

水力空化技术的应用研究

李 璞

河南向荣能源管理有限公司, 河南 郑州

收稿日期: 2026年6月22日; 录用日期: 2026年7月9日; 发布日期: 2026年8月24日

摘 要

空化作为一种新兴氧化技术, 近年来在表面清洗、污垢处理、水处理以及食品工业等多个领域得到了广泛应用。水力空化因具有装置简单, 空化效率高且具有工业规模化应用潜力, 而被广泛研究。随着水力空化技术的工业化不断发展, 水力空化在工业应用中将发挥更重要的作用。本文深入探讨了空化基础理论、水力空化原理、水力空化反应器的特点以及影响水力空化效应的因素, 并对未来水力空化的发展进行展望, 为提升水力空化反应装置的空化效率提供科学的理论依据与实践指导。

关键词

水力空化, 空化效应, 空化反应器, 空化效率

Application Research on Hydrodynamic Cavitation Technology

Pu Li

Henan Xiangrong Energy Management Co., Ltd., Zhengzhou Henan

Received: June 22, 2026; accepted: July 9, 2026; published: August 24, 2026

Abstract

As an emerging oxidation technology, cavitation has been widely used in recent years in various fields such as surface cleaning, dirt removal, water treatment, and the food industry. Hydrodynamic cavitation has been extensively studied because of its simple setup, high cavitation efficiency, and potential for industrial-scale applications. With the increasing industrialization of hydrodynamic cavitation technology, it is expected to play a more important role in industrial applications. This article delves into the basic theory of cavitation, the principles of hydrodynamic cavitation, the characteristics of hydrodynamic cavitation reactors, and the factors affecting cavitation effects. It also looks ahead to the future development of hydrodynamic cavitation, providing scientific

theoretical support and practical guidance for improving the cavitation efficiency of hydrodynamic cavitation reactors.

Keywords

Hydrodynamic Cavitation, Cavitation Effect, Cavitation Reactor, Cavitation Efficiency

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着现代工业的快速发展，国内生产总值和人民生活水平不断提高，但又破坏了人类赖以生存的珍贵水资源[1]。在社会经济发展过程中，居民生活污水和企业工业废水不断排除，使得水污染问题日益严峻。而且国内人口的不断增长，更是加剧水资源的短缺问题，水污染问题成为目前亟待解决的环境问题。常用的传统水处理方法已经不能满足水处理技术要求，因此高效、绿色、低耗的新一代水处理技术应运而生并成为研究热点，其中水力空化作为环保、效率高、反应装置结构简单、易于工业规模化的新型水处理技术，在水体污染物降解、杀菌消毒、破乳除油等水处理领域展现出巨大应用潜力，受到当代研究学者的广泛关注，并实现迅速发展[2]。

2. 空化基础理论

2.1. 空化现象

空化是一种发生在流体中的物理现象，内部局部压力骤降导致空化泡的产生，随着流体压力的继续降低，空化泡内外压差进一步扩大，导致其体积增大。空化泡随着流体流动，流动至压力恢复区，受到外部流体压力作用，其体积迅速缩小直至破灭。空化泡的破灭过程会产生高温高压等空化效应，使得空化在强化传热、表面清洗和污垢、杀菌降解水处理、食品加工、化学反应等领域得到了广泛的应用[3]。

空化数是一个可以用来表征空化现象的无量纲常数，而且还可以衡量空化效应程度，表达式为来流压力与环境温度下液体饱和蒸汽压力之差比液体密度和速度平方乘积的二分之一。从空化数表达式的物理量以及运算来看，其本质上是欧拉数。空化数的大小和空化程度成反比，即随着空化数的减小会导致空化程度的增加。从空化数的表达式可以看出，空化数的大小取决于流体压力、环境温度和流体流动速度以及密度。在理论研究中，空化数可以用来表征空化效应的强弱和判别某种条件下能否发生空化现象。

2.2. 空化效应

空化现象发生时，由于流体中空化泡的不断经历产生、长大、缩小和破灭的过程，从而产生机械效应、热效应、光效应、化学效应。机械效应：空化泡的溃灭产生持续的微射流和冲击波，对流体产生物理机械作用。Hammit 研究发现，空化泡溃灭时，产生的微射流速度极高，并且对周围物体表面产生的冲击可达几百兆帕[4]。热效应：空化泡溃灭时，流体内部形成上千度的局部高温。光效应：液体中空化泡溃灭时，会发出短暂的光亮，被称为“声致发光”现象[5]。1934 年，Frenzel 和 Schultes 首先发现了由超声波空化导致的发光现象[6]。化学效应：空泡溃灭时产生的极端条件，使水分子的化学键断裂，产生羟自

由基,具有强氧化性。羟基自由基的化学性质比较活泼,进一步发生化学反应,生成超氧化氢和过氧化氢。而且由于羟自由基含有未配对电子,可以从其他物质中吸走一个电子,所以很容易通过化学反应形成稳定的分子。

2.3. 空化类别

超声空化利用高频超声波,在液体中产生周期性交变声压,负压区形成空化泡,正压相使其剧烈压缩、溃灭,常应用于超声碎石、超声清洗等领域。激光空化是利用激光聚焦于流体,聚焦区域形成等离子体击穿效应,产生空化泡。粒子空化是把高能粒子束打到流体的一个点上,将粒子束的能量传递给流体,导致流体中的空化核不断膨胀,产生空化泡,可以用于强化材料性能[7]。水力空化是流体通过水力空化装置导致局部压力下降,发生空化现象。

3. 水力空化原理

流体流过一个限流区域时产生压降,当流体压力降低至低于饱和蒸汽压时,产生空化泡,空泡随着流体流动,遇到周围的压力增大时,体积将急剧缩小直至溃灭。如图1所示:

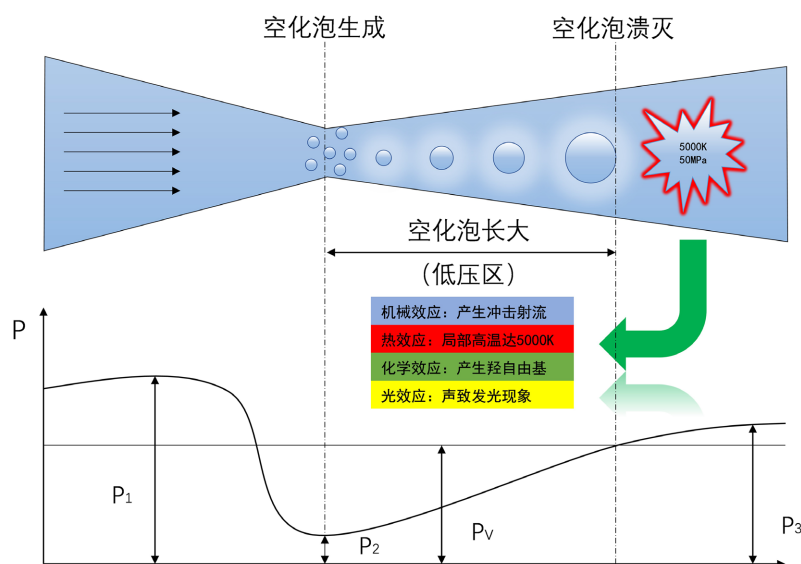


Figure 1. Schematic diagram of hydrodynamic cavitation principle

图1. 水力空化原理示意图

水力空化杀菌主要是靠空化产生的机械效应和热效应。空化泡溃灭时不仅产生高温高压,而且还会产生冲击波和射流,该作用能引起细胞损伤。同时,水分子断裂产生具有强氧化性的羟自由基,羟自由基十分活泼,与细胞、微生物发生化学反应,破坏其生物活性,达到杀菌消毒作用。水力空化所产生的空化效应,在生物医学、食品加工、水处理等行业领域大有可为,并且水力空化技术具有能量利用率高、装置简单、操作方便等特点[8]。

4. 水力空化反应器

水力空化一般是通过产生压力变化的空化装置来发生的,流体流经水力空化装置时压力下降,当压力降至流体温度对应饱和蒸气压时,空化现象发生。常见不同类型的水力空化装置有各自的优缺点,如表1。

Table 1. Pros and cons of different types of hydrodynamic cavitation devices
表 1. 不同类型的水力空化装置优缺点

类型	孔板型	文丘里型	旋转型	涡流型
优点	构造简单装置设计灵活易于操作 操作和维护成本低	装置结构简单 易于操作 操作和维护成本低	流体压力损失较小	涡流产生不需要运动部件， 可以减少对装置的损伤
缺点	空化装置易发生阻塞且表面损伤， 流体压力损失较大	空化装置易发生阻塞 且表面损伤 制造成本高	操作和维护成本高 装置结构比较复杂	空化装置产生空化强度的 控制性低

4.1. 孔板型

孔板结构简单，易于设计，装置结构参数的控制灵活度高，如图 2。孔板型空化器的空化发生由于孔口的急剧收缩和发散导致的，并且是瞬时的，所以产生的空化效应较为剧烈。

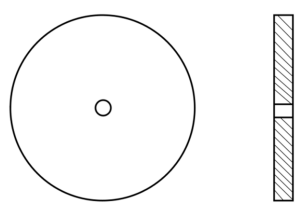


Figure 2. Orifice plate diagram
图 2. 孔板简图

4.2. 文丘里管型

文丘里管空化反应器的结构包括收缩段、喉部、扩散段三个部分，见图 3，收缩段和扩散段作用相反。流体流量一定时，流体流速与流经面积成反比。所以当流体流过收缩段时，流经面积减小，即流速增大，由伯努利方程可知，流体压力下降。当压力下降到流体的饱和蒸气压时，产生空化泡。随着流体在收缩段继续流动，空化泡周围的压力进一步降低，其逐渐长大。然后，空化泡流动到扩散段时，流体流经面积逐渐增大，导致压力逐渐恢复，最终空化泡溃灭。

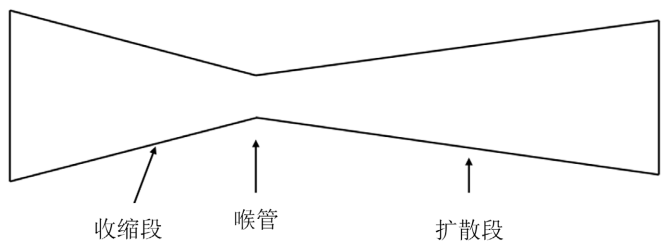


Figure 3. Simplified diagram of a venturi tube
图 3. 文丘里管简图

喉道直径与长度的比值可以确定空化泡的最大直径，发散角决定了空化泡在低压区的停留时间。通常发散角越小，空化泡周围压力恢复越平稳，越有利于空化泡的长大。

4.3. 旋转型

旋转型水力空化发生器通常是由定子、转子、腔室组成，如图 4 所示。转子表面设计有凹槽，各个

运动部件相对运动所产生的剪切力，构成局部高速流动区域，产生局部低压，发生空化现象。Maršálek 等 [9]设计一种新型旋转空化装置，用于选择性去除水中的蓝藻。相比传统的空化器，该旋转空化器去除水中蓝藻的成本和时间效益显著提高。

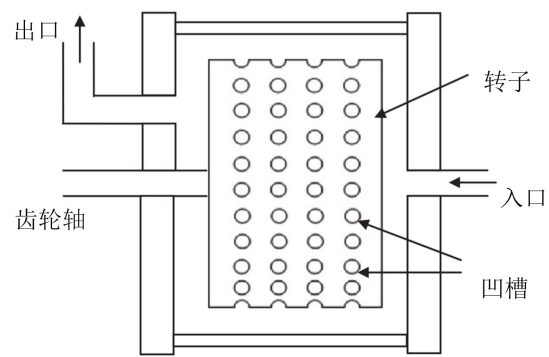


Figure 4. Rotary cavitation device
图 4. 旋转式空化装置

4.4. 涡流型

涡流型水力空化器主要有旋流射流式空化发生器与涡流二极管式空化发生器两种，如图 5 和图 6 所示：

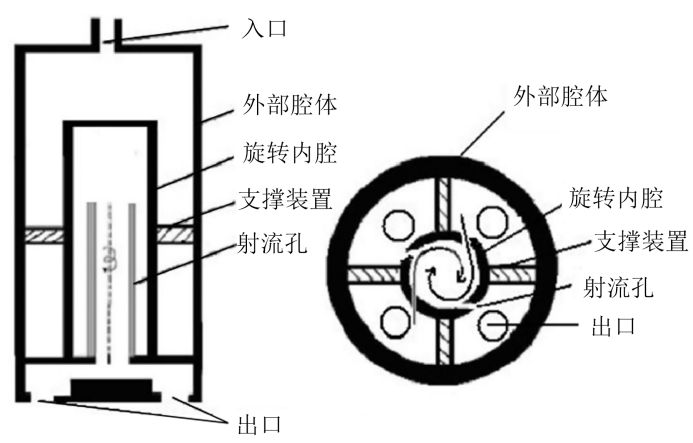


Figure 5. Swirl jet cavitator
图 5. 旋流射流空化器

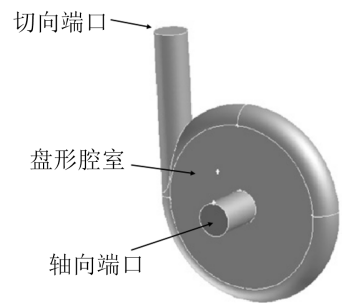


Figure 6. Eddy current diode
图 6. 涡流二极管

旋流射流式空化器有流体出入口、外部腔体、旋转内腔、射流孔等。在旋转内腔，流体形成高速旋流射流。中心压力降低，产生空化泡。旋流射流从射流孔射出，冲击到组合室底面，压力急剧上升，空化泡溃灭。

流体从涡流二极管的切向端口进入盘形腔室，由于腔室的漩涡结构，流体形成高速旋转运动，在盘形腔室中心轴附近形成了低压区域，发生空化。

5. 影响空化效率的因素

5.1. 入口压力的影响

水力空化装置的入口压力是影响空化效率的重要因素，通过改变入口压力的大小，显著影响空化强度。在一定入口压力范围内，入口压力增加可以增强湍流压力的脉动，提高压力恢复区的恢复压力[10]，提高空化泡的最大直径，增加空化强度。同时，随着入口压力的增加，流体的流速增加，由空化数公式可知，空化数减小，即空化强度提高。但是一旦超过这个入口压力范围，过高的入口压力会使空化泡数量太多，导致空化泡的聚集，空化泡的溃败受到抑制，从而降低了溃败强度，发生阻塞空化[11]。

5.2. 流体温度的影响

流体温度升高，对应饱和蒸气压升高，空化发生所需压力降减小，且有利于空化泡的形成和长大。但是，随着流体温度的升高，溶解气体含量减少，气体溶解量的减少会导致汽化核心的减少，减弱空化效果，所以一般存在一个最佳空化温度。

5.3. 气体溶解量的影响

在一定范围内，增大溶解气体可以增加汽化核心和气泡比率，使空化泡数量增多，空化效果增强。但含气量达到某一值时，流体的可压缩性增加，对空化泡的溃败产生缓冲作用，空化强度减弱。同时，过高的空化泡数量会发生阻塞空化现象，大大减弱空化强度[12]。

6. 结论与展望

本文对空化基础理论、水力空化原理、空化器类型、影响水力空化效率因素进行了概括总结。水力空化技术在石油化工、水处理以及食品加工等领域已经广泛应用，但还存在诸多挑战，现作以下展望：

将水力空化与其他高级氧化技术联合应用于水处理，进一步提高水力空化在水处理领域的能量利用率和经济性。水力空化装置的几何参数对空化强度有着很重要的影响。目前常见的空化装置有孔板、文丘里管、旋转式、涡流式等空化器。为了进一步提高空化强度，需不断研究更加高效的空化器。比如研究将不同空化反应器进行多级串联或并联，提高空化强度。操作参数和流体的理化性质对空化强度有着重要的影响，目前大部分研究针对进口压力的影响，出口压力的研究比较少，还需要对出口压力进行更多的研究，进一步研究压力的影响。

参考文献

- [1] 张磊, 詹云霞. 巢湖水污染现状及防治对策[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2017, 27(3): 3-5.
- [2] 石宇. 文丘里管水力空化器的数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津科技大学, 2018.
- [3] Gevari, M.T., Abbasiasl, T., Niazi, S., Ghorbani, M. and Koşar, A. (2020) Direct and Indirect Thermal Applications of Hydrodynamic and Acoustic Cavitation: A Review. *Applied Thermal Engineering*, **171**, Article ID: 115065. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115065>
- [4] Hammitt, F.G. (1980) *Cavitation and Multiphase Flow Phenomena*. McGraw-Hill College.

-
- [5] Barber, B.P. and Putterman, S.J. (1991) Observation of Synchronous Picosecond Sonoluminescence. *Nature*, **352**, 318-320. <https://doi.org/10.1038/352318a0>
- [6] Frenzel, H. and Schultes, H. (1934) Lumineszenz im ultraschallbeschickten Wasser. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, **27**, 421-424. <https://doi.org/10.1515/zpch-1934-2737>
- [7] 何浩. 基于激光空化强化提升铸铁材料抗空蚀性能研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- [8] Gogate, P.R. (2002) Cavitation: An Auxiliary Technique in Wastewater Treatment Schemes. *Advances in Environmental Research*, **6**, 335-358. [https://doi.org/10.1016/s1093-0191\(01\)00067-3](https://doi.org/10.1016/s1093-0191(01)00067-3)
- [9] Maršálek, B., Zezulka, Š., Maršálková, E., Pochylý, F. and Rudolf, P. (2020) Synergistic Effects of Trace Concentrations of Hydrogen Peroxide Used in a Novel Hydrodynamic Cavitation Device Allows for Selective Removal of Cyanobacteria. *Chemical Engineering Journal*, **382**, Article ID: 122383. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122383>
- [10] Pradhan, A.A. and Gogate, P.R. (2010) Removal of P-Nitrophenol Using Hydrodynamic Cavitation and Fenton Chemistry at Pilot Scale Operation. *Chemical Engineering Journal*, **156**, 77-82. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.042>
- [11] Gągól, M., Przyjazny, A. and Boczkaj, G. (2018) Wastewater Treatment by Means of Advanced Oxidation Processes Based on Cavitation—A Review. *Chemical Engineering Journal*, **338**, 599-627. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.049>
- [12] 杨会中. 水力空化强化效应实验研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2006.