

文章编号: 1000-7393(2005)01-0016-04

喷嘴结构对高压射流特性影响研究^{*}易 灿¹ 李根生²

(1 石油大学石油工程学院, 山东东营 257061; 2 石油大学石油天然气工程学院, 北京 102249)

摘要 自 20 世纪 70 年代以来, 高压水射流技术已在各工业领域逐渐得到了广泛应用, 但迄今仍未能大规模采用, 原因是还存在着一些有待解决的问题, 其中最为迫切的就是如何提高喷嘴射流效率、充分利用其能量的问题。喷嘴是水射流技术应用中获得高能量利用率的关键因素之一, 其结构好坏直接影响射流质量。为充分发挥喷嘴最大效率, 最大限度地利用水力能量, 国内外有关专家从理论分析、数值计算和实验研究 3 个方面对喷嘴结构与高压射流特性的关系进行了研究分析, 结果表明喷嘴结构对射流流动特性、冲蚀性能、空化现象等产生重要影响, 指出提高喷嘴效率应当着眼于以下几个方面: 加强基础研究; 改变射流作用方式、将连续射流调制成脉动射流; 充分利用空化空泡破裂压力, 研制开发优质喷嘴, 以期对拓宽水射流技术在工业中的应用有所帮助。

关键词 喷嘴 高压射流 空化 流场

中图分类号: TE248 文献标识码: A

喷嘴是水射流技术应用中获得高能量利用率的关键因素之一, 对射流质量有明显的影响。利用从喷嘴射出的具有很大动能的射流, 来进行清洗、切割和破碎岩石等。实验已经证实, 如果喷嘴质量差或耐磨性不够, 将引起射流质量恶化, 就有可能使射流设备功率大部分都浪费掉。因此研究喷嘴结构与射流性能之间的关系, 提高射流质量是非常重要的。

喷嘴结构是指喷嘴的流道形状与几何尺寸; 喷嘴的流动特性(水力特性)是指由它所形成的射流扩散角的大小、等速核的长度以及喷嘴流量系数的大小。对喷嘴结构与射流动力性能关系的研究主要包括 3 个方面: 理论分析、数值计算和实验研究。

1 理论分析

国内外不少研究人员从不同角度对喷嘴进行了理论分析, 早期分析喷嘴问题多把流动看成是无黏性势流来处理, 从而归结为求解势函数的 Laplace 方程, 由于流体总是有黏性的, 因而喷嘴壁附近必有一层很薄的边界层, 边界层厚度对射流质量影响不可忽略。目前一般将喷嘴内部流动划分为 2 部分: 一是流动速度大而横向速度梯度和紊流度都较小的核心区, 通常近似的看作势流核心区; 另一部分则是

流动速度小而横向速度梯度大的边界层。

喷嘴内核心区流动按轴对称平面势流处理。根据流函数 $\Psi(x, r)$ 定义可写出核心区内流体的轴向速度 u_x 及径向速度 u_r 如下

$$u_x = \frac{\partial \Psi}{\partial x}, \quad u_r = -\frac{\partial \Psi}{\partial r} \quad (1)$$

$$\text{连续方程为 } \frac{\partial \Psi}{\partial x} - \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} + \frac{\partial \Psi}{\partial r^2} = 0 \quad (2)$$

对喷嘴内部的边界层, 有连续方程、动量方程和输运方程

$$-H \frac{d\theta}{dx} + \frac{(R-H)\theta}{d_0} \frac{d\theta}{d\eta} - \theta \frac{dH}{d\eta} + R' = 0 \quad (3)$$

$$\frac{R-\theta}{R} \frac{d\theta}{dx} + \left[\frac{\theta}{U_c} (H+2) - \frac{\theta^2}{2RU_c} (H+2) \right] \frac{dU_c}{dx} + \frac{\theta}{R} \frac{dR}{dx} - \frac{C_f}{2} = 0 \quad (4)$$

$$\eta \frac{d\theta}{dx} + \frac{\theta\eta}{\nu_0} \frac{d\theta}{dx} + \theta \frac{d\eta}{dx} - \varphi = 0 \quad (5)$$

式中, H 为形状因子; θ 为边界层动量损失厚度; R 为喷嘴轮廓半径; η 为卷吸参数; C_f 为壁面摩擦阻力因数; U_c 为喷嘴内核心区速度; φ 为卷吸函数。

喷嘴内部势流核与边界层的诸方程分别求解,

*基金项目: 国家杰出青年科学基金(50125413)和 CNPC 重点应用基础研究项目(03A20201)资助。

作者简介: 易灿, 1973 年生。石油大学(华东)博士研究生, 主要从事油气井流体力学方面研究。电话: 0546-8393964

结合边界上的速度匹配,得出一个完整的喷嘴内部流动特性,不同的文献给出了不同的数值解。文献[1]采用轴对称湍流边界层的动量积分方法,对喷嘴内的流动作了分析计算。文献[2~3]采用同样的方法得到了类似解,只不过方程解的系数略有不同而已。

自振空化喷嘴是利用小扰动波在管系传播的瞬态流理论和水声学的流体自激振荡原理研制而成的,能将连续射流调制成脉冲射流,其中风琴管和亥姆霍兹谐振腔是2种典型的自激振动腔室结构。根据理论推导,风琴管内产生强烈谐振时应满足的关系式为^[4]

$$L = \frac{K_n d}{M_a S} \quad (6)$$

式中, L 为风琴管振动腔长度, mm; d 为喷嘴出口直径, mm; M_a 为射流工作马赫数; S 为临界 Strouhal 数; K_n 为振动腔内振动的模数系数,由下式确定。

$$K_n = \begin{cases} \frac{2N-1}{4}, & \left(\frac{D_i}{D}\right)^2 \gg 1, & \left(\frac{D_i}{d}\right)^2 \gg 1 \\ \frac{N}{2}, & \left(\frac{D_i}{D}\right)^2 \gg 1, & \left(\frac{D_i}{d}\right)^2 \geq 1 \end{cases} \quad N=1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

式中, D_i 为喷嘴入口直径; D 为喷嘴谐振腔直径。

这2种喷嘴都取得了比较好的现场应用效果^[5~9]。

2 数值计算

Quinn等^[7]利用数值计算的方法对不可压的低速射流下不同流道型线的喷嘴进行了研究,指出射流初始段截面上速度的衰减以及轴心速度的衰减与喷嘴内部流道型线有关。对于喷嘴内的流动特性来说, Khar等^[8]利用连续方程、动量方程以及紊动能(k)和能量消散(ϵ)方程,预测了不同蓝宝石喷嘴内高压紊流的动力学行为,计算了3种不同锥角(10° , 60° , 90°)喷嘴,表明 90° 锥角在进入管嘴之前产生循环,接近壁面的大部分紊动能都消散了,因而形成循环的 90° 锥角出口速度最大,其余2种则相差无几。随着圆柱段长度增加,出口速度递减,最佳长度为喷嘴出口直径的4~10倍。

K Babets^[9]等采用标准模型对喷嘴内的紊流进行数值模拟,并与实验结果进行了对比,结果表明喷嘴内的空气相对流动影响很大,流体分离以及空化对喷嘴设计具有重要影响。Lohn等^[3]采用有限元

方法研究了喷嘴内的流场特性,并采用激光测速仪和压力传感器对数值结果进行了验证,结果表明射流在宏观上是紊动的,而在微观上是一连串的离散液滴。以上各种方法均采用稳定、二维、不可压、绝热紊流控制方程

$$\frac{dU_i}{dx_j} = 0 \quad (8)$$

$$\rho U_j \frac{\partial K}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] - \rho \epsilon \quad (9)$$

$$\rho U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \mu_t \frac{\epsilon}{K} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{K} \quad (10)$$

式中, U_i 为喷嘴出口 x, y 向速度; K 为紊动能; μ_t 为温度为 T 时的流体黏度; ϵ 为耗散率; C_1, C_2, σ_k 均为经验常数; ρ 为液体密度。

在国内,何枫等^[10]利用 RNG 湍流模式和有限体积法,并采用四边形非结构网格,对不同内部流道型线的喷嘴自由射流进行数值模拟,得出了对于轴对称等直径圆管喷嘴,进口处的流道型线对射流流道参数的分布有较大的影响,轴对称收缩喷嘴的收缩角大小主要影响射流出口附近的流动,对流动具有不同的阻滞效果。钟声玉等^[2]计算了锥形喷嘴各参数对射流性能的影响,其参数包括收缩角、圆柱段长度、粗糙度等,并与试验结果进行了比较。蒋彧澄等^[11]采用面元法对不同锥形喷嘴结构内部及射流区域内的流场进行了简要的计算,并结合试验结果进行分析,得出了喷嘴的几何结构对淹没空化水射流冲蚀性能的影响关系。此外,贾建国^[12]、刘成文^[13]等通过对锥形喷嘴内流动阻力的分析,推导出锥形喷嘴流量系数的理论计算公式。

3 实验分析

由于实验条件的限制,直接对喷嘴射流质量进行测量是很困难的,因此大部分研究者通过射流对物体的冲蚀率大小,间接判断射流质量的优劣。

许多研究工作者探索了淹没条件下不同喷嘴类型及不同工作条件下对射流性能的影响。Leach和Walker^[14]从产生最大冲击压力的角度认为, 13° 锥形收缩角效果最好,而Voitsekhovsk等^[15]从射流紧密性认为, $3 \sim 4^\circ$ 锥形角最好。Leach及Walker和Voitsekhovsk都认为,从射流冲击压力和紧密性观点出发,圆柱形出口段长度为喷嘴直径3~4倍时效

果最好。Yang Geun Young等^[16]运用实验方法得出射流初始段截面上速度的衰减以及轴心速度的衰减与喷嘴内部流道型线有关,这验证了Quinn的数值模拟结论。Baker^[17]等人实验研究了喷嘴几何尺寸对淹没水射流喷嘴切割性能的影响,通过改变喷嘴入口锥角($13 \sim 180^\circ$)和喷嘴圆柱形部分长度($0.5 \sim 4$ 倍喷嘴直径)得出了最好的喷嘴是锥角 60° ,圆柱段长度为喷嘴直径 0.5 倍。由此可以得出,最佳的入口锥角和圆柱段长度与实验条件密切相关,实验条件不同,结果不同。

对于高压射流,空化的出现可能使得原本就复杂的喷嘴内流场更加复杂。尽管如此,仍旧有许多研究空化喷嘴成功的范例。Katsuya Yanacida^[18]进行了淹没条件下简单角形喷嘴的实验,这种喷嘴能促进空化在水里产生,通过喷嘴出口段扩散形状的改变,加剧了射流和周围液体之间的剪切作用,从而引起空泡的产生。从实验结果看,与非角型喷嘴相比,角型喷嘴获得的冲蚀体积几乎数倍于前者。摄影方面,Chaves等^[19]利用摄影技术,成功地拍摄到 $\varnothing 0.2$ mm喷嘴内的空化现象,结果显示喷嘴从入口到出口都是空化区域。Arcumanis等^[20]照片清楚地显示了不对称喷嘴喷管梢的空化情况。Schmidt等^[21]研究不对称喷嘴空化情况,实验照片表明液气界面情况,在入口处,界面光滑,空化区末端则显粗糙。并解释了喷嘴出口分离情况,低空化数时,是雷诺数的函数,高空化数时,是空化数的函数。

近年来,空化射流以其在清洗、切割方面的高效率,特别是在围压条件下石油钻井、水下清洗的潜在优势,深受研究人员青睐。Vijay^[22]利用同轴重叠喷嘴结构,使内喷嘴高压水与外喷嘴低压水环形水束的界面产生强烈剪切形成空化射流,这种射流应用于水下切割和船舶清洗试验中,取得了明显效果。石油大学李根生等^[23]研究了一种新型喷嘴——双射流喷嘴,充分利用旋转射流中心压力低,中心射流易产生空化的优点,在破岩扩孔方面取得了重要进展。笔者在围压条件下进行了自振空化喷嘴、双射流喷嘴和锥形喷嘴空化起始能力的实验测量,结果表明自振空化喷嘴、双射流比普通锥形喷嘴有更大的起始空化数,自振空化喷嘴和双射流喷嘴起始空化数大都在 1.0 以上,自振喷嘴最高达到 1.67 而锥形喷嘴最高仅为 0.54 在射流压力为 20 MPa时,自振喷嘴和双射流喷嘴至少比锥形喷嘴增加 5 MPa的空化起始能力。

4 研究方向

4.1 基础性研究

基础性研究包括实验、数值模拟和理论研究,实验方法是采用先进的技术手段测量喷嘴射流的细微流动结构,注重简单条件下射流中被弱化、被忽略的一些因素,而这些因素可能在复杂条件时对射流影响较大,这将对提高复杂条件下喷嘴射流效率的研制起到重要作用;从数值计算看,紊流模型和边界层的处理是2个最为关键的问题,目前射流紊流场的数值计算刚刚起步,因此是一个应当引起重视的研究方向;理论分析方面,目前的理论研究大都是为了满足实际工程的需要,对大量的实验数据归纳总结的,未有任何新的方法出现,其预测精度取决于具体问题及归纳公式所依据的实验的相近性,严重制约了理论的指导作用。

4.2 射流的作用方式

改变射流作用方式,将连续射流调制成脉冲射流,文献[24~25]介绍了风琴管自振喷嘴在脉动特性、破岩效率等方面的实验研究,结果表明自振空化射流的冲击压力脉动峰值和脉动幅度分别比普通锥形喷嘴高 37% 和 24% ,在相同泵压下,冲蚀岩石效果为普通喷嘴的 $2 \sim 4$ 倍。

4.3 射流的作用效率

充分利用空化射流空泡的破裂压力,提高射流的作用效率。空化和空蚀对物体的破坏作用是十分强大的,空泡溃灭同时还产生强烈的振动和噪声,在工业清洗、切割、钻探射流中可人为地引入空化和空蚀,利用其强大的破坏作用和振动噪声冲击波来提高喷嘴的使用效率。

4.4 研制新型优质喷嘴

随着对高压水射流技术研究工作的不断开展,优质喷嘴的重要性已越来越明显,通常包括以下几方面:喷嘴的内截面形状、表面加工精度、表面粗糙度、材质和热处理工艺等。

5 结论

以较详实的资料和文献,从理论分析、数值计算和实验研究3个方面对喷嘴结构影响高压射流流动特性进行了分析总结,表明喷嘴结构对射流流动特性、冲蚀性能、空化等产生重要影响,针对如何提高喷嘴射流效率、充分利用其能量的问题,指出提高喷嘴效率应当着眼于以下几个方面:加强基础性研究、将连续射流调制成脉动射流、充分利用空泡破裂压

力和研制开发优质喷嘴,以期对拓宽水射流技术在工业中的应用有所帮助。

参 考 文 献

- [1] Jackson M K, Davies T W. Nozzle Design for Coherent Water Jet Production. Proceeding of the 2nd U S Water Jet Conference, Rolla, Missouri, 1983, 53~74
- [2] 廖其冀, 钟声玉, 朱勇. 喷嘴结构对高压水射流性能影响的研究. 水动力学研究与进展, 1987, 2(4): 42~51
- [3] Lohn P D, Brent D A. Nozzle Design for Improved Water Jet Cutting. 3rd International Symp. WJCT Paper A3, 1976
- [4] 李根生, 沈忠厚. 风琴管自振空化喷嘴设计原理. 石油大学学报, 1992, 16(5): 35~39
- [5] 沈晓明, 袁建强, 刘明宇. 利用定向自激振动射流提高机械钻速. 石油钻采工艺, 1997, 19(4): 17~20, 35
- [6] 廖振方, 唐川林, 张风华. 自激振荡脉冲射流喷嘴的试验研究. 重庆大学学报(自然科学版), 2002, 25(2): 28~32
- [7] Quinn W R, Militzer J. Effects of Nonparallel Exit Flow on Round Turbulent Free Jet. International J Heat and Fluid Flow, June 1989, 10(2): 359~365
- [8] Khan M E H, Geskin E S. A Numerical Investigation of Turbulent Behaviors of Water Flow Inside Nozzle. Proc 7th U S Water Jet Conference, Seattle, Washington, 1993, 273~285
- [9] Babets K E, Geskin. Numerical Study of the Turbulent Flow Inside a Pure Water Jet. Proc 11th U S Water Jet Conference, Paper 19, Minneapolis, 2001
- [10] 何枫, 谢峻石, 杨京龙. 喷嘴内部流道型线对射流流场的影响. 应用力学学报, 2001, 18(4): 114~120
- [11] 蒋盛澄, 宁原林, 胡寿根. 淹没水射流锥形喷嘴的计算分析与试验比较. 上海理工大学学报, 1999, 21(4): 345~350
- [12] 贾建国. 高压水射流喷嘴的流量系数与能量转换效率的关系. 长春光学精密机械学院学报, 1995, 18(1): 32~36
- [13] 刘成文, 李兆敏. 锥形喷嘴流量系数及水力参数的理论计算方法. 钻采工艺, 2000, 23(5): 1~3
- [14] Leach S J, Walker G L. The Application of High Speed Liquid Jets to Cutting. Phil Trans A, 260, 1965
- [15] Voitsekhovskiy B V, Solovkin E B, Grebennik O I. On Destruction of Rocks and Metals by High Pressure Jets of Water. Proc 1st Int Symp. Cutting Technology, 1972, Paper C8
- [16] Yang Geunyoung, Choimansop, Lee Joonsik. Experimental Study of Spat Jet Impingement Cooling on Concave Surface. Effects of Nozzle Configuration and Curvature. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42(12): 2199~2209
- [17] Barker C R, Selberg B P. Water Jet Nozzle Performance Tests. Proceedings of the 4th International Symposium on Jet Cutting Technology, Paper A1, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, Bedford, England, 1978
- [18] Katsuya Yanacda. Water Jet Cavitation of Submerged Horn Shaped Nozzle. Proc 3rd U S Water Jet Conference, Pittsburgh, USA, Paper D4, 1985
- [19] Chaves H, et al. Experimental Study of Cavitation in the Nozzle Hole of Diesel Injectors Using Transparent Nozzles. SAE Paper 950 290, 1995
- [20] Arcoumanis C, Gavaises M, Nouri J M, Abdul-Wahab E, Horrocks Roy W. Analysis of the Flow in the Nozzle of a Vertical Multi Hole Diesel Engine Injector. SAE Paper 980 811, 1998
- [21] Schmidt David P, Rutl C J, Corradini M L. Cavitation in Two-Dimensional Asymmetric Nozzles. Sae Technical Paper Series, 1999
- [22] Vijay M M, Zou C, Hu S G, et al. A Study of the Practicality of Cavitating Water Jets. Proc 11th Int Symp on Jet Cutting Technology, St Andrews, Scotland, 1992
- [23] 李根生, 易灿, 吴波. 双射流喷嘴破岩扩孔的实验研究. 石油钻探技术, 2001, 29(3): 9~11
- [24] 李根生, 沈忠厚, 周长山等. 自振空化射流冲击压力脉动特性实验研究. 水动力学研究与进展, 2003, 18(5): 570~575
- [25] 李根生, 沈忠厚. 常压下淹没自振空化射流冲蚀岩石效果的实验研究. 华东石油学院学报, 1987, 11(3): 12~21

(收稿日期 2004-09-20)

[编辑 薛改珍]

Yingchun Yuan Xianhua (Drilling Technology Research Institute of Shengli Petroleum Administrative Bureau Dongying 257017, Shandong)

Abstract During drilling horizontal well usually adopt geometry steerable drilling technology to increase the penetration rate of borehole track in oil reservoir. Geosteering technology is system engineering and may be resolved by personnel of drilling and geology and well logging and oil reservoir and logging participate in and combine with together. Combination the geosteering drilling technology characteristics with reality conditions of geology feature of drilled oil layer, drilling tool construction, well path control and field application of real-time geology curve etc., we introduce the application condition about geosteering technology in horizontal well drilling and discuss important function of the geometry steerable drilling technology in oil layer identification and put forward several viewpoint and suggestion that guides the geometry steerable drilling technology. Practice indicates that geometry steerable drilling technology has important function on distinguishing hydrocarbon reservoirs. It has got good application result in Chengyi - Pingli horizontal well geosteering parameter-measuring interpretation while drilling system presents the dependable means that can explain the real-time curve of LWD and the results is basically in accordance with the explain results of wireline cable logging and it has great value of employment.

Key words East Cheng Oilfield geosteering well path control Logging While Drilling geologic parameter

METHOD FOR REAL-TIME LITHOLOGY IDENTIFYING WHILE DRILLING

Zhang Hui Gao Deli (University of Petroleum Beijing 102249)

Abstract It is very important for the drilling engineer and geologist to real-time identify formation lithology while drilling. Based on the mud logging data to identify lithology, the effect of drilling operational parameters, hydraulic factors and bit wear should be comprehensively considered. It is not practical to real-time measure bit wear while drilling. According to BP neural network theory, dual neural network model for lithology identification was established. The first neural network was used to identify

lithology under the condition of known bit wear. The second neural network was used to predict bit wear under the condition of given lithology. The two neural networks were linked by the state of bit wear. Sample data were selected to train the two neural networks respectively. Combined with mud logging data, lithology was predicted according to the process of lithology identification. This model was verified in Xinjiang oil field. Compared with geological explanation of logging data, the prediction result is better and the coincidence rate can reach about 85%. Field application result shows that this model is effective and feasible.

Key words mud-logging data lithology identification bit wear real-time BP neural network prediction

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE NOZZLE STRUCTURE ON WATERJET CHARACTERISTICS

Yi Can (Department of Petroleum Engineering University of Petroleum Dongying 257061, Shandong), Li Gen sheng

Abstract Nozzle is one of key factors to obtain high energy efficiency in water jets applications, which indirectly influences effect of water jet. In order to utilizing hydraulic energy and improve jets efficiency, a survey of the literature on nozzle configuration and its influence on jet characteristics was summarized in theorization, numerical simulation and test. The survey reveals nozzle configuration strongly influencing jet flow characteristics, erosion efficiency and cavitation. According to the investigation, the paper suggests that strengthening basic studies, changing jets acting manners and adjusting continue jets to impulse jets should be emphasized for improving nozzle efficiencies. Also, there will be benefit to widen jets industrial applications by taking advantage of high pressure due to bubbles breaking in cavitation jets and developing new high efficient nozzles.

Key words nozzle high pressure jet cavitation flow field

APPLICATION OF BELLOWS SEALING TECHNIQUE FOR WELL L7-71 N TUHA OILFIELD

Zhang Yanping Tan Jun Zhao Zhifang Zeng Quanxian Yu Ping (Drilling and Production Technology Research Institute of Exploration and Development