

空化水射流物理化学效应分析

邓松圣¹ 雷飞东¹ 李赵杰² 沈银华¹

1.中国人民解放军后勤工程学院,重庆 401311 2.65113 部队,辽宁 沈阳 110000

摘要:

空化水射流是射流流场某点压力降至饱和蒸汽压以下,伴随有气泡产生、长大和破灭过程的一种新型射流,空泡溃灭产生瞬间高温和高压现象,伴随有 H^+ 和 OH^+ 等强氧化物质的产生。利用高温、高压及微射流等物理效应,可以显著地提高射流清洗、除锈、破碎效果及改善金属表面性能的能力。通过机械剪切、热解、自由基氧化和超临界水氧化等化学效应,可以对毒性难降解有机物进行化学降解。空化水射流在石油、矿业及环保等领域具有广阔的应用前景。

关键词:

空化;射流;物理效应;化学效应

文献标识码:A

文章编号:1006-5539(2011)04-0081-04

0 引言

空化现象是指液体中某点压力降至饱和蒸汽压以下形成的气泡产生、长大的过程。在工程实践中,产生空化主要有两种途径,一是通过声场,如超声和转能器空化,如前所述;另一是流体流动的动力效应——水力空化、体空化、水翼空化、旋涡空化、尾流-湍流空化、射流空化等。以前,在机械工程领域对空化的研究最感兴趣的是要避免其破坏作用,如管道、阀门、水泵、涡轮和螺旋桨的剥蚀破坏,对空化机理的研究主要是对气泡的产生、长大及破灭进行的研究较多。目前,可控空化已用于为人类服务,如超声清洗、侵蚀、切割和毒性有机物的降解等。

1 空化产生

在温度不变的条件下,如果忽略形成小气泡时表面张力的微小作用,则液流局部的绝对压力降低到当

地温度下的饱和蒸汽压力时,液体内部原来含有很小的气泡(通称气核)将迅速膨胀,在液体内部形成含有水蒸气或其他气体的空泡,从而产生空化现象。

通常采用无量纲参数“空化数”来量化研究水流中的空化现象。对于具体的水射流系统中,空化数 σ 定义为:

$$\sigma = \frac{p_{\infty} - p_v}{\frac{1}{2} \rho u_{\infty}^2} \quad (1)$$

式中 p_{∞} ——环境压力,Pa; p_v ——液体的饱和蒸汽压,Pa; ρ ——液体的密度,kg/m³; u_{∞} ——射流的速度,m/s。

当流场内最低压力达到空化核不稳定的临界压力 p_i 时,首先在该处发生空化现象,此时的空化数称为临界空化数或初生空化数,用 σ_i 表示:

收稿日期:

2011-05-13

基金项目:

重庆市科技攻关项目(CSTC,2010AC7034);重庆市自然科学基金项目(CSTS,2009BB7177);后勤工程学院学术创新基金项目(yz0643601)

作者简介:

邓松圣(1963-),男,重庆人,教授,博士生导师,主要从事油气储运理论和技术研究。

$$\sigma_i = \frac{p_i - p_v}{\frac{1}{2} \rho u_\infty^2} \quad (2)$$

对流场中,当 $\sigma > \sigma_i$ 时,不会发生空化;当 $\sigma < \sigma_i$ 时,发生空化。 σ 值越小,越容易产生空化。 $\sigma_i - \sigma$ 越大,空化程度越高。

根据空化水射流形成的条件,有三种比较普遍的产生空化的机制:尾流中的空化初生、振荡型空化初生、高剪切流区内的空化初生。

利用射流产生空化效应的基本原理是,从喷嘴出来的射流在其内部诱生成充满水蒸气的空化泡,当喷嘴与冲击物体表面距离适宜时,这些空化泡便经历长大和压缩过程,进而破灭,产生空化效应。在工程实际中,剪切型空化射流以 Yanaida、日本 Yoshiaki 教授等研究的简单角形喷嘴为代表,见图 1^[1]。普通的淹没水射流和人工淹没水射流也属于剪切型空化射流,一般地,当射流速度大于 30 m/s 便产生空化现象。简单角形喷嘴由于喷嘴出口段扩散角的作用,加剧了射流和周围液体间的剪切作用,有利于产生空化。

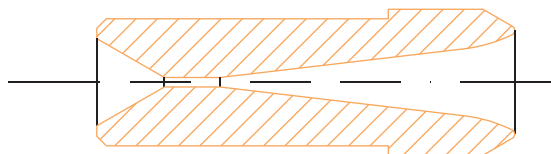


图 1 角形喷嘴

2 空化的物理效应

空泡溃灭过程是一个复杂的物理化学过程,空泡溃灭时将伴随产生局部高温、高压现象,其压力用下式描述:

$$\frac{p_{\max}}{p_0} = 1 + \frac{[(R_0/R)^3 - 4]^{\frac{4}{3}}}{4^{\frac{1}{3}} [(R_0/R)^3 - 1]^{\frac{1}{3}}} \quad (3)$$

式中 $p_{\max}$ 、 p_0 ——气泡的最高压力和初始压力,Pa;
 R 、 R_0 ——气泡的半径和初始半径,mm,在破灭过程中,如 $R_0/R=25$ 时, $p_{\max}=2\,461\,p_0$ 。

可见,水蒸气气泡破灭时,产生非常高的压力。

将空化射流引入高压水射流后,空化水射流冲击压力与普通连续高压水射流的冲击压力关系为:

$$p_i = \frac{p_s}{6.35} \exp\left(\frac{2}{3a}\right) \quad (4)$$

式中 p_i ——空化射流冲击压力,Pa;
 p_s ——连续射流冲击压力,Pa;
 a ——液体内气体含量,可以看出,当 $a=1/6\sim$

1/10 时^[2-3], $p_i=(8.6\sim 124)p_s$ 。

当纯空气泡绝热收缩时,产生的局部温度由下式计算:

$$T/T_0 = (R_0/R)^{3(\gamma-1)} \quad (5)$$

式中 γ ——绝热指数,可取 $\gamma=4/3$;

T 、 T_0 ——压缩过程终了时的气体温度与初始时的气体温度,K。

可见,空化水射流的物理效应具有巨大能量,在清洗、切割、破碎和除锈等方面具有广阔应用前景。

2.1 清洗

空化水射流清洗以水为介质,在高压条件下对物件进行清洗,同时,利用空化效应产生的高温、高压及微射流的作用,具有环保、节能、高效、无腐蚀、不损坏滤芯基体、装置简单和易操作等特点。

美国学者 Patricia, McGrew Garcia 及 Brooks Bradford 将超声空化水射流用于管道清洗技术,研究发现用超声空化清洗技术与传统的清洗方法相比,大大减少所需清洗时间及耗水量。此外,超声空化清洗技术清洗管道可减少被清洗件的腐蚀,而且对碳氢化合物类沉淀物的清洗特别有效^[4]。

2.2 材料切割、岩石破碎和油井解堵

空化水射流被用来替代普通射流进行破碎和切割等作业,提高水射流加工的效率。如 Ryoji Aoyagi 等人通过将空化水射流流过直径为 0.15 mm 的燃料喷嘴,经过不到 15 min 就将其上小于 10 μm 的机加工毛刺去掉^[5]。

在石油和矿业的钻井工程中,空化水射流用于提高钻井速度,并且采用自振空化水射流,进行油井解堵并提高原油采收率。

2.3 改善材料的表面性能

利用空化水射流空泡溃灭时作用在材料表面上的冲击力可以极大地提高材料的表面性能。在实际应用中,通过对合金工具钢 JIS SKD61(日本标准)制造的热锻模进行空化喷射硬化处理后,模具的寿命提高了约 50%。

2.4 材料的超细粉碎

空化水射流在气泡溃灭过程中产生的冲击波和微射流对周围的物料具有巨大的冲蚀作用,使物料粉碎。大量研究结果表明,利用空化水射流可以高效率地使物料粉碎为小于 10 μm 的超细颗粒;自振式空化水射流粉碎物料的产量与效率分别是球磨机的 6.6 倍和 3.9 倍^[6]。

3 空化的化学效应

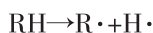
当水体中含有高分子化合物时,空泡溃灭产生的高温、高压及微射流同样会对高分子有机物产生作用,使高分子断链分解,同时空泡溃灭对水作用产生的强氧化物和自由基与高分子有机物反应,降解常规情况下难以降解的有机物,如苯酚等。其降解机理包括机械剪切、热解、自由基氧化和超临界水氧化等。

3.1 机械剪切

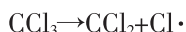
在含有聚合物的多相体系中,由于空化泡崩灭时会使传质模质的质点产生很大的瞬时速度和加速度,引起剧烈的振动,产生强大的液体剪切力,使大分子主链上碳键产生断裂,使高分子物质降解^[7]。

3.2 热解

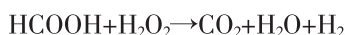
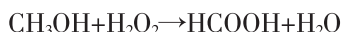
由于空泡破灭,在局部地点形成瞬间高温,高分子化合物发生解链反应,如烃类解链生成自由基和自由原子^[8]:



非极性、易挥发溶质的蒸汽也能直接热分解如 CCl_4 :



水蒸气解离产生 H_2O_2 等强氧化物,通过这些强氧化物,又进一步氧化污染水体中的有机物,如:

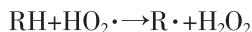
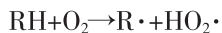
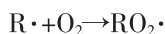
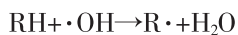


最终使有机物分解、氧化成溶于水或低粘度的物质,达到降解的目的。

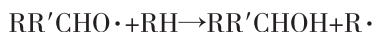
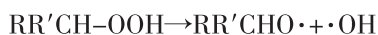
3.3 自由基氧化

空泡溃灭时,水中会产生局部的高浓度游离状态的 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{H}$ 、 $\text{O}\cdot$ 等自由基,并产生高压和微射流,产生强烈的剪切力,使大分子主链上碳键断裂,产生自由基。由于自由基的强氧化性,与溶液中溶质进行反应,实现降解。例如, $\cdot\text{OH}$ 非常活跃,能脱去有机分子(如

烃类物质)上的一个氢,形成 $\text{R}\cdot$ 自由基, $\text{R}\cdot$ 能被水中溶解氧进一步氧化成 $\text{RO}_2\cdot$, $\text{RO}_2\cdot$ 也是强氧化剂,这样自由基不断产生不断氧化,大大增强了空化的氧化效率,部分反应如下^[9]:

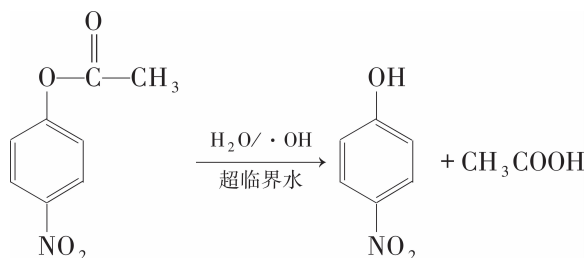


随着反应的继续,烃基过氧化物不断分解,并与新的烃分子或自由基作用,进一步氧化生成中间产物,如醇和酮,反应如下:



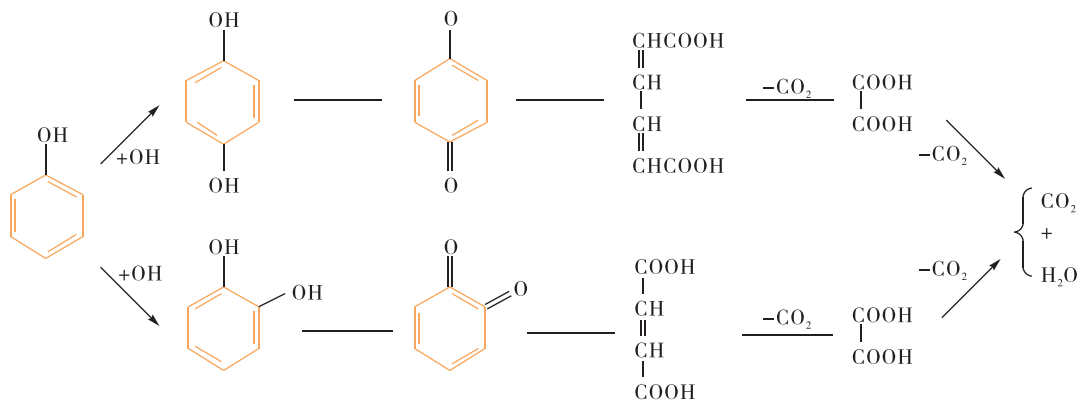
3.4 超临界水氧化

在空泡破灭过程中,形成超临界水,有利于提高大多数化学反应速度,例如低挥发性溶质如对硝基苯乙酸酯在瞬时超临界水相的反应如下:



实验研究表明,羟基自由基氧化降解苯酚的机理如下:首先,苯酚在 $\cdot\text{OH}$ 的作用下被氧化为对苯二酚或邻苯二酚,然后,继续被氧化为醌类化合物,之后开环形成脂肪酸(如丁烯二酸和乙酸),最终降解为二氧化碳和水,反应过程如下^[10]。

目前已进行的实验表明:空化射流对苯酚具有降解效果,在平均 15 MPa 的中低压条件下,经过 800 min 的降解,累计降解率可达 70.9 %。



4 结论

空化水射流是一种易于获得的新型射流,空化形成的机制有尾流中的空化初生、振荡型空化初生和高剪切流区内的空化初生等形式;空泡破灭产生的局部高温和高压,具有巨大的能量,在清洗、切割、破碎、除锈和金属材料表面强化等方面具有广阔应用前景;并且,空化射流伴随有机械剪切、热解、自由基氧化和超临界水氧化等作用,对毒性难降解有机物进行降解,化学效应突出。

参考文献:

- [1] 沈忠厚. 水射流理论与技术[M]. 东营: 石油大学出版社, 1998.
- [2] 沈银华, 邓松圣, 张洁, 等. 轴对称淹没水射流喷管内外紊流流场数值模拟[J]. 后勤工程学院学报, 2007, 23(2): 33-36.
- [3] 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.
- [4] Patricia, McGrew Garcia, Brooks Bradford. Hydrokinetic Using the Cleaning of Exchanger Tubes and Pipes [A]. Proc of the 10th American Water Jet Conference, Houston Texas [C]. Chicago: Dearborn, 1999.
- [5] Ryoji Aoyagi, Ryuichi Fujiwara, Tokwo Niita. Possibility of Metal Processing Using Ultrasonic Cavitation Jet [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2001, 40(2): 3784-3786.
- [6] 付胜. 热力辅助水射流超细粉碎装置设计理论及实验研究——射流粉碎的空化效应[D]. 北京: 中国矿业大学, 2002.
- [7] 卢义玉, 李倩, 李晓红, 等. 空化水射流空泡云长度的试验研究[J]. 流体机械, 2006, 34(5): 9-11.
- [8] 卢义玉, 左伟芹, 李晓红, 等. 空化水射流-双氧水处理苯酚废水的机理分析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, 2008, 31(10): 19-22.
- [9] 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.
- [10] 张凤华, 廖振方, 唐川林, 等. 空化水射流的化学效应[J]. 重庆大学学报, 2004, 27(1): 32-35.