

# 双射流喷嘴射流空化噪声小波分析初探

张定国<sup>1</sup> 李根生<sup>2</sup> 易 灿<sup>3</sup> 宋 剑<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东东营 257061; 2. 中国石油大学(北京)石油天然气工程学院, 北京昌平 102249; 3. 胜利石油管理局钻井工艺研究院, 山东东营 257017)

**摘要:** 开展喷嘴空化性能研究, 对增大射流作用效果, 提高其工业应用效能具有非常重要的意义。试验研究了双射流喷嘴在不同围压下的空化性能, 并应用小波分析方法研究了在围压条件下双射流喷嘴空化射流噪声声压级特性和规律。结果表明: 双射流喷嘴比普通锥形喷嘴具有更强的空化初生能力, 在较高围压下仍有空化现象; 围压小于5MPa时双射流喷嘴空化性能受围压影响很小, 且不同射流压力下的空化性能相差不明显; 在试验条件下, 双射流喷嘴射流噪声声压级统计均值在186 dB以上时, 有明显的空化现象。

**关键词:** 喷嘴; 射流; 封闭压力; 空化; 噪声; 小波分析

**中图分类号:** TE21; TE248    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-0890 (2006) 01-0006-04

## 引 言

空化现象是流体流动过程中局部压力低于饱和蒸气压力时出现的空泡生成、溃破现象。根据理论计算, 空泡爆破时的瞬时压力为喷嘴压降的8.6~124倍<sup>[1]</sup>。双射流喷嘴是旋转射流喷嘴与普通圆直射流喷嘴的有机组合, 其主要特点是既保留了两种喷嘴优点, 同时又扩大了射流的清洗面并增强了剪切扰动, 因而促进了空化的初生<sup>[2]</sup>。因此, 开展双射流喷嘴空化性能研究, 对增大射流作用效果, 提高其工业应用效能具有非常重要的意义。

小波变换(wavelet transform)是近年来快速发展起来的一种数学分析应用技术, 目前广泛地应用于信号处理、图形编码及数值计算等方面。小波变换是将一个信号在时间和频率甚至在方向上进行分解。在将信号与小波函数进行卷积之前, 可以将选定的小波函数在频域上进行任意的放大和缩小, 并在时域进行平移, 这有利于发现信号的特征结构。在研究空泡溃灭的瞬态噪声过程中, 溃灭过程的持续时间非常短, 而其中的变化又非常剧烈, 用传统的Fourier变换得到的频谱不能充分反映空化噪声这种瞬态特性。笔者应用小波变换对噪声信号进行了小波变换, 得到空化噪声频谱曲线去除干扰噪声后的结果, 发现其具有较为明显的周期性, 其统计直方图得到的数据也揭示了噪声能量的变化规律, 对深入了解空化噪声信号具有重要作用。

## 1 双射流喷嘴的原理与设计

双射流喷嘴可以分为内部喷嘴和外部喷嘴两部分。内喷嘴结构类似于增添螺旋导流槽后的普通锥形喷嘴; 外部喷嘴结构类似于普通锥形喷嘴。内外两部分喷嘴组装在一起便构成了整个旋转双射流喷嘴。旋转双射流的形成方法多种多样, 其中最常用的是固定叶片法。叶片位置可以分为喷嘴壁直接加工和加入独立的叶片等多种形式, 所以旋转双射流喷嘴结构设计的首要任务便是确定旋转速度生成方式, 也就是加旋形式。固定叶片式加旋法的工作原理为流体流经叶片时, 受到叶片的斜向压力, 从而产生旋转, 该方法具有对流动的干扰小、便于设计加工等优点而得到广泛应用。根据设计要求, 为了保证较大的孔深, 旋转射流的旋转强度不能太大, 而且要求喷嘴结构尽可能的简单。为此确定旋转双射流喷嘴采用固定叶片加旋方式<sup>[3]</sup>。

图1为双射流喷嘴的内、外喷嘴结构图。内外两部分喷嘴组装在一起, 便组成了完整的旋转双射流喷

收稿日期: 2005-06-14; 改回日期: 2005-10-26

基金项目: 国家自然科学基金重大计划(编号: 90410007)和国家杰出青年科学基金(编号: 50125413)资助

作者简介: 张定国(1977—), 男, 黑龙江省大庆市人, 1997年毕业于石油大学(华东)机电工程学院, 获学士学位, 油气井工程专业在读硕士研究生。

联系电话: (0546) 8393472

嘴。在实际组装中内外喷嘴组装属于过盈配合。喷嘴结构尺寸为: 出口直径 3.1 mm (当量直径), 入口直径 6.4 mm, 导轮旋转角 20°。

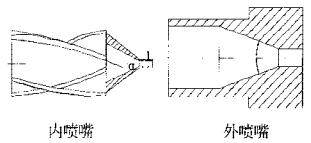


图 1 双射流喷嘴内外喷嘴结构简图

## 2 空化与空化噪声的判定

判别空化初生的标准目前尚未统一, 主要有两种方法: 声压级差法和噪声能量法。有的研究单位认为当声压级差达到 5 dB 时即可认为发生了空化, 有的则认为要达到 10 dB, 还有的认为要达到 15 dB。李忠义等<sup>[4-5]</sup>通过长期试验认为: 若水听器紧靠空化源放置, 则当 10 kHz 以上高频噪声能量  $E$  比背景下的噪声能量  $E_B$  增加一倍 (即  $E/E_B=2$ ) 时, 一般可确定为空化初生,  $E$  的定义为:

$$E=0.2316 \times 10^{-12} \sum_{i=1}^n 10^{(SPL)_i} \times f_i \quad (1)$$

式中,  $E$  为噪声能量,  $\text{mJ}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ ;  $f_i$  为频带的中心频率,  $\text{Hz}$ ;  $(SPL)_i$  为频带的声压级,  $\text{dB}$ ;  $n$  为测量频带内等分频段个数, 笔者取 10。

曲景学<sup>[6]</sup>则对两种判别方法进行了相关性分析, 认为噪声能量与各频段噪声声压级差的最大值之间存在较为明确的关系。研究发现, 在本试验条件下, 噪声能量与各频段噪声声压级差的最大值之间确实存在对应关系, 当噪声能量比值为 2 时, 各频段噪声声压级差的最大值约为 8.5 dB, 因此笔者采用噪声能量法 ( $E/E_B=2$ ) 进行判定。

## 3 试验装置和试验方法

### 3.1 试验装置

试验在高压釜上进行, 高压釜由高压泵组、高压釜体组成, 噪声测试系统采用丹麦 B&K 公司制造的 8105 型水听器 (水听器内置于可提供围压的高压釜体内, 与射流喷嘴处于同一淹没射流环境中)、2825 型前置放大器和 3106 采集处理系统及配套软件, 该系统的分析频率可达 102.4 kHz, 水听器测量频率范围为 0~160 kHz, 耐压 10 MPa。如图 2 示。

### 3.2 试验方法

先固定射流压力不变, 通过调节高压釜体出水阀门开度大小调节围压值, 围压值选取范围为 0~9 MPa, 每次围压增加 1 MPa, 然后改变射流压力值,

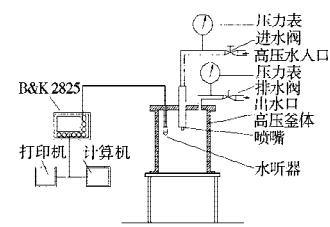


图 2 试验装置示意图

并在新的射流压力下改变围压值。根据对空化噪声研究的需要, 主要测量了空化噪声功率谱。为了消除测量的随机误差, 每组共测量 15 次, 最后结果取其平均值。试验结果与普遍采用的 13° 锥形喷嘴进行比较。

## 4 试验结果与分析

### 4.1 空化噪声能量研究

空化噪声能量是依据式 (1) 在 10 kHz 以上频率段上的积分求和, 由于数值偏大且变化幅度较大, 取以 2 为底的对数, 则噪声能量判定标准比值为 2 时, 对数比值为 1, 即曲线在比值标准线以上时存在空化现象。图 3 为双射流喷嘴在不同射流压力、围压时的空化初生状况。由图 3 可知, 双射流喷嘴在射流压力为 20 MPa、围压为 9 MPa 时仍存在空化现象, 随着喷嘴射流压力增大, 空化噪声能量也显著增大, 表明其初生空化围压值也相应增大。

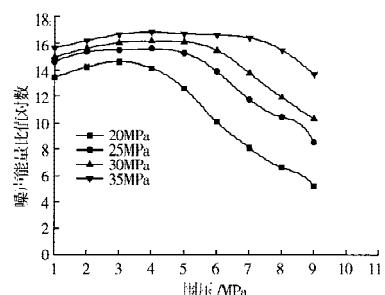


图 3 双射流喷嘴噪声能量比值对数曲线

图 4 为锥形喷嘴在不同射流压力、围压时的空化情况, 当射流压力为 20 MPa、围压达到 5 MPa 时,

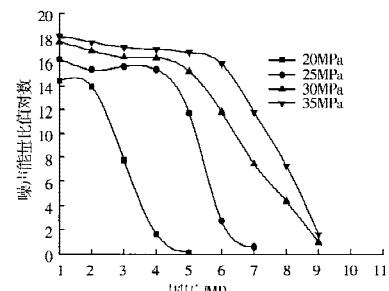


图 4 锥形喷嘴噪声能量比值曲线

空化已经停止, 即空化起始压力为 5 MPa。与图 3 相比较可以看出, 在射流压力为 20 MPa 时, 双射流喷嘴比锥形喷嘴增加了 5 MPa 以上的空化起始压力, 可见, 相对于锥形喷嘴, 双射流喷嘴具有很强的空化起始能力。

#### 4.2 空化噪声小波分析

小波是一种衰减的波, 它在有限的区域里存在(不为零), 且均值为零。小波是尖锐变化且不规则的波形, 这是小波变换的基础, 因此用小波能更好地刻画信号的局部特性。笔者采用小波分析对信号进行消噪与分解, 选 DMeyer (离散的 Meyer) 小波做为小波基, 在尺度大于 3 的分解结果中能够很好的去除干扰, 得到的噪声声压级曲线具有明显的周期性。

声压级定义为: 某一声压与基准声压 (频率为 1000 Hz 时可听阈声压为  $2 \times 10^{-5}$  Pa) 之比的常用对数的 20 倍。声压实际上是振动引起的压力起伏部分, 与声强 (单位时间内垂直于传播方向的单位面积上通过的声音能量) 具有平方关系。因此, 声压级曲线中, 幅值的变化体现了空泡溃灭时振动强度的变化, 噪声声波以球面方式传播出去, 到达水听器表面引起振动的声波主要包括直接到达的和经过高压釜壁面反射后的两部分, 由于噪声源 (包括溃灭的空泡和其它声源) 之间声波的相互叠加与削弱, 造成声压级曲线的不规则, 而经过 Meyer 小波基对信号高频噪声的消除, 可得到信号主要部分 (相对低频的部分) 的明显的周期性特征, 说明射流情况稳定后, 空泡产生的数量以及初生与溃灭的时间都比较稳定。

经过对分析后的声压级信号曲线进行数理统计, 得出在不同射流压力及围压下, 声压级 (即反映了噪声的能量) 均值的变化规律。图 5 为经过 DMeyer 小波变换后双射流喷嘴声压级统计均值与背景噪声声压级统计均值的对比关系。

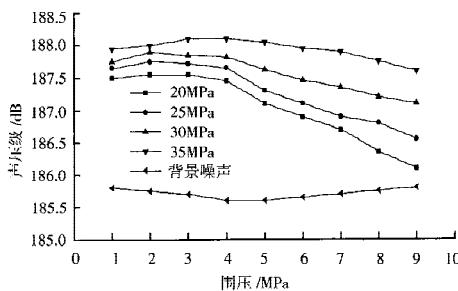


图 5 双射流喷嘴声压级统计数据曲线

由图 5 可以看出: 背景噪声声压级均值随围压变化不大, 并在 186 dB 以下, 空化噪声声压级统计均

值明显高于背景噪声声压级统计均值, 并位于 186 dB 之上, 可以认为在本试验条件下声压级统计均值在 186 dB 以上有明显的空化, 与已有的判定空化的方法的结果基本吻合; 射流压力越高, 声压级均值也越高, 并随围压的增加而降低, 但在围压小于 5 MPa 的条件下, 相差并不明显。

图 6 所示为经过 DMeyer 小波变换后锥形喷嘴声压级统计均值与背景噪声声压级统计均值的对比关系。由图 6 可以看出: 锥形喷嘴空化性能受围压变化的影响较双射流喷嘴更大, 在射流压力为 20、25 和 30 MPa 时, 围压分别为 5、7 和 9 MPa 时, 空化已经消失, 在射流压力为 35 MPa 时, 空化初生压力超过了 9 MPa。

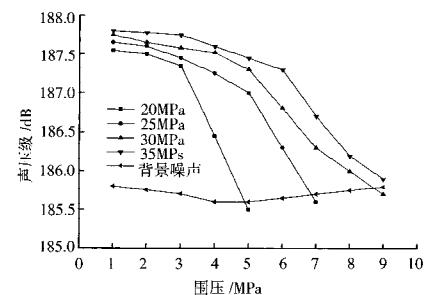


图 6 锥形喷嘴声压级统计数据曲线

可见, 锥形喷嘴的空化能力明显低于双射流喷嘴, 且其受围压变化的影响较大。在有围压作用的淹没射流条件下, 双射流喷嘴的空化噪声能量在固定围压时随着射流压力的增加而增加, 在固定射流压力时, 随围压的增加而降低。

#### 5 结 论

1) 在更高的围压条件下, 双射流喷嘴比普通锥形喷嘴具有更强的空化初生能力, 在喷嘴压降 20 MPa 下, 双射流喷嘴能够比普通喷嘴增加 5 MPa 以上的空化初生压力。

2) 采用小波分析对空化噪声信号进行处理后, 在试验条件下, 当声压级统计均值在 186 dB 以上时, 有明显的空化现象。经小波变换后的声压级曲线明显具有周期性, 证明在该试验条件下空泡的数量及产生和溃灭的时间比较稳定。

3) 在试验压力范围内, 围压小于 5 MPa 时双射流喷嘴空化性能受围压影响很小, 且不同射流压力下空化性能的差别不明显。

4) 小波分析显示双射流喷嘴空化性能比较稳定, 在 0~10 MPa 围压下空化性能受射流压力和围压变化的影响较锥形喷嘴小。

## 参 考 文 献

- [1] Maurer W C. Advanced drilling techniques [M]. Tulsa: The Petroleum Publishing Company, 1980: 30.
- [2] 李根生, 易灿, 吴波. 双射流喷嘴破岩扩孔的实验研究 [J]. 石油钻探技术, 2001, 29 (3): 9-11.
- [3] 胡永堂, 李根生, 牛继磊. 双射流结构特性理论研究 [J]. 流体机械, 2002, (专刊): 190-192.
- [4] 陈霞, 李忠义. 凌津滩水电站泄洪闸空化试验研究 [A]. //徐秉衡. 高速水流 [C]. 吉林长春: 吉林科学技术出版社, 1986: 104-109.

- [5] 李忠义, 陈霞, 陈美法. 多级孔板的若干空化特性 [A]. //徐秉衡. 泄水工程与高速水流 [C]. 四川成都: 成都科技大学出版社, 1994: 174-176.
- [6] 曲景学. 孔板泄洪洞初生空化的试验及数值模拟研究 [D]. 四川成都: 四川大学, 2001.

[审稿 李子丰]

## Study on Cavitation Noises of Dual-Jet Nozzles by the Wavelet Analysis Method

Zhang Dingguo<sup>1</sup> Li Gensheng<sup>2</sup> Yi Can<sup>3</sup> Song Jian<sup>2</sup>

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Dongying, Shandong, 257061, China; 2. Institute of Petroleum and Gas Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 3. Drilling Technology Research Institute, Shengli Petroleum Administration, Dongying, Shandong, 257017, China)

**Abstract:** It's of great significance to research into the inception ability of nozzles and enhancement of their effects to improve efficiencies in industries. Cavitation performances of dual-jet nozzles are tested at different ambient pressures. This paper presents the wavelet analysis results of experimental data on cavitation abilities and feature of dual-jet nozzles under different ambient pressures. The results show that the dual-jet nozzle can still produce cavitation under higher ambient pressure; when ambient pressure is less than 5 MPa, its changes slightly influence the result. In the experiment, the average statistical number of the sound pressure level are above 186dB, which is considered to have obvious cavitation.

**Key words:** nozzle; fluidics; confining pressure; cavitation; noise; wavelet analysis

## 欢迎订阅 2006 年《石油钻探技术》

《石油钻探技术》创刊于 1973 年, 经国家科委批准, 1979 年在全国发行, 1988 年对国内外公开发行。她是我国石油天然气钻井方面历史悠久的综合技术性刊物, 深得国内外读者的厚爱和钻井界的好评, 曾被授予“首次北京地区科技期刊全优奖”称号。她是中文核心期刊和历年科技论文统计源刊, 被美国《石油文摘》、《中国石油文摘》和《中国地质文摘》等大量摘录, 同时进入国际最大联机检索系统 DIALOG、国际第二大联机检索系统 ORBIT 以及 Ulrich 国际期刊指南数据库。1996 年加入《中国学术期刊(光盘版)》全文数据库系统, 1999 年加入 ChinaInfo 网络信息资源系统《电子期刊》, 从而为中文钻井论文进入世界信息高速公路架起一座无形的桥梁。2001 年, 入选《中国核心期刊(遴选)数据库》, 成为评价国内期刊技术、学术水平的主要源刊之一。

本刊选题注重指导性、先进性和适用性, 坚持理论与实践相结合, 以多刊快刊应用性文章为特色。主要报道国内石油钻探工程(包括钻井、泥浆、固井、完井、开采等专业)以及钻探机械设备与自动化方面的科技进展和现场经验, 适当介绍国外石油钻探技术发展的水平和动向。栏目众多, 内容丰富, 版面紧凑。适合于石油、海洋、地矿行业广大钻井工程技术人员、高等院校师生和经营管理者阅读。本刊自 1991 年试办、1993 年开办彩色广告以来, 成效显著, 已成为石油、海洋、地矿、机电、化工、轻工、冶金、煤炭、军工、建材、信息等行业科技人员联系的纽带, 是石油天然气行业走向市场的桥梁和迎接 21 世纪的使者, 是科研人员交流信息的园地和高校师生了解现场的益友。本刊广告刊出及时, 收费合理, 采用彩色桌面系统制作高精度彩页与插页。欢迎随时联系广告业务。

本刊逢单月末出版, 2006 年每期定价 11 元, 全年 6 期共 66 元(含挂号邮费)。自办发行, 邮汇与信汇均可。欢迎有关单位和个人及时订阅。订阅办法:

1. 认真填写订阅单及汇款单, 切勿潦草, 以免因地址不详而无法邮寄。可破季订阅。
2. 银行汇款请寄: 山东省德州市建行交通支行, 帐号: 37001842901050002128, 户名“中国石油化工股份有限责任公司德州石油钻井研究所”, 并著明“期刊”字样。
3. 邮局汇款请寄: 山东省德州市东风东路 35 号石油钻井研究所编辑部(邮编: 253005, 电话: 0534-2670163, 2670121, 传真: 0534-2622468, E-mail: syzt@vip. 163. com, http://syzt. chinajournal. net. cn)。