

水下超声速气体向上喷射时的动量射流特性研究

施红辉, 陈 帅, 董若凌, 章利特, 郭 强, 贾会霞, 王 超

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘 要: 针对水下垂直向上喷射的气体射流在潜射导弹破水发射装置(WPML)中的应用,对其气体射流的基础理论及关键技术进行了实验研究。实验得出气体射流时动量射流段的射流直径是以近线性速率增大的结论,并分析了动量射流长度与斯特鲁哈数之间的某种相关性。结果指出,随着射流出口速度的增加,可以减小斯特鲁哈数,射流的周期不稳定性明显减弱,得到稳定且长度较长的射流,对 WPML 的设计和应用具有参考作用。

关键词: 水下超声速气体射流; 动量射流; 斯特鲁哈数; WPML

中图分类号: O358 **文献标识码:** A

0 引 言

水下高速气体射流在水下运载器喷气推进领域中有重要应用。早在 20 世纪 60 年代,美国就率先开展了潜艇导弹水下点火的课题研究,运载器无动力发射的巡航导弹和直接水下点火发射技术装备于战略武器。近年来,Weiland 等^[1]率先提出了潜射导弹破水发射装置(water piercing missile launcher, WPML)应用于潜艇新一代导弹发射平台的概念,即利用火箭动力喷嘴形成气体射流破水,气体射流冲破洋面后形成气体通道,使导弹在射流形成的气体通道中飞行并冲出洋面,装置示意图见图 1。潜射导弹破水发射技术涉及到水下气体射流,是高速水下气体射流在实际中运用的典型。水下高速气体射流是涉及气液界面不稳定性及流动不稳定性的复杂流动,相关的基础研究有,王柏懿^[2-4]和戴振卿^[3]等人通过流场可视化与压力测量的同步校验,证实了喷嘴端面处回击事件与流场气相区中压力脉动之间的相关性,并对水下超声速气体射流的力学机制进行了研究,分别测量了喷嘴下游、喷嘴附近及喷嘴上游的压力,并将回击现象定义为激波反馈。随后,施红辉等^[5]指出超音速气体射流沿轴线方向

射流包括动量射流、浮力射流与羽流三部分,在喷嘴附近区域激波反馈发生之前总是伴随着多次射流胀鼓的发生,郭强^[6]接着对胀鼓和激波反馈之间的关联性进行了探讨。此外,Hoefele^[7]指出修正弗劳德数对于射流稳定性的影响,郭强等^[8-9]用实验数据探讨了修正弗劳德数在一定程度上对于射流稳定性的影响,指出修正弗劳德数值越大,射流连续性和整体稳定性越好,其中发现的准回击现象更好地说明了动量射流的作用,文献^[4]强调了斯特鲁哈数是描述流场不稳定性的重要参数,关于气体射流基础理论研究仍有待继续发展与完善。

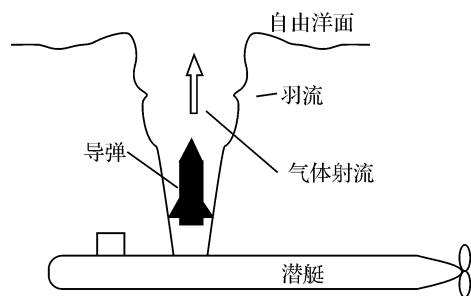


图 1 潜射导弹破水发射装置示意图

1 实验系统

水下垂直向上气体射流的实验系统装置见图 2,

水槽由透明的有机玻璃制成,其尺寸为长1 500 mm、宽 50 mm、高 1 100 mm。水槽的水处于室温室压的自由液面状态,实验时的注水高度 H (自由液面到喷管出口的距离) 为 750 mm。实验采用拉伐尔喷嘴,喷嘴的出口截面直径为 4 mm,相应的喉部截面直径为 2 mm。喷嘴的设计马赫数分别为 2.94。实验时,喷嘴分别在不同工况下进行实验,高速摄影仪和数码相机拍摄射流形貌,对图片进行分析、统计处理后得到相关的实验数据。

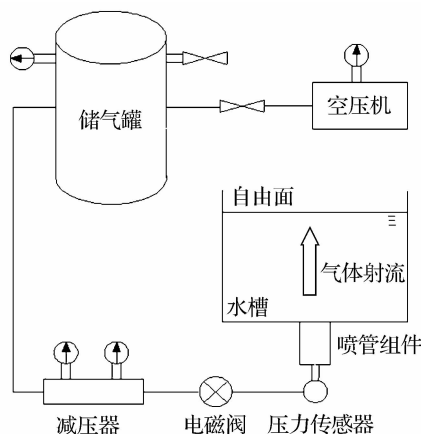


图2 水下垂直向上气体射流实验系统

2 实验结果与讨论

水下高速气体射流可基本分为初始段的动量射流、中段的紊流浮射流和后段的羽流^[5]。紊流浮射流是介于动量射流与浮力射流之间的一种射流形态,它既受射流初始动量的作用,同时又受周围环境浮力的影响。本文对动量射流段的情况以及对动量射流有影响的周期不稳定性作了探讨。

2.1 动量射流分析

喷嘴在各个工况下的典型射流形貌见图 3(a)~图 3(e)。由图 3 可以清晰看到,喷嘴在不同工况下射流中出现形态不同的 3 部分,包括最下面的稳定垂直向上的动量射流,夹杂动量射流与浮力射流的中间过渡段和最上面完全由浮力主导的羽流。动量射流段是气体从喷嘴高速喷出,具有很高的射流初始动量,因而这一段的射流呈现的是稳定的垂直向上的射流形态。文献[4]指出射流直径是以近线性速率增大的,在动量射流这一段中,因为超声速气体射流包含的动量很大,其雷诺数对射流的影响可以忽略不计,随着射流长度的变大,射流直径也是呈现线性增加的,即任意的 x 和相对应的 D 值(x 是动量射流射流长度任意取值, D 是相对应的射流通道直径,见图 4(a)),两者的比值是呈线性关系的。

现在以驻室压力 $P_{04}=2.1$ MPa 工况下的动量射流段进行测量,得到实验数据(作无量纲化,其中 L 为动量射流段长度, d 为喷嘴内径)后作图分析,如图 4(b)所示。测量的结果表明,在动量射流段,射流直径随着射流长度的变化呈线性关系。

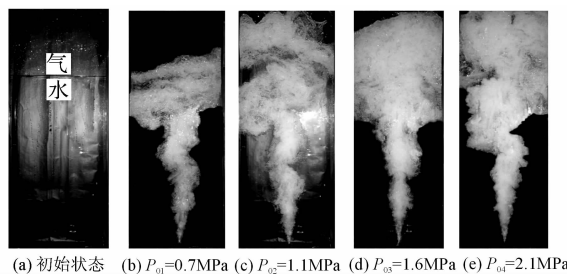
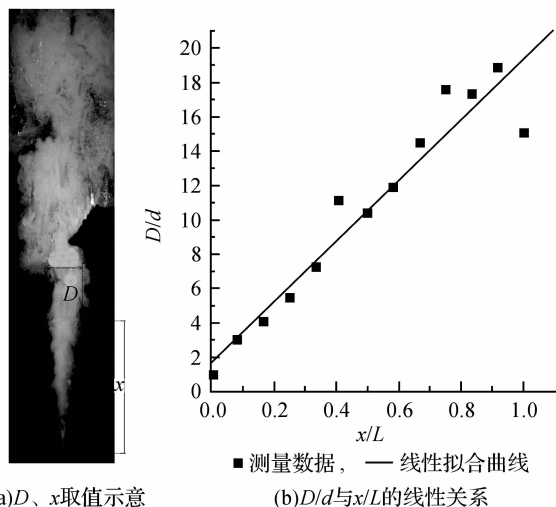


图3 喷嘴在不同工况下的射流形貌



(a) D 、 x 取值示意

(b) D/d 与 x/L 的线性关系

图4 射流通径直径与射流长度的无量纲线性关系

2.2 动量射流与周期不稳定性的相关探讨

依据 WPML 设计预想可知,最需要得到的是气体射流在液体中保持射流状态下的射流穿透深度,即射流近场区中完全保持稳定且长度较长的射流区域长度。实验中的射流是在喷嘴静止下喷射的,不同于潜射导弹的发射,潜艇移动会使气体射流弯曲,但静止状态下的射流其主体段往往也是不稳定的,会出现随机偏摆的情况。因此,不考虑这些因素的影响,能够获得稳定且长度较长的射流无疑就是动量射流段。斯特鲁哈数 St 是表征周期不稳定性的参数,定义是 $St = \frac{fD}{V_j}$, V_j 为射流速度, D 是射流直径或喷嘴出口直径, f 是频率^[4],显然,对斯特鲁哈数 St 公式中的 3 个参数的选取,频率没有给出具体的选取依据。但同时,射流胀鼓与回击是存在某些关联性的,高速摄影仪拍摄的结果见图 5(a)~图 5(e),图中可以明显看到胀鼓(如图 5(b)、(e)、

(g))与回击现象(图 5(l))的存在,由研究得知,胀鼓和回击均是由射流内部压力振荡引发,回击发生之前总是伴随着多次胀鼓事件的出现,胀鼓是回击前能量聚集的前征和表现,当胀鼓的振荡即能量聚集到一定程度后就发生回击,于是,在频率参数的选取上可取为回击频率值。

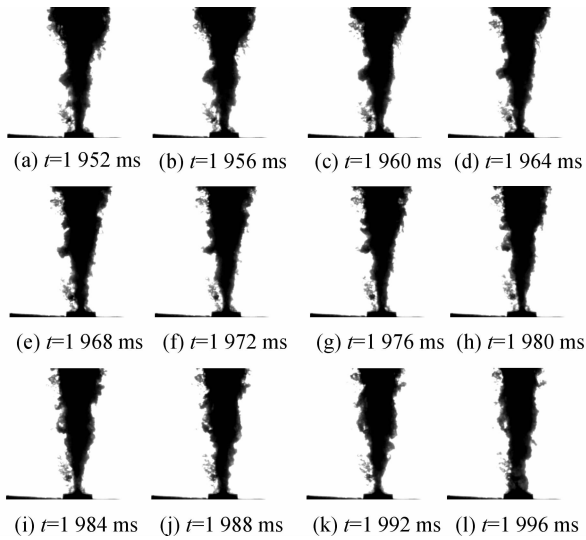


图 5 驻室压力 $P=0.7\text{ MPa}$ 工况不同时间下的典型气体喷射射流形貌

动量射流与斯特鲁哈数 St 之间的相关实验数据统计见表 1。

表 1 实验数据统计

实验 工况	驻室压力 P/MPa	射流出口 速度 v/ms^{-1}	回击频率 f/Hz	出口 直径 d/mm	$St/10^{-5}$	L/d
工况 1	0.7	397.9	10.35	4	10.40	33.50
工况 2	1.0	511.9	8.26	4	6.45	48.50
工况 3	1.6	589.4	5.80	4	3.94	73.25
工况 4	2.1	640.0	3.87	4	2.42	98.75

由图 6 可知,随着 St 值的逐渐减小,动量射流值越大,就是说越能得到稳定的长度较长的射流。图 3 流场可视化实验结果验证了这一结论。对于回击

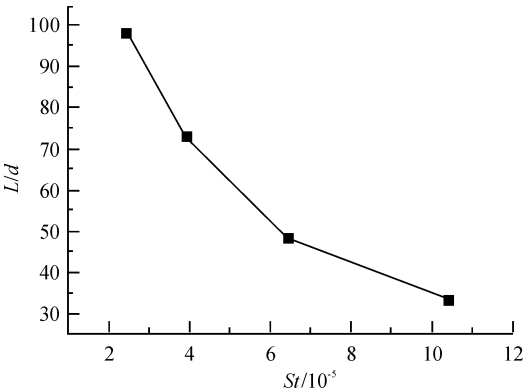


图 6 动量射流长度 L 与周期不稳定性参数 St 之间的变化趋势

频率的统计分析知,随着驻室压力的增加,出口速度变大,回击频率也越小,另一方面,斯特鲁哈数的定义是 $St = \frac{fd}{V}$,随着出口速度的增加,回击频率与出口速度都对减小斯特鲁哈数的值呈正相关,因此,增大射流出口速度,回击频率 f 和斯特鲁哈数 St 的改变对射流是力的叠加作用影响,也就可以得到长度较长的稳定射流。在实验中可控的是射流出口速度(通过改变驻室压力值的大小),在其他条件不变的情况下,增加射流出口速度能得到长度较长的稳定射流,即增大动量射流长度,故 WPML 装置可以增加水下发射深度;提高射流出口速度,气体在喷嘴中的流动越接近于喷嘴设计工况,气体射流越不易发生激波反馈现象,回击频率的降低和出口速度的增大势必使得修正斯特鲁哈数骤减,使得射流更加稳定。

3 结 论

用高速摄影仪和数码相机拍摄了水下垂直向上喷射的气体射流形貌,对射流形貌图进行分析处理,得到实验统计数据,证实了动量射流段的射流通道直径与射流长度之间的线性关系,分析了动量射流长度与斯特鲁哈数之间的某种相关性,指出增大射流出口速度能获得长度较长和稳定的射流,也为 WPML 的设计与实践提供了参考。同时,通过对动量射流的定量刻画,也加深对水下超声速气体射流的理解。

参考文献:

[1] Chris J W, Pavlos P V, Ion J Y. Concept analysis and laboratory observations on a water piercing missile launcher[J]. Ocean Engineering, 2010, 37: 959-965.

[2] 王柏懿,戴振卿,戚隆溪,等. 水下超音速气体射流回击现象的实验研究[J]. 力学学报, 2007, 39: 267-272.

[3] Dai Zhenqing, Wang Boyi, Qi Longxi, et al. Experimental study on hydrodynamic behaviors of high-speed gas jets in still water[J]. Acta Mechanica Sinica, 2006, 22: 443-448.

[4] Shi Honghui, Wang Boyi, Dai Zhenqing. Research on the mechanics of underwater supersonic gas jets[J]. Science China Phys Mech and Astron. 2010, 53(3): 527-535.

[5] Shi Honghui, Guo Qiang, Wang Chao, et al. Oscillation flow induced by underwater supersonic gas jets[J]. Shock Waves, 2010, 20: 347-352.

[6] 施红辉,郭 强,王 超,等. 水下超音速气体射流鼓

胀和回击的关联性研究[J]. 力学学报, 2010, 42(6): 1206-1210.

[7] Hoefele E O, Brimacombe J K. Flow regimes in submerged gas injection[J]. Metallurgical Transactions B, 1979, 10B: 631-648.

[8] 郭强, 王晓刚, 施红辉, 等. 近二维水下高速气体射流动态不稳定性的实验研究[C]//吴有生. 第 9 届全国水动力学学术会议暨第 22 届全国水动力学研讨会文集. 北京: 海洋出版社, 2009: 372-381.

[9] 郭强, 施红辉, 王超, 等. 准二维水下超声速垂直过膨胀射流研究[J]. 实验流体力学, 2010, 24(4): 6-11.

Investigation on the Momentum Jet during Upward High-Speed Underwater Gas Jets Injection

SHI Hong-hui, CHEN Shuai, DONG Ruo-ling, ZHANG Li-te, GUO Qiang, JIA Hui-xia, WANG Chao
(School of Machinery and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The paper presents an experimental research on high-speed underwater gas jets injection techniques, which are applied in water piercing missile launcher (or WPML). Through analyzing the experimental data acquired, the authors find that the diameter of gas flow passage increases in linear rate in the momentum jet section. Also the authors analyze the relation about the length of momentum jet with Strouhal number. The research result indicates that increasing the jet exit velocity can reduce Strouhal number and weaken the periodic unstability, and finally steady and long jet may be obtain. The characteristic study of momentum jet may be helpful to the design and application of the WPML.

Key words: high-speed underwater gas jets; momentum jet; Strouhal number; WPML

(责任编辑: 杨元兆)