

文章编号: 1000-4750(2007)03-0185-04

空化射流形成的判据和冲蚀机理

李子丰

(燕山大学石油工程研究所, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 阐述了空化射流研究简况和空化形成机理。讨论了用于描述空化是否发生和空化程度的空化数的合理性, 认为用空化数不能判断射流的空化状态; 流场中具有绝对压强小于或等于汽化压强的区域是射流空化的必要条件; 在高环境压强下, 必须采取特殊的减压措施才有可能实现空化。针对空化射流比普通射流冲蚀能力强的事实, 分析了 Rayleigh 空穴湮灭冲击压强计算公式存在的问题, 给出了空化射流的射流质量脉动引发作用在靶体表面上的压强脉动是导致靶体容易破坏的主要原因。

关键词: 流体力学; 空化; 理论研究; 射流; 喷嘴; 湮灭; 破坏; 冲蚀; 判据

中图分类号: U66; O35 **文献标识码:** A

CRITERION AND EROSION MECHANISM OF CAVITATING JET

LI Zi-feng

(Petroleum Engineering Institute of Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: Mechanism of cavitation is introduced. Rationality of cavitating number which is used to judge cavitation and describe cavitating degree of jet is discussed, and it is found that cavitating condition cannot be obtained from cavitating number. The prerequisite for cavitation is that there exists an area in which absolute pressure is lower than or equal to vaporization pressure. To cavitate jet in high pressure environment, special decompression measure must be undertaken. Problems of Rayleigh equations for calculating impulsion pressure under annihilation of cavity to explain the fact that cavitating jet is of greater power to break target object than common jet are analyzed. A new explanation is given that target surface pressure pulse from density changes of cavitating jet which contain cavity is the main factor for breaking target more effectively.

Key words: fluid mechanics; cavitation; theoretical research; jet; nozzle; annihilation; break; erosion; criterion

从 19 世纪后半叶在螺旋桨叶片上发现空化现象以来, 空化理论及应用已经有了很大发展, 并且所涉及的领域也越来越多。虽然空化形成机理和冲蚀机理尚不是很清楚, 但是它的破坏能力已经是有目共睹^[1,2]。在航海领域, 固体壁面附近空化泡的湮灭不仅会造成船舰和潜艇螺旋桨表面的气蚀损坏, 而且所产生的空化噪声还会对军舰和潜艇的安全造成危险^[3]。在水能领域, 随着资源的进一步开发, 百米级的高坝陆续建设, 高速水流容易产生空化, 而由空化所引起的空蚀破坏严重影响系统的正常运

行, 甚至造成重大的灾难性工程事故^[4]。在机械领域, 已经用空化射流进行切割和物体表面清洗^[5]。在石油和矿山领域, 已经开展空化射流冲蚀实验^[1,2,6~11]。本文探讨空化射流的判据和空化射流具有较强冲蚀能力的原因。

1 空化形成机理^[1,2,4]

空化是由于液流系统中的局部低压(低于相应温度下该液体的饱和蒸气压)使液体蒸发而引起的微气泡(或称为气核)爆发性生长现象。通常见到的

收稿日期: 2005-08-05; 修改日期: 2006-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(50574078)

作者简介: 李子丰(1962), 男, 河北迁安人, 教授, 博士后, 博导, 从事石油工程力学研究(E-mail: zfli@ysu.edu.cn)

液体都不是纯液体，里面含有许多微粒杂质，如固体微粒、微生物和微气泡。这种微气泡的半径一般在 20 μm 以下，叫做气核或空化核。当液体压强低到相应温度下的饱和蒸气压强时，空化核开始膨胀，实现空化。当环境压强高于相应温度下的饱和蒸气压强时，空化泡湮灭。图 1 表示一段收缩扩张管内发生的空化现象；液流的上游绝对压强为 p_1 ，下游绝对压强为 p_2 ；下游的速度为 v_2 ；收缩管内的绝对压强为 p_c ，速度为 v_c 。则当 $p_c < p_v$ (p_v 为液体在当前温度下的绝对饱和蒸气压) 时，发生空化。

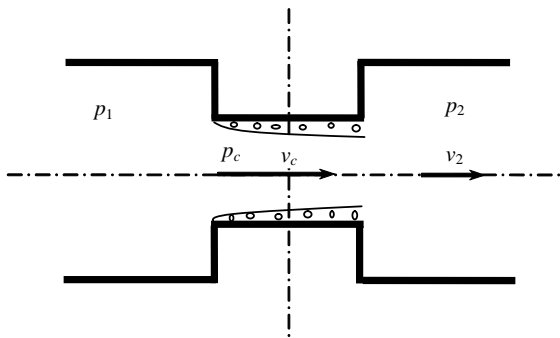


图 1 收缩扩张管内的空化现象

Fig.1 Cavitation in contracting and expanding tube

2 空化的判据

2.1 现有的理论-空化数^[1,4,8]

在实际工程应用中，不管是避免空化，或利用空化，都关心空化在什么时候发生。对于已经有的液体系统，如果检测到绝对压强等于或低于饱和蒸气压强的区域，则空化必然出现。但是，如果要预测一种新设计和研制新的液体系统内是否会发生空化，光通过检测就行不通了。为此，人们试图通过相似准则，像流体力学中的雷诺数一样，定义一个数，在不同的系统里，只要这个数相等，则它们的空化状态就一致，并且可以用一个临界数来判断空化是否发生。这个数被命名为空化数。影响空化发生的因素很多，如流动边界条件、绝对压强、流速、液体粘性、表面张力等，但主要影响空化发生的是压强和流速。定义了空化数表达式：

$$\sigma = \frac{p_2 - p_v}{\frac{1}{2} \rho v_c^2} \quad (1)$$

式中， σ 为空化数， p_v 为某一温度下液体的饱和蒸气压强， ρ 为液体密度。

对于有高围压的淹没射流，因为分子项中的 p_2 很大， p_v 可以忽略不计，另外 $\frac{1}{2} \rho v_c^2 = p_1 - p_2$ ，所

以空化数可以表达式：

$$\sigma = \frac{\text{下游压强}}{\text{喷嘴总压降}} = \frac{p_2}{p_1 - p_2} \quad (2)$$

认为，只要 $\sigma \leq 1$ 就应该产生空化， $\sigma \leq 0.5$ 就必然产生稳定的空化。即使在环境压强为几十兆帕时，只要射流速度足够大，就能够出现空化现象。

2.2 存在的问题

在实际工程应用中发现空化数的离散度较大，即用空化数判断是否产生空化不准。

在地面的空气中或接近于水面的水中，绝对压强为一个大气压，根据式(1)，只要常规喷嘴的压降大于一个大气压，就应该产生空化。但是，真实情况是，这些从常规喷嘴喷出的射流并没有产生空化，例如消防队的水射流没有空化，加油站注入汽车油箱的各种燃油射流没有产生空化。

从理论上，流体力学的能量平衡方程和连续性方程为^[12]：

$$\left. \begin{aligned} p_c + \frac{1}{2} \rho v_c^2 &= p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \frac{\xi}{2} \rho v_c^2 \\ A_c v_c &= A_2 v_2 \\ \xi &= \left(1 - \frac{A_c}{A_2}\right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中， ξ 为截面突然扩大管的局部阻力系数， A_c 为收缩段的截面积， A_2 为液流下游的截面积。

推导出

$$p_c = p_2 + \rho v_c^2 \left[\left(\frac{A_c}{A_2}\right)^2 - \frac{A_c}{A_2} \right] \quad (3)$$

从式(3)看出，收缩段内的压强是面积比 $\frac{A_c}{A_2}$ 的

函数；对 $\frac{A_c}{A_2}$ 求导，得 $\frac{A_c}{A_2} = 0.5$ 时， p_c 取得极极小值：

$$p_c = p_2 - \frac{1}{4} \rho v_c^2 \quad (4)$$

这是在最优化空化结构的条件下的结果。

在空化数 $\sigma = 1$ 时， $p_2 = p_v + \frac{1}{2} \rho v_c^2$ ， $p_c = p_v + \frac{1}{4} \rho v_c^2 > p_v$ ，不产生空化。

在空化数 $\sigma \leq 0.5$ 时， $p_2 \leq p_v + \frac{1}{4} \rho v_c^2$ ， $p_c \leq p_v$ ，满足物理条件，产生空化。

为此用空化数来判断空化是否发生，必须具备两个条件：(1) $\frac{A_c}{A_2} = 0.5$ ，(2) $\sigma \leq 0.5$ 。所以，没有普遍应用价值，即不能用空化数来判断是否发生

空化,更谈不上空化后的状态相似了。

对于 $\frac{A_c}{A_2} \ll 1$ 的情况,例如钻井液喷出喷嘴,

$$p_c = p_2 \quad (5)$$

即喷嘴内的压强等于钻头处的环境压强。所以对于常规射流喷嘴,在有围压(围压强 > 汽化压强)的情况下,如不采取特殊减压技术,是无法实现空化的。

在低压强环境下的空化射流,可以进行检测,并得到充分证实。在类似石油井下高压强环境下的“空化”射流,还没有见到任何直接的检测资料。

美国 Tulsa 大学于 20 世纪 70 年代对空化射流破岩进行了较多的室内实验研究^[2]。他们采用的是旋转叶片射流喷嘴,没有说明如何判断射流是否空化,也没有对射流是否空化进行检测。

2.3 解决方案

不将空化数作为判断射流空化的依据,而将系统内最低压强小于或等于饱和蒸气压强作为唯一判据。

3 空化射流提高冲蚀效率的原因

空化冲蚀能提高液体的破坏能力(图 2)。它不但能破坏金属材料,如钢质的泵轮、铜质的螺旋桨,还能破坏岩石、混凝土、橡胶等非金属材料。

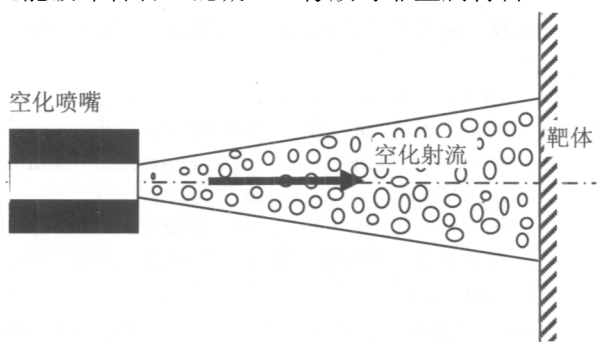


图 2 空化射流冲蚀靶体图

Fig.2 Cavitating jet acting on a target

3.1 现有的理论—空穴内爆冲击压强说^[1-2,5,10]

现有的理论认为空穴湮灭时的“内爆”是空化射流的冲蚀能力比普通射流的冲蚀能力高的原因。

“内爆”的定义为空泡运动到压强升高区时,其内蒸气将凝结成液体而湮灭,在液体内部出现空洞,原来与空泡毗邻的液体微团向空洞中心冲击的现象。Rayleigh 于 1971 年提出了孤立空泡在无界的、不可压缩的静止液体里突然消失所需要的时间,以及空泡湮灭过程中空泡附近的瞬态压强。其结果为:

$$p_{\max} = \frac{1}{6.35} p_{\infty} \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 \quad (6)$$

式中, p_{\max} 为瞬态最大压强, p_{∞} 为环境压强, R_0 为气泡初始半径, R 为瞬时半径。当 $R_0 = 20R$ 时, $p_{\max} = 1260 p_{\infty}$, 即最大压强是环境压强的 1260 倍。由此推断破坏能力极强。

针对空化射流,给出了公式:

$$p_i = \frac{1}{6.35} p_s e^{3\alpha} = \frac{1}{6.35} \frac{1}{2} \rho v_c^2 e^{3\alpha} \quad (7)$$

式中, p_i 为空化射流的冲击压强, p_s 为常规射流的冲击压强, α 为射流中的气体含量。假定 $\alpha = 0.17 \sim 0.1$, 则有 $p_i = (8.6 \sim 124) p_s$ 。从而空化射流能大大提高冲蚀效率。如果用空化射流喷嘴取代普通喷嘴,则在冲蚀效率相同的条件下,泵压可以降低一到二个数量级。

3.2 空穴爆裂冲击压强说存在的问题

(1) 包含气泡的液体假设为不可压缩液体不合理;气泡的湮灭是一个动力学过程,应该假设周围液体是可压缩的。气泡的生消是一个从气泡核在低压区内逐步长大(此时气泡内的压强大于液体内的压强)在高压区内逐步缩小(此时气泡内的压强小于液体内的压强)的过程, R_0 和 R 很难取值。气泡内的蒸气凝结虽然时间不长,但也有一个过程,气泡内的压强不等于零。所以式(6)不可信。

迄今为止,单靠纯解析的理论方法还无法分析气泡湮灭的全过程;高速摄像实验已能描述气泡湮灭时的形状和射流顶端的速度大小,但由于气泡尺寸较小,而气泡产生后的湮灭速度极快,要详细测量目前还有困难。用数值模拟方法的研究已经开始^[3]。

(2) 在式(7)中,如果令 $\alpha \rightarrow 0$ 即没有空化的情况,应该为 $p_i = p_s$, 而式(7)的结果却是 $p_i \rightarrow \infty$ 。式(7)不符合能量守恒原理。喷嘴的输入能量是 $p_s A_c v_c$, 而输出能量为 $(8.6 \sim 124) p_s A_c v_c$, 凭空多出很多倍的能量。所以式(7)不可信。

3.3 脉冲压强是空化射流提高冲蚀能力的主要原因

空穴的“内爆”是提高射流冲蚀能力的因素之一。在液流速度极低的条件下,“内爆”可能成为冲蚀的主要原因。在液流速度不很低的条件下,“内爆”只是影响因素之一,但不是主要原因。主要原因是在射流冲向靶体表面时,有时是液体冲击靶体,有时是空泡冲击靶体。由于冲击物的质量波动,即气泡与液体体密度不同,造成靶体表面的压强波动,

导致靶体在瞬时拉应力的作用下破坏和交变应力作用下疲劳破坏。作用在靶体表面上的最大动压强为 p_s ，而最小压强为 p_v 。如果考虑环境压强，则作用在靶体表面上的压强变化范围为 $p_v \sim p_\infty + p_s$ 。这类类似于磨料射流中的磨粒密度远低于连续液体的密度。

3.4 压强波动是自振射流提高冲蚀效率的主要原因

现场试验证明，在石油钻头上装上自振射流喷嘴钻井，会显著提高钻进速度^[6~9]。

在解释之一事实的原因时，有些人认为是射流空化造成的。

根据前述分析，射流在井下空化是很难的。另一个合理的解释为脉动的射流本身就比普通射流对冲蚀有利。

为此，自振射流提高钻井效率的主要原因是钻井液的冲击压强波动，而不一定是液流空化。

4 结论

(1) 空化数不能有效地反映液体的是否空化及空化程度。直接由液体压强是否低于它的饱和蒸气压强来判断更合理。

(2) 空化射流冲蚀能力强的主要原因不是气泡爆裂时的冲击压强，而是气泡在冲击物体时，由于气泡的密度低于射流本体的密度，而造成的冲击压强波动。

参考文献:

- [1] 崔谟慎, 孙家骏. 高压水射流技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
Cui Moshen, Sun Jiajun. High pressure water jet technology [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1993. (in Chinese)
- [2] 严世才. 射流辅助机械破岩钻井[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989.
Yan Shicai. Mechanical drilling assisted with jet [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1989. (in Chinese)
- [3] 王起棣, 张慧生. 表面张力对固壁近旁空化气泡溃灭特性的影响[J]. 复旦学报(自然科学版), 2003, 42(2): 201~207.
Wang Qidi, Zhang Huisheng. Surface tension effects on the collapsing behavior of a cavitation bubble near a rigid wall [J]. Journal of Fudan University (Natural Sciences), 2003, 42(2): 201~207. (in Chinese)
- [4] 杨庆, 张建民, 戴光清, 王海云. 空化形成机理和比尺效应[J]. 水力发电, 2004, 30(4): 56~59.

- Yang Qing, Zhang Jianmin, Dai Guangqing, Wang Haiyun. Summary of cavitation formation mechanism and scale effect [J]. Water Power, 2004, 30(4): 56~59. (in Chinese)
- [5] 王萍辉. 空化水射流清洗的实验研究[J]. 中国矿业, 2004, 3(5): 43~47.
Wang Pinghui. Experimental study on cleaning technology based on cavitation water jet [J]. China Mining Magazine, 2004, 3(5): 43~47. (in Chinese)
- [6] 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.
Shen Zhonghou, Li Gensheng, Wang Ruihe. Application and prospects of water jet technology in petroleum engineering [J]. Engineering Science, 2002, 4(12): 60~65. (in Chinese)
- [7] 李根生, 沈忠厚, 周长山, 张德斌, 易灿. 自振空化射流冲击压强脉动特性实验研究[J]. 水动力学研究与进展, 2003, 18(5): 570~575.
Li Gensheng, Shen Zhonghou, Zhou Changshan, Zhang Debin, Yi Can. An experimental study on impact pressure of self-resonant cavitating jets [J]. Journal of Hydrodynamics, 2003, 18(5): 570~575. (in Chinese)
- [8] 李根生, 沈忠厚, 张召平, 廖华林. 自振空化射流钻头喷嘴研制及现场试验[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(5): 11~13.
Li Gensheng, Shen Zhonghou, Zhang Zhaoping, Liao Hualin. Development and field tests of self-resonant cavitating water jet nozzle for oilwell drilling [J]. Petroleum Drilling Technique, 2003, 31(5): 11~13. (in Chinese)
- [9] 李根生, 沈忠厚, 李在胜, 易灿. 自振空化射流提高钻井速度的可行性研究[J]. 石油钻探技术, 2004, 32(3): 1~4.
Li Gensheng, Shen Zhonghou, Li Zaisheng, Yi Can. Feasibility study of self-resonating cavitating jet for augmenting drilling rate [J]. Petroleum Drilling Technique, 2004, 32(3): 1~4. (in Chinese)
- [10] 张风华, 张晓琪, 唐川林, 杨林, 廖振方. 淹没水射流空化发生的动力判据[J]. 水动力学研究与进展, 2002, 17(4): 460~466.
Zhang Fenghua, Zhang Xiaoqi, Tang Chuanlin, Yang Lin, Liao Zhenfang. Dynamic criterion for cavitation inception of submerged water jet [J]. Journal of Hydrodynamics, 2002, 17(4): 460~466. (in Chinese)
- [11] Johnson V E Jr, Conn A F. Cavitating and structured jets for mechanical bits to increase drilling rates [J]. Trans ASME Journal of Energy Resource Technology, 1984, 106(6): 282~294.
- [12] 大连工学院水力学教研室. 水力学解题指导及习题集[M]. 北京: 高等教育出版社, 1984. 540.
Hydraulic teaching and research unit of dalian university of technology. Instructions and exercises of hydraulics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1984. (in Chinese)