

自振空化射流研究与应用进展

李根生¹, 沈忠厚¹, 周长山², 张德斌², 廖华林²

(1. 石油大学(北京)石油天然气工程学院, 北京 102249;

2. 石油大学(华东)石油工程学院, 山东东营 257061)

[摘要] 介绍一种新型射流——自振空化射流的设计原理、冲击压力特性、冲蚀破岩特性和现场应用情况。研究表明, 以风琴管结构为基础设计的喷嘴可以产生强烈的自振空化射流, 与锥角为 120° 的普通锥形喷嘴相比, 冲击压力脉动幅度和峰值分别提高 24 % 和 37 %, 冲蚀岩石效果提高 1~2 倍。自振空化射流已成功应用到石油工程中, 研制出自振空化射流钻头、高压旋转自振空化射流处理近地层技术和自激波动注水技术, 取得明显的经济效益。

[关键词] 自激振动; 空化射流; 石油钻井; 油气开采

[中图分类号] TE248 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)01-0027-06

1 前言

钻井实践证明, 提高井底水力冲击力, 可以提高钻井速度, 降低成本。众所周知, 空化具有很强的破坏作用, 如果将强大的空化破坏作用引入到射流中, 变害为利, 将可以大大提高射流的破岩效果。研究表明, 在相同泵压下, 空化射流的冲击压力是连续射流冲击压力的 8.6~124 倍, 关键是如何在井底下引入空化作用^[1,2]。自振空化射流无需激励源, 通过谐振腔形成涡流, 可以在井下高围压环境产生空化作用, 它是近年来发展起来的一种新型射流。

2 自振空化射流原理和设计

2.1 自振空化射流调制机理

根据瞬态流理论和水声学原理, 当稳定流体流过喷嘴谐振腔的出口收缩断面时, 产生自激压力激动, 这种压力激动反馈回谐振腔形成反馈压力振荡。适当控制谐振腔尺寸和流体的马赫数及 Strouhal 数, 使反馈压力振荡的频率与谐振腔的固有频率相匹配, 从而在谐振腔内形成声谐共振, 使

喷嘴出口射流变成断续涡环流, 从而加强射流的空化作用。其中风琴管和 Helmholtz 谐振腔是两种典型的自激振动腔室结构, 如图 1 所示。

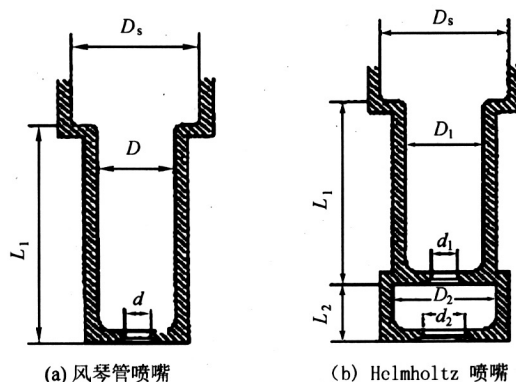


图 1 实验用自振空化喷嘴示意图

Fig.1 Schematic of self-resonating cavitating jet nozzles

风琴管振动腔结构按下式设计^[3]:

$$L = \frac{K_N \cdot d}{Ma \cdot Sr} \quad (1)$$

式中: L —风琴管振动腔长度/mm; d —喷嘴出口

[收稿日期] 2004-02-13

[基金项目] 国家杰出青年科学基金资助项目(50125413); CNPC 重点应用基础研究项目(03A20201)

[作者简介] 李根生(1961-), 男, 安徽石台县人, 石油大学教授, 博士生导师, 主要从事石油工程和水射流技术研究

直径/mm; Ma —射流工作马赫数, 无因次; Sr —临界 Strouhal 数, 无因次; K_n —振动腔内振动的模数系数, 由下式确定:

$$K_N = \begin{cases} \frac{2N-1}{4}, \left(\frac{D_s}{D}\right)^2 \gg 1, \left(\frac{D}{d}\right)^2 \gg 1 \\ \frac{N}{2}, \left(\frac{D_s}{D}\right)^2 \gg 1, \left(\frac{D}{d}\right)^2 \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

2.2 自振空化射流喷嘴设计^[4,5]

由于流体共振是靠自激产生的, 是无源自振。根据水声学原理, 共振驻波的频率与射流临界自激结构频率相近, 该频率值由喷嘴的临界斯特罗哈 (Strouhal) 数确定, 但是, 精确的共振频率值取决于谐振腔的入口截面 $(D_s/D)^2$ 和出口截面 $(D/d)^2$ 的收缩程度。因此, 谐振腔的设计, 首先必须计算出谐振腔的固有频率, 然后根据自激压力振荡可能发生的激励频率 (射流临界自激结构频率) 设计出合适的谐振腔尺寸。表 1、表 2 给出几种自振空化射流喷嘴的设计。

表 1 几种典型风琴管自振空化射流喷嘴

Table 1 Organ-pipe cavitating nozzle

编号	结构尺寸/mm				结构关系		
	d	D_s	D	L	D_s/D	D/d	L/d
1	3.0	26.0	12.0	31.5	4.70	16.0	10.5
2	4.0	26.0	12.0	42.0	4.70	9.0	10.5
3	5.0	26.0	12.0	52.5	4.70	5.76	10.5
4	10.0	28.0	15.0	75.0	3.50	2.25	7.5
5	10.0	28.0	15.0	55.0	3.50	2.25	5.5
6	10.0	26.0	10.0	42.0	6.76	6.25	10.5

表 2 几种典型的 Helmholtz 空化喷嘴

Table 2 Helmholtz cavitating nozzles

喷嘴 编号	结构尺寸/mm				结构关系		
	d_1	d_2	L_2	D_2	d_2/d_1	L_2/d_1	D_2/d_1
1	10.0	12.0	10.0	30.0	1.2	1.0	3.0
2	10.0	12.0	20.0	30.5	1.2	2.0	3.0
3	3.4	4.0	3.0	15.0	1.2	0.9	4.4
4	3.4	4.0	6.5	10.5	1.2	1.9	3.1

3 实验装置与实验方法

实验装置如图 2 所示, 可以安装 2 种模拟井筒, 一种是透明有机玻璃筒, 用来进行常压射流实验; 另一种是厚壁钢管筒, 用来进行围压射流实

验。喷枪竖直固定在升降横梁上, 喷嘴装在井筒内喷管的下端, 靶盘 (测压底盘或岩芯) 安装在井筒底座上。通过升降电机驱动横梁, 可调节喷嘴出口与被冲击靶物表面的距离 (此距离通称为喷距)。

冲击压力测试实验是利用水射流在一定喷距下冲击到测压底盘上, 测压底盘上开有直径很小的测压孔 (0.5~1.0 mm), 射流的冲击压力通过测压孔传到装于靶盘的压力传感器上, 从而得到各种喷嘴射流冲击压力的变化规律。岩石冲蚀实验将测压底换成岩芯盒, 其它装置与冲击压力实验相同。

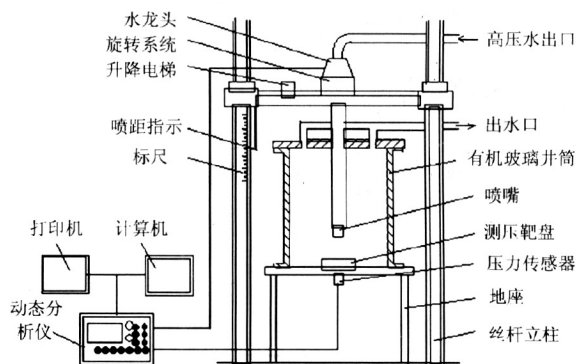


图 2 实验装置示意图

Fig.2 Schematic of experimental system

4 冲击压力特性实验研究

4.1 常压下自振空化射流冲击压力特性

4.1.1 轴向压力分布规律

图 3 是 3 种不同结构风琴管喷嘴在泵压为 10.0 MPa 条件下射流轴心冲击压力脉动峰值 $p_{\max}$ 随喷距 S 变化的规律。

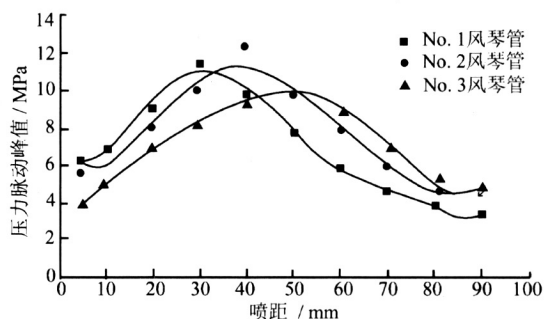


图 3 风琴管空化喷嘴压力脉动峰值随喷距的变化规律

Fig.3 Variation of pressure fluctuation peak vs jet standoff distance for organ-pipe nozzles

可以看出,在泵压一定的条件下,射流冲击压力脉动值在某一合适喷距范围内达到最大,将此喷距称为最优喷距,用 S^* 表示。将最优喷距用喷嘴出口直径无因次化(S^*/d),通过实验发现,在低泵压条件下,风琴管喷嘴的无因次最优喷距范围为8~14,随着泵压的增加,冲击压力峰值和脉动幅度增加,但无因次喷距基本保持不变。

4.1.1.2 径向压力分布规律

如图4所示,射流压力脉动幅度 Δp 随径向距离的增加先逐渐增大,在某一径向距离 r 处达到最大,随后又逐渐降低。因而在一定喷距下某一截面上的最大脉动幅度并不出现在射流轴心,而是偏离轴心一段径向距离 r 处。

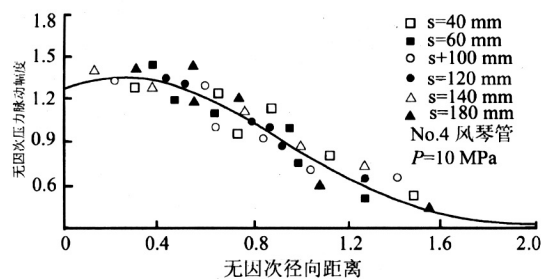


图4 风琴管喷嘴射流压力脉动幅度沿径向分布规律

Fig.4 Distribution of pressure fluctuation amplitude for organ-pipe nozzles vs radial distances

4.1.1.3 不同喷嘴冲击压力脉动特性比较

图5,图6是泵压为9.0 MPa条件下,风琴管空化喷嘴、Helmholtz振荡腔喷嘴和锥角120°普通锥形喷嘴的射流脉动压力峰值和压力脉动幅度随喷距

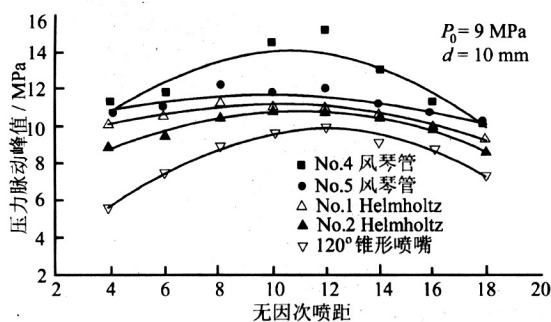


图5 相同泵压下不同喷嘴压力脉动峰值与喷距的关系

Fig.5 Relationship between jet pressure fluctuation peaks and jet standoff distance

变化的关系曲线。显然,在泵压相同条件下,风琴管喷嘴和Helmholtz振荡腔喷嘴压力脉动幅度都高于普通锥形喷嘴,风琴管空化喷嘴的冲击压力峰值和压力脉动幅度分别比锥形喷嘴提高37%和24%。

4.2 围压下自振空化射流冲击压力脉动特性

围压是射流在石油工程应用中影响射流特性的重要参数之一,因此研究围压下自振空化射流的压力脉动特性将具有重要意义。

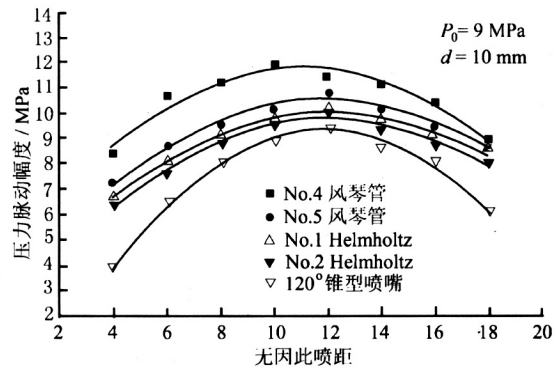


图6 相同泵压下不同喷嘴压力脉动幅度与喷距的关系

Fig.6 Relationship between jet pressure fluctuation amplitude and jet standoff distance

4.2.1 围压下自振空化射流轴心压力脉动幅度分布规律

图7是不同围压条件下,风琴管喷嘴在压降8.0 MPa时的轴心压力脉动幅度随喷距的变化关系。可以看出:a.围压条件下自振空化射流轴心压力脉动幅度存在最优喷距,为喷嘴直径的5~13倍。b.随着围压 p_a 的增大,最优喷距增大,而最大脉动幅度则减小。

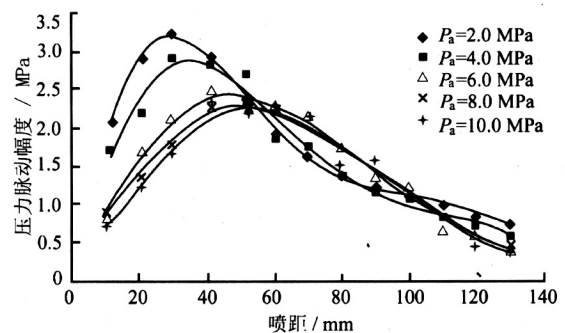


图7 压降为8.0 MPa时轴心压力脉动幅度随喷距的变化曲线

Fig.7 Variation of axial jet pressure fluctuation amplitude vs jet standoff distance at $\Delta p = 8.0$ MPa

4.2.2 围压下自振空化射流时均压力特性

图8是围压为8.0 MPa下不同喷嘴压降时的风琴管喷嘴时均压力分布曲线。分析可知,在不同压降时的数据点均在某一曲线附近,不同围压有相似的规律。同时,自振空化射流轴心时均压力的衰减要比普通喷嘴射流轴心压力缓慢。

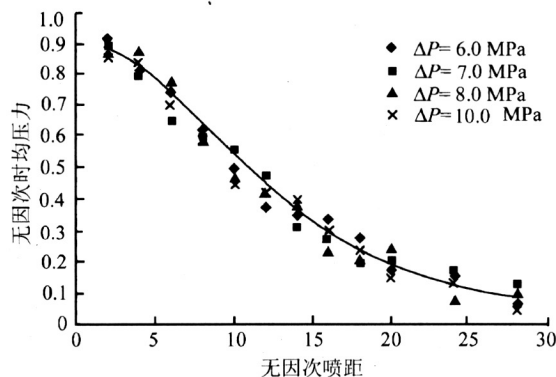


图8 围压为8.0 MPa时的时均压力分布曲线

Fig.8 Distribution of time-averaged jet pressure vs jet standoff distance at $p_a = 8.0 \text{ MPa}$

4.2.3 轴心压力脉动频率变化规律

由图9可明显看出,自振空化射流轴心压力脉动频率基本不随围压、压降和喷嘴的变化而变化,保持在1.38 kHz左右。

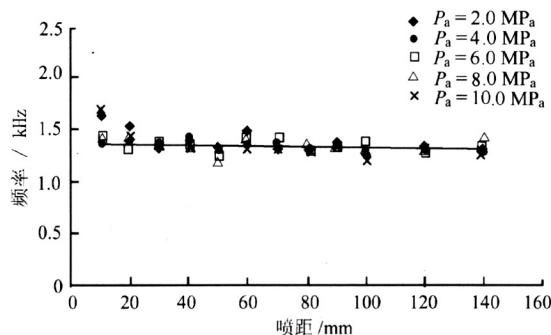


图9 压降为7.0 MPa时不同围压下轴心压力脉动频率随喷嘴距变化曲线

Fig.9 Variation of jet pressure fluctuation frequency vs standoff distance at different ambient pressures

5 冲蚀岩石特性实验

5.1 喷嘴距对自振空化射流冲蚀岩石效果的影响

在泵压一定的条件下,对风琴管空化喷嘴、Helmholtz 振动腔空化喷嘴和锥形喷嘴进行了不同喷嘴距时的冲蚀岩石试验。图10是部分风琴管自振空化喷嘴、Helmholtz 喷嘴和120°普通锥形喷嘴在相同泵压下的的体积冲蚀速度与喷嘴距的关系曲线。在实验泵压条件下,3种喷嘴的无因次最优喷嘴距在8~14之间。

5.2 不同喷嘴射流冲蚀岩石效果比较

试验表明,风琴管空化喷嘴最大体积冲蚀速度是120°锥形喷嘴的3.0~3.3倍,Helmholtz 振动腔空化喷嘴最大体积冲蚀速度是120°锥形喷嘴的1.3~2.3倍,风琴管空化喷嘴最小比能只有120°锥形喷嘴的43%~49%。在相同泵压下,风琴管空化喷嘴冲蚀岩石效果最好,Helmholtz 振动腔空化喷嘴次之,普通锥形喷嘴较差。

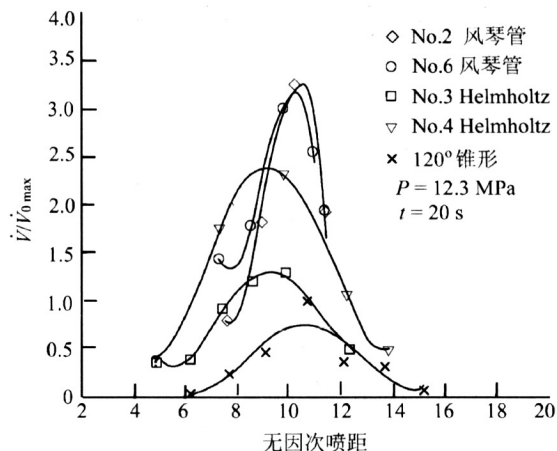


图10 不同喷嘴体积冲蚀速度比较示意图
Fig.10 Comparison of rock erosion rate between different nozzles

5.3 不同风琴管结构对射流冲蚀岩石效果的影响

为了进一步的优化风琴管自振空化喷嘴的设计和应用,对7种不同结构尺寸和结构关系的风琴管喷嘴进行了相同泵压下的冲蚀岩石实验。通过实验发现,当马赫数相同时,Strouhal数小的喷嘴冲蚀岩石效果较好。这与S. C. Crow、F. H. Champagne和V. E. Johnson等人^[6~7]所做的空气射流压力脉动实验结果是相似的。风琴管结构设计最佳参数依据是马赫数 Ma 为0.08~0.09,Strouhal数 Sr 为0.3,截面收缩比 $(D_s/D)^2$ 为10~11;风琴管的长度应在满足上述条件下设计,在没有长度限制时应使喷嘴具有尽可能小的临界

Strouhal 数。

与此同时, 对相同结构、不同出口扩散角的风琴管喷嘴产生的射流冲蚀岩石效果进行了研究。实验发现, 出口扩散角为 30° 的喷嘴比 0° 扩散角的喷嘴冲蚀效果明显提高, 最大体积冲蚀速度提高了 50%, 相应的比能降低了 40%。这是因为喷嘴出口有扩散角时, 出口处沿轴向射流速度梯度减小, 压力梯度增加, 易于产生附面层分离。附面层厚度减小, 有利于旋涡的产生和脱落, 诱发振动强烈, 起始空化数增大, 因而增强了空化强度, 使冲蚀效果得到改善。

5.4 压降对风琴管空化喷嘴冲蚀岩石效果的影响

图 11 是 2 种风琴管空化喷嘴和 120° 锥形喷嘴在最优喷距条件下冲蚀人造砂岩的体积冲蚀速度与压降的关系曲线。从曲线的趋势可以看出: a. 随泵压的增加, 各喷嘴的体积冲蚀速度和深度冲蚀速度按指数规律增长; b. 在各种泵压下, 风琴管空化喷嘴的冲蚀效果都优于锥形喷嘴, 且随泵压的增加, 这种优越性更加显著。这是因为泵压的增加, 射流作用在岩石表面的滞止压力随之增加, 这对冲蚀效果的提高有一定的作用。但更重要的是泵压增加, 射流的空化数和 Strouhal 数减小, 提高了射流的振动幅度和空化强度, 从而使冲蚀效果大大提高。

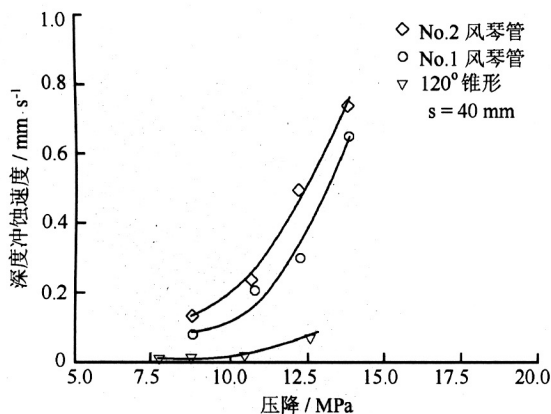


图 11 风琴管喷嘴和锥形喷嘴冲蚀岩石效果与压降的关系

Fig.11 Effect of jet pressure on rock erosion depth for organ-pipe nozzles and conical nozzle

6 自振空化射流应用

6.1 自振空化射流喷嘴钻头

将自振空化喷嘴安装在在胜利、中原、江苏、华北等 5 个油田的 500 多只三牙轮钻头上进行了现场钻井试验。虽然在各个油田试验的区块不同, 井深不同, 岩性不同, 钻头水力参数也不完全相同, 但结果表明, 大多数使用自振空化射流喷嘴的钻头都能提高机械钻速、增加钻头进尺。

在相同或相近条件下, 自振空化喷嘴钻头与普通中长喷嘴钻头相比, 钻井速度提高 10.5% ~ 49.3%, 平均机械钻速提高 31.2%, 钻头进尺也相应增加 29.1%。实践证明, 采用自振空化射流钻头是提高机械钻速的有效方法之一。由于自振空化喷嘴成本较低, 使用方便, 在不增加地面机泵功率的情况下就可以大幅增加射流对井底的冲击力, 从而提高机械钻速, 增加钻头进尺, 降低钻头成本, 应用于油田生产将会带来显著的经济效益。

6.2 自振空化射流处理近井地层

研究出高压旋转自振空化射流处理炮孔和近井地层新技术^[8]。该技术在利用自振空化射流在井下产生低频水力冲击、高频水力振荡、空化噪声(超声波) 3 种物理效应同时作用于炮孔和近井地层, 达到对射孔段所有炮孔的全方位处理。自 1995 年以来, 在辽河、胜利、中原等 10 多个油田的 500 多口油井和注水井现场实验和应用中, 平均单井增油 20% ~ 30%, 单井增注 30% ~ 130%, 有效率 90% 以上, 有效期 90 天以上, 开辟了自振空化射流技术新的研究和应用领域。

6.3 自激波动注水

利用自振空化射流能产生强烈的压力震荡和空化噪声的特性, 研制出自激波动注水技术。该技术使得在正常注水过程中, 不仅可以将自振空化水射流的振动和冲击能量直接作用到炮眼和近井地层, 解除已形成的地层堵塞, 提高注水量, 而且可以利用自振空化射流的脉动特性, 将目前的持续压力注水改变成波动压力注水, 避免和减少机械杂质沉淀, 稳定注水量, 延长注水有效周期^[9]。胜利油田 11 口井现场试验表明, 自激波动注水技术平均降低注水压力 2.1 MPa, 单层日增注 29 m³, 该技术开辟了自振空化射流新的应用领域, 实现注水技术的突破性发展。

7 结论

1) 采用风琴管谐振腔振荡模型设计的喷嘴可以产生具有良好破岩效果的自振空化射流。

2) 在相同条件下, 自振空化射流的冲击压力脉动幅度比锥形喷嘴射流提高 24% ~ 37%, 冲蚀岩石效果提高 1~2 倍。

3) 自振空化喷嘴钻头与普通中长喷嘴钻头相比, 钻井速度提高 10.5% ~ 49.3%, 平均机械钻速提高 31.2%, 钻头进尺也相应增加 29.1%。采用自振空化射流钻头是提高机械钻速的有效方法之一。

4) 基于自振空化射流原理的处理近井地层和自激波动注水新技术在石油工程中取得了良好的增产和增注效果, 开辟了自振空化射流技术新的研究和应用领域, 具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Johnson Jr, Virgil E, Chahine G L, Lindenmuth W T. The development of structured cavitating jet for deep hole bits [R]. SPE 11060, 1982, 546~557
- [2] 李根生, 沈忠厚. 空化射流及其在钻井工程中的应用前景 [J]. 石油钻探技术, 1996, 24 (4): 51~54
- [3] 沈忠厚, 李根生, 王瑞和. 水射流技术在石油工程中的应用及前景展望 [J], 中国工程科学, 2002, 4 (12): 60~65
- [4] Li Gensheng, Zhou Changshan, et al, Experimental study of impact pressure fluctuations for self-resonating cavitating water jets [A]. Proc of The 3rd Pacific Rim Int Conference on Water Jet Technology [C]. Taiwan, 1992, 91~106
- [5] Liao Z F, Tang C L. Theoretical analysis and experimental study of the self-excited oscillation pulse jet device [R]. Proceedings 4th U S Waterjet Conference. 1987, 27~34
- [6] Crow S C, Champagne F H. Orderly structure in jet turbulence [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1971, 48 (3): 547~591
- [7] Johnson V E Jr, Conn A F, et al. Cavitating and structured jets for mechanical bits to increase drilling rate [J]. Trans ASME Journal of Energy Resources Technology, 1984, (106): 282~294
- [8] 李根生, 马加骥, 沈晓明. 高压水射流处理地层的机理及试验 [J]. 石油学报, 1998, 19 (1): 96~99
- [9] Li Gensheng, Zhang Debin, Huang Zhongwei, et al. Self-excited oscillating water injection: mechanisms and experiments [J]. Petroleum Science and Technology, 2003, 21 (1&2): 153~163

Advances in Investigation and Application of Self-resonating Cavitating Water Jet

Li Gensheng¹, Shen Zhonghou¹, Zhou Changshan², Zhang Debin², Liao Hualin²

(1. Faculty of Petroleum Engineering, University of Petroleum, Changping, Beijing 102249, China;

2. College of Petroleum Engineering, University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China)

[Abstract] The paper presents advances in investigations of a new jet, the self-resonating water jet, including its design principles, impacting properties of impact pressure and rock erosion, and field applications in China. The researches show that nozzles designed on basis of organ pipe structure can generate self-resonating cavitating water jets. As compared with conventional cone-shaped nozzle with 120 degree of taper angle, the amplitude of impulse pressure, and maximum impact pressure increases 24% and 37% respectively, and rock breaking efficiency increases by 1 to 2 times. Self-resonating water jets have been successfully applied in petroleum engineering. Roller bits, devices for treatment of near well-bore formation, self-excited oscillating water injectors with the self-resonating water jet technique have been developed, and great economic efficiency has been achieved.

[Key words] self-excited resonance; cavitating jet; oil well drilling; oil and gas production