

空化射流技术的应用进展与前瞻性分析*

程效锐^{1,2} 张舒研^{1**} 陈红杏¹ 常正柏¹

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃兰州 730050;

2. 兰州理工大学甘肃省流体机械及系统重点实验室, 甘肃兰州 730050)

摘要: 空化射流技术借助于空泡破裂时产生的强大冲击力来增强射流的效果, 并利用空泡溃灭时引起的“空化效应”来解决工程性问题。介绍了空化现象和空化射流的研究发展史, 并对空化射流与高压水射流清洗技术的特点进行了比较分析, 同时总结和讨论了空化射流的形成机理与空化效应, 综述了空化射流技术在清洗除污、生化环保工程、油气开采、物料破碎与超细粉碎等方面的工程应用状况, 对该项技术现阶段的应用进展进行了阐述与说明。展望了该技术的发展趋势与未来研究方向, 对进一步探索空化射流的深层机理提供了可借鉴的研究思路, 对扩展其应用范围具有一定的指导意义。

关键词: 空化射流 空化机理 应用进展 发展前景

中图分类号: TK79

文献标志码: A

文章编号: 2095-9834(2018)04-0019-06

Application progress and prospective analysis of the cavitating jet technology

CHENG Xiaorui^{1,2}, ZHANG Shuyan¹, CHEN Hongxing¹, CHANG Zhengbai¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Fluid Machinery and Systems of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Cavitating jet technology can enhance the fluidic effect with the aid of powerful impact force generated by cavitation bubble broken, and can be applied to solve engineering problems by means of cavitation effect created by cavitation bubble collapse. The brief developing history of research on cavitating jet and the phenomenon is presented, and the characteristics and research status of cavitation jet and high pressure water jet cleaning technology are compared and analyzed. The formation mechanism and cavitation effect are summarized and discussed, and the applications status of cavitating jet technology in cleaning, decontamination, environmental chemical engineering, oil production, material crushing and ultrafine grinding and the like are reviewed. In particular, the progress of cavitating jet technology application at the status quo is expounded. Meanwhile, the development trend and the future research direction of cavitating jet technology are prospected, which provides useful references and research ideas for the further exploration of cavitating jet mechanism and has a vital guiding significance for extension of its application range.

Key words: cavitating jet; mechanism of cavitation; research progress; development prospects

空化是一种复杂的流体动力学现象, 为液体所特有。一般认为, 当流场中某处的局部压力低于该处液体的饱和蒸气压时, 不仅溶在液体中的气体

会逸出, 而且液体自身也开始汽化, 在液体中形成许多空泡^[1]。这些空泡达到高压区时会产生溃灭现象与压缩波或微射流, 对附近的固壁破坏性极

收稿日期: 2018-03-19。

作者简介: 程效锐(1972—), 男, 甘肃兰州人, 博士, 副教授, 主要从事水力机械的 CFD 优化、空化理论与应用的研究以及极端参数离心泵的设计。E-mail: cxr168861@sina.com。

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51469013)。

** 联系人: 张舒研(1993—), 男, 辽宁大连人, 硕士研究生, 主要从事流体机械空化理论与空化应用的研究。E-mail: zsy19930524@sina.com。

大 因而对高速运转的流体机械而言,应极力避免空化现象。

1 空化现象与空化射流理论研究

早在 1753 年,Eular 首次从理论上预言了液体中能发生空化现象,他指出“水管中某处的压强降低到负值时,水自管壁分离,而在该处形成了一个真空空间,这种现象应该予以避免”。20 世纪 60 年代末期,随着对空化现象的研究深入,Johanson 和 Kohl 等将空化作用引入射流技术中,创造性地提出了“空化射流”的概念。随后 Johanson 等采用中心体喷嘴与转叶型喷嘴分别产生空化射流,并对空化原因作出分析,成为空化喷嘴的经典之作^[2]。直到 20 世纪 80 年代,射流空化开始受到学术界的关注^[3],尤其进入 21 世纪后,随着科学技术的发展与实验手段的丰富进步,研究者们认识到空化时释放的巨大能量可为一般条件下难以实现的物理或化学反应提供一种非常特殊的环境,应予以利用^[4]。

Epstein 和 Plesset 于 1950 年就已经证明了游离

气泡在静止液体中不能稳定存在,它们或在浮力作用下上浮并从自由液面逃逸,或在表面张力作用下逐渐溶解。值得注意的是:一方面气核是不能稳定存在的,另一方面整个空化理论和实验都是以气核存在作为出发点,这是相互矛盾的^[5]。不仅如此,杨庆等^[6]也指出大气核因浮力作用上升至水面而逸出,小气核则由于不断溶解而溃灭,这也被称为气核悖论。但实际观察却发现,液体中气核可持久悬浮^[7]。

由于液体内部结构尚未清楚,因而空化形成机理也无明确的理论说明。目前较为人所接受的是 Harvey 的稳定空泡核子机理假说^[5]。Harvey 认为未溶解的气核存在于憎水性固体表面的缝隙中(设缝隙夹角为 2α),由于缝隙表面不是湿润的,因而缝隙中的气体形成一个下凹形状的“液-气”分界面,如图 1 所示。此时表面张力起到减小压力的作用,从而气体不会被迫溶解,且仍保持气相。因此肯定了微小气核有被永久困在裂隙里的可能性。

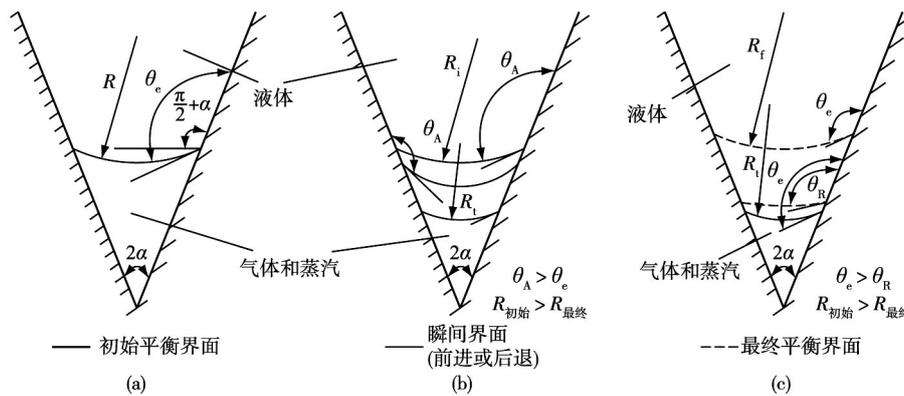


图 1 气核在憎水性裂隙中的稳定性分析

1917 年, Rayleigh 提出了较为系统的空化理论,建立了空泡处于无界静止液体中的溃灭方程^[8]。此后 Plesset 在考虑液体黏性影响下对空泡溃灭方程进行改进,得到了著名的 Rayleigh - Plesset 方程^[9],为空泡动力学奠定了基础。1954 年, Fox 等^[10]提出,微小气核之所以不会溶解,是因为气核被有机薄膜所包围。这种有机薄膜是在水-气界面上自然形成的,它改变了液体的有效表面张力,从而推迟蒸发、阻碍扩散,使微小气核可以持久地悬浮,但有机薄膜是否存在还有待物理上的证明。20

世纪 70 年代初, Knapp 和 Raily 等人对空泡的产生、发展、溃灭机理作了大量的深入研究,从而形成了较为完整的空化理论^[11]。

2 空化射流形成机理与空化效应

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力)使液体蒸发而引起的微气泡(或称为气核)爆发性生长^[12]、发展和溃灭的现象。收缩管道内水流流动产生的空化现象如图 2 所示。图中表示一段收缩管道内的水流,上

游压力为 p_1 , 下游压力为 p_2 , 收缩段压力为 p_c , 水流速度为 u , 当地绝对压力 p 。

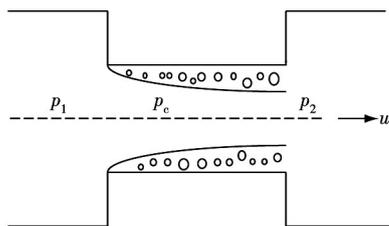


图2 水流流动在收缩管道内产生空化现象示意

由图2可见:若 p_c 降低到等于或小于当地水的饱和蒸气压 p_v 时,在低压区空化的液体夹带着大量的空泡形成了“两相流”运动,使整个管道内液体流动的连续性被破坏。因此,空泡在收缩截面的固体内壁面孕育而生,并在低压区内长大,随主流运动到压力升高区内,进而空泡收缩发生溃灭^[13]。产生该现象的实质是在流体的动力学及热力学联合作用下,液体介质的局部产生液-气相变现象^[14]。有学者指出^[15-21]在空化泡溃灭的瞬间可产生高达 5 200 K 的高温,50 MPa 以上的高压,温度变化率高达 10^9 K/s,并会以每秒数万次的连续作用产生强烈冲击波和时速约 400 km/h 的微射流等极端条件,即形成所谓的“热点”(又称“空化效应”)。这些条件足以使有机物在空化泡内发生水相燃烧、高温分解、化学键的断裂以及自由基反应^[22]。Hammit^[18]通过监测游移型空泡溃灭试验发现,当空泡破裂时,近壁处微射流时速可达 250~610 km/h,在物体表面产生的冲击力在 140~170 MPa,微射流直径为 2~3 μm ,表面受到微射流冲击次数在 100~1 000 次/($\text{s} \cdot \text{cm}^2$),冲击脉冲的作用时间每次仅为几微秒。空化射流就是利用空泡破裂引起的强大冲击力来提高其清洗、破碎、切割和处理有机污染物等能力。

3 空化射流与高压水射流的比较及其技术优势

3.1 空化射流与高压水射流的比较

目前学界普遍将空化射流与高压水射流统称为水射流技术,二者均具有高效节能、环保可靠的优点,但是也存在着明显差异。

从清洗机理方面来看,高压水射流是应用高速水流的冲击力对设备表面进行清洗,而空化射流技

术则是应用空泡在设备表面产生的溃灭破裂现象,进而通过密集连续的微射流冲击作用而达到清洗目的。值得注意的是,高压水射流清洗效果主要取决于两个方面,其一是射流本身的特性和被清洗物的理化特性,其二是射流与物料在切割过程中相互作用的结果^[23]。从表面破坏性角度来看,高压水射流会严重破坏设备表面,甚至导致表面防腐层的脱落等;而空化射流技术极少或完全不会破坏设备表面,保持了防腐层的完整性^[24]。李子丰^[25]指出,空化射流技术破坏能力强的主要原因并非气泡破裂时的冲击压强,而是气泡冲击物体时,由于气泡密度低于射流本体密度,进而造成冲击压强的波动。此外,空化射流技术的水流初始压力最高不超过 16 MPa,而高压水射流清洗则须至少 70 MPa 的起始压力,因而空化射流技术更加节能^[26]。

3.2 空化射流的技术优势

与高压水射流相比,空化射流具有如下技术优势。

1) 清洗方式简单且无污染:空化射流清管器通过发散器,随清洗水流经由油管,再由接收器取回。因此不需要起初油管,避免了传统清洗方式的弊端,且由于不使用化学试剂,对环境无污染。

2) 安全可靠:空化射流技术所需水流推力差一般小于 3 MPa,而高压水射流技术所需压力一般大于 70 MPa,如有操作不慎,极易引发安全事故,尤其在易燃易爆等危险场合,空化射流技术安全可靠更高。

3) 清洗距离长、范围广、用时少:高压水射流清洗的单次距离受自身设备限制,一般距离在几百米。而空化射流技术清洗距离可达数公里,且不受复杂管道形状限制,能够顺利清洗各类盘管内部污垢。通常来说,利用空化射流洗井工作时间为 1~3 h。

4) 投资与运行费用低廉,维护方便,性能更加稳定。

5) 不受场地、天气条件等因素的限制,可以随时随地作业。

6) 易于实现自动化、机械化,只需一次清理,清洗效率高。

4 空化射流在工程技术的应用

4.1 空化射流应用于清洗除污领域

射流空化通常以水为介质,利用空化效应产生

的微射流冲击波与高温环境,多应用于管道清洗。Patricia等^[27]研究发现,利用空化射流技术在清洗时间和耗水量方面相比于传统管道清洗方法减少很多,可以节约极大的经济投入,带来可观的社会效益。康灿等^[28]通过将中心体嵌入喷嘴流道从而引发空化射流,借此来研究空化泡的空蚀作用和空化区形态。研究表明:中心体相对直径对空蚀的程度影响较大,且相对直径越大,空蚀程度越高,清洗效果越好。张丽婷等^[29]从海洋污损生物的危害分析着手,研究表明空化射流清洗技术是一种高效可行的新型清洗技术,能在不破坏设施表面防腐层的基础上,安全彻底地清洗水下设施表面的海洋生物污垢层;此外,该项技术在清洗湖泊方面也有一定效果。廖振方等^[30]提出了一种应用空化射流配合COANDA效应杀灭藻类及浮游生物、治理湖泊与江河水体富营养化的新型技术和装置,该技术对当前我国治理江河湖泊水体富营养化问题具有极其重要的应用价值。

4.2 空化射流在化学反应及水处理领域的应用

Kalumuck和Chahine^[31]在不同操作条件下利用不同的空化射流循环设备降解了对硝基苯酚,研究了酸碱度、温度、射流压力和流速等对降解效果的影响。试验结果表明:与超声空化相比,水力空化能效呈现二次方比例增加,大大提高了能量利用率。管金发等^[32]进行了乳化油废水空化射流破乳试验,探究了表面活性剂质量浓度、静置时间、油的质量浓度和靶距等对空化射流破乳效果的影响规律;结果表明:最佳靶距为280 mm时,空化射流破乳除油率随着循环处理次数和入口压力的增加而增加。赵启鑫等^[33]通过试验考察了射流空化对亚硫酸法澄清糖液筒纯度的影响,重点研究了入口压力、溶液温度和空化循环处理时间对糖液筒纯度的影响。结果表明:糖液经过空化射流装置处理后,糖液筒纯度提高率高达1.75%,说明该方法的试验可行性与潜在的应用价值。刘峰等^[34]针对深度乳化且高浓度的含油废水,发明了一种有效且能回收废油资源的物化方法——射流空化法,研究了不同油滴粒径尺寸、废水含油浓度、表面活性剂含量等与除油率的关系。试验结果表明:当空化数为0.121时,高浓度含油废水经一次射流空化处理后,去除率可达85%。邓松圣等^[35]研究了空化射流条件下,压力和初始浓度等对苯酚降解率的影响,结

果表明进口压力为6 MPa时苯酚降解率最大。此外,较低的苯酚初始浓度、流量较大的高压泵和酸性溶液条件都有利于苯酚的降解。

4.3 空化射流在油气工程领域的应用

在油气和煤炭开采的过程中,射流喷嘴作为核心部件,起到了关键性作用。韩健等^[36]基于水声学 and 流体网络理论,分析了风琴管喷嘴和赫姆霍兹喷嘴射流特性,试验结果表明:与普通喷嘴相比,2种喷嘴均能产生高频压力振荡并且促进空化的产生,其中赫姆霍兹喷嘴共振腔对射流自振幅值有放大作用,进而空化效果更为明显。与此同时,水力脉冲空化射流钻井技术作为水力脉冲射流与空化射流相结合的新兴技术,一般是利用水力脉冲空化射流发生器来具体完成的。钻井工艺中,发生器能够将钻具内连续流动的钻井液调制脉冲空化射流作用至井底,通过降低压持效应,提高破岩效率,进而提高钻速^[37-38]。张立新等^[39]通过在YB121H井研究和试验表明,证实了利用水力脉冲空化射流技术来提高钻井速度是一种节省钻井成本,行之有效的办法。陶满霞等^[40]结合川东北元坝A井的实际工程情况,进行了水力脉冲空化射流技术的应用试验。结果表明:利用水力脉冲空化发生器可以有效解决超深矿井破岩难、钻速慢的难题,加快了水力清岩的效率;和机械钻速比较,钻速提高22.96%,提速效果明显。

4.4 空化射流用于改善材料的表面性能

利用射流空化效应产生的冲击力作用于材料表面上能够极大地提高材料的表面性能。20世纪80年代后期,Zafred^[41]率先提出利用高压水射流对金属表面喷丸硬化的思想,随即开始了该项技术的研究。Soyama等^[42]运用空化水射流的方法提高材料的表面性能,作用于材料上的空化水射流可使材料产生残余压应力,提高材料的疲劳强度和抗腐蚀能力。康学勤等^[43]选用黄铜作为研究对象,利用淹没射流的方法进行黄铜表面改性研究,结果表明:射流压力和喷射时间对黄铜表面有显著的强化效果,与传统机械喷丸强化相比,水空化射流喷丸在材料表面光洁度、硬化层深、表层组织改善等方面均有提高,是一种具有发展前景的表面强化方法。Kalumuck等^[44]指出,通过对合金工具钢JIS SKD61进行空化射流处理后,模具寿命提高约50%。

4.5 空化射流在物料破碎与超细粉碎方面的应用

淹没射流条件下,空化过程中气泡溃灭的微射

流与冲击波会对其周围的物料形成极强的冲蚀作用,从而使物料粉碎^[45]。张军^[46]借助于CFD手段,基于欧拉-欧拉法的两相流模型,对喷孔内部的空化流动特性进行数值模拟。结果表明:提高喷射压力,降低出口压力,有利于孔内空化现象的发生;然而增大喷孔入口圆角半径,使燃油流动变得更加流畅,不利于空化效应的产生。卢玉义等^[47]对空化水射流的空泡云特性和破碎机理进行了试验研究,研究了空化水射流的空泡云和冲蚀能力之间的相互关系。试验结果表明:空化水射流切割破碎岩石主要是由空泡的溃灭引起的,空泡云的长度等于切割深度与靶距之和。

5 研究展望与结语

空化射流技术作为一项新型高效、可应用于众多工业领域的新技术,具有极大的优越性和广阔的发展空间。虽然国内外众多学者对空化效应及射流理论进行了大量研究,在某些领域也取得了一些成果,但是空化仍然被认为是当今未解决的科学难题之一,尤其对于空化射流的认识仍需要深化,目前尚有一些问题^[48-50]需要研究与探讨。

1) 对射流中空泡初生、发展和溃灭机理的认识仍需要进一步完善,对影响空化效应的因素还需深入研讨。

2) 由于有机废水的成分较为复杂,水质对空化效应的影响机理及程度需要从理论和实验两方面来进行研究。

3) 射流中空泡或空泡群运动的非线性动力学特性研究以及对于空化射流中的化学反应研究。

4) 研究射流空化技术与其他物化水处理技术、氧化工艺(如:臭氧技术、过氧化氢氧化等)的联合作用,实现多项技术结合,使其在净化水质、消毒除垢等各个方面更加经济可行,技术便于利用,提高资源利用率。

5) 空化射流装置与高效新型喷嘴的设计仍然需要进一步探索与研究。

6) 空化射流在精密微细蚀制造方面的应用,也会成为未来的研究热点。

相信伴随人们对于空化射流认识的不断深入与相关技术的不断优化,其应用前景必将更加广阔。

参考文献:

[1] 胡寿根,朱美洲.空化水射流研究现状及其应用[J].

华东工业大学学报,1996(1):1-8.

[2] KIM K H, CHAHINE G L, FRANC J P, et al. Advanced experimental and numerical techniques for cavitation erosion prediction [M]. Berlin: Springer, 2014: 3-20.

[3] BRENNEN C E. Cavitation and bubble dynamics [M]. Oxford: Oxford University Press, 1995.

[4] 章昱,李育敏,计建炳.孔板水力空化装置的模拟优化[J].化工时刊,2010,24(11):20-22.

[5] 潘森森,彭晓星.空化机理[M].北京:国防工业出版社,2013.

[6] 杨庆,张建民,戴光清,等.空化形成机理和比尺效应[J].水力发电,2004,30(4):56-59.

[7] 吴亚丹.文丘里管内空泡及空泡群的演变及其溃灭特性[D].大连:大连理工大学,2009.

[8] RAYLEIGH L. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity [J]. Aip Conference Proceedings, 1917, 6(4): 94-98.

[9] PLESSET M S, ZWICK S A. The growth of vapor bubbles in superheated liquids [J]. Journal of applied physics, 1954, 25(4): 493-500.

[10] FOX F E, HERZFELD K F. Gas bubbles with organic skin as cavitation nuclei [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 26(6): 984-989.

[11] 兰华菊.空化水射流破岩实验研究及机理分析[D].重庆:重庆大学,2007.

[12] 刘小兵,程良骏.空泡在任意流场中的运动研究[J].水动力学研究与进展,1994,9(2):150-162.

[13] 贾力平,于开平,张嘉钟,等.空化器参数对超空泡形成和发展的影响[J].力学学报,2007,39(2):210-216.

[14] 王福霞,赵丽,付显威,等.空化初生研究综述[J].中国石油大学胜利学院学报,2006,20(3):3-6.

[15] DIDENDO Y, SUSLICK K S. The energy efficiency of formation of photons, radicals and ions during single-bubble [J]. Nature, 2002, 418(25): 394-397.

[16] SUSLICK K S. Sonochemistry [J]. Science, 1990, 247: 1439-1445.

[17] FLINT E B, SUSLICK K S. The temperature of cavitation [J]. Science, 1991, 253: 1397-1399.

[18] HAMMITT F G. Cavitation and multiphase flow phenomena [M]. New York: McGraw-Hill Press, 1980.

[19] GOGATE P R, PANDIT A B. Hydrodynamic cavitations reactors: a state of the art review [J]. Divisions of Chemical Engineering, 2001, 17(1): 1-85.

[20] 王西奎,邢乃军,王金刚,等.水力空化技术在有机废水处理中的应用[J].济南大学学报(自然科学版),2009,23(1):38-41.

- [21] 冯高坡. 水力空化机理及处理油田污水实验研究[D].北京:中国石油大学(北京) 2008.
- [22] HUA I, HOECHEMER R H, HOFFMANN M R. Sonolytic hydrolysis of p-nitrophenyl acetate: the role of supercritical water [J]. *Journal of Physical Chemistry*, 1995, 99: 2335-2342.
- [23] 唐贵富, 李东旭, 李洋, 等. 高压水射流表面清洗技术的应用[J]. *清洗世界* 2016, 32(5): 39-41.
- [24] KALUMUCK K M, CHAHINE G L, FREDERICK G S, et al. Development of a DYNAJET™ cavitating water jet cleaning tool for underwater marine fouling removal [C]//Proceedings of the 9th American Waterjet Conference. Dearborn, MI, USA: Waterjet Technology Association, 1997.
- [25] 李子丰. 空化射流及其在钻井破岩中的应用前景[J]. *天然气工业* 2006, 26(8): 86-89.
- [26] 邓松圣, 沈银华, 李赵杰, 等. 空化射流喷嘴流场的数值模拟[J]. *后勤工程学院学报* 2008, 24(2): 42-46.
- [27] PATRICIA M G, BROOKS B S. Hydrokinetic using the cleaning of exchanger tubes and pipes [C]//Proceedings of the 10th American Waterjet Conference. Houston, TX, USA: Waterjet Technology Association, 1999: 569-578.
- [28] 康灿, 周亮, 杨敏官, 等. 嵌入中心体诱发空化射流的实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2013, 34(12): 2275-2278.
- [29] 张丽婷, 张莹, 徐栋, 等. 空化水射流技术在海洋污损生物清除领域应用研究[J]. *海洋开发与管理* 2016, 33(8): 70-72.
- [30] 廖振方, 陈德淑, 邓晓刚, 等. 利用空化射流清洗湖泊[J]. *清洗世界* 2004, 20(4): 1-6.
- [31] KALUMUCK K M, CHAHINE G L. The use of cavitating jets to oxidize organic compounds in water [J]. *Journal of Fluids Engineering* 2000, 122(3): 465-470.
- [32] 管金发, 邓松圣, 陈明, 等. 乳化油废水空化射流破乳实验[J]. *后勤工程学院学报* 2016, 32(2): 37-40.
- [33] 赵启鑫, 黄永春, 罗佐帆, 等. 射流空化对亚硫酸法澄清糖液纯度的影响[J]. *食品科技*, 2016, 41(7): 115-120.
- [34] 刘峰, 朱南文, 王亚林, 等. 射流空化技术处理乳化含油废水的研究[J]. *石油与天然气化工*, 2005, 34(5): 416-419.
- [35] 邓松圣, 雷飞东, 邱正阳, 等. 空化射流降解水中苯酚的实验研究[J]. *重庆科技学院学报(自然科学版)*, 2011, 13(4): 91-93.
- [36] 韩健, 蔡腾飞, 潘岩, 等. 风琴管喷嘴和赫姆霍兹喷嘴射流特性分析[J]. *煤矿安全* 2017, 48(7): 134-137.
- [37] 张志云, 李根生, 史怀忠, 等. 超深井水力脉冲空化射流钻井试验研究[J]. *石油钻探技术*, 2009, 37(4): 11-14.
- [38] 王学杰, 李根生, 康延军, 等. 利用水力脉冲空化射流复合钻井技术提高钻速[J]. *石油学报* 2009, 30(1): 117-120.
- [39] 张立新, 黄晓川, 张林, 等. 水力脉冲空化射流钻井技术在YB121H井的应用[J]. *钻采工艺* 2013, 36(1): 22-24.
- [40] 陶满霞, 薛飞, 刘杰, 等. 水力脉冲空化射流技术在元坝井的现场试验及评价[J]. *辽宁化工* 2015, 44(8): 985-987.
- [41] ZAFRED P R. High pressure water shot peening: EP, EP0218354 [P]. 1990-11-07.
- [42] SOYAMA H, PARK J D, SAKA M. Use of cavitating jet for introducing compressive residual stress [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2000, 122(1): 83-89.
- [43] 康学勤, 孙智, 杨春敏, 等. 空化水射流对黄铜表面强化性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2010, 31(8): 140-145.
- [44] KALUMUCK K M, BRANDT A, ARMAND M, et al. Biomimetic undulating fin propulsion for maneuvering underwater vehicles [J]. *Johns Hopkins Apl Technical Digest*, 2010, 28(3): 278-279.
- [45] 宫伟力, 安里千. 高压水射流超细粉碎技术的研究与应用[J]. *中国粉体技术* 2001, 7(3): 35-40.
- [46] 张军. 柴油机喷嘴内空化效应的机理及射流破碎特征的研究[D].天津:天津大学 2010.
- [47] 卢义玉, 李晓红, 向文英. 空化水射流破碎岩石的机理研究[J]. *岩土力学* 2005, 26(8): 1233-1237.
- [48] 付胜, 李海涛, 刘丽丽, 等. 空化水射流的形成方法及其应用研究[J]. *机械科学与技术*, 2006, 25(4): 491-496.
- [49] 葛强, 李晓红, 卢义玉, 等. 空化射流处理有机废水的机理[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2007, 30(5): 19-22.
- [50] KAKEGAWA A, KAWAMURA T. An experimental study on oxidation of organic compounds by cavitating water-jet [C]//Fifth International Symposium on Cavitation (CAV2003). Osaka, Japan 2003.