



基于激光粒度仪测量油品喷雾粒径的方法研究

雷 正¹, 鲁长波², 安高军², 熊春华², 解立峰¹

(1. 南京理工大学 化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 中国人民解放军总后勤部油料研究所, 北京 102300)

摘要: 为了测量油品喷雾过程的雾化性能, 通过对喷嘴雾化粒径的指标和雾化粒径测定方法的分析, 利用激光粒度仪及粒径发生装置设计喷嘴雾化实验系统, 并对实验系统的工作原理进行描述; 在不同喷雾压力下测定煤基柴油特征平均粒径 d_{v10} 、 d_{v50} 、 d_{v90} 、 $d_{[3,2]}$ 、 $d_{[4,3]}$ 数据。结果表明: 柴油雾化过程分为形成阶段、扩散阶段、稳定阶段; 喷雾压力越大, 雾滴特征平均粒径 d_{v10} 、 d_{v50} 、 d_{v90} 、 $d_{[3,2]}$ 、 $d_{[4,3]}$ 参数值越小, 雾化效果越好, 并且随着喷雾压力的增大, 液滴雾化粒径减小的趋势变缓。

关键词: 激光粒度仪; 油品; 喷雾粒径

中图分类号: TB302.1, X43

文献标志码: A

文章编号: 1008-5548(2015)01-0011-05

Methods Research on Oil Particle Size Based on Laser Particle Size Analyzer

LEI Zheng¹, LU Changbo², AN Gaojun²,
XIONG Chunhua², XIE Lifeng¹

(1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Oil Research Institute of General Logistics Department of PLA, Beijing 102300, China)

Abstract: In order to measure the oil atomization performance of spray process, the indicators of atomizing nozzle particle size and methods of measuring particle size were analyzed. A nozzle atomization experimental system was designed based on laser particle size analyzer and particle generating device, and the working principles of the experimental system were described. The characteristic sizes of atomized diesel drops, such as d_{v10} , d_{v50} , d_{v90} , $d_{[3,2]}$, $d_{[4,3]}$, were measured at different spray pressures. The results show that the atomization process of diesel is divided into formation phase, diffusion phase and stable phase. The greater the spray pressures are, the smaller the characteristic sizes of d_{v10} , d_{v50} , d_{v90} , $d_{[3,2]}$, $d_{[4,3]}$ of atomized diesel drops are, the better the atomization is. The trend of atomized diesel drops decreasing slows when the spray pressure increases.

Keywords: laser particle size analyzer; oil; size of atomized drop

随着石油燃料产品种类的增多, 对液体燃料进行表征的工作也越来越多^[1]。乳化液的液滴大小对液体

燃料稳定性和润滑、燃烧等性能有很大的影响, 特别是对油品气溶胶体系在发动机中工作燃烧影响较大的喷雾粒径分布的精确测定变得尤为重要。传统的粒度分析方法有筛分法、沉降法、显微镜法和电阻法等, 目前比较先进并且被广泛认同的测定方法是激光衍射法。激光衍射法测量粒径克服了传统粒度分析方法所带来的各种弊端, 具有使用范围广、操作简单、迅速准确、再现性较好等多种优点^[2-3]。

本文中基于激光粒度仪自主设计一套油品喷雾粒径测试系统, 通过粒径发生装置喷雾, 然后使用激光探测器对油品雾化粒径进行测试。系统可根据粒径发生装置喷雾后检测油品燃烧爆炸反应, 真正做到模拟和实际燃烧结合, 更好地探究油品喷雾燃烧爆炸效果, 得到深层次的燃烧爆炸机理。实验测定煤基柴油不同喷雾压力下的雾化粒径并对粒径分布进行分析。

1 仪器系统

1.1 构成

该装置系统主要包括粒径发生装置、控制系统和数据采集系统 3 大部分。其中粒径发生装置主要由不锈钢球体、进料罐以及配气系统构成, 最大工作压力为 4 MPa, 分辨率为 0.001 MPa, 最高工作温度为 80 ℃, 分辨率为 0.1 ℃, 配气方式为真空比例配气, 配气精度 0.1%。实验时进料罐预先充入高压空气, 随后高压气流携带液体燃料经分散喷嘴喷入球内形成高紊流度的液体雾滴。控制系统通过软件实现对喷雾的控制和数据采集。数据采集系统主要由粒度仪及采集软件组成, 粒度仪两侧镜头水平置于粒径发生装置喷雾场。粒度测量范围为 0.1~2 000 μm, 采样速率可达 2 500 Hz, 可详细测量极短的脉冲或瞬间喷雾过程。激光粒度仪主要由激光器、透镜、光电接收器、信号转换与传输系统、数据处理系统等组成。Spraytec 型实时喷雾粒度分析仪(英国马尔文仪器有限公司)是用于测量喷雾和动态气溶胶的激光粒度分析仪, 采用激光衍射技术, 允许每 4 ms 查看液滴大小及浓度等分布。整个装置系统通过粒径发生装置喷雾, 粒度仪实时检测液滴雾化粒径, 粒径测试系统结构如图 1 所示。

收稿日期: 2014-05-16, 修回日期: 2014-07-30。

基金项目: 科技部国际科技合作重大专项, 编号: 2013DFR60080。

第一作者简介: 雷正(1988—), 男, 硕士研究生, 研究方向为燃烧爆炸及其作用机理。E-mail: njleizheng@163.com。

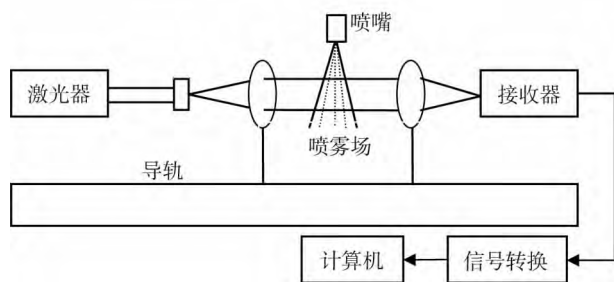


图 1 粒度测试系统结构示意图

Fig. 1 Apparatus of particle size measurement system

1.2 工作原理

液滴在装置系统内雾化机理如下:高压气体进入样品仓,气体和液体在混合腔内混合后液滴发生破碎。当气-液两相流从圆形喷嘴口喷出时,由于气体速度很大,因此气、液 2 相之间产生较大的相对速度,从而被一次雾化。喷出后,经分布板雾化扩散后进入球内形成高紊流度的液体雾滴,保证样品以气溶胶形式均匀分散到爆炸仓内^[4]。

液体雾化后激光粒度仪实时检测其雾化参数, Spraytec 型激光粒度仪利用激光衍射法原理,激光器发射出激光经过滤波扩束系统,得到可扩展光束并形成一定的光强分布。经不同大小的颗粒衍射的光分布在相应不同的位置,通过衍射光的位置就可以反映出所测颗粒的粒径。利用其衍射光的位置和强度的信息,可以经系统换算得出相应体积,同时依据等效圆球理论(米氏理论)换算出所测颗粒的粒度分布^[2]。

2 粒径相关指标

通过对激光粒度仪工作原理的分析可知,在测试过程中只能得到被测样品的体积,其他数据(如粒径、面积、数量等)都经过程序计算得出。目前,一般采用统计方法定义平均雾滴粒径,通过平均粒径来描述喷雾特性^[5-6],比较有代表性的是体积平均直径(VMD)以及 Sauter 平均直径(SMD)。液滴的平均粒径可以用单一直径、液滴表面积或者体积来表示,本文中主要采用以下 5 种特征平均粒径分析液滴的雾化性能:

1) d_{v10} 、 d_{v50} 、 d_{v90} 为累积体积分数为 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%,其中 d_{v50} 也称中位粒径或中值粒径,它准确地将总体粒径分布划分为 2 个等分。

2) $d_{[3,2]}$, 即表面积动量平均径,又称 Sauter 平均直径,它能很好地反映真实的雾滴群的状态及效果。

3) $d_{[4,3]}$, 即体积或质量动量平均径,它是指与该雾滴群的雾滴形状相同、总体积(质量)相同、颗粒数相同,但粒度均匀的一个假想雾滴群的粒度^[7]。

3 实验步骤

液体雾化是一个多项、瞬态的复杂过程。液体雾化后的雾滴具有尺寸小、范围大、数量多的特点,且随时间和空间而变化。本仪器系统能准确测量雾滴实时尺寸分布。实验用油料为解放军总后勤部油料研究所油样煤基柴油。煤基柴油是新近研制的一种煤制清洁燃料,是以煤炭为原料,通过化学加工过程,经煤基直接液化合成柴油。实验过程中通过固定部分参数,考察不同压力条件下不同时间点雾滴的粒径分布。油样加入量为 50 mL,进样仓关闭时间为 300 ms,粒度仪采样时间为 300 ms,通过控制喷气压力对柴油雾滴粒径进行测试。

粒度分析实验主要步骤有系统进样、粒度仪设置、喷雾设置、系统测试,然后通过实验结果分析绘制图表计算参数得出相关结论。

3.1 系统进样

仔细清洗喷雾球体内部,尤其是光学玻璃要擦拭干净。打开进样仓上盖,用进样器加注所需油样至进样仓底部,进样结束后拧紧上盖并密闭进样仓。

3.2 粒度仪设置

在计算机上打开激光粒度仪软件,按照需要输入实验参数,选择设定好的标准操作程序,对背景进行测量。如果背景条件不合格需重新关闭软件,并擦拭光学玻璃及镜头,保证背景的准确性。背景校正完后开始测试,等待粒径发生装置喷雾,粒度仪自动触发测试。

3.3 喷雾设置

打开高压空气瓶阀门,输出压力保持在 2.0 MPa,并打开喷雾装置系统电源,启动油料可控粒径发生装置专用软件,然后设置实验参数和压力,填写实验信息条件。

3.4 系统测试

粒径发生装置准备。实验启动后,装置自动完成整个实验过程,依次为真空泵对球体抽真空、进样仓充压、高压空气携带进样,当激光探测到雾滴,激光粒度仪软件开始分析、处理数据。

4 结果分析与讨论

4.1 结果分析

根据激光粒度仪软件及数据分布结果,得到在喷雾压力为 0.687 MPa(爆炸仓内真空度为 80 kPa)时粒径和透光率(透光率指发射光经喷雾场后透过的光与其入射光通量的分数)随时间的变化曲线,如图 2 所示。从图中可知,透光率在 50 ms 时间点附近急速减小,然后缓慢增大,并在 200 ms 时间点附近趋于稳

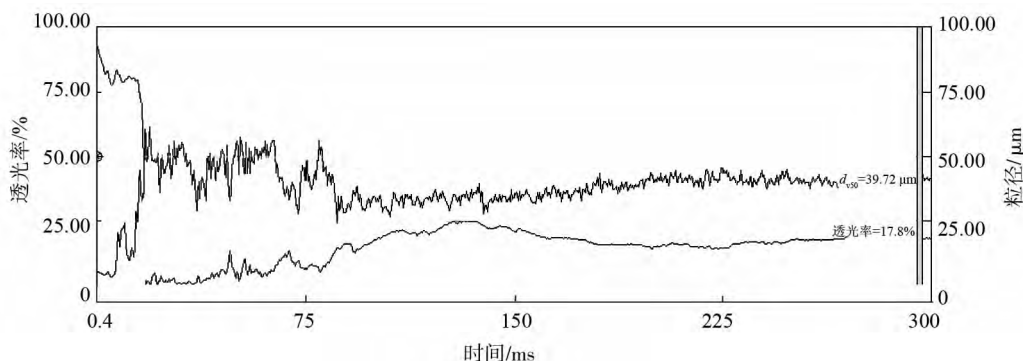


图 2 油料雾滴粒径和透光率随时间的变化曲线

Fig. 2 Size and transmission of atomized drops varying with time

定。雾滴粒径变化与之对应,喷雾发生后雾滴粒径逐渐增大,经过一段中间过程后雾滴粒径趋于稳定。综合考虑喷雾压力和雾滴所受气动阻力的相互作用导致粒径的变化,将油料雾滴粒径分布过程分为如下 3 个阶段:

1)形成阶段。空气推动力起主导作用的阶段,液相速度由零开始不断增大,在此阶段燃料主要以射流形式喷出,其雾滴的抛撒速度处于加速阶段,对应于喷雾的时间为 50 ms。

2)扩散阶段。空气推动力与气动阻力相互作用阶段,此阶段雾滴抛撒加速运动结束,同时发生着液相的扰动、油料液滴的剥离、破碎及挥发等过程,雾滴径向膨胀速度逐渐减小,减速运动过程中由于液相受惯性和空气阻力作用,阻力大小取决于运动速度,因此速度越大,阻力越大。对应于喷雾的时间为 50~200 ms。

3)稳定阶段。气动阻力占主要作用阶段,在气动阻力作用下液滴继续进行扩散运动,并与气流发生湍流最后逐步形成雾滴,在此阶段雾滴径向半径不再扩大,由于液滴的雾化更充分,因此液相将会分散得更加均匀。对应于喷雾的时间为 200~300 ms。

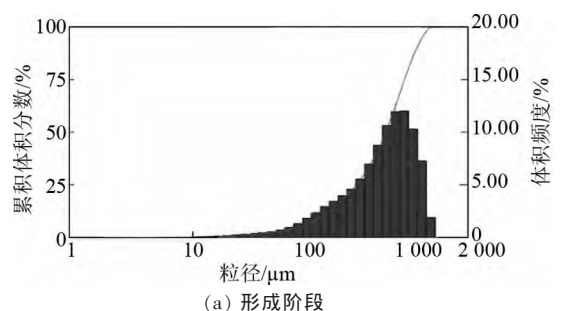
图 3 为喷雾压力为 0.687 MPa 条件下不同阶段的雾滴粒径分布图。表 1 所示为不同阶段的雾滴粒径分布数据。

从表中数据可知,喷雾压力为 0.687 MPa 时,超过 50%的雾滴粒径小于 500 μm ,在扩散阶段雾滴粒径有减小趋势。由图 3 可知,在形成阶段,喷雾过程刚开始形成,各特征平均粒径参数较大,粒径在 10~100 μm 范围内的雾滴数量相对较多;在扩散阶段,雾滴粒径分布范围较广,仍以粒径约为 500 μm 的雾滴居多;在稳定阶段,雾滴粒径分布范围较窄且大小集中,粒径在 300~700 μm 范围内的雾滴数量较多,达 60%左右;粒径小于 100 μm 的雾滴仅占 4.3%。

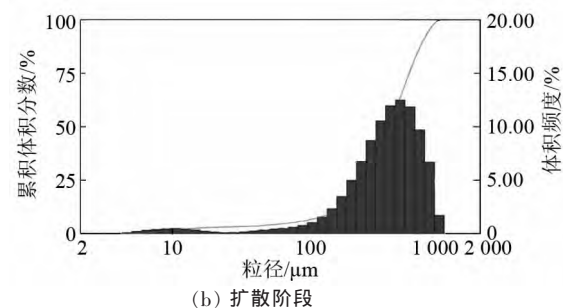
为了使得实验兼具比较性和特殊性,分别在喷雾压力为 0.343、0.687、1.030 MPa(爆炸仓内真空度分别

为 90、80、70 kPa)时进行多次实验。在进行不同的喷雾压力实验时其他条件保持不变。图 4 为 3 种不同喷雾压力条件下 300 ms 内样品喷雾粒径分布图。表 2 所示为不同喷雾压力时雾滴粒径分布数据。

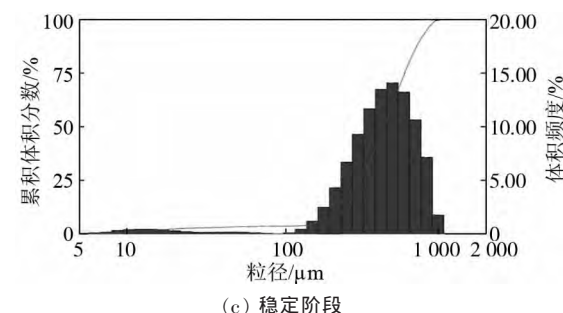
可以看出,随着喷雾压力的增大,油料雾滴的 d_{v50} 不断减小。在喷雾压力为 0.687 MPa 时, d_{v50} 为 446.8 μm ,相比压力为 0.343 MPa 时降幅为 23.8%;在喷雾压力为 1.030 MPa 时, d_{v50} 为 396.6 μm ,相比压力为 0.687 MPa 时降幅为 11.2%。从测试结果可知,随着喷雾压力的增大,粒径小于 100 μm 的雾滴



(a) 形成阶段



(b) 扩散阶段



(c) 稳定阶段

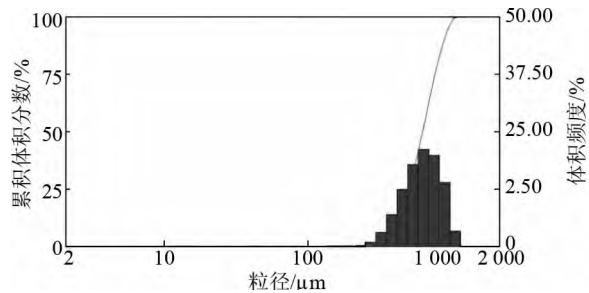
图 3 不同阶段油料雾滴粒径分布

Fig. 3 Particle size distribution of atomized drops at different phases

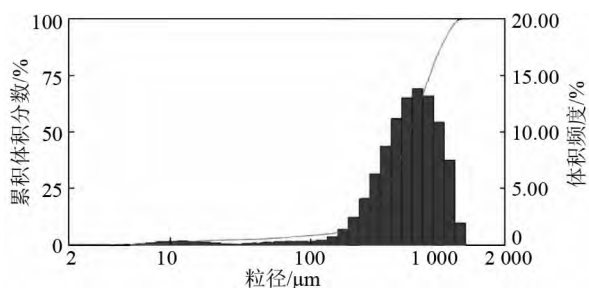
表 1 不同阶段液油料雾滴粒径分布数据

Tab. 1 Particle size distribution data of atomizde drops at different phases

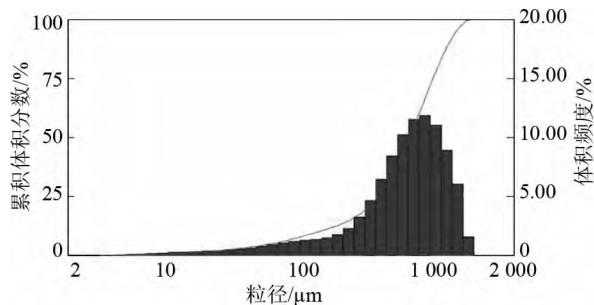
阶段	$d_{v10}/\mu\text{m}$	$d_{v50}/\mu\text{m}$	$d_{v90}/\mu\text{m}$	$d_{[3,2]}/\mu\text{m}$	$d_{[4,3]}/\mu\text{m}$	$\varphi_v \times 10^6$
形成阶段	259.8	488.6	780.0	350.3	502.1	427.5
扩散阶段	155.8	416.4	743.3	154.4	433.0	111.0
稳定阶段	219.6	445.0	751.4	209.1	462.9	181.2

注: φ_v 指雾滴在空间中的体积分数。

(a) 喷雾压力 0.343 MPa



(b) 喷雾压力 0.687 MPa



(c) 喷雾压力 1.030 MPa

图 4 不同喷雾压力时的油料雾滴粒径分布图

Fig. 4 Particle size distribution of atomizde drops at different spray pressures

比例逐渐增大。喷雾压力为 0.343 MPa 时,大尺寸雾滴相对集中,粒径小于 100 μm 的雾滴的比例仅为 0.19%。喷雾压力为 0.687 MPa 时,粒径小于 100 μm 的雾滴比例占 4.3%;喷雾压力为 1.030 MPa 时,粒径

小于 100 μm 的雾滴的比例为 10.4%。随着喷雾压力的增大,雾滴平均粒径变小,粒径分布变宽,且喷雾压力越大,雾化效果越好。

为了更直观地比较不同喷雾压力条件下雾滴粒径变化情况,图 5 中给出了不同喷雾压力条件下雾滴粒径随时间的变化情况。对比结果可以清楚地看出,喷雾压力越大,5 个特征平均粒径参数数值越小。随着喷雾压力的增大,雾滴粒径减小的趋势变缓。不同喷雾压力条件下 d_{v10} 数值减小相对较明显, d_{v90} 数值相差不大。描述油品喷雾粒度大小的衡量指标可用 d_{v50} 来表示,是表征粒度大小的典型值。

4.2 雾化机理及因素分析

根据实验结果分析可知,油品雾化过程可分为形成阶段、扩散阶段和稳定阶段。形成阶段是以加速为特征。在形成阶段,油品经高压空气作用喷出形成射流,速度由零开始不断增大。当油流或油滴在气体介质中进行高速运动时,气流对其表面产生冲击与摩擦,致使油流或油滴扭曲变形。在紊流扰动下,油流或油滴表面的粗糙凸出部分会脱离油滴主体,分裂成小油滴^[8]。雾滴在高压气体喷射作用下获得最大抛撒速度,由于受空气阻力、表面张力以及黏性耗散的作用^[9],因此抛撒速度随时间迅速衰减。扩散阶段以第 2 次加速和第 2 次减速为特征。与第 1 阶段相比,此阶段加速趋势明显减弱,雾化过程衰减也较慢。稳定阶段为油品的继续减速抛撒和扩散阶段,此阶段油品的抛撒速度逐渐减小且变化缓慢直至扩散过程结束。随着雾化过程的不断深入,气体与液体燃料的界面的不稳定性得到进一步发展,液体破碎成液滴群,并伴随着大量汽化,初步形成较大空间的雾滴。由于空气扰动加剧,因此这一阶段不仅存在液体与气体之间质量、动量和能量的交换,而且存在复杂的相互作用如液滴破裂、蒸发和

表 2 不同喷雾压力时油料雾滴粒径分布数据

Tab. 2 Particle size distribution data of atomizde drops at different spray pressures

喷雾压力/MPa	$d_{v10}/\mu\text{m}$	$d_{v50}/\mu\text{m}$	$d_{v90}/\mu\text{m}$	$d_{[3,2]}/\mu\text{m}$	$d_{[4,3]}/\mu\text{m}$	$\varphi_v \times 10^6$
0.343	380.6	586.1	829.1	486.1	595.2	795.0
0.687	205.2	446.8	758.6	205.1	462.4	190.5
1.030	96.4	396.6	729.1	161.2	410.8	94.6

注: φ_v 指雾滴在空间中的体积分数。

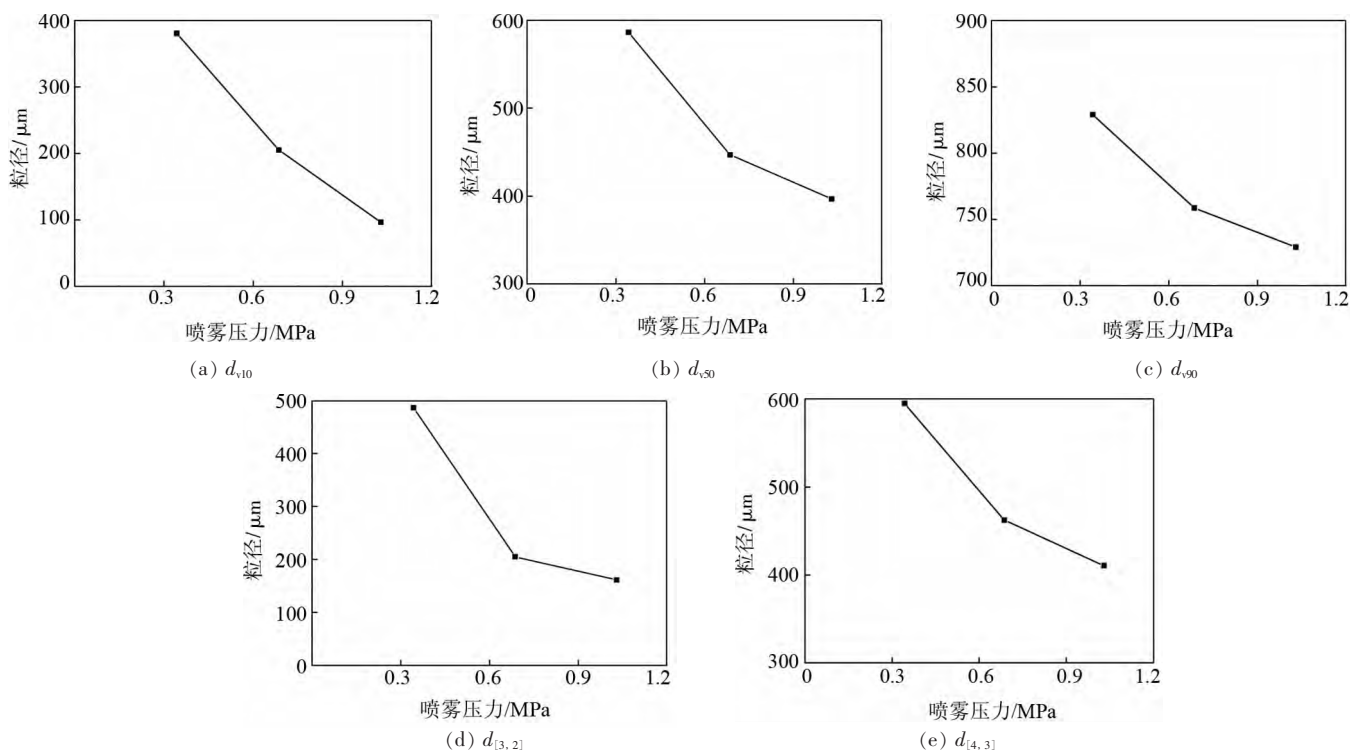


图 5 不同喷雾压力时油料雾滴粒径参数

Fig. 5 Particle size parameters of atomized drops at different spray pressures

碰撞聚合等。在以上气、液 2 相不断融合扩散过程中,燃料液滴进一步碎裂、雾化,最终稳定^[10-11]。

5 结论

1)对喷嘴雾化粒度的指标和雾化粒度的测定方法进行了分析,设计了喷嘴雾化实验系统,能较好地探究模拟油品喷雾燃烧爆炸效果。

2)对不同压力下的煤基柴油雾化粒度进行测定,柴油雾化过程可分为形成阶段、扩散阶段、稳定阶段。

3)喷雾压力越大,雾滴特征平均粒径 d_{v10} 、 d_{v50} 、 d_{v90} 、 $d_{[3,2]}$ 、 $d_{[4,3]}$ 参数值越小,雾化效果越好,且随着喷雾压力的增大,液滴雾化粒径减小的趋势变缓。

参考文献(References):

- [1] 李诚炜,田松柏,弓爱君,等. 仪器分析技术在油品分析中的应用[J]. 分析仪器, 2004 (4): 1-5.
- [2] 孔丹,何清,张瑞军. 应用 Malvern MS2000 激光粒度仪分析沙尘粒度[C]// 中国气象学会 2007 年年会大气成分观测、研究与预报

分会论文集, 2007: 798-807.

- [3] 李文凯,吴玉新,黄志民,等. 激光粒度分析和筛分法测粒径分布的比较[J]. 中国粉体技术, 2007, 13 (5): 10-13.
- [4] 杨刚,唐亚鸣,赵磊. 干雾抑尘喷嘴雾化粒径与气压关系实验[J]. 液压与气动, 2012 (9): 126-128.
- [5] 杨震铭,李毅,张强. 水雾雾滴粒径的分析与研究[J]. 消防科学与技术, 2007, 26 (4): 409-411.
- [6] 程卫民,周刚,左前明,等. 喷嘴喷雾压力与雾化粒度关系的实验研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35 (8): 1308-1313.
- [7] 张茂根,翁志学,黄志明. 颗粒统计平均粒径及其分布的表征[J]. 高分子材料科学与工程, 2000, 16 (5): 1-4.
- [8] 梁孟洋. 气动雾化重油粒径的影响因素[J]. 陶瓷研究, 1998, 13 (3): 9-11.
- [9] 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.
- [10] 席志德. 高速运动液体燃料爆炸抛撒数值模拟[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
- [11] SANTANGELO P E. Characterization of high-pressure water-mist sprays: experimental analysis of droplet size and dispersion [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34: 1353-1366.

(上接第 10 页)

参考文献(References):

- [1] 杜孟成,陈宝喜,李剑波,等. 白炭黑分散性的改善及白炭黑分散剂的应用[J]. 橡胶科技市场, 2011 (6): 18-23.
- [2] COCHET P, PETIT D, BARRIQUAND L, et al. 高分散性沉淀法白炭黑在轮胎中的应用研究[J]. 轮胎工业, 2001, 21 (8): 482-489.
- [3] 李炳炎. 高分散性白炭黑的性能特征和生产工艺(一)[J]. 橡胶科技市场, 2008 (4): 10-13.
- [4] 庄艺伟,胡晓慧,汤道英,等. 粒径分布法测定白炭黑的分散性能[C]// 中国无机盐工业协会第三届会员代表大会暨无机硅化物分

会 2010 年全国无机硅化物行业年会论文集, 2010: 140-142.

- [5] STENZEL O, UHRLANDT S, LUGINSLAND H D, et al. Highly dispersible precipitated silica having a high surface area: the United States, US7628971B2[P]. 2009-11-08.
- [6] 王启国,董文武,杨益文. 高分散沉淀白炭黑的粒径分布研究[J]. 世界橡胶工业, 2012, 39 (11): 36-39.
- [7] 刘建路,张启林,梁金龙,等. 基于微观结构的白炭黑性能分析[J]. 中国粉体技术, 2012, 18 (4): 39-44.
- [8] 周新木,曾慧慧,张丽,等. 激光粒度仪在超细白炭黑粒度分析中的应用[J]. 无机盐工业, 2007, 39 (5): 55-62.