

# 充液腔体中气体射流冲击压力的实验测量<sup>1)</sup>

刘 明\* 王柏懿<sup>\*,2)</sup> 戚隆溪\* 施红辉<sup>†</sup>

\* (中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080)

<sup>†</sup> (浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

**摘要** 对充液腔体中气体射流的冲击效应进行了实验研究。测量结果表明了冲击压力的瞬态最大值、稳态平均值和脉动值随喷管进口压比的增加而增加, 冲击区是主要的噪声源和动态压力承载部位。通过充气与充水两种状态的对比实验, 还揭示了腔体充水时气体射流冲击压力出现一个上冲阶段, 其瞬态最大值比充气值有显著的增加。

**关键词** 充液腔体, 气体射流, 冲击效应, 压力测量

## PRESSURE MEASUREMENTS OF GAS IMPINGING JETS IN A CYLINDRICAL CAVITY FILLED WITH WATER<sup>1)</sup>

LIU Ming\* WANG Boyi<sup>\*,2)</sup> QI Longxi\* SHI Honghui<sup>†</sup>

\* (LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

<sup>†</sup> (CMEA, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract** This paper describes the experimental study on gas impinging jets in a cylindrical cavity filled with water. Measurements of the maximum instantaneous pressure in the initiative phase as well as the averaging and fluctuating pressures in the steady phase indicate that, at the stagnation point of the impinging region, these three pressures increase with increasing the nozzle inlet pressure ratio. The obtained results show that the impinging region, bearing the most intensive dynamic load, is the main noise source. Through a comparative approach, it is found that there is a pressure overshoot phenomenon in the water-filling case and its maximum instantaneous pressure is much higher than that in the corresponding gas-filling case.

**Key words** cavity filled with water, gas jet, impingement effect, pressure measurement

### 引 言

自 20 世纪 60 年代以来, 冲击射流及其效应一直是流体力学研究的一个重要课题。其推动力首先在于冲击射流在诸多领域的广泛应用, 包括航空航天、加工制造、轻工食品、能源化工及环境保护等。其次, 冲击射流包含着丰富复杂的流体力学现象, 从科学研究的角度来看亦十分有意义。例如当射流是超声速时, 冲击平板的存在会导致激波、膨胀波或压缩波的形成, 流场便成为超声速、亚声速和声速的混合体系<sup>[1]</sup>。当声速或超声速射流处于非理想膨胀工况时, 冲击平板的存在不仅会改变射流核心区

中的激波胞格结构而且会导致射流的整体振荡<sup>[2~4]</sup>。因此, 相关的研究吸引了众多学者的关注。

本文是关于充液腔体中气体冲击射流动力学效应的实验研究, 其背景涉及水下发射装置、水下切割焊接以及核反应堆事故评估等。前人主要是针对气体环境中气体冲击射流开展了流场显示以及流动特性(速度、温度、压力)测量等不同方面的实验研究, 此外有些作者还研究了液体环境下水射流冲击效应。其中文献[1,2,5]测量了冲击压力。但是上述研究对象均是单相流动体系, 而本研究考虑的水体中气体射流是一种气液两相流动体系, 所涉及的问题

2006-09-19 收到第 1 稿, 2007-03-12 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金(10672144)项目资助。

2) E-mail: wby@imech.ac.cn

更加复杂. 因此, 我们采用对比实验研究的途径, 在相同喷管运行条件下, 分别测量腔体中充气 and 充水两种状态下冲击区驻点处的压力及其随喷管进口压比的变化, 从而为工业应用提供必要的科学依据.

## 1 实验装置及程序

本实验装置由供气系统、喷管组件和充液腔体 3 个部分构成. 供气系统包括空气压缩机、储气罐、调压阀、电磁阀和输气管路等通用器件, 可以按照实验要求的驻室压力为喷管提供稳定的工作气流. 喷管组件和充液腔体则是自行加工的 (参见图 1). 前者由壳体、导气管、驻室和拉瓦尔喷管组成, 后者由外筒、内筒和溢水槽组成. 喷管组件嵌置于充液腔体的内筒之中, 通过导气管与供气系统的管路连接. 充液腔体的内外筒之间和溢水池可以按照实验要求充注水 (本文称之为“充水”状态) 或不充水 (本文称之为“充气”状态). 当腔体内充气时, 试验气体从拉瓦尔喷管排出后, 由于腔体外筒底端面的阻挡, 形成所谓的冲击射流. 如通常的气体环境中气体冲击射流那样, 它可以分解为射流区、冲击区和壁射流区 3 个性质不同的流动区域. 只是由于腔体的有限体积限制, 壁射流沿其半球状底部向上发展并经由内外筒之间的间隙泄放到大气中. 当腔体内充水时, 其下端构成一个贮水室, 试验气体从拉瓦尔喷管排出后, 在贮水室内亦形成冲击射流. 但是, 除了射流核心区仍为纯气体单相流动外, 射流区的剪切层、冲击区和壁射流区均为气水混合两相流动, 从内外筒间隙泄放到溢水池的也是含有大量气泡的水体.

为了测量气体射流的冲击压力, 在腔体外筒底部

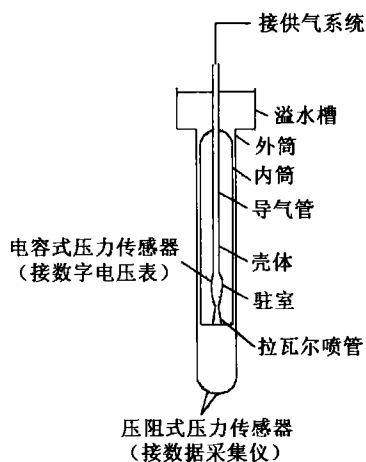


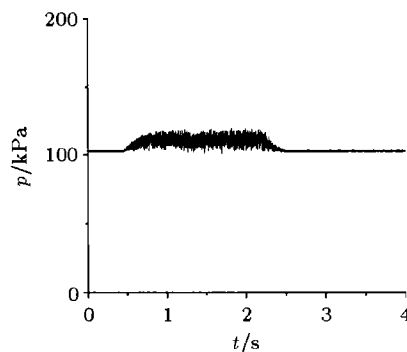
图 1 喷管组件及充液腔体示意图

驻点处设置了一个压阻式压力传感器, 为了进行比较, 还在壁射流区 (距驻点  $\pi/6$  弧度处) 设置了另一个压阻式压力传感器. 此外, 在喷管的驻室处设置了一个电容式压力传感器. 3 个传感器的位置在图 1 中示出, 它们分别连接到数据采集仪和数字电压表上. 后者为传感器提供工作电压并采集、处理压力数据. 本实验中, 数据采集仪的采样频率取为 2kHz, 采样时间为 4.096s, 每次试验信息获取量为 8k. 充水实验的具体程序为: (1) 利用调压阀调节供气压力达到所需要的喷管驻室压力  $p_0$  (由电容式压力传感器监测); (2) 充注水到腔体内达到指定的充水高度  $H$ ; (3) 启动数据采集仪在无射流情况下运行约 0.5s 时间; (4) 开启电磁阀, 形成气体射流, 贮水室内水体逐渐被排导到溢水槽内; (5) 冲击射流稳定运行 1~3s 后, 关闭电磁阀, 切断气源; (6) 达到预定的采集持续时间 (4.096s) 后, 采集仪自动停止运行, 数据存贮完毕后即显示压力随时间变化历程.

本实验中, 相关的几何参数有: 拉瓦尔喷管喉部直径  $d^* = 4.95$  mm, 出口直径  $d = 6.43$  mm, 充液腔体外筒直径  $D_1 = 135$  mm, 内筒直径  $D_2 = 120$  mm. 此外, 腔体充水高度  $H = 1225$  mm, 喷管出口距贮水室驻点处距离  $h = 107$  mm, 喷管进口压比  $p_0/p_a = 8.76, 4.38, 2.50$  (这里  $p_a$  为大气环境背压). 实验期间水体和空气均处于室温条件.

## 2 实验结果及讨论

图 2 给出腔体充气时的典型压力实测曲线, 它们为 3 个不同压比下冲击区驻点压力  $p$  随时间  $t$  的变化. 可以看出, 在射流稳定运行期间冲击压力均是在其平均值附近作强烈的起伏变化. 显然, 迭加在平均值上的脉动分量是冲击区流动不稳定性所致.



(a)  $p_0/p_a = 2.50$

图 2 腔体充气状态下气体射流冲击压力的实测曲线

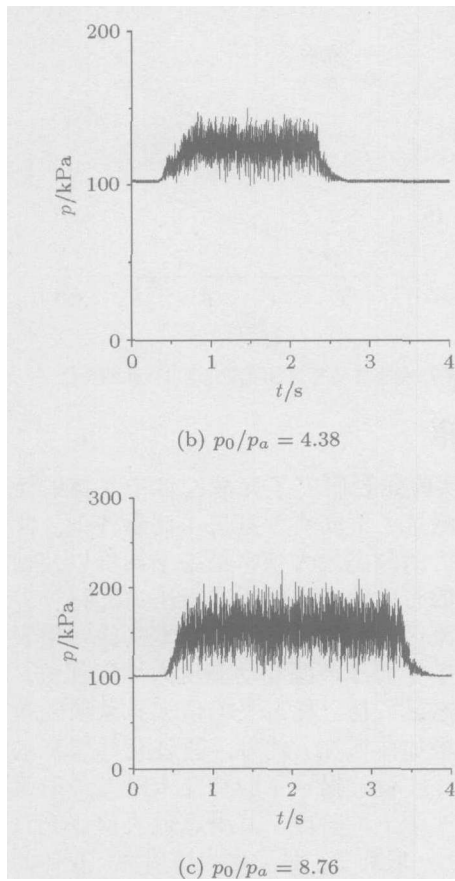


图 2 腔体充气状态下气体射流冲击压力的实测曲线 (续)

类似地，图 3 给出腔体充水时 3 个压比下的典型压力实测曲线。可以看出，由于高密度水体的惯性阻滞作用，气体射流的冲击压力曲线都出现一个上冲阶段，随着贮水室内水体逐渐排出，冲击压力开始下降并逐渐达到一个稳态值。若干关于水下自由气体射流初期发展的理论研究 [6,7] 曾揭示了向水中喷气时气泡在短时间内会形成压力峰值的现象。从图 3 还可以得知：腔体充水时冲击压力亦存在着强烈的脉动起伏，而且上冲阶段的压力脉动远大于平稳阶段。这从而表明，冲击气体射流与环境水体的掺混在本质上依然是不稳定过程，形成了大小不同

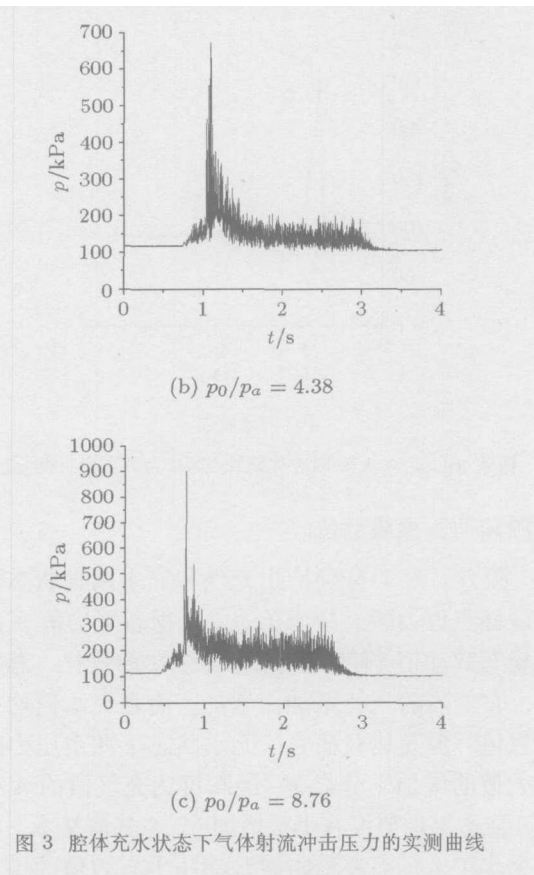
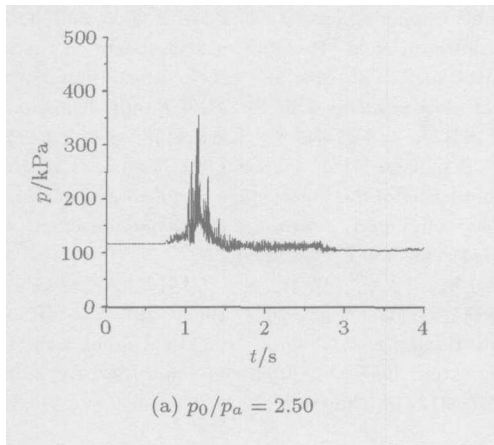
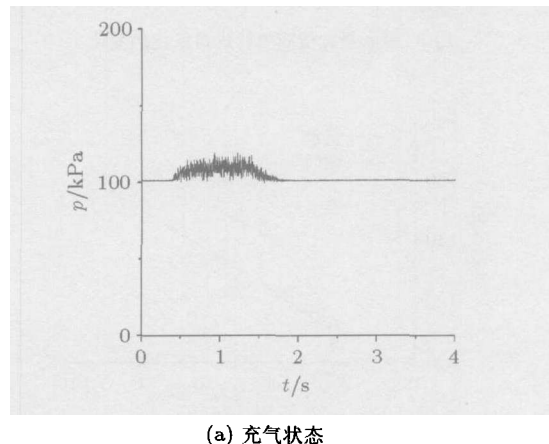


图 3 腔体充水状态下气体射流冲击压力的实测曲线

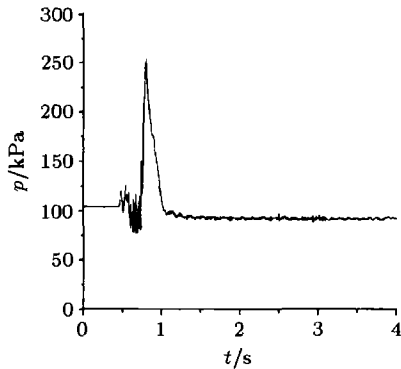
尺度的涡结构，从而在冲击区产生了高强度的噪声，并使该处的结构承受最大的动态载荷。

为了比较，图 4 示出  $p_0/p_a = 8.76$  时壁射流区内的典型压力实测曲线，分别为充气 and 充水两种状态的结果。比较图 4(a) 和图 2 可知：对于充气状态，壁射流区内压力及其变化的性态基本上与冲击区内的相同，只是平均值的大小和脉动值的幅值与频率有所下降。但是对于充水状态，壁射流区内压力虽然同样有一个上冲阶段，但没有像冲击区内压力那样有着强烈的脉动起伏 (比较图 4(b) 和图 3)。这进一步表明充液腔体中气体射流的冲击区是主要的噪



(a) 充气状态

图 4  $p_0/p_a = 8.76$  时腔体壁射流区压力的实测曲线



(b) 充水状态

图4  $p_0/p_a = 8.76$  时腔体壁射流区压力的实测曲线(续)

声源和动压承载部位。

图5~图7分别给出充气和充水两种状态下冲击区驻点压力瞬态最大值  $p_{max}$ ，稳态平均值  $p_{ave}$  以及稳态脉动值(有效值)  $p'_{rms}$  随压比的变化。总体而言，它们均随压比增加而增加，而且充水值均大于充气值。但是比较而言，充水状态下冲击压力瞬态最大值的增加十分显著(最高可达充气值的4倍以上)，稳态平均值仅有小量增加(与充气值基本上在同一个水平上)，而在稳态时脉动压力有效值的增加随压比的变化有较大的差异。本实验结果表明了腔体充水将明显改变气体射流的冲击效应。

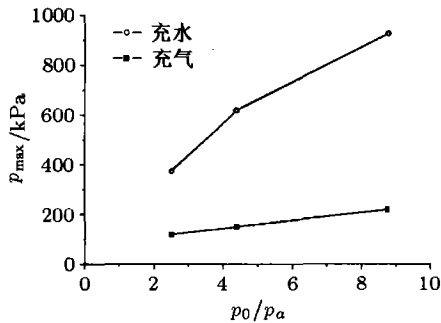


图5 瞬态最大值随喷管进口压比的变化

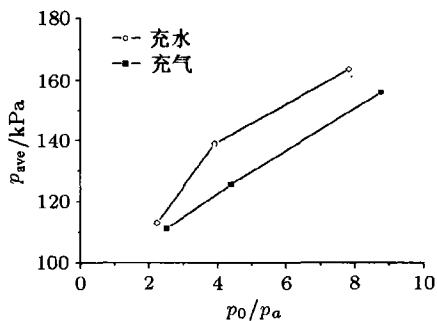


图6 稳态平均值随喷管进口压比的变化

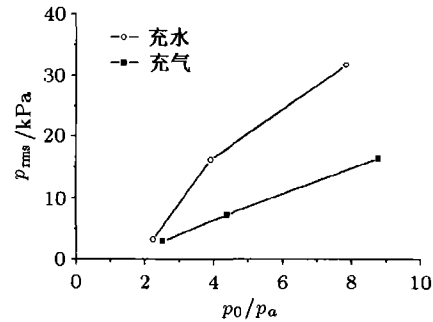


图7 稳态脉动有效值随喷管进口压比的变化

### 3 结 语

通过实验途径研究了充液腔体中气体射流的冲击效应，测量了不同喷管进口压比条件下，冲击区驻点处压力的瞬态最大值、稳态平均值以及稳态时脉动压力的有效值。为分析冲击压力的特征，还监测了壁射流区压力的动态变化。本实验结果表明：冲击区是主要的噪声源和动态压力承载部位，冲击压力的瞬态最大值、稳态平均值和脉动值随喷管进口压比的增加而增加。此外，通过充气与充水两种状态的对比实验，揭示了腔体充水时气体射流冲击压力存在一个上冲阶段，其瞬态最大值比充气值有显著增加。一般而言，对于超声速射流，腔体的耦合作用不会对上游喷管驻室的工况产生影响。但是对于亚声速情况，射流与充液腔体的耦合作用应予考虑。这种复杂现象构成一个新的研究课题，今后可进一步探索。

### 参 考 文 献

- 1 Carling JC, Hunt BL. The near wall jet of a normally impinging uniform axisymmetric supersonic jet. *J Fluid Mech*, 1974, 66: 159~176
- 2 Lamont PJ, Hunt BL. The impingement of underexpanded axisymmetric jets on perpendicular and inclined flat plates. *J Fluid Mech*, 1980, 100: 471~511
- 3 Kuo CY, Dowling P. Oscillations of a moderately underexpanded choked jet impinging upon a flat plate. *J Fluid Mech*, 1996, 315: 267~291
- 4 Henderson B, Bridges J, Wernet M. An experimental study of the oscillatory flow structure of tone-producing supersonic impinging jets. *J Fluid Mech*, 2005, 542: 115~137
- 5 Crafton J, et al. Pressure measurements on the impingement surface of sonic and sub-sonic jets impinging onto a flat plate at inclined angles. *Exps Fluids*, 2006, 40: 97~707
- 6 易淑群等. 水下高速喷气水流场研究. 水动力学研究与进展(A辑), 2002, 17(4): 448~453 (Yi Shuqun, et al. Numerical simulation of the initial stage of noncondensing high-speed gas jet in liquid. *Journal of Hydrodynamics (Seri A)*, 2002, 17(4): 48~453 (in Chinese))
- 7 贺小艳, 马汉东, 纪楚群. 水下气体射流初期数值研究. 水动力学研究与进展(A辑), 2004, 19(2): 207~212 (He Xiaoyun, Ma Handong, Ji Chuqun. Numerical simulation of gas jets in water. *Journal of Hydrodynamics (Seri A)*, 2004, 19(2): 207~212 (in Chinese))