

# 水下超声速气体射流回击现象的实验研究<sup>1)</sup>

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

<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** 对水下超声速气体射流的动力学行为进行了实验研究. 通过流动可视化揭示了回击现象的演化过程, 利用探针排获得了射流近场区的脉动压力分布, 实验结果表明: 在超声速喷管出口两倍直径处, 射流形貌的变化导致气体中出现了大幅值压力脉冲. 通过流场可视化与压力测量的同步校验, 证实了喷口端面处回击事件与流场气相区中压力脉动之间相关性.

**关键词** 超声速气体射流, 水下喷管, 压力脉冲, 回击

**中图分类号:** O358 **文献标识码:** A **文章编号:** 0459-1879(2007)02-0267-06

## 引 言

水下高速气体射流在工程技术中有广泛应用, 涉及到金属冶炼、污染控制、水下切割以及国防安全等诸多领域. 众所周知, 气体在水中泄放后形成一种复杂的气水两相体系. 相关研究表明<sup>[1,2]</sup>, 随着孔口气体速度的变化, 可以形成两种不同的流动形态: (1) 当气体流出速度较小时 (例如亚声速), 流动状态主要受表面张力和浮力控制, 气体以离散泡的形式从孔口溢出. 此系泡流区制 (bubbling regime). (2) 当气体流出速度较大时 (例如超声速), 气体形成一股连续的射流. 由于惯性作用, 气体射流在水中穿透一定的长度之后才破碎, 所产生的泡群在浮力作用下迅速浮起. 此系射流区制 (jetting regime). 当然, 在中等速度下 (跨声速区域) 存在一个泡流 - 射流的过渡区 (bubbling to jetting transition). 了解水下气体射流的动力学性态, 对于各类混合装置和水下推进器的研制有着重要的意义, 因此相关的研究一直吸引着国内外学者的关注. 以炼钢应用为例, 从 20 世纪 70 年代起, 由于诸如萃取、精炼和搅拌等喷射冶金工艺的兴起, 人们对淹没在液体中气体射流的特性开展了大量的研究<sup>[3~9]</sup>. 为了更好理解其中涉及的力学机制, 许多研究者从事了水模实验并发现了“回击现象”(back-attack phenomenon), 其中 Aoki 等<sup>[3]</sup> 首先定义了回击是射流间歇性地发生气体逆流并反转吹向孔口表面的事件. 这一现象

造成了冶炼炉中风口周围炉衬的侵蚀和损伤问题, 因此多年来回击强度、频率测定以及减轻措施一直是喷射冶金研究的重点<sup>[4~6]</sup>. 特别是, Yang 等<sup>[7,8]</sup> 借助于高速摄影研究了气体射流的不稳定性导致的间歇性颈缩, 造成了射流膨胀, 继而发生回击, 他还提出了“空穴模型”, 解释了风口材料的侵蚀.

本文相对前人研究做了以下改进: (1) 实验水槽足够大, 保证了自由射流的获得. 前人的工作<sup>[6,9]</sup> 多采用针对各类具体炉型的水模, 实验中由于尺寸有限性导致的整体运动将显著影响回击效应; (2) 采用收缩扩张型拉瓦尔喷管, 探讨了超声速时的完全射流区制下 (perfect jetting regime) 的回击现象. 前人的实验<sup>[2,3,7,9~11]</sup> 均采用圆形直管或收缩型喷管, 出口处气体的速度为亚声速或声速, 此时射流处于泡流区制或过渡区制; (3) 测量了射流内部压力及其分布, 从而可以研究回击事件和射流近场区内气相中压力脉冲的关系, 而前人实验中<sup>[1,5]</sup> 压力测量仅在风口端面或喷管内进行; (4) 揭示了射流区制下回击演化过程及产生机制并通过端面上压力脉冲与射流回击现象的同步校验证了二者相关性, 而 Yang 等<sup>[8]</sup> 把回击等同于射流膨胀过程且没有证明压力脉冲和回击现象是同步发生的.

## 1 实验系统简介

本研究中, 实验布置如图 1 所示. 实验设备主

2005-12-23 收到第 1 稿, 2006-10-31 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金资助项目 (10672144).

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

要由空气压缩机、储气罐、调压阀、电磁阀、水槽和喷管组件构成。测量设备则由测压和摄影两个系统

构成,前者包括探针排、可移动支架、压力传感器和数据采集仪,后者包括数字照相机和高压无闪灯。

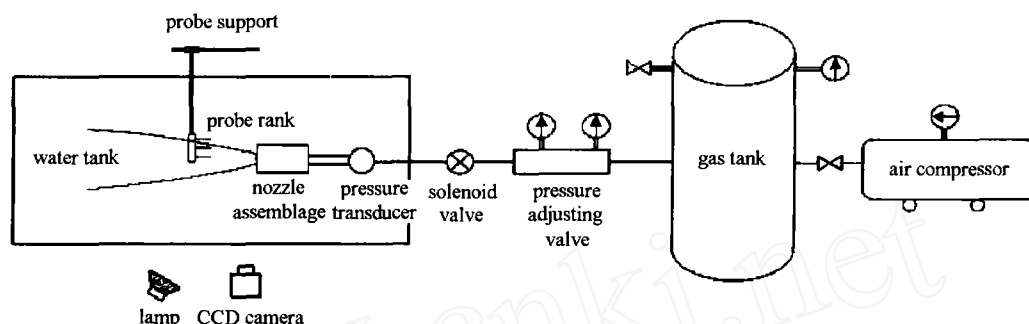


图 1 水下超声速气体射流实验布置示意

Fig.1 Schematic of experimental layout for supersonic gas jets in water

空气压缩机可以提供最高压力为 3 MPa 的工作气体(空气). 储气罐容积为  $0.8 \text{ m}^3$ , 可以确保实验期间(约 5 s)气体压力保持恒定. 调压阀可以调节喷管的驻室压力, 电磁阀则是控制气体射流的开启和终止. 开口水槽由透明的有机玻璃制成, 280 cm(长), 50 cm(宽), 55 cm(高). 这里, 水槽尺寸远大于喷管出口直径. 水槽中水是静止的, 处于室温室压条件. 喷管组件水平浸入水面下方 15 cm 处. 本实验中 3 个拉瓦尔喷管的喉部直径均为 4.3 mm, 但喷管出口分别为 4.7 mm, 5.1 mm 和 5.6 mm, 相应的设计马赫数  $Ma$  为 1.5, 1.75, 2.0. 通过调压阀调节驻室压力, 使得实验可以在 3 个设计马赫数下进行, 而且每个喷管可有 3 个不同工况. 这里, 当出口压力  $p_e$  等于环境压力  $p_a$  时是适配工况. 而非适配工况则有欠膨胀和过膨胀工况两种, 它们分别相应于出口压力大于和小于环境压力的情况, 本实验中此两种工况下压比分别为  $p_e/p_a = 1.2$  和 0.8.

实验中, 驻室的压力由电容式压力传感器测定, 气水射流中的压力由探针排获取. 为了测量脉动压力并减少时间延迟, 3 个高频响应的压阻式压力传感器直接安装在探针排的尾部. 该探针排有 3 个间距 1 cm 的皮托管静压探针, 其中 1 号探针位于喷管中心轴线上, 3 号探针位于偏离喷管中心轴线最远的位置上, 2 号探针位于二者之间. 探针排安装在可移动支架上, 能够沿水平方向移动并精确定位. 利用数字照相机拍摄流场过程中, 由于回击现象演变很快, 需要很高的快门速度才能获得清晰的射流形貌, 为了保证正确曝光的进光量, 必须通过额外补光以获得足够的成像光信号. 实验中, 采用高频

无闪灯把光打在射流上, 利用气液界面的反射光即可达到光影成像的合格要求.

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 回击事件的可视化研究

本实验采用 100 帧/s 数字照相机来记录水下超声速气体射流的形貌及其变化, 每次拍摄可以持续 5 s. 实验揭示了水下高速气体射流特有的间歇性回击现象. 我们完成的大量实验表明, 在 3 个不同设计马赫数喷管中, 在欠膨胀、适配、过膨胀 3 种工况下, 回击现象均会出现. 这里仅以  $Ma = 2.0$  喷管在适配工况下一次回击演化过程为例说明之. 图 2(a) 示出的是水下气体射流的一般形态, 它具有一定的穿透长度. 随着远离喷口, 混合层逐渐增厚, 其界面呈现不断发展着的大涡结构. 图 2(b), 图 2(c) 表明射流在喷口附近迅速膨胀. 膨胀的气体到达一定程度后分离成两个部分, 一部分气体继续流向下流, 另一部分流向上游, 后者撞击到端面后受到阻碍而被挤压(如图 2(d) 所示). 流向上游的气体在撞击端面的过程中破碎成大量的气泡并由于浮力作用而上浮(参见图 2(e)~图 2(g)). 从图 2(h) 可以看到, 回击事件结束后, 常态射流形貌再次形成. 我们的可视化研究表明了每个回击发展过程要经历膨胀, 分离、撞击和破碎 4 个阶段. 本研究所揭示的超声速射流条件下回击演化过程与 Ozawa<sup>[3]</sup>, Wei<sup>[9]</sup> 在直喷管水模实验中观察到的回击过程是不尽相同的. 我们观测结果与 Yang<sup>[8]</sup> 所指出射流膨胀的现象是吻合的, 但是 Yang 没有发现膨胀气体分离成两个部分.

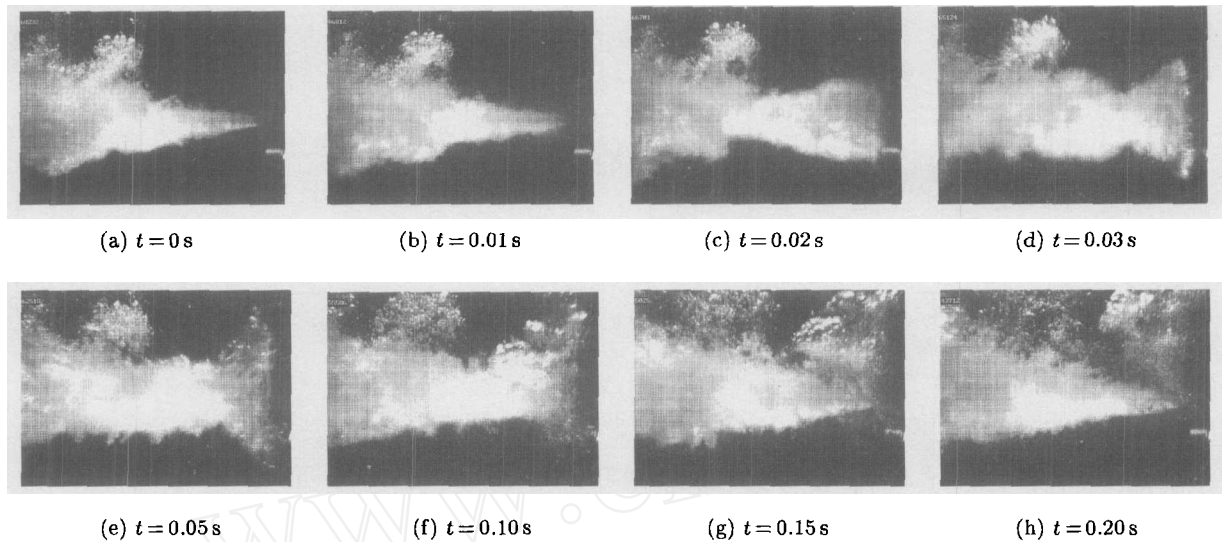


图 2 回击事件的演化过程 ( $Ma = 2.0$ , 适配工况)

Fig.2 Image of instantaneous flow pattern during a back-attack event ( $Ma = 2.0$ , full-expansion operation)

这样，单次回击现象演化过程可描述如下：由于高雷诺数、大密度差条件下混合剪切层导致的非线性不稳定性，水下超声速气体射流中必然会发生间歇性颈缩，这样气流通道便会出现梗阻而导致气体迅速聚集，因而射流发生快速膨胀。液相的惯性限制了射流在径向方向上持续膨胀，使得膨胀主要在轴向方向上进行，这样沿轴线膨胀的气体分离成

两个部分，一部分流向下游，一部分流向上游。后者撞击到端面后受到阻碍而被挤压，接着破碎成大量气泡。前人都把回击当作射流整体的反向流动，而我们的实验证明回击仅由膨胀气体分离后流向上游的部分所产生。图 3 示出不同设计马赫数喷管在不同工况下气体开始膨胀时射流的典型形貌。根据本研究所完成的大量实验结果可以得知，膨胀出现

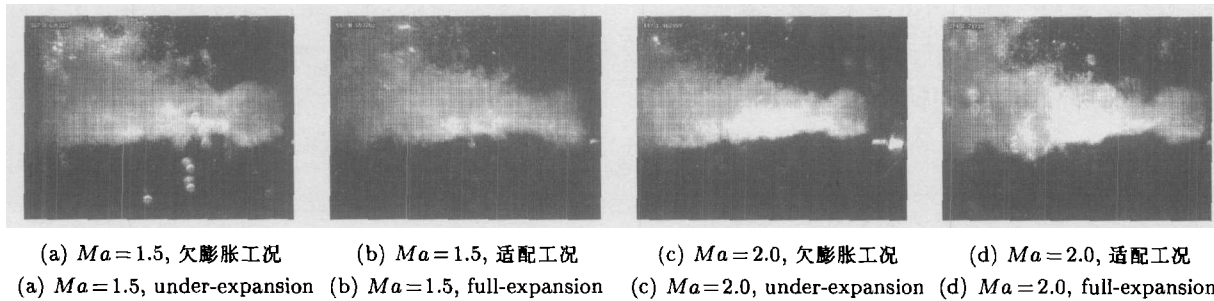


图 3 气体膨胀时射流的典型形貌

Fig.3 Typical appearance of underwater gas jet

位置大体在距 2 倍喷口直径处。

### 2.2 射流脉动压力的测量

本实验采用可移动探针排获得了水下超声速气体射流近场区的脉动压力场。压力脉动强度可以采用其有效值表征如下

$$\bar{p} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^2} \quad (1)$$

其中  $p_i$  为压力， $\bar{p}$  为压力平均值， $N$  为每次实验

中采集的样本数量。这里平均压力定义为

$$\bar{p} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i \quad (2)$$

图 4 给出压力随时间变化的一组典型记录曲线，其中压力是对于大气压的相对值。它们分别是在  $Ma = 1.5$  喷管的欠膨胀工况下，1,2,3 号探针采样的结果。这里，探针测点位置为喷管出口处，其中 1 号探针位于射流的气相核心区，2 号和 3 号探针位于液相区。可以看到射流场中压力的动态变化异常显著，除了连续性的小幅值脉动外，都出现了间

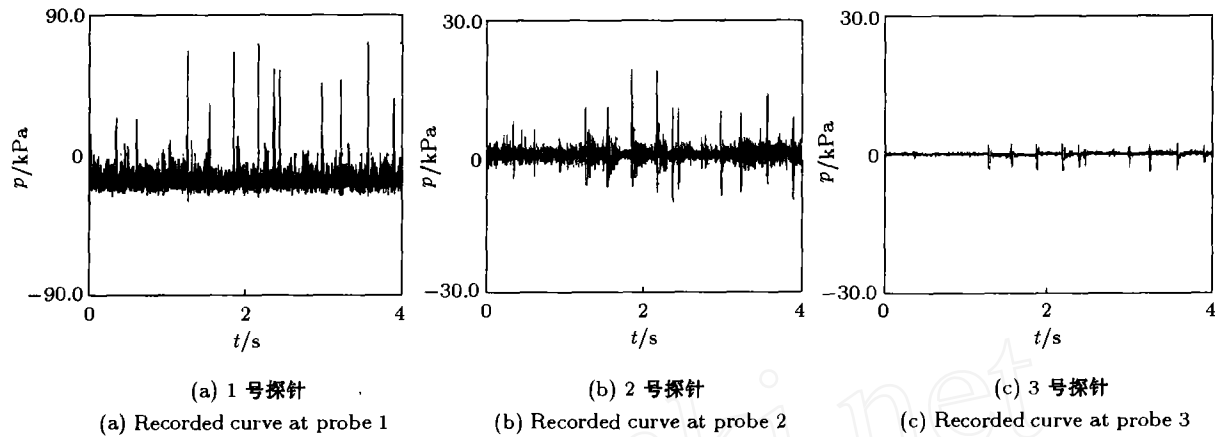


图 4 喷管出口处流场压力随时间变化的典型曲线 ( $Ma = 1.5$ , 欠膨胀工况)

Fig.4 Typical pressure oscillation curve at the nozzle exit ( $Ma = 1.5$ , under-expansion operation)

歇性的大幅值脉冲,以中心探针处最为剧烈,2号探针处次之,3号探针处最小.这表明在射流内不断发生压力突增及其泄放过程.特别有意义的是,对于射流场内不同位置,这些大幅值脉冲是在同一时刻发生的.

利用可移动支架,将探针排向下游推进,可以得到射流近场区的脉动压力分布.按照式(1)计算所得压力脉动有效值的大小主要取决于压力脉冲的幅值和频次.因此,在本研究中,该有效值刻画了间歇性大脉冲的强弱.图5给出3个喷管(相应的设计马赫数  $Ma$  为 1.5, 1.75 和 2.0)在欠膨胀工况下的射流场脉动压力分布,其中横坐标  $x$  是测压点到喷口的距离 (cm),纵坐标  $y$  是脉动压力有效值  $\bar{p}$ (kPa).

探针排移动过程中,1号探针始终位于核心区,而2号和3号探针则位于混合区或液相区.从图5可以看到,不同马赫数下流场中脉动压力的变化趋势基本相同,其中1号探针处的脉动压力强度要高一个数量级以上,而且沿着轴线向下游衰减很快.大量的实验表明射流近场区内脉动压力的变化在适配、过膨胀工况亦有类似的特性.更重要的是,在3个马赫数下核心区的脉动压力有效值在距离喷管端面2倍出口直径附近均达到最大,而这恰恰是射流中气体开始聚集和膨胀的位置.射流内部压力的突增和突降表明了气体内能(势能)的增加和释放,它们是否源于气体的聚集和释放,将在下面通过压力脉冲和射流形貌变化的同步校验获得验证.

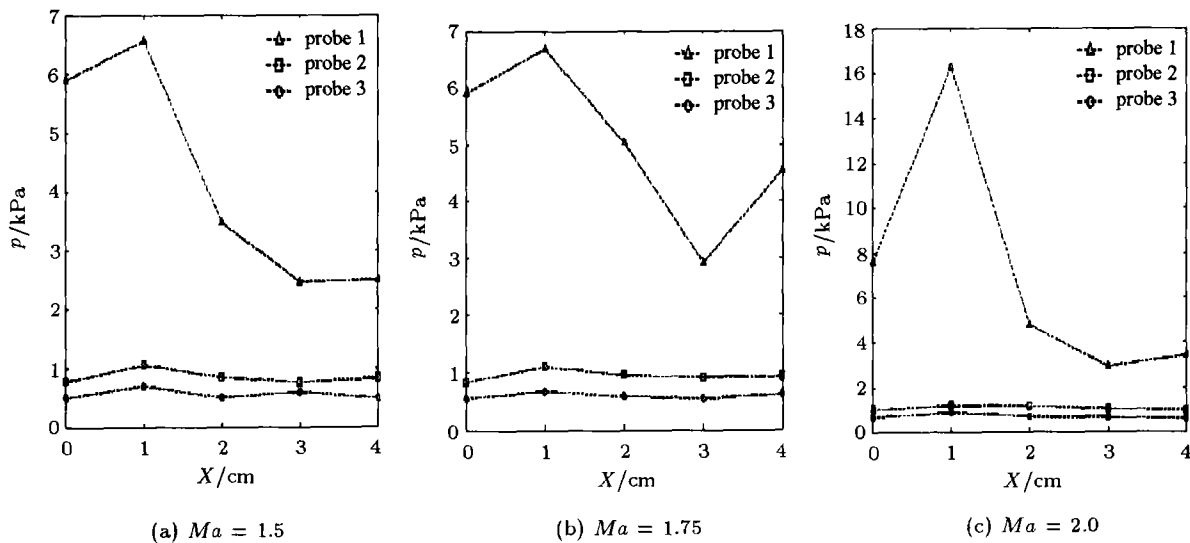


图 5 射流近场区脉动压力有效值分布

Fig.5 The r.m.s. of pressure oscillation in near field of underwater gas jet

### 3 压力脉冲和回击现象的同步校验测量

本研究中, 我们采用相对时间基准的概念, 十分方便地实现了同步校验. 这里, 在每次实验中, 令压力传感器和数字照相机在气体尚未喷射时开始采集和拍摄. 为了克服探针排测压方式对流场可视化的影响, 同步校验实验中, 测压点设置在喷管出口端面上. 这时测出的是回击压力. 当气流从喷管射出的瞬间, 传感器随即感应到压力的变化, 同时照相机亦会拍摄到射流初始形貌. 以此作为相对的时间基准, 再观测此后的实验时间内, 压力变化和射流形貌间的对应关系.

图 6 是  $Ma = 2.0$  喷管在欠膨胀工况下所得的实验结果, 在回击压力的记录曲线中, 压力脉冲非常明显, 间隔清晰. 图中标注“开始”表示气体刚流出喷口的时刻. 射流形成后, 大幅值压力脉冲开始间歇地出现. 为了校验压力脉冲与射流形貌变异是同步出现的, 作为例子, 图 6 中标出了第 5, 第 6 和第 10 次脉冲, 图 7 则给出了开始时刻和第 5, 第 6,

第 10 次压力脉冲发生时刻的射流图像. 可以清楚看到, 相应时刻射流气体均处于膨胀阶段. 这样就证明了压力脉冲和射流形貌改变是伴随发生的. 由此得知, 射流中气体的聚集和释放导致了射流内部的压力突增和突降.

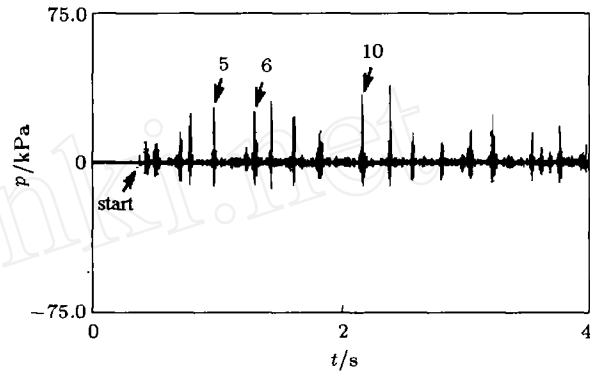


图 6  $Ma = 2.0$  喷管在欠膨胀工况下出口端面处压力的实测曲线  
Fig.6 Recorded exit pressure curve for  $Ma = 2.0$   
under-expanded nozzle

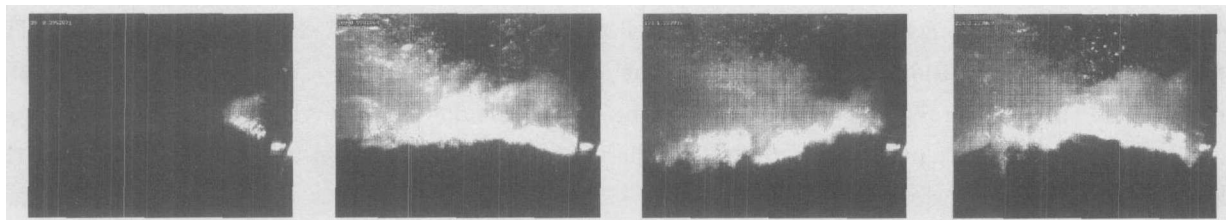


图 7 开始时刻及第 5, 第 6, 第 10 次压力脉冲出现时刻的射流形貌  
Fig.7 Jet appearance at four moments when the jet and 5th, 6th, 10th pressure pulse forms

### 4 结 论

本文介绍了在静止水槽中对水下超声速气体射流进行的实验研究, 通过流场可视化、脉动压力测量以及同步校验, 揭示了单个回击事件演化机制, 以及回击与射流近场区内气体压力脉冲的关联. 基于本实验结果, 我们得出回击产生的力学机制: 由于水下超声速气体射流中剪切不稳定性, 使得在距离端面 2 倍喷口直径附近处发生间歇性颈缩, 这样射流通道便会出现梗阻而导致气体的迅速聚集. 聚集过程中射流内部压力突增 (即气体势能的增加), 当达到一定程度后射流发生膨胀 (即势能开始转化为动能) 从而导致压力下降. 液相的惯性限制了射流在径向上持续膨胀, 使得膨胀主要在轴向方向上进行. 这样, 沿轴线膨胀的气体分离成两个部分, 一部分流向下游, 一部分流向上游. 回击现象正是流向上

游的气体撞击到端面, 受到阻碍而被挤压破碎成大量气泡的过程.

### 参 考 文 献

- 1 Hoefele EO, Brimacombe JK. Flow regimes in submerged gas injection. *Metallurgical Transactions B*, 1979, 10B: 631~648
- 2 Mori K, Ozawa Y, Sano M. Characterization of gas jet behavior at a submerged orifice in liquid metal. *Trans ISIJ*, 1982, 22: 377~384
- 3 Aoki T, Masuda S, Hatano A, et al. Characteristics of submerged gas jets and a new type bottom blowing tuyere. In: Proc. Int. Conf. on injection phenomena in extraction and refining (edited by Wraith AE), Vol 1. University of Newcastle upon Tyne. 1982, A1-A36
- 4 Ozawa Y, Mori K. Characterization of jetting observed in gas injection into liquid. *Trans. ISIJ*, 1983, 23: 764~768
- 5 Taylor IF, Wright JK. Transient pressure and vibration

- events resulting from high speed gas injection into liquids. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 1988, 27: 293~301
- 6 Fabritius TMJ, Mure PT, Harkki JJ. The determination of the minimum and operational gas flow rates for sidewall blowing in the AOD-Converter. *ISIJ International*, 2003, 43: 1177~1184
- 7 Yang QX, Gustavsson H, Burstrom E. Erosion of refractory during gas injection. A cavitation based model. *Scand J Metall*, 1990, 19: 127~136
- 8 Yang QX, Gustavsson H. Effects of gas jet instability on refractory wear. A study by high-speed photography. *Scand J Metall*, 1992, 21: 15~26
- 9 Wei JH, Ma JC, Fan YY, et al. Back-attack phenomena of gas jets with submerged horizontally blowing and effects on erosion and wear of refractory lining. *ISIJ International*, 1999, 39: 779~786
- 10 Szekely J, El-Kaddah NH, Grevet JH. Flow phenomena in argon stirred ladles. In: Scaninject II, Sweden, 1980, 5:1~5:32
- 11 Cho YW, Yoon JK. Physical shielding by shrouding gas jet issuing horizontally into a liquid. In: Scaninject IV, Sweden, 1986, 4:1~4:19

## EXPERIMENTAL STUDY ON BACK-ATTACK PHENOMENON IN UNDERWATER SUPERSONIC GAS JETS<sup>1)</sup>

Wang Boyi<sup>\*,2)</sup> Dai Zhenqing<sup>\*</sup> Qi Longxi<sup>\*</sup> Shi Honghui<sup>\*,†</sup>

<sup>\*</sup>(LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

<sup>†</sup>(CMEA, Zhejiang University of Science and Technology, Xiasha Higher Education Zone, Hangzhou 310018, China)

**Abstract** The paper presents an experimental study on the back-attack phenomenon in underwater supersonic gas jets. The development process of back-attack phenomena is visualized using a digital camera. The fluctuating pressure distributions in the near field of the jet are obtained by a row of probes. The experimental results indicate that, in the region two diameters of the nozzle exit downstream, the distortion of the gas jet results in the strong pressure pulse. Synchronization checkout tests have confirmed the correlation between the back-attack event and gas pressure pulsation.

**Key words** supersonic gas jet, submerged nozzle, pressure pulse, back-attack

Received 23 December 2005, revised 31 October 2006.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (10672144).

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