DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0465-07

圆柱形充液室中 4 股贴壁燃气射流扩展特性的实验研究*

胡志涛,余永刚
(南京理工大学能源与动力工程学院,江苏 南京 210094)

摘要: 为了探索高温高压周向均布 4 股贴壁燃气射流在受限空间中的扩展特性,设计了贴壁燃气射流在圆柱形充液室内扩展的实验装置,借助数字高速录像系统,观察了 4 股贴壁燃气射流在充液室中的扩展过程,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;通过处理拍摄记录的射流扩展序列图,获得不同时刻射流扩展的轴向和径向位移;对比了不同破膜喷射压力和喷孔结构参数对 4 股贴壁燃气射流扩展过程的影响。实验结果表明:喷孔面积越大,贴壁射流初期轴向扩展速度越大,但由于径向扩展达到交汇的时间较早,湍流掺混和干涉强烈,衰减也越快;破膜喷射压力越高,射流径向扩展到达交汇的时间越短;破膜喷射压力从 12 MPa 升高到 20 MPa,射流轴向扩展速度大幅增加,气液湍流掺混效应增强。

关键词: 流体力学;扩展特性;湍流掺混;燃气射流;气液相互作用
中图分类号: O358 **国标学科代码**: 13025 **文献标志码**: A

潜艇作为武器发射的水下平台,具有机动灵活和隐蔽性好等优点,极大地提升了海上武器系统的作战效能。其潜射导弹水下发射过程中,喷出的高温高压燃气与周围水介质发生强烈的相互作用,其间伴随一系列复杂的物理现象,如激波、气水掺混、换热、相变等。对水下自由射流的扩展特性已进行了相关研究。E. Loth 等[1-2]通过大量实验获得水下自由燃气射流中心轴线上压力的时空分布特性,并数值研究了其多相流动过程。Chen Yongsheng 等[3-4]、甘晓松等[5]和 Tang Jianing 等[6]针对水下燃气射流问题,分别采用不同的数值方法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。施红辉等[7]对高压气体射流水下自由扩展过程进行了可视化实验研究,并对射流压力场进行了详细的测量,发现超声速气体射流扩展过程的流体振荡与射流气相介质中的激波反馈现象有关。汤龙生等[8]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,探讨了压力波在水介质中的衰减规律。C. Weiland 等[9]利用高速录像系统记录了不同马赫数下水下自由燃气射流的扩展过程,发现了回击现象,认为该回击现象是一种激波反馈现象。

针对全淹没水下火炮发射方式,考虑到水下发射过程中,由于身管内充满水,弹前有很长一段水柱,弹前阻力与空气相比增大了 1 000 倍,导致水下火炮内弹道特性发生突变,膛压陡增,严重时会出现膛炸事故。本文中提出一种新方法,即:在弹丸运动的同时,通过发射身管内壁表面喷出多股燃气射流,实时排出身管中弹前水柱。这属于圆管内受限射流与液体的相互作用问题,对该问题学者们已进行了大量的研究。S. I. Voropayev 等[10]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。D. Liberzon 等[11]针对受限射流湍流扩散过程中出现的断裂现象,通过实验研究验证了受限空间存在反向压力梯度,最终导致断裂发生,并根据数值模拟中压力分布特性的分析补充说明了这一结论。Yu Yonggang 等[12-13]、齐丽婷等[14]和莽珊珊等[15-16]针对单股燃气射流与液体工质相互作用的特性进行了实验和数值研究。Xue Xiaochun 等[17-18]针对双股射流在圆柱渐扩形充液室中的扩展过程进行实验和数值研究。

* **收稿日期**: 2014-12-24; **修回日期**: 2015-03-12
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)
第一作者: 胡志涛(1990—),男,博士研究生,starry_dust@163.com。

以上研究都以单股或双股射流在自由流场或充液室中扩展为研究对象，本文中以全淹没式水下火炮发射为背景，针对周向均布 4 股贴壁燃气射流在圆柱形观察室中的扩展特性进行实验研究，重点讨论不同喷孔结构参数和破膜喷射压力对 4 股贴壁燃气射流在液体工质中扩展形态的影响。

1 实验装置与原理

实验装置如图 1 所示，主要由高压燃烧室、周向均布 4 孔喷嘴和圆柱形观察室组成。图 1 右侧为 *A-A* 剖视图，周列 4 个半圆为狭缝形贴壁喷孔。观察室为∅55 mm×150 mm 的圆柱型结构，由透明的有机玻璃制成以便于观测，内部充满液体，观察室的底部连接燃气发生器。

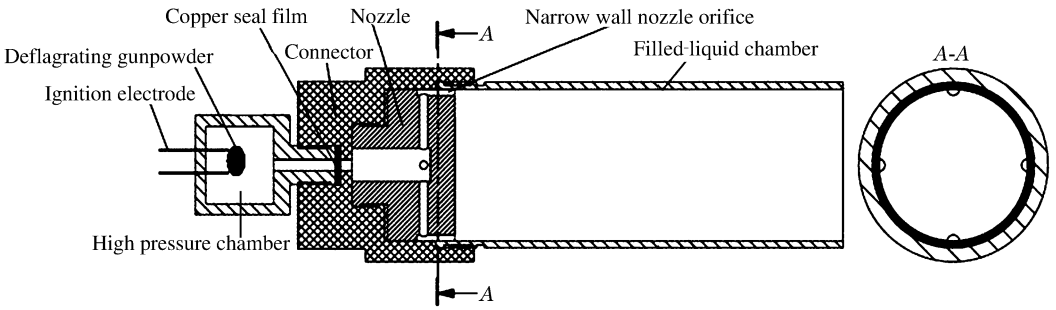


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Sketch of experimental setup

其工作原理是：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，其压力迅速升高，至一定阈值，冲破紫铜密封膜片，高温高压的燃气经周向均布 4 孔喷嘴形成 4 股贴壁燃气射流，喷入充满液体工质的透明观察室中，燃气射流在喷管出口处为声速流，进入充液室之后，很快衰减，变成亚声速流。4 股贴壁燃气射流在液体工质中相互作用以及射流扩展过程由数字高速录像系统记录。为了减少重力的影响，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入，观察室上端与大气相连。实验中选择的液体工质为水。

图 2 为实验系统光路图。2 平面镜呈 45°夹角放置，分别捕捉 4 股燃气射流正面和侧面扩展过程。高速摄影仪对焦平面镜，拍摄记录镜中图像。

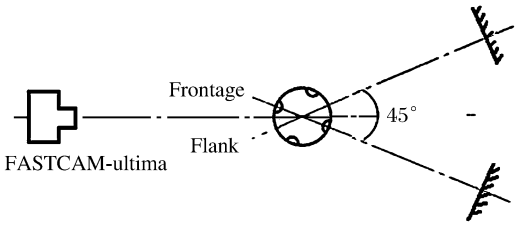


图 2 实验系统光路图

Fig. 2 Optical pathway sketch of experimental system

实验研究了破膜喷射压力、喷孔形状以及喷孔面积对 4 股贴壁燃气射流扩展特性的影响。其中破膜喷射压力是通过改变装药量和紫铜膜片的厚度实现的。通过更换喷嘴，实现对喷孔形状和面积 S 的改变。喷孔的结构参数如表 1 所示。

表 1 喷孔的结构参数

Table 1 Parameters of nozzle structure

类型	形状	S
A	半圆形	8 mm^2
B	长方形	2 mm×4 mm
C	长方形	3 mm×4 mm

2 实验结果及分析

2.1 周向均布 4 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 A 型喷孔为例，说明破膜喷射压力为 12 MPa 时，周向均布 4 股贴壁燃气射流（温度 2 300～2 400 K）在圆柱形充液室中扩展的特性，图 3 显示了其系列发展过程，实验中高速录像拍摄频率为 4 000 fps。

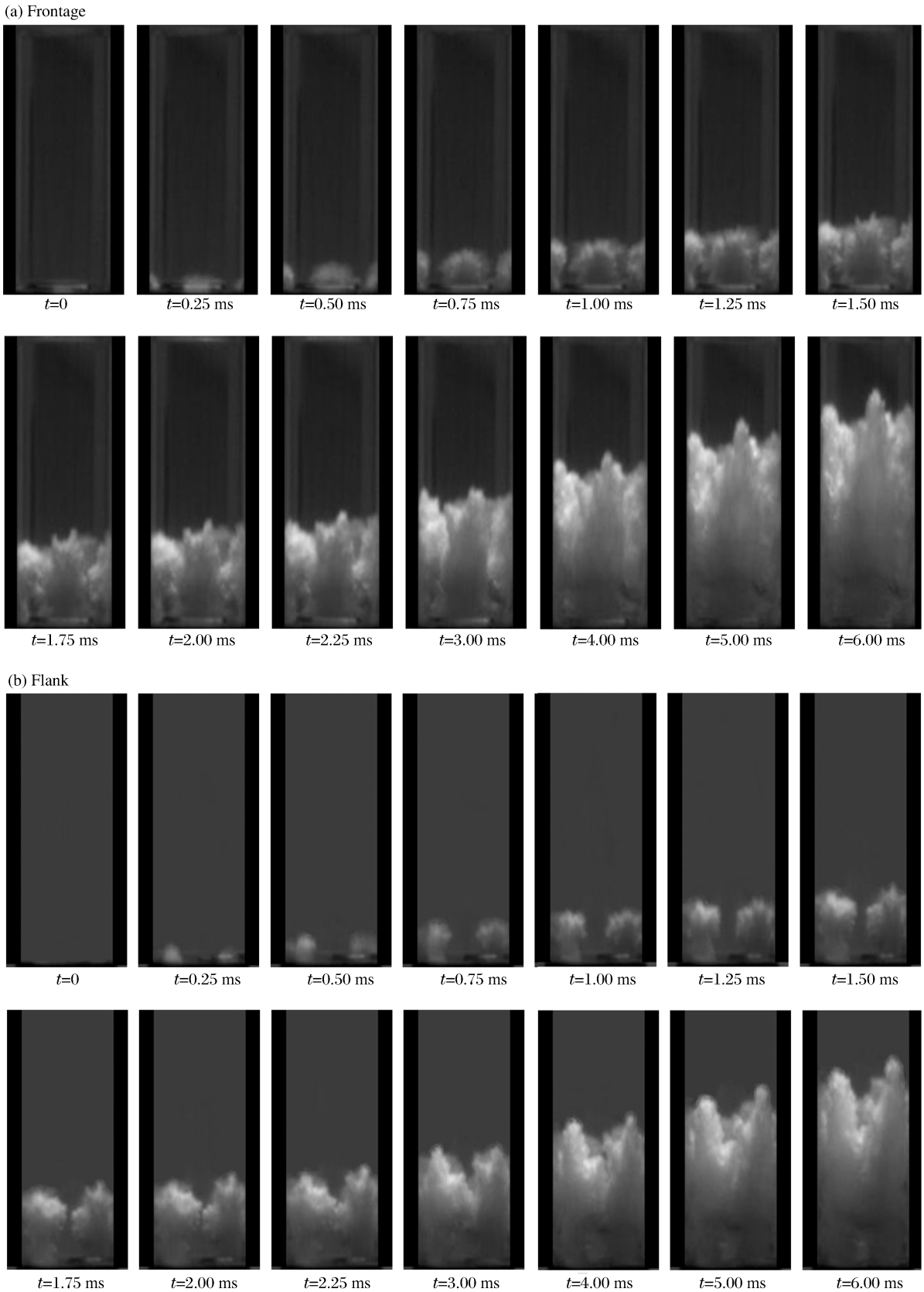


图 3　A 型喷孔 4 股贴壁燃气射流在圆柱形充液室中扩展的序列过程

Fig. 3　Sequence of annular four wall gas jets through A-type nozzles expanding in the liquid-filled cylindrical chamber

由图 3 可以看出，当 4 股贴壁燃气射流从狭缝喷孔刚喷入液体工质时，即在 $t=0.50$ ms 时，4 股贴壁射流明显分开，同时可以看到射流边界很不规则，呈锯齿形，表明射流扩展初期已经呈现 Kelvin-Helmholtz 不稳定效应。之后随着时间的推移，射流之间发生相互卷吸和干涉，边界湍流掺混明显。当 $t=2.25$ ms 时，4 股贴壁射流中心已经开始交汇，贴壁射流的内侧边缘出现明显的相互干涉，射流的头部也由于相互吸引而呈现弯曲靠近的趋势。当 $t=4.00$ ms 时，4 股射流中心已经汇聚为一股。同时可以看到，贴壁射流扩展后期充液室底部还残存大量的液体工质，残留的液体只能通过 Kelvin-Helmholtz 不稳定效应与燃气发生相互作用，产生强烈的湍流掺混和卷吸现象。从整个序列图中可以看出，在 4 股贴壁射流扩展的整个过程中，4 股贴壁射流基本是对称的。

2.2 不同参数对 4 股贴壁燃气射流在液体工质中扩展特性的影响

2.2.1 喷孔形状的影响

通过射流扩展序列照片，采用 Photoshop 软件可以读出照片中 4 股 Taylor 空腔的轴向和径向扩展位移，并取其平均值作为相应的扩展位移。图 4 为相同破膜喷射压力 20 MPa 和喷孔面积 8 mm^2，仅改变喷孔形状，分别使用∅4.5 mm 的半圆孔和 2 mm×4 mm 的矩形喷孔，4 股贴壁燃气射流的轴向和径向扩展位移曲线图。

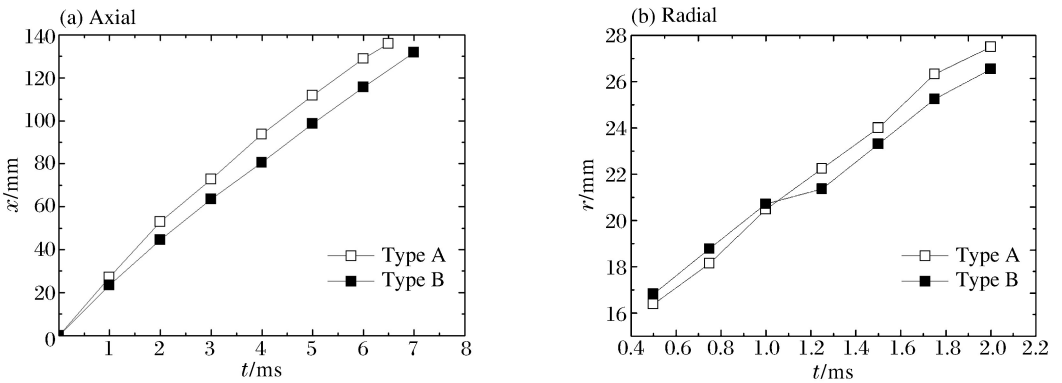


图 4 不同类型喷孔射流的轴向和径向扩展位移曲线

Fig. 4 Axial and radial displacement curves of jets under different nozzle shapes

由图 4(a)可见，在整个扩展过程中，相同时间内 A 型喷孔射流的轴向扩展位移皆略大于 B 型；同时从径向扩展位移曲线图 4(b)可以看到，扩展前期 B 型喷孔射流径向扩展位移略大于 A 型，之后径向扩展变缓，后期射流径向扩展位移小于 A 型。这跟 C. K. W. Tam[19] 对矩形气体射流的理论研究相符，即高度局部的角落不稳定性模式会迅速导致显著的气液掺混，从而导致径向扩展速度迅速下降。根据图像处理获得的数据点，利用一阶指数衰减方程拟合出 Taylor 空腔轴向位移 x 随时间 t 变化的规律：

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

式中：B_0、B_1 和 B_2 为实验常数。Taylor 空腔轴向位移随时间变化曲线的拟合参数，如表 2 所示，p 为破膜喷射压力。由于 Taylor 空腔径向扩展时间短，取得的数据点有限，此处不进行拟合处理。

表 2 Taylor 空腔轴向位移随时间变化曲线的拟合参数

Table 2 Fitted parameters for axial displacement-time curves of Taylor cavity

p/MPa	喷孔类型	B_0/mm	B_1/mm	B_2/ms
20	A	286.4	−286.2	10.1
20	B	397.3	−396.5	17.5

2.2.2 喷孔面积的影响

图 5 为相同破膜喷射压力 20 MPa 和相同矩形喷孔形状，仅改变喷孔面积，分别使用 B、C 型喷孔，4 股贴壁燃气射流的轴向和径向扩展位移曲线图以及根据轴向扩展位移处理所得轴向扩展速度曲线图。

由图 5 可见，喷孔面积增大，使射流动量增大，相同时间内 C 型喷孔射流轴向扩展位移比 B 型喷孔的大，同时 C 型喷孔射流径向扩展到达交汇更早。由于 4 股射流交汇后，4 股射流间的干涉以及射流与

水之间的卷吸作用增强，削弱了 Taylor 空腔轴向湍动能，从而使轴向扩展速度衰减。从图 5(c)可看出，由于 C 型喷孔射流径向扩展交汇较早，加强了卷吸与干涉作用，使轴向扩展速度衰减更快，在射流扩展后期甚至小于 B 型喷孔射流轴向扩展速度。Taylor 空腔轴向位移随时间变化的拟合参见表 3。

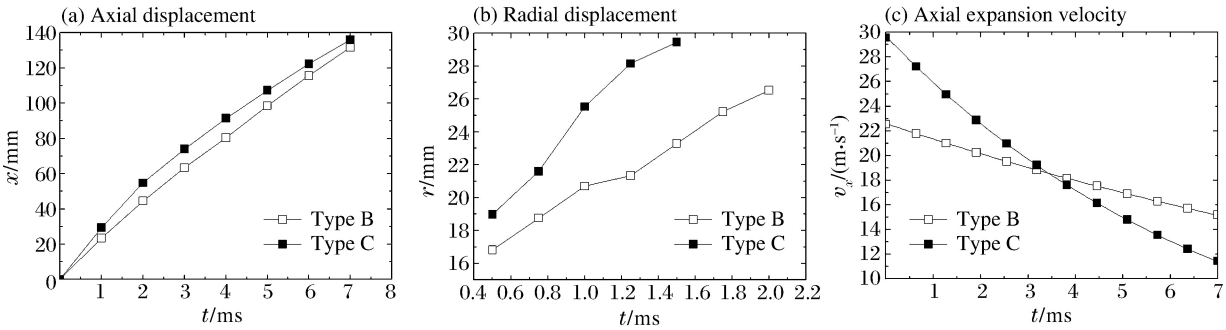


图 5　B、C 型喷孔射流的轴向和径向扩展位移以及轴向扩展速度曲线

Fig. 5　The axial and radial displacement, and axial expansion velocity curves under different nozzle areas

表 3　Taylor 空腔轴向位移随时间变化曲线的拟合参数

Table 3　Fitted parameters for axial displacement-time curves of Taylor cavity

p/MPa	喷孔类型	B_0/mm	B_1/mm	B_2/ms
20	B	397.3	−396.5	17.5
20	C	218.1	−217.1	7.3

2.2.3　破膜喷射压力的影响

图 6 为针对 A 型喷孔，在破膜喷射压力分别为 12 和 20 MPa 的条件下，4 股贴壁燃气射流的轴向和径向的扩展位移曲线图以及不同破膜喷射压力下轴向扩展速度曲线图。

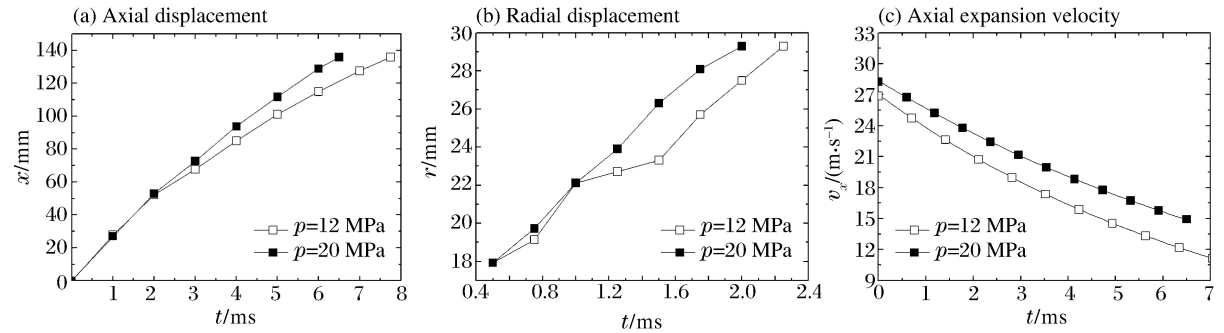


图 6　不同破膜喷射压力下 4 股贴壁燃气射流的轴向、径向扩展位移以及轴向扩展速度曲线

Fig. 6　Axial and radial displacement, and axial expansion velocity curves of jets at different blasting injection pressures

由图 6(a)可以观察到，增加燃气的破膜喷射压力，4 股贴壁射流的射流强度增大，射流轴向扩展到达充液室顶部的时间变短。同时从径向扩展位移曲线图 6(b)可以看到，压力越高，相同时间内的径向扩展位移越大，4 股贴壁射流径向扩展到达交汇的时间也越短。从图 6(c)可以看出，破膜喷射压力从 12 MPa 升高到 20 MPa，射流的轴向扩展速度大幅度提高。Taylor 空腔轴向位移随时间变化曲线的拟合参数，如表 4 所示。

表 4　Taylor 空腔轴向位移随时间变化曲线的拟合参数

Table 4　Fitted parameters for axial displacement-time curves of Taylor cavity

p/MPa	喷孔类型	B_0/mm	B_1/mm	B_2/ms
10	A	216.6	−215.1	8.0
20	A	286.4	−286.2	10.1

3 结 论

(1)圆柱型充液室内,4 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差,Kelvin-Helmholtz 不稳定效应强烈。同时由于 4 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)4 股贴壁燃气射流的扩展形态与喷孔结构尺寸有关。矩形喷孔射流相较于半圆形喷孔射流,其高度局部的角落不稳定性模式会迅速导致显著的气液掺混,从而导致径向扩展速度迅速下降;喷孔面积越大,贴壁射流初期轴向扩展速度越大,同时由于湍流掺混和干涉的影响,衰减也越快。

(3)4 股贴壁燃气射流扩展形态随着破膜喷射压力的变化而变化,破膜喷射压力从 12 MPa 升高到 20 MPa,4 股贴壁射流径向扩展到达交汇的时间变短,同时射流轴向扩展速度大幅增加,气液湍流掺混效应增强。

(4)破膜喷射压力在 12～20 MPa 的范围内,半圆形和矩形喷孔射流的轴向扩展位移-时间曲线均满足经验公式 $x(t)=B_0+B_1\mathrm{e}^{-t/B_2}$。

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 Journal, 1990,36(6):818-826.

[3] Chen Yongsheng, Liu Hua. Mathematical modeling of fluid flows for underwater missile launch[J]. Journal of Hydrodynamics, 2006,18(3):492-497.

[4] Chen Yongsheng, Liu Hua. A coupling model of water flows and gas flows in exhausted gas bubble on missile launched underwater[J]. Journal of Hydrodynamics, 2007,19(4):403-411.

[5] 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 Xiaosong, Jia Youjun, Lu Chuanjing, et al. Research on numerical simulation of combustion gas jet under water[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2009,32(1):23-26.

[6] Tang Jianing, Wang Ningfei, Shyy W. Flow structures of gaseous jets injected into water for underwater propulsion [J]. Acta Mechanica Sinica, 2011,27(4):461-472.

[7] 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(1):92-100.
Shi Honghui, Wang Boyi, Dai Zhenqing. Research on the mechanical mechanism of underwater supersonic gas jets [J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2010,40(1):92-100.

[8] 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 Longsheng, Liu Yu, Wu Zhifeng, 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.

[9] Weiland C, Vlachos P P. Round gas jets submerged in water[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2013, 48:46-57.

[10] 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.

[11] Liberzon D, Fernando H J S. Pressure distribution in confined jet flow[J]. Journal of Fluids Engineering, 2014, 136(3):1-4.

[12] Yu Yonggang, Chang Xuexia, 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):748-760.

[13] Yu Yonggang, Yan Shanheng, 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):769-775.

[14] 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 Liting, Yu Yonggang, Peng Zhiguo, et al. A 2-D model of energetic gas jet expansion process in liquid and numerical simulation[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008,16(2):131-137.

[15] 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 Shanshan, Yu Yonggang. 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.

[16] 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,2011,31(3):300-305.

Mang Shanshan, Yu Yonggang. 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.

[17] Xue Xiaochun, Yu Yonggang, 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.

[18] Xue Xiaochun, Yu Yonggang, 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.

[19] Tam C K W, Thies A T. Instability of rectangular jets[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1993,248:425-448.

Experimental study on expansion characteristics of annular four wall combustion-gas jets in a liquid-filled cylindrical chamber

Hu Zhitao, Yu Yonggang

(*School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*)

Abstract: The combustion-gas generator and liquid-filled cylindrical chamber are designed to study the expansion characteristics of annular four wall combustion-gas jets under high temperature and high pressure in a confined space. The expansion processes of Taylor cavities formed by combustion-gas jets are observed by means of a high-speed digital photographic system. It is shown that the irregular interface induced by the Kelvin-Helmholtz instability exists in the entire expansion process of the jets. The axial and radial displacements at different times are obtained from a series of expansion photographs of gas jets. The effects of the blasting injection pressure and the parameters of the nozzle structure on the expansion characteristics of the annular four wall combustion-gas jets are discussed. The experimental results indicate that, the larger the nozzle orifice area, the greater the axial expansion velocity of the wall jets in the prime stage. Meanwhile, the axial expansion velocity attenuates more quickly due to the effect of turbulent mixing and interference. The higher the blasting injection pressure, the earlier the four jets begin converging. Moreover, the axial expansion velocity of the wall jet increases substantially and the gas-liquid turbulent mixing effect becomes much stronger when the blasting injection pressure increases from 12 MPa to 20 MPa.

Key words: fluid mechanics; expansion characteristics; turbulent mixing; combustion gas jet; gas-liquid interaction

(责任编辑　张凌云)