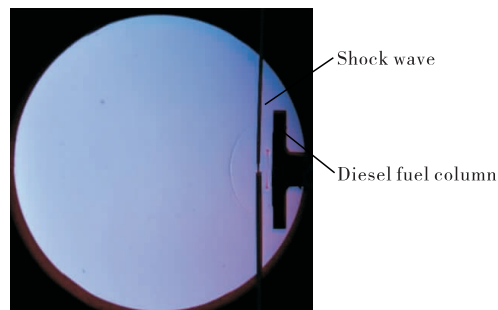


图 3 激波作用油柱情况

Fig.3 Shock wave acting diesel fuel column

程度将导致油柱变形和破碎。

2.1 变形行为

柴油密度远大于空气,是重流体,而激波诱导的高速气流为轻流体,加速度方向指向轴心,因此必然出现 R-T 不稳定性现象。当气动力作用油柱的时候,气流在油柱表面形成不均匀的压力分布,油柱沿气流方向被压缩,沿垂直气流的方向被拉伸。水平方向上,上下管口的油液因为黏性力的作用阻碍与它贴近的油柱液层沿气流方向运动,这样的黏性力作用随着时间从上、下液层向油柱中心层传递,由于油柱中心部分总是先于油柱上下两端液层发生速度和位移,而越往中心处其液层与贴近的上下两层液层在垂直方向的相对速度越小,根据剪切力公式可知黏性阻力越小,沿气流运动方向加速度越大,油柱呈弓箭形变形,并伴有液体发生剥离。图 4 是典型时刻激波及高速气流作用下的油柱变形情况。

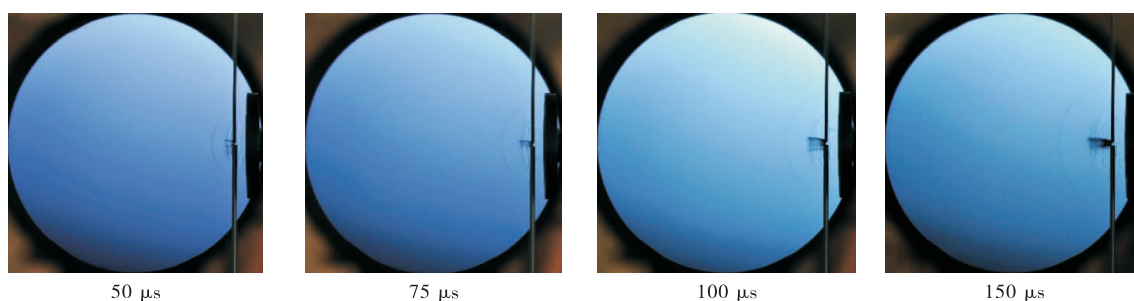


图 4 典型时刻激波作用油柱变形情况

Fig.4 Deformation of diesel fuel column by shock wave at typical time

取上下出油管空隙间形成的柴油柱为研究对象,建立油柱在激波作用下的运动方程。考虑背风面可能出现的负压,油柱迎风面的滞止压强取 $\frac{\rho_g (u_g - u_1)^2}{2}$, u_1 为油柱运动速度,下标 l 代表油液,下标 g 代表气体。滞止压强对油柱迎风端面形成的压力大小为滞止压强乘以迎风面在来风方向的投影面积,该压力使油柱具有运动趋势。表面张力阻碍油柱变形,从而产生阻碍油柱运动的力,油柱迎风面和背风面的总阻力为 $4r(\pi+1)\sigma$, σ 为油液表面张力, r 为油柱的底面半径。油柱上下底面还受到出油管内油液对其的水平剪切力,假设油柱受到水平方向同高并与气体速率大小一致的连续柴油流体作用,即可运用圆管均匀流沿程水头损失与剪切力的关系,得到油柱受到的水平剪切力为

$$\tau = \rho_l g \frac{H}{2} h_f \quad (3)$$

式中: τ 为油柱上下底面受到的水平剪切力之和; g 为重力加速度; H 为油柱的高度, $H = 2r$; h_f 为单位长度沿程阻力损失,为

$$h_f = \lambda \frac{1}{H} \frac{u_g^2}{2g} \quad (4)$$

式中 λ 为沿程摩阻系数,计算公式为

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2lg \frac{Re_l \sqrt{\lambda}}{2.51} \quad (5)$$

式中 Re_l 为连续柴油流体的雷诺数。

根据牛顿第二定律,得到油柱运动方程为

$$\frac{du_1}{dt} = \frac{1}{\rho_l \pi \cdot r} \left[\rho_g u^2 - \frac{2(\pi+1)\sigma}{r} - \frac{\rho_l g h_f}{2r} \right] \quad (6)$$

式中 $u = u_g - u_l$ 为气体与油柱的相对速度。对该式分别进行一次、二次积分可得油柱的瞬时速度和瞬时位移。

2.2 破碎模式

由于油柱的直径与高相等,因此这里可以将油柱近似为球状油滴,其变形和破碎的程度取决于作用在液滴上的气动阻力和形成液滴的液体的表面张力之间的比值,即 Weber 数(We 数)表示。其定义为

$$We = \frac{\rho_g u^2}{\sigma/d_l} = \frac{\rho_g d_l u^2}{\sigma} \quad (7)$$

式中 d_l 为液滴的直径。

Ohnesorge 数(Oh 数)是黏性力与液滴表面张力的比值,它代表了液滴黏性的影响,其计算公式为

$$Oh = \frac{\mu_l}{(\rho_l d_l \sigma)^{0.5}} \quad (8)$$

式中 μ_l 为液滴的动力黏性系数。

将液体连续相在发生首次破碎后产生的液体颗粒进入气流到二次破碎开始的时间无量纲化,得到无量纲的特征破碎时间 t^* [14]

$$t^* = \frac{d_l}{u (\rho_g/\rho_l)^{0.5}} \quad (9)$$

在 Oh 比较低的条件下,随 We 的增加,当 $We \leq 12$, $12 < We \leq 50$, $50 < We \leq 100$, $100 < We \leq 350$, $We \geq 350$ 时,液滴依次出现振荡变形破碎、袋形变形破碎、棒形破碎、剥离破碎、爆炸破碎等模式。

由无量纲参数式(7)、式(8)、式(9)可以计算出近似油滴的 We , Oh 和 t^* ,结果见表 2,近似油滴与气流的相对速度 u 约为激波诱导气流的速度,空气密度取激波诱导气流的密度。

由表 2 可知, Oh 较小, We 远大于 350,近似油滴在气动力直接作用下将发生爆炸破碎,破碎成微小的颗粒,这与图 4 的实验现象是吻合的,当近似油滴在上、下出油管间发生弓箭形变形的时候,微小颗粒在油滴黏性边界层周围开始剥离,150 μs 左右时油滴基本完成变形发生爆炸破碎,形成大量雾滴颗粒。

表 2 近似油滴的无量纲参数

Table 2 Dimensionless parameters of approximate oil drop

样品	M_s	$u /$ ($m \cdot s^{-1}$)	We	Oh	$t^* /$ μs
-10# 柴油	1.75	333.93	29 033.286	0.011 4	153

2.3 雾化过程

油柱破碎后的雾滴在气动力、空气阻力等作用下继续运动,并形成较大面积的云雾团。图 5 为激波作用下油柱的雾化过程。

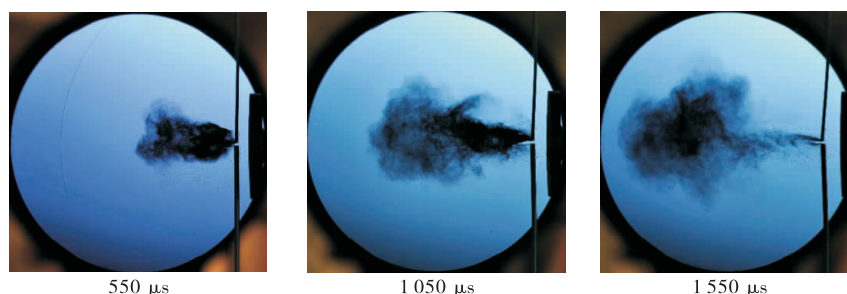


图 5 激波及高速气流作用下柴油柱的雾化过程

Fig.5 Atomization of diesel fuel column by shock wave and high speed airflow

由图5可以看出,油柱在 $550\text{ }\mu\text{s}$ 时属于抛撒过渡阶段,云雾团较小,细小雾滴在气动力作用下主要呈水平运动,并且出油管向下流动的油柱被气流持续作用成液滴跟随在云雾团前沿的雾滴后面; $1\,050\text{ }\mu\text{s}$ 时,雾滴已进入抛撒稳定阶段,只受惯性和空气阻力作用,做减速运动,此时细小雾滴后部持续的高速气流追赶上它,推动雾滴向周围运动,云雾团体积增大,但雾滴密度减小; $1\,550\text{ }\mu\text{s}$ 时,雾滴速度更小,云雾团体积变大,前沿近似呈球状。

又运用 Spraytec 型实时喷雾激光粒度分析仪测得了波速分别为 $1.75M_s$, $1.25M_s$ 的激波抛撒雾化油样的雾滴特征平均粒径,如图6所示,其中 $D_v(10)$, $D_v(50)$, $D_v(90)$ 的累积体积分数分别为 10%, 50%, 90% 时对应的雾滴粒径,即小于此粒径的雾滴体积分别占全部雾滴总体积的 10%, 50%, 90%。 $D_{[3,2]}$ 为表面积动量平均径,即索态尔(Stauter)平均直径。 $D_{[4,3]}$ 为体积或质量动量平均直径。

由图6可知,波速为 $1.75M_s$ 的激波作用下的雾滴5种特征平均粒径均明显小于 $1.25M_s$ 激波作用下的粒径,如 $1.25M_s$ 激波作用下的雾滴 $D_{[3,2]}$ 为 $569.8\text{ }\mu\text{m}$, $1.75M_s$ 激波作用下的雾滴 $D_{[3,2]}$ 为 $392.6\text{ }\mu\text{m}$, $D_{[3,2]}$ 越小,雾化质量越高。显然,激波波速越大,气动力越大, We 越大,破碎越剧烈,雾化粒径也越小。

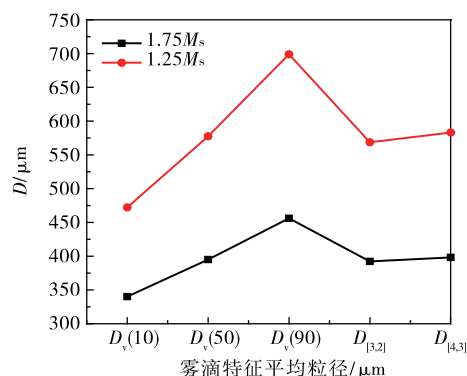


图6 雾滴特征平均粒径

Fig.6 Characteristic mean particle size of droplet

3 结 论

1) 激波前进中遇到油液柱会发生绕射现象,但是在油柱表面会形成不均匀的压力分布,激波诱导的高速气流继续作用油柱,压力分布发生变化,油柱继而发生变形并最终破碎、雾化。

2) 当气动力作用油柱的时候,油柱迎风面受到滞止压强作用,油柱沿气流方向被压缩,沿垂直气流的方向被拉伸,呈弓箭形变形,并伴有液体发生剥离。同时,表面张力以及出油管内油液对油柱的水平剪切力阻碍油柱沿气流方向运动。由此,可以得到油柱的运动方程。

3) 直径与高相等的油柱可近似为球状油滴,根据无量纲参数公式计算以及实验均得到在 $153\text{ }\mu\text{s}$ 左右时油滴完成变形发生爆炸破碎,形成大量雾滴颗粒。

4) 油柱破碎后的雾滴在气动力、空气阻力作用下继续运动形成云雾团。应用激光粒度分析仪测定了不同波速的激波作用油柱形成的云雾团的雾滴平均粒径,表明激波波速越大,油柱破碎越剧烈,雾化粒径也越小。

5) 液体燃料由于其自身的挥发性和易燃性,在激波强冲击作用下,极易发生快速雾化进而引起燃烧和爆轰。目前的研究主要关注于激波冲击下非反应性液滴的破碎和雾化,对于燃料液滴的雾化特性研究较少,因此研究柴油液滴的变形、破碎和雾化过程,对掌握它的爆炸特性和开发在强冲击载荷作用下抛撒而不发生云雾爆炸的安全燃料具有重要理论和技术指导作用。原总后勤部油料研究所在激波与燃料液滴相互作用过程中的流场混合机制认识基础上,成功开发出冲击作用下不易发生爆轰的阻爆柴油。

参考文献:

- [1] FAETH G M, HSIANG L P, WU P K. Structure and breakup properties of sprays[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1995, 21: 99-127.

- [2]杨磊. 轴向气流作用下液体轴对称抛撒的实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2005.
- [3]HINZE J O. Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes[J]. *AIChE Journal*, 1955, 1(3): 289-295.
- [4]HSIANG L P, FAETH G M. Drop deformation and breakup due to shock wave and steady disturbances[J]. *Journal of Multiphase Flow*, 1995, 21(4): 545-560.
- [5]HSIANG L P, FAETH G M. Near-limit drop deformation and secondary breakup[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1992, 18(5): 635-652.
- [6]CHOU W H, HSIANG L P, FAETH G M. Temporal properties of drop breakup in the shear breakup regime[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1997, 23(4): 651-669.
- [7]HSIANG L P, FAETH G M. Drop properties after secondary breakup[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1993, 19(5): 721-735.
- [8]耿继辉, 叶经方, 王健, 等. 激波诱导液滴变形和破碎现象实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2003, 24(5): 797-800.
- [9]吴德义. 爆炸冲击波作用下液体抛撒二次破碎的实验研究[J]. *中国公共安全(学术版)*, 2005, 8(2): 16-18.
- [10]DOMBROWSKI N, JOHNS W R. The aerodynamic instability and disintegration of viscous liquid sheets[J]. *Chemical Engineering Science*, 1963, 18(3): 203-214.
- [11]HESPEL J M, BRUNET Y, DYMENT A. Liquid sheet and film atomization; a comparative experimental study[J]. *Experiments in Fluids*, 1995, 19(6): 388-396.
- [12]蔡庆军, 韩肇元, 张寿齐. 轴对称液体环的形成、变形和破碎的研究[J]. *爆炸与冲击*, 1999, 19(1): 1-11.
- [13]王继海. 二维非常流和激波[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [14]PILCH M, ERDMAN C A. Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of a liquid drop[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1987, 13(6): 741-757.

(责任编辑:殷丽莉)