

文章编号: 1006-9941(2016)02-0177-05

多股贴壁燃气射流在圆柱型充液室中的扩展特性

胡志涛¹, 余永刚¹, 曹永杰²

(1. 南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712099)

摘要: 为了探索高温高压周向均布多股贴壁燃气射流在受限空间内液体工质中的扩展特性, 设计了贴壁燃气射流在圆柱形充液室内扩展的实验装置。用数字高速录像系统记录多股贴壁燃气射流在充液室中的扩展过程, 处理拍摄记录的射流扩展序列图, 获得了不同时刻多股射流形态头部的平均轴向位移。从射流扩展序列图可以发现由 Kelvin-Helmholtz 不稳定性引起的表面不规则一直存在于整个射流扩展过程。通过改变喷孔个数和破膜喷射压力, 对比分析了不同工况下多股贴壁燃气射流的扩展特性。结果表明: 喷孔个数增加, 相同时刻射流轴向扩展位移变小, $t=5$ ms 时刻, 从四孔增加到六孔, 其轴向扩展位移减少了 8.3%, 从六孔增加到八孔, 减少了 3.1%; 随着破膜喷射压力增大, 射流轴向扩展速度更快, 射流轴向扩展到达充液室顶部的时间变短, $t=5$ ms 时刻, 燃气破膜压力从 12 MPa 增加到 20 MPa, 射流轴向扩展速度增加了 20.1%, 从 20 MPa 增加到 28 MPa, 增加了 19.9%。

关键词: 贴壁射流; 扩展特性; 湍流掺混; Kelvin-Helmholtz 不稳定性

中图分类号: TJ55; O358

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.02.012

1 引言

为了适应海洋成为未来战争主战场的需要, 水下发射技术的发展受到了高度重视。水下武器在水下发射过程中, 喷出的高温高压燃气与周围水介质发生强烈相互作用, 其间伴随有一系列复杂的物理现象, 如激波、气水掺混、换热、相变等。国内外学者针对气体射流在液体工质中的扩展特性进行了大量的实验研究。Loth 和 Faeth^[1-2] 实验测量了高压气体射流水下喷射过程中中心轴线上压力的分布以及时间平均空隙率。施红辉^[3-4] 和王伯懿^[5] 研究了超声速气体射流的水下自由扩展过程, 通过测量射流内部压力分布, 揭示了射流扩展过程中的回击现象。汤龙生^[6] 采用燃气发生器和水下实验系统, 研究了水下超声速燃气射流的气泡生长及演变过程, 以及气泡压力波在水中的传播特性。Weiland^[7] 通过高速录像系统记录了不同流速下的气体射流在水下的自由扩展过程, 发现射流存在颈缩断裂现象, 并且其颈缩断裂位置固定。Voropayev^[8] 实验研究了受限射流扩展过程, 发现射流扩展后期出现

周期性震荡, 并获得其震荡频率, 同时研究发现边界条件的改变会影响压力分布, 并最终导致射流破碎。

在数值研究方面, 许多学者也进行了相关报道。曹嘉怡^[9]、甘晓松^[10] 和 TANG Jia-ning^[11] 针对水下燃气射流问题, 分别使用 mixture 和 VOF 两相流模型模拟了燃气射流扩展过程, 并揭示了射流的颈缩、断裂和回击现象。Rafferty^[12] 数值研究了二维条件下双股平行射流在受限空间的扩展情况, 发现掺混现象主要存在于双股射流之间, 同时掺混剧烈程度与射流间距有关。余永刚^[13-14]、齐丽婷^[15] 和莽珊珊^[16-17] 实验和数值模拟研究了单股燃气射流在不同形状充液室内燃气射流的扩展特性, 并给出了详细的流场结构图。薛晓春^[18-19] 针对双股射流在圆柱形和圆柱渐扩形充液室中的射流扩展特性进行了实验和数值研究, 并给出了射流场区域的密度、压力、速度和温度分布云图。

以上研究都以单股或双股射流在自由流场或受限空间内扩展为研究对象, 而未对周向均匀分布的多股贴壁射流在受限空间的扩展特性进行研究。本研究以全淹没式水下火炮发射为背景, 实验研究周向均布多股贴壁燃气射流在圆柱形充液室中的扩展特性, 在破膜喷射压力为 20 MPa, 燃气温度为 2300 ~ 2400 K 工况下, 重点讨论了喷孔个数分别为四个, 六个和八个对多股贴壁燃气射流在液体工质中扩展形态的影响, 以及喷孔个数为六的条件下, 破膜喷射压力分别为 12,

收稿日期: 2015-04-16; 修回日期: 2015-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(11372139), 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX14_0396)

作者简介: 胡志涛(1990-), 男, 博士研究生, 主要从事含能液体燃烧推进理论与技术相关研究。e-mail: starry_dust@163.com

20 MPa 和 28 MPa 对多股贴壁燃气射流在液体工质中扩展形态的影响。

2 实验装置与原理

图 1 为实验装置示意图, 主要由高压燃烧室、多孔喷嘴和圆柱形充液室组成。图 1b 为 A-A 剖视图, 图中分别示出四孔喷嘴、六孔喷嘴和八孔喷嘴。充液室为透明有机玻璃制成的 $\Phi 55 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的圆柱形结构, 便于可视化研究, 其内部充满液体工质, 底部连接燃气发生器。实验系统的工作原理是利用电点火装置点燃填充在燃烧室内的速燃火药, 火药被点燃, 燃烧室内压力迅速升高, 至破膜压力冲破紫铜膜片, 高温高压的燃气进入连接件, 再通过多个导气槽到狭缝形贴壁喷孔射入充满液体工质的透明充液室中形成多股贴壁燃气射流。燃气射流在喷管出口处为声速流, 进入充液室之后, 快速衰减变成亚声速流。实验采用了数字高速录像系统 (拍摄频率为 4000 fps) 记录多股贴壁燃气射流在液体工质中相互作用以及射流扩展的过程。为了减少重力对 Taylor 空腔扩展形态的影响, 将此装置竖直向上放置, 即高温高压的燃气由燃烧室下部向上喷射, 充液室上端与大气相连。实验中选择水作为液体工质。

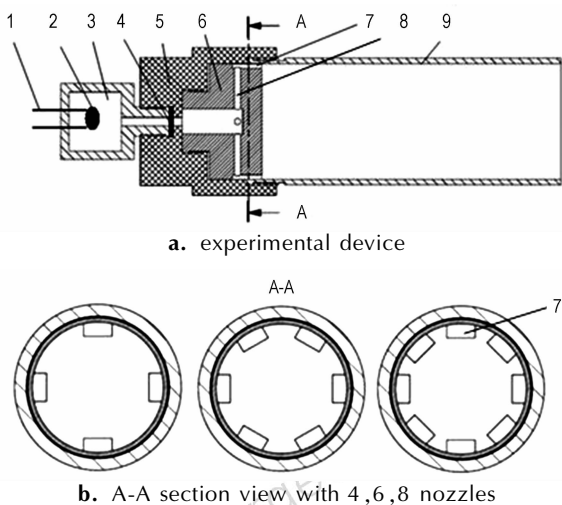


图 1 实验装置示意图

1—点火电极, 2—速燃火药, 3—高压燃烧室, 4—紫铜膜片, 5—连接件, 6—多孔喷嘴, 7—狭缝形贴壁喷孔, 8—导气槽, 9—充液室

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

1—ignition electrode, 2—deflagrating gunpowder, 3—high pressure chamber, 4—copper diaphragms, 5—connector, 6—multi orifice nozzle, 7—narrow wall orifice, 8—air slot, 9—filling liquid chamber

实验研究了破膜喷射压力和喷孔个数对多股贴壁燃气射流扩展特性的影响。其中破膜喷射压力通过改变装药量和紫铜膜片的厚度实现。通过更换多孔喷嘴, 分别获得四股射流、六股射流和八股射流的扩展形态。

3 实验结果及分析

3.1 多股贴壁燃气射流在充液室中的扩展过程

实验中, 喷孔采用紫铜膜片密封, 用来得到足够的破膜喷射压力。现以八孔喷嘴为例, 说明破膜喷射压力为 20 MPa 时, 八股贴壁燃气射流 (温度约 2300 ~ 2400 K) 在圆柱形充液室中的扩展特性, 图 2 显示了其系列发展过程。

由图 2 可以看出, 当八股贴壁燃气射流从狭缝贴壁喷孔刚进入液体工质时, 八股贴壁射流两两之间是明显分开的, 同时射流头部形态呈锥形。当 $t=0.5 \text{ ms}$ 时, 射流进一步扩展, 射流边界很不规则, 呈锯齿形, 表明射流扩展初期已经呈现 Kelvin-Helmholtz 不稳定效应^[20]。随着时间的推移, 射流之间发生相互卷吸和干涉作用, 边界湍流掺混明显。当 $t=1.0 \text{ ms}$ 时, 八股贴壁燃气射流间已经看不到明显的间隙, 说明射流经过径向扩展, 相邻射流之间已经达到交汇。结合四股、六股 (由于篇幅限制, 相应图片未在文中列出) 和八股射流扩展过程的序列图, 可以发现四股贴壁射流扩展后期, 底部还残留部分液体工质, 在 Kelvin-Helmholtz 不稳定效应^[20]下, 湍流掺混强烈。六股和八股射流扩展过程中, 底部均不能明显观察到残留液体工质, 可见六股和八股射流扩展过程更加稳定。同时从整个序列图中可以看出, 在八股贴壁射流扩展的整个过程中, 八股贴壁射流是基本对称的。

3.2 不同参数对射流扩展特性的影响

3.2.1 喷孔个数的影响

通过射流扩展序列照片, 采用 Photoshop 软件可以读出照片中多股 Taylor 空腔的头部位移值, 并取其平均值作为对应工况下射流的轴向扩展位移。图 3 为相同破膜喷射压力 20 MPa 下, 喷孔个数分别为四、六和八个, 多股贴壁燃气射流的轴向扩展位移及通过轴向位移获得的轴向扩展速度曲线。

由图 3a 可以看出, 喷孔个数从四孔增加到八孔, 相同时刻射流轴向扩展位移变小, $t=5 \text{ ms}$ 时刻, 从四孔增加到六孔, 其轴向扩展位移减少了 8.3%, 从六孔增加到八孔, 减少了 3.1%。由图 3b 看出, 喷孔个数从四孔增加到六孔, 其轴向扩展速度变小, 从六孔增

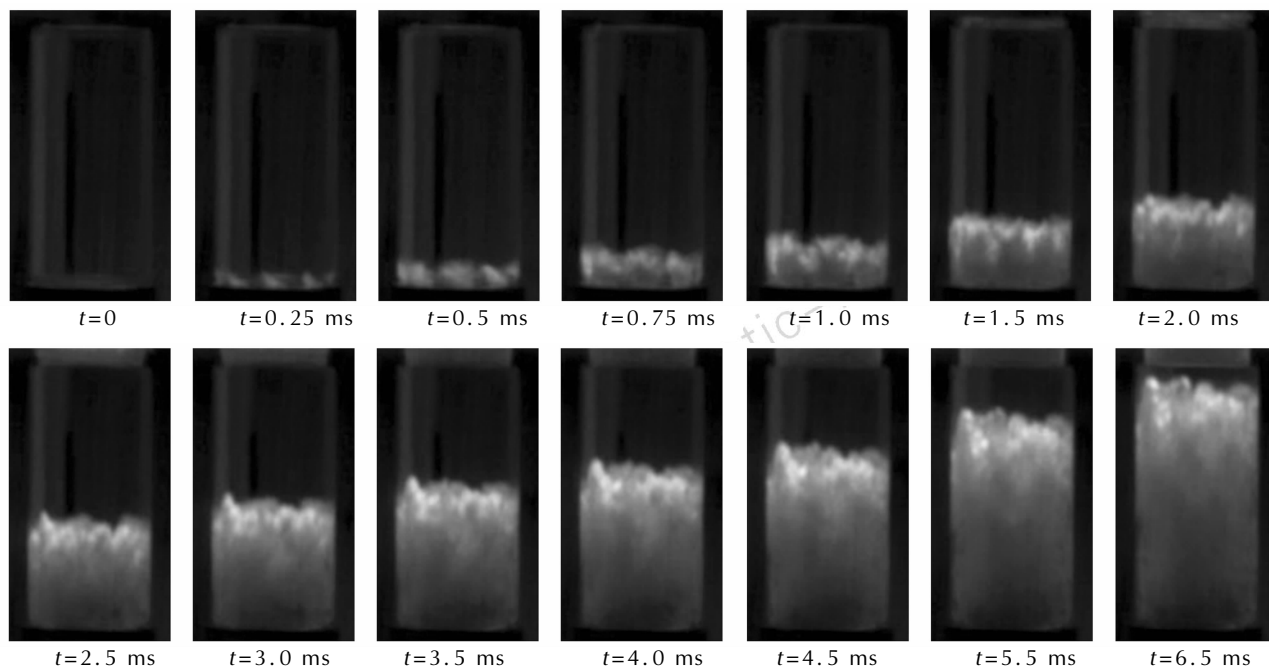
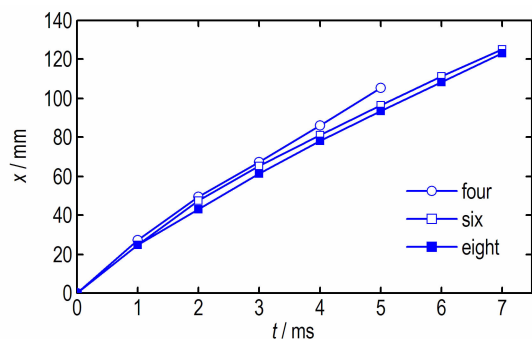


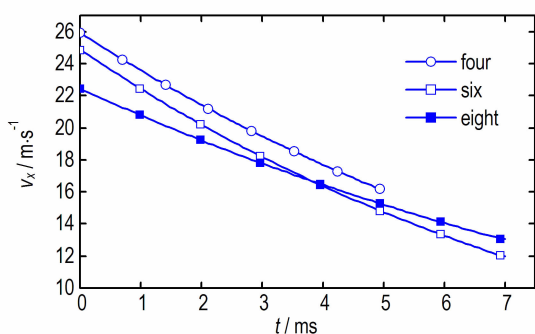
图2 八股贴壁射流在圆柱形充液室中扩展的序列过程

Fig.2 Sequence processes of eight wall jets expanding in cylindrical chamber

加到八孔,八孔喷嘴射流轴向扩展速度在射流扩展初始阶段较小,衰减速率也比六孔喷嘴小,射流扩展后期其轴向扩展速度比六孔喷嘴要大。结合图1可以



a. displacement



b. expansion velocity

图3 多股贴壁射流轴向扩展位移及速度曲线

Fig.3 The axial displacement and the axial expansion velocity curves of multiple wall jets vs time

发现,燃气射流是经过连接件再通过多个导气槽分成多股射流,在破膜喷射压力相同的情况下,八孔喷嘴条件下单股射流的初始能量最小,六孔喷嘴次之,四孔喷嘴条件下单股射流的初始能量最大,这与图3中初始时刻的轴线扩展速度大小顺序相对应。随后,在射流扩展过程中,由于喷孔面积不变,喷孔个数的增加会导致喷孔间距变小,射流间的干涉作用增强,从而导致射流径向湍动能增强,轴向湍动能削弱,轴向扩展速度衰减迅速。图3中,六股射流和八股射流扩展后期出现轴向扩展速度曲线交叉现象,这是由于八孔喷嘴间隙进一步变小,八股射流较早的汇聚在一起,使多股射流协同在轴向扩展,以致后期八股射流轴向扩展速度比六股射流大。

通过处理多股贴壁燃气射流扩展序列图获得不同时刻的轴向位移数据,利用一阶指数衰减方程拟合出Taylor空腔轴向扩展位移随时间变化的规律。

$$x(t) = B_0 + B_1 e^{-t/B_2}$$

式中, $x(t)$ 为Taylor空腔的轴向扩展位移,mm; t 为时间,ms; B_0, B_1, B_2 为Taylor空腔轴向扩展位移随时间变化的拟合参数,如表1所示。

3.2.2 喷射压力的影响

图4为六孔喷嘴在破膜喷射压力分别为12,20,28 MPa条件下,六股贴壁燃气射流的轴向扩展位移和轴向扩展速度的曲线。从图4可以看出,随着燃气破膜喷射压力增加,燃气射流能量增强,其轴向扩展速

表 1 破膜压力 20 MPa 下 Taylor 空腔轴向位移随时间变化的拟合参数

Table 1 The fitting parameters for the axial displacement-time curves of Taylor cavity at blasting pressure of 20 MPa

number of orifices	B_0	B_1	B_2
4	272.2	-271.2	10.4
6	238.2	-237.4	9.5
8	289.3	-288	12.8

度更快,射流到达充液室顶部的时间更短。 $t=5$ ms 时刻,燃气破膜压力从 12 MPa 增加到 20 MPa,射流轴向扩展速度增加了 20.1%,从 20 MPa 增加到 28 MPa,增加了 19.9%,可见破膜喷射压力对轴向扩展速度的影响强烈,属于非线性关系。Taylor 空腔轴向位移随时间变化的拟合参数,如表 2 所示。

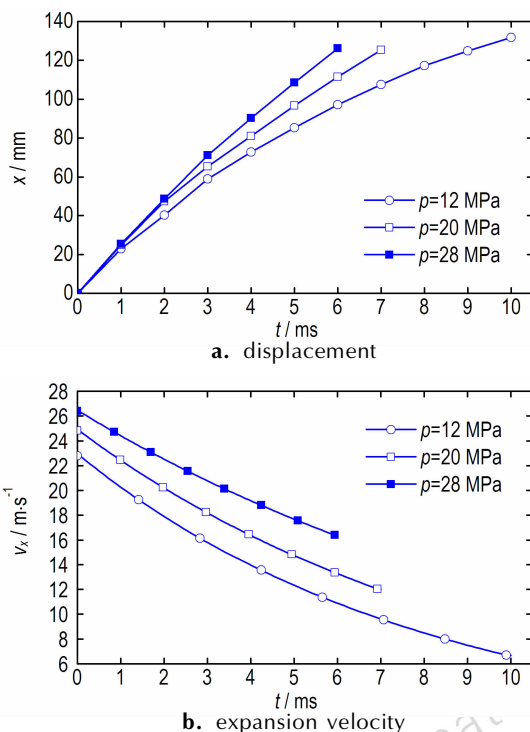


图 4 不同破膜喷射压力下六股贴壁射流轴向扩展位移及速度曲线

Fig. 4 The axial displacement and the axial expansion velocity curves of six wall jets under different pressures

表 2 六孔喷嘴下 Taylor 空腔轴向位移随时间变化的拟合参数

Table 2 The fitting parameters for the axial displacement-time curves of Taylor cavity with 6 orifices

blasting injection pressure/MPa	B_0	B_1	B_2
12	185.2	-184.7	8
20	238.2	-237.4	9.5
28	328.6	-328.6	12.4

4 结 论

(1) 圆柱型充液室内,多股贴壁燃气射流在液体工质中扩展时,由于气液相间较大的速度和密度差,Kelvin-Helmholtz 不稳定效应强烈。同时由于多股贴壁射流在扩展过程中发生相互卷吸和干涉作用,其边界湍流掺混现象显著。

(2) 周向均布多股贴壁燃气射流扩展形态随喷嘴个数变化而变化:喷嘴个数从四孔增加到八孔,相同时刻射流轴向扩展位移变小, $t=5$ ms 时刻,从四孔增加到六孔,其轴向扩展位移减少了 8.3%,从六孔增加到八孔,减少了 3.1%。初期射流轴向扩展速度随喷嘴个数增加而减小,射流扩展后期,八股射流平均轴向扩展速度大于六股射流。

(3) 周向均布多股贴壁燃气射流扩展形态随破膜喷射压力变化而变化:破膜喷射压力增大,射流轴向扩展速度更快,射流轴向扩展到达充液室顶部的时间变短。 $t=5$ ms 时刻,燃气破膜压力从 12 MPa 增加到 20 MPa,射流轴向扩展速度增加了 20.1%,从 20 MPa 增加到 28 MPa,增加了 19.9%。

(4) 破膜喷射压力在 12 MPa 到 28 MPa 范围内,多股贴壁燃气射流的轴向扩展位移-时间曲线均满足经验公式 $x(t) = B_0 + B_1 e^{-t/B_2}$

参考文献:

- [1] Loth E, Faeth G M. Structure of underexpanded round air jets submerged in water [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1989, 15(4): 589-603.
- [2] Loth E, Faeth G M. Structure of plane underexpanded air jets into water [J]. *Aiche (American Institute of Chemical Engineers) Journal*, 1990, 36(6): 818-826.
- [3] 施红辉,王柏懿,戴振卿.水下超声速气体射流的力学机制研究[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2010,40(01):92-100. SHI Hong-hui, WANG Bo-yi, DAI Zhen-qing. Research on the mechanical mechanism of underwater supersonic gas jets [J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2010, 40(01), 92-100.
- [4] 施红辉,郭强,王超,等.水下超音速气体射流胀鼓和回击的关联性研究[J].力学学报,2010,42(6):1206-1210. SHI Hong-hui, GUO Qiang, WANG Chao, et al. Experiments on the relationship between bulging and back attack of submerged supersonic gas jets [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2010, 42(6): 1206-1210.
- [5] 王柏懿,戴振卿,戚隆溪,等.水下超声速气体射流回击现象的实验研究[J].力学学报,2007,39(2):267-272. WANG Bo-yi, DAI Zhen-qing, QI Long-xi, et al. Experimental study on back attack phenomenon in underwater supersonic gas jets [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2007, 39(2): 267-272.

- [6] 汤龙生, 刘宇, 吴智锋, 等. 水下超声速燃气射流气泡的生长及压力波传播特性实验研究[J]. 推进技术, 2011, 32(3): 417-420.
TANG Long-sheng, LIU Yu, WU Zhi-feng, et al. Experimental study on characteristics of bubble growth and pressure wave propagation by supersonic gas jets under water [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2011, 32(3), 417-420.
- [7] Weiland C, Vlachos P P. Round gas jets submerged in water[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2013, 48: 46-57.
- [8] Voropayev S I, Sanchez X, Nath C, et al. Evolution of a confined turbulent jet in a long cylindrical cavity: homogeneous fluids[J]. *Physics of Fluids*, 2011, 23(11): 115106.
- [9] 曹嘉怡, 鲁传敬, 李杰, 等. 水下超声速燃气射流动力学特性研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2009, 24(5): 575-582.
CAO Jia-yi, LU Chuan-jin, LI Jie, et al. Research on dynamic characteristics of underwater supersonic gas jets[J]. *Journal of Hydrodynamics(Ser. A)*, 2009, 24(5): 575-582.
- [10] 甘晓松, 贾有军, 鲁传敬, 等. 水下燃气射流流场数值研究[J]. 固体火箭技术, 2009, 32(1): 23-26.
GAN Xiao-song, JIA You-jun, LU Chuan-jing, et al. Research on numerical simulation of combustion gas jet under water [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2009, 32(1), 23-26.
- [11] TANG Jia-ning, WANG Ning-fei, Shyy W. Flow structures of gaseous jets injected into water for underwater propulsion[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2011, 27(4): 461-472.
- [12] Rafferty I, Kaminski D. Non-dimensionalization and mixing quantification of laminar twin semi-confined jets[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2014, 48: 15-23.
- [13] YU Yong-gang, CHANG Xue-xia, ZHAO Na, et al. Study of bulk-loaded liquid propellant combustion propulsion processes with stepped-wall combustion chamber[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2011, 78(5): 051001-051008.
- [14] YU Yong-gang, YAN Shan-heng, LU Xin, et al. Study on expansion process and interaction of high speed twin combustion-gas jets in liquid[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2010, 77(5): 051404-1-7.
- [15] 齐丽婷, 余永刚, 彭志国, 等. 含能气体射流在液体工质中扩展的两维模型及数值模拟[J]. 含能材料, 2008, 16(2): 131-137.
QI Li-ting, YU Yong-gang, PENG Zhi-guo, et al. A 2-D model of energetic gas jet expansion process in liquid and numerical simulation[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(2), 131-137.
- [16] 莽珊珊, 余永刚. 高压热气流与整装式液体工质相互作用的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(12): 2017-2020.
MANG Shan-shan, YU Yong-gang. Experimental study on the interaction of high-pressure hot gas jet with bulk-loaded liquid[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009, 30(12): 2017-2020.
- [17] 莽珊珊, 余永刚. 高压燃气射流在整装液体中扩展过程的实验和数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2011(3): 300-305.
MANG Shan-shan, YU Yong-gang. Experiment and numerical simulation for high pressure combustible gas jet expansion process in a bulk-loaded liquid[J]. *Explosion and Shock waves*, 2011, 31(3), 300-305.
- [18] XUE Xiao-chun, YU Yong-gang, ZHANG Qi. Expansion characteristics of twin combustion gas jets with high pressure in cylindrical filling liquid chamber [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2013(5): 763-771.
- [19] XUE Xiao-chun, YU Yong-gang, ZHANG Qi. Study on expansion characteristic of twin combustion gas jets in five-stage cylindrical stepped-wall observation chamber[J]. *Flow Turbulence and Combustion*, 2013, 91(1): 139-155.
- [20] 董志勇. 射流力学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
DONG Zhi-yong. Jet mechanics[M]. Bei-jing: Science Press, 2005.

Experimental Study on Expansion Characteristics of Multiple Wall Combustion-gas Jets in Cylindrical Filling Liquid Chamber

HU Zhi-tao¹, YU Yong-gang¹, CAO Yong-jie²

(1. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Northwest Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Xiayang 712099, China)

Abstract: To explore the expansion characteristics of multiple wall combustion-gas jets which uniformly distributed along the circumferential direction under high temperature and high pressure in confined liquid working medium, the combustion gas generator and cylindrical filling liquid chamber were designed. The expansion processes of multiple wall jets were recorded by high-speed digital photographic system. The average axial displacements of multiple wall jets at different time were achieved by disposing the expansion sequence diagrams. It shows that the irregular interface induced by the Kelvin-Helmholtz instability exists in the entire jets expansion process. The effects of the number of orifices and the blasting injection pressure on expansion characteristics of multiple wall jets are discussed. The experimental results indicate that, as the number of orifices increase from four to eight, the axial expansion displacements of multiple jets decrease, at $t=5$ ms, the number of orifices increase from four to six, the axial expansion displacements decrease 8.3 percent, and it decrease 3.1 percent when the number of orifices increase from six to eight. The larger the blasting injection pressure, the greater the axial expansion velocity, the earlier jets get to the top of liquid filling chamber, at $t=5$ ms, the blasting injection pressure increase from 12 MPa to 20 MPa, the axial expansion velocity increase 20.1 percent, and it increase 19.9 percent when the blasting injection pressure increase from 20 MPa to 28 MPa.

Key words: wall jet; expansion characteristics; turbulent mixing; Kelvin-Helmholtz instability

CLC number: TJ55; O358

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.02.012