

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.05.001

硝化甘油喷射硝化器喷雾效果优化及试验验证^{*}

刘 晶^{①②} 景 青^{①②} 陈 松^{①②} 秦 能^{①②} 康 超^{①②} 马 宁^{①②} 周致富^③

①西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

②氟氮化工资源高效开发与利用国家重点实验室(陕西西安,710065)

③西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室(陕西西安,710049)

[摘 要] 喷射硝化法是目前最常用制备硝化甘油的硝化方法,但实际应用中常会出现批次与批次之间喷射效果差别太大、雾化效果不均匀等情况,对硝化甘油的制备产生了一定程度的影响。为了分析不同结构参数对喷射器喷射效果的影响,进而优化喷射器的结构,本文使用相位多普勒技术(PDA)的检测方法,检测了不同喷嘴安装形式、不同加工精度、不同流体喷嘴的轴向位置等不同结构参数下喷雾颗粒的粒径及速度分布。通过试验,得出了不同结构参数下雾化颗粒粒径、颗粒速度的轴向及径向分布规律,并得出了最优喷射器喷嘴结构,使雾化后颗粒的粒径降低至 40 μm 以下,颗粒速度降低至 3 m/s,对工厂的实际生产有一定的指导作用。

[关键词] 硝化甘油;喷射硝化;PDA 检测技术;优化分析

[分类号] TJ55

引言

喷射硝化器是目前硝化甘油生产的常用设备,它是利用射流紊流扩散作用实现传质传能的混合硝化设备^[1]。喷射硝化器的结构会影响雾化颗粒的粒径、雾化颗粒的均匀性,进而决定了硝化的充分程度,甚至影响硝化过程的安全性。因此,优化喷射器的结构,提高喷射性能一直受到许多研究者的关注。喷雾效果主要通过颗粒的粒径大小、均匀程度来表征;另外,为了缩小喷射硝化反应所需空间、减小喷射设备尺寸,控制雾化颗粒的运动速度,保证硝化时间充分也是优化喷射硝化器结构的另一项关键内容。因此,提高喷射性能主要从减小雾化颗粒粒径、提高均匀度、降低喷雾颗粒的运行速度两方面来着手。从已发表的关于喷射器优化的文献来看,改变喷嘴的安装形式、安装位置、加工精度容差及配合精度^[2-7]可达到一定的优化目的。而且,通过调整喷射器的结构(如喷嘴的轴向位置、喷嘴喉口截面积、混合室的截面积等)或混合室的形状及长径比,可以使喷射器处于最佳工作状况^[8-11]。而在实际操作中,可以通过改变进气管和进液管之间垫片的厚度来改变喷嘴的轴向位置。

本研究中,利用相位多普勒粒子测量仪(PDPA),测量在不同工况下雾场内每个液滴的粒径和

速度。再在采集时间段内,对通过光探头的液滴进行统计、平均,即可得到最终的平均液滴粒径、速度以及液滴数密度。

1 试验部分

1.1 测试原理

PDPA 是利用多普勒效应来测量运动粒子的相关特性,它所依据的基本光学原理是 Lorenz-Mie 散射理论,一般包括激光器、入射光学单元、接收光学单元、信号处理器和数据处理系统等几部分。在 PDPA 中,依靠运动微粒的散射光与照射光之间的频差来获得速度信息,而通过分析穿越激光测量体的球形粒子反射或折射的散射光产生的相位移动来确定粒径的大小。

1.2 试验仪器

PDPA,Flow Sizer 2033 型,美国 TSI 公司生产,可测粒径范围为 0.5 μm ~ 4 mm,如图 1 所示;试验所用喷射器为目前硝化甘油制备中常用的硝化喷射器。

要得到完整的雾场分析结果,PDPA 采样点必须涵盖径向和轴向两个方向,这样对于解释和比较雾化特性才可以得到满足要求的描述。PDPA 测点分布如图 2 所示,径向测点均为间隔 2 mm,轴向测点均为间隔 10 mm。

^{*} 收稿日期:2016-05-18

基金项目:国防科工委基础产品创新计划火炸药科研专项

作者简介:刘晶(1988 -),女,工程师,主要从事火炸药工艺研究。E-mail:15901165735@163.com

通信作者:景青(1969 -),男,高工,主要从事火炸药工艺研究。E-mail:jq204@163.com

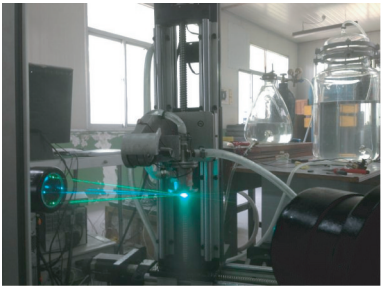


图 1 相位多普勒粒子测量仪

Fig. 1 Phase Dppler particle analyzer (PDPA)

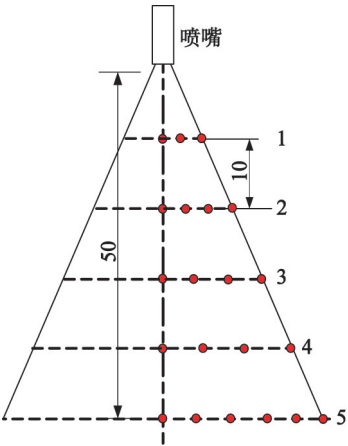


图 2 PDPA 测点分布 (单位:mm)

Fig. 2 Distribution of PDPA test points (unit: mm)

1.3 试验材料

根据硝化反应物料配比计算,混酸流量为 35 kg/h,密度为 1.733 g/cm³,折算为水的流量约为 20 kg/h;甘油流量 5 kg/h;以甘油、水与压缩空气为喷雾三流体介质,统一取定喷雾气体驱动压力为 0.12 MPa,甘油出口温度为 52 ℃,得到三流体喷雾场液滴粒径表征描述。

2 结果与讨论

2.1 喷嘴的安装形式对喷雾效果的影响

如前所述,本次试验的工况条件为水流量 20 kg/h,甘油流量 5 kg/h,驱动压力为 0.12 MPa。在这种情况下将压缩空气流道与水流道的夹角分别固定为 0°、90°、180°,测量喷雾轴向和径向液滴粒径与速度轴向分布状况。3 种不同的安装形式如图 3 所示。通过测量,得到了轴向距离 Z 为 10 ~ 50 mm 时液滴粒径与速度轴向分布规律和轴向距离分别为 30、50 mm 时喷雾液滴粒径与速度径向分布规律,分别如图 4、图 5 和图 6 所示。

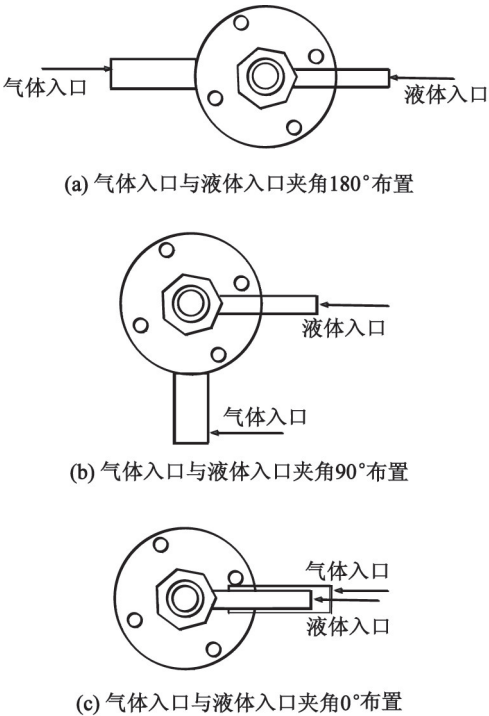
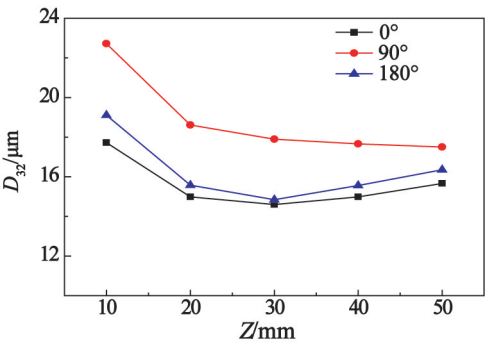
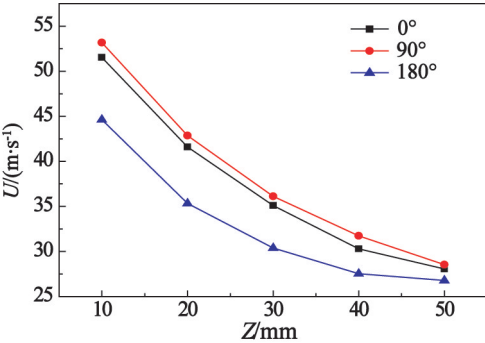


图 3 三流体喷雾喷嘴气体与水不同入口夹角俯视图

Fig. 3 Vertical view of different entry angles of gas and water in three fluid sprays



(a) 粒径



(b) 速度

图 4 不同入口夹角下液滴粒径与速度的轴向分布规律

Fig. 4 Axial distribution of spray particle size and velocity in different entry angles

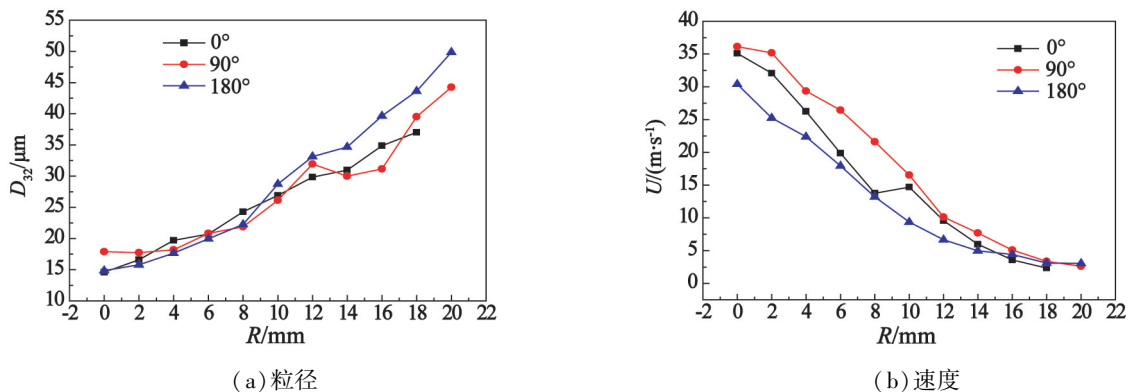


图 5 不同喷嘴夹角 30 mm 处液滴粒径与速度的径向分布规律

Fig. 5 Radial distribution of spray particle size and velocity in the 30 mm axial distance with different entry angles

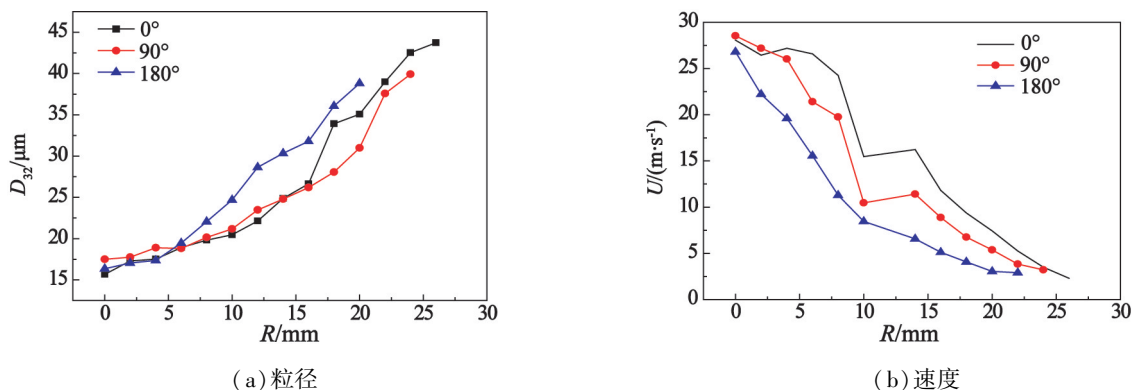


图 6 不同喷嘴夹角 50 mm 处液滴粒径与速度的径向分布规律

Fig. 6 Radial distribution of spray particle size and velocity in the 50 mm axial distance with different entry angles

2.1.1 不同入口夹角下喷雾液滴粒径与速度的轴向分布

图 4 为不同入口夹角下液滴直径与速度轴向分布比较。布置方式为 90° 时液滴轴向粒径最大, 180° 次之, 0° 时液滴的轴向粒径最小, 但是 180° 和 0° 时液滴粒径轴向分布差距较小; 再从速度来看, 当夹角为 0° 时液滴轴向速度较夹角为 180° 时更大一些, 因而, 从缩小后续反应设备角度来看, 180° 角度布置是比较好的布置方式。

液滴速度随轴向距离的增加而呈现出减小的趋势, 90° 夹角时液滴的轴向速度最大, 而 180° 时液滴轴向速度最小, 0° 时液滴速度居中。液滴速度减小一方面是因为周围气体对液滴的阻碍, 另外一方面也是液滴动能转化为使液滴二次破碎所需要的能量。液滴粒径变小的趋势随着距离的增加而有所变缓, 这也是初始距离下液滴破碎作用明显耗能较大, 而随着距离增加, 液滴破碎已经不是主导液滴在表面张力和惯性力等作用力的平衡, 使得破碎现象变少, 主要的能量耗散变少, 液滴速度减小, 趋势也变小。

2.1.2 不同入口夹角下喷雾液滴粒径与速度的径向分布规律

图 5 为轴向距离 30 mm 时不同入口夹角对应

的喷雾径向液滴粒径、速度分布曲线。液滴粒径分布差别不是很明显, 说明入口角度不同对于雾场液滴径向分布影响较小, 粒径分布呈现出中心粒径较小、边缘粒径较大的特性, 流道夹角为 180° 时中心液滴粒径均匀区域较广, 但是喷雾边缘液滴粒径迅速增大, 最后达到边缘最大液滴粒径的状态。

从液滴速度分布来看, 三者服从相似的递减规律, 3 个角度下液滴达到的径向速度差别较小, 喷雾夹角为 180° 时液体在 30 mm 距离表现出了更小的液滴速度分布, 并且较其他两种角度, 其可达到更均匀的液滴粒径分布。

从图 5 与图 6 结合来看, 3 种角度喷雾雾场都没有表现出较大的径向扩张, 从轴向距离为 50 mm 处液滴粒径分布规律来看, 夹角 180° 时中心液滴粒径相对于其他夹角的安装形式来说较小, 但就粒径变化而言, 其变化曲率是最大的, 这一结果表明了其雾场的不均匀性较大, 其他两种角度布置雾场稍有所扩张, 但整体径向液滴粒径不均匀度较小。

从液滴速度分布来看, 与 30 mm 表现出了相同的递减趋势, 图 6 中也显示了在 50 mm 轴向距离下, 180° 布置可以达到最小且相对较均匀径向速度分布特性。就整个液滴速度径向分布而言, 0° 和

90°布置在中心速度较大。液滴速度径向分布递减均较为迅速,边缘液滴所达到的最小速度相差较小。

2.2 喷嘴加工精度容差及配合精度对喷雾效果的影响

根据查得的文献,加工精度容差及配合精度会影响喷射器的喷雾效果^[6]。因此,调整甘油、水与压缩空气之间的配合间隙以及每个关键位置的形位公差,对比调整前后喷射器的喷雾效果,可以得到以下结果。

如前所述,本次试验的工况条件为水流量 20 kg/h,甘油流量 5 kg/h,驱动压力为 0.12 MPa,在这种情况下,设定流道夹角 180°,测量优化前与优化后两种喷嘴喷雾轴向和径向液滴粒径与速度轴向分布状况,如图 7 所示。可以看出,新型喷嘴的轴向速度整体较前一阶段喷嘴速度小,较小的速度可以保证液滴不会太高速流过特定距离,因而从新型喷嘴喷出的液滴能够有更多的时间反应。从粒径的分布规律曲线可以看出,优化喷嘴轴向液滴粒径更小而且分布更为均匀,这一结果表明优化以后的喷嘴能够在轴向表现出良好的雾化特性。

图 8 为两种喷嘴三流体喷雾场轴向距离为 30、

50 mm 截面液滴粒径与速度径向分布比较。由图 8 可以分析,两种喷嘴液滴径向分布均服从中心液滴粒径较小、边缘液滴粒径较大的特性,但是对于相同喷雾轴向距离下优化型喷嘴均表现出了更小液滴粒径和更均匀的液滴粒径径向分布。由速度分布特性可以看出,两种喷嘴喷雾都存在液滴中心速度较大而边缘液滴速度较小的分布规律,但是优化后喷嘴在喷雾截面中心区域液滴速度更小,速度径向分布更加均匀,这说明新型喷嘴在喷雾截面中心区域气液两相剪切作用更剧烈,液滴破碎也更为充分,驱动气体所具有的能量更多耗散在克服液滴表面张力等融合作用,而非转化为对液体的加速作用。这一特性体现了新型喷嘴的更为优化的雾化特性,优化后的喷嘴喷雾截面液滴粒径更小,且粒径与速度径向分布更为均匀。因此总体上,在 180°夹角条件下优化后的喷嘴可以在径向和轴向均表现出更优秀的雾化特性。

2.3 喷嘴的轴向位置对喷雾效果的影响

试验采用180°入口夹角布置,进气管与进水管之间的相对轴向位置分别为2 mm 和 3 mm,图9和图10分别为测得的其轴向距离30、50 mm处液滴速

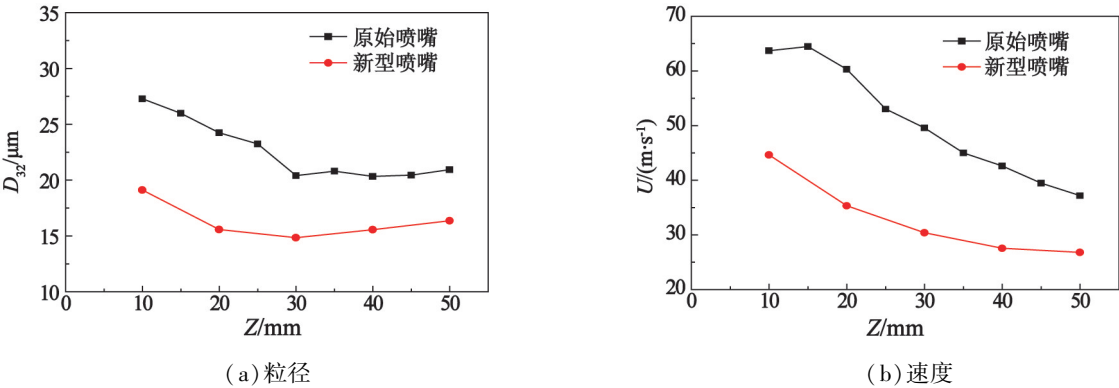


图 7 两种不同喷嘴喷雾液滴粒径与速度轴向分布规律比较

Fig. 7 Comparison of two axial distributions of spray particle size and velocity in different nozzles

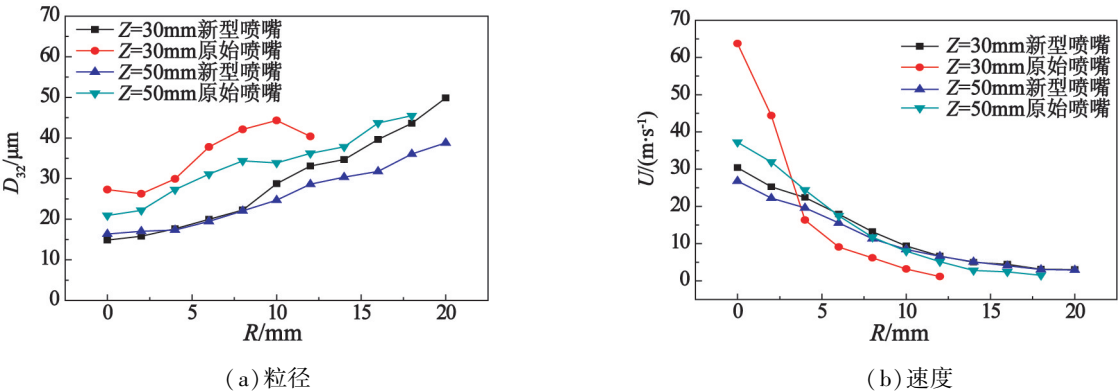


图 8 液滴粒径和速度的径向分布特性

Fig. 8 Radial distribution characteristic of spray particle size and velocity

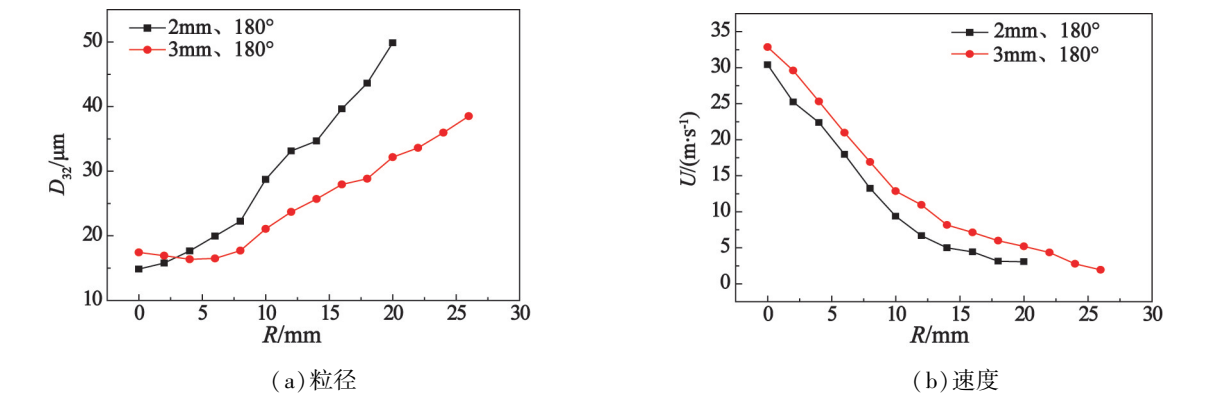


图 9 不同流体喷嘴位置下轴向距离 30 mm 处液滴粒径与速度的径向分布规律

Fig. 9 Radial distribution of spray particle size and velocity in the 30 mm axial distance with different spray nozzle positions

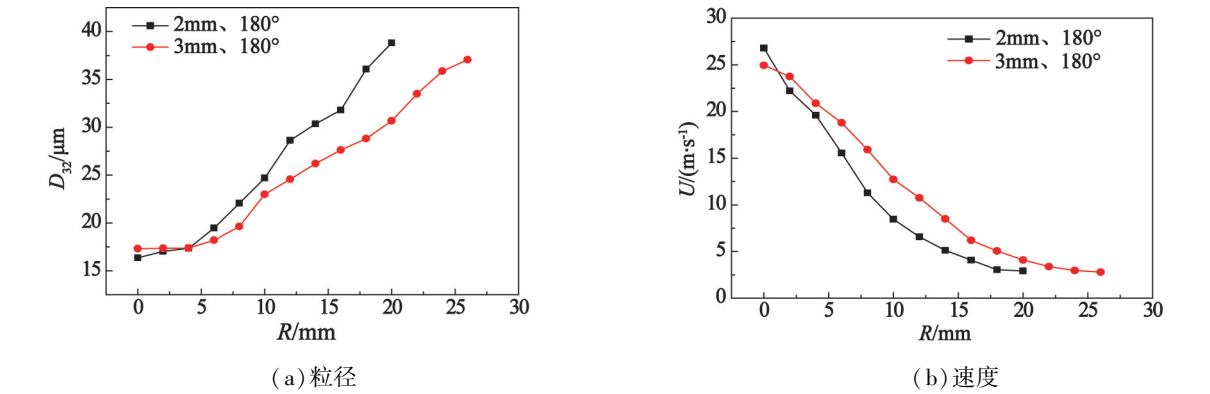


图 10 不同流体喷嘴位置下轴向距离 50 mm 处液滴粒径与速度的径向分布规律

Fig. 10 Radial distribution of spray particle size and velocity in the 50 mm axial distance with different spray nozzle positions

度与粒径的径向分布。

可以看出,当两管相对轴向位置为 3 mm 时,雾场在轴向距离为 30 mm 和 50 mm 处均表现出了更广的分布特性,并且可以使喷雾截面中心区域液滴粒径附近具有更好的均匀性,即液滴粒径随着轴向距离的增加径向分布变化更小。这些现象的解释为:增加进气管和进水管之间的轴向距离可以使液体在喷嘴内部被更加充分地破碎(一次破碎主要发生于气液接触区域开始的小距离内),进而形成更加细小和均匀的初始液滴,在喷嘴外部二次破碎也能够保持这一较为均匀的特性。从速度的径向分布来看,轴向距离为 30 mm 时,两管相对轴向距离较长的喷嘴具有较大的喷雾速度;在喷雾距离为 50 mm 时,整体来看也具有较大速度。

由前述分析可以得知,增加进气管与进水管之间的相对轴向位置,在相同喷雾截面下,液滴速度更大,径向分布更均匀。因而,气体对液滴的剑气作用越强,可以使得液滴直径更小,沿径向分布更均匀。

3 结论

1) 经过对不同喷嘴夹角下喷雾效果的测量,发现当喷嘴气体与水入口夹角为 0° 时,喷雾中心轴线上液滴直径最小,90° 时液滴直径最大;在不同喷雾

截面,入口夹角对液滴直径径向分布影响较小;而当入口夹角为 180° 时,液滴速度轴向与径向分布均最小。因此,入口夹角 180° 为最优夹角。

2) 经过对现有喷射器形位公差及配合公差进行调整,发现改进后的喷嘴较之前喷嘴雾化效果有较大的提高,相较之前喷嘴,喷雾场中心轴线不同距离处以及各喷雾截面不同径向位置处液滴直径均更小,并且各喷雾截面液滴粒径与速度径向分布更为均匀。

3) 增加进气管与进水管之间的相对轴向位置对改进后喷嘴雾化效果有一定改善作用,能够使得各喷雾截面液滴粒径与径向速度分布更为均匀,尤其是在远离喷雾中心的边缘区域,可以较大程度地降低液滴直径。

参 考 文 献

[1] 马昕霞,袁益超,黄鸣,等. 环周进水汽-液两相喷射性能优化[J]. 热能动力工程,2012,27(1):33-37.
MA X X, YUAN Y C, HUANG M, et al. Optimization of full-arc water-admission steam-liquid two-phase jet flow performance[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2012,27(1):33-37.

[2] CHANG Y J, CHEN Y M. Enhancement of a steam-jet

- refrigerator using a novel application of the petal nozzle [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2000, 22 (3): 203-211.
- [3] 张少维,徐海涛,桑芝富. 新型喷嘴结构下蒸汽喷射式热泵性能的数值研究[J]. *热能动力工程*, 2004, 19 (5): 506-509.
- ZHANG S W, XU H T, SANG Z F. Numerical study of the performance of steamer jet heat pumps with an innovative nozzle structure[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2004, 19(5): 506-509.
- [4] 季红军,陶乐仁,王金锋,等. 喷嘴位置对喷射器的性能影响的研究[J]. *制冷*, 2007, 26(4): 16-19.
- JI H J, TAO L R, WANG J F, et al. Study the influence of nozzle position on ejector performance [J]. *Refrigeration*, 2007, 26(4): 16-19.
- [5] 陈向阳,袁丹青,王冠军,等. 多喷嘴液体射流泵的设计及试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2009(4): 49-53.
- CHEN X Y, YUAN D Q, WANG G J, et al. Design of the multi-nozzle water jet pump and experimental research on it [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2009(4): 49-53.
- [6] 王锁芳,李立国. 多喷管引射器的性能分析[J]. *南京航空航天大学学报*, 1996, 28(3): 350-356.
- WANG S F, LI L G. Performance analysis of a multi-nozzle ejector [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 1996, 28(3): 350-356.
- [7] 段新胜,孙孝庆. 环形多喷嘴射流泵结构参数的实验研究[J]. *探矿工程*, 1999(6): 17-19.
- DUAN X S, SUN X Q. The experimental study on compositional parameters of the annular multinozzle jet pump [J]. *Exploration Engineering (Drilling & Tunneling)*, 1996(6): 17-19.
- [8] NAHDI E, CHAMPOUSSIN J C, HOSTACHE G. Optimum geometric parameters of a cooling ejector-compressor [J]. *International Journal of Refrigeration*, 1993, 16(1): 67-72.
- [9] 程效民. 喷射器结构参数优化设计[J]. *化学工程*, 1994(3): 71-73.
- [10] 陆宏圻. 喷射技术的理论及应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004: 336-345.
- [11] 索科洛夫 E. Я, 津格尔 H. M. 喷射器[M]. 黄秋云, 译. 北京: 科学出版社, 1977: 176-180.

Optimization and Experiment Verification of Nitration Spray Characteristic Used in Nitroglycerin

LIU Jing^{①②}, JING Qing^{①②}, CHEN Song^{①②}, QIN Neng^{①②}, KANG Chao^{①②}, MA Ning^{①②}, ZHOU Zhifu^③

①Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

②State Key Laboratory of Fluorine & Nitrogen Chemicals (Shaanxi Xi'an, 710065)

③State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University (Shaanxi Xi'an, 710049)

[ABSTRACT] Spray nitration is the most common nitration method used in the production of nitroglycerin. But in the practical application, the spray often appears obvious inconsistency from batch to batch so that the inhomogeneity affects the production of nitroglycerin. In order to analyze the influence of different spray structure parameters to spray characteristic and optimize the spray structure, distribution of particle size and velocity of spray granular in different structure parameters, such as different nozzle types, machining precision, axial position of spray nozzle, were detected by phase Doppler analyzer (PDA). By means of experiment, distribution rule of particle size and velocity both in axial and radial direction were also obtained, and the optimal spray structure which made the particle diameter reduced to 40 μm , and the particle velocity reduced to 3 m/s was determined. This conclusion plays a role in guiding the actual production in factory.

[KEYWORDS] nitroglycerin; spray nitration; PDA detection technology; optimized analysis