水力机械空蚀中微颗粒的关键作用

汪家道 陈皓生 秦 力 李永健 陈大融*

(清华大学摩擦学国家重点实验室, 北京 100084. * 联系人, E-mail: chendr@mail.tsinghua.edu.cn)

摘要 100多年来, 人们一直认为空化直接导致了空蚀的发生. 但本研究发现, 空化仅仅是导致空蚀的必要条件, 而不是充分条件. 旋转圆盘空蚀实验结果显示, 微颗粒在空蚀过程中起到了不可或缺的作用, 而且颗粒粒径对钢样表面蚀坑的形成有显著影响. 钢样表面的破裂和变形表明, 空蚀过程是一种力学作用的结果, 通过数值分析进一步论证了这一机制.

关键词 空化 空蚀 表面形貌 颗粒

空蚀常常出现在各种水力机械中, 如水轮机组、船用螺旋桨、各种管道和阀门等等, 它是导致这些机械破坏的主要原因. 目前, 中国的水电站装机容量已经达到 1.2×10^9 kW. 由于空蚀而导致的停机检修, 按照每年10%来计算, 将造成高达每年 50 亿美元的经济损失. 从19世纪末发现空蚀以来, 经过大量的研究, 人们普遍认同空蚀发生包括以下过程 [1]: (1) 流场中的速度梯度变化导致了局部压力的变化, 空泡(气泡)将在局部压力低于液体饱和蒸汽压的区域形成(此过程被称为空化); (2) 空泡随流体运动, 当空泡经过高压区, 气泡周围压力急剧增大时, 空泡将剧烈收缩, 进而溃灭; (3) 空泡溃灭时形成穿越空泡的高速射流 [2]将攻击并破坏壁面. 因此, 大部分的研究者认为, 空化直接导致了空蚀的发生.

通常, 水中含有大量微小颗粒, 微颗粒引起水中气核的增加, 并进一步增加空化的可能性. 关于微颗粒对空化的作用研究目前已有一些相应成果. Harvey等人 [3]首先提出了空化过程中的异相气核成长的理论. 然后, Arora等人 [4]通过实验验证了微颗粒可以引起空化. 对于异相气核成长过程中影响因素的研究, Jones等人 [5]指出固体壁面是一个关键因素. 空化过程中气核生长动力学的理论研究方面目前也取得了一定的进展 [6,7]. 微颗粒对于空蚀的直接影响, 目前研究取得的共识是: 颗粒对空蚀的影响只是通过增加空化的概率和直接冲击固体壁面两种方式来实现的. 例如, Huang和Ihara[8]研究了含沙水中的沙粒尺寸对空蚀和冲蚀的影响; Chen等人 [9]在振动空蚀实验中, 利用在去离子水中添加特定尺寸微颗粒的方法研究了颗粒对振动空蚀结果的影响. 然而, 我们在空蚀实验中却发现, 微颗粒对水力机械中空蚀的产生起着直接的、至关重要的作用. 数值分析的结果显示, 当颗粒趋近壁面时, 将形成极高的压力. 微颗粒吸附微气泡已经被广泛证明和应用. 因此, 微颗粒和微气泡的联合体在趋近壁面的过程中形成高压, 微气泡在剧烈增大的压力作用下, 在短时间内体积急剧缩小, 泡内能量聚集, 最终坍缩溃灭. 这时, 溃灭点出现在空泡最高有效压力点处, 并形成指向固壁的微射流和微激波 [10], 进而严重破坏固体表面. 因此, 在空蚀过程中, 力学因素起了最重要的作用. 空化引起了空泡的形成和生长, 而颗粒的运动导致了空泡的溃灭.

1 颗粒作用的实验证据

为了研究和比较不同水质和颗粒粒径对空蚀的影响, 并确定纳米颗粒和表面形貌在空蚀过程中的关系, 在旋转圆盘空蚀实验装置中进行了空蚀实验. 图 1 为转盘空蚀实验装置的示意图. 试样材料为Q235钢, 不经热处理; 试样表面采用磨削加工, 表面 R_a 值为 0.7~0.8 μm. 每块试样尺寸均为 40 mm×30 mm×6 mm. 转盘直径为 300 mm, 在每组实验中将 4 块试样均匀安装在转盘上. 安装时, 试样表面比转盘表面突出1 mm, 以利于空化. 实验时, 转盘的转速为2800 r/min, 对应试样中心的线速度为 30 m/s. 实验温度通过冷却水循环机保持在室温(25℃).

为了研究微颗粒对空蚀发生的影响, 实验采用自来水作为实验介质进行实验. 调节转盘转速, 保证试样中心速度保持在 30 m/s. 如图 2(a)所示, 通过扫描电子显微镜(SEM)可以观察到自来水中存在大量

2007-07-23 收稿, 2007-09-30 接受
国家自然科学基金资助项目(批准号: 50675112, 50475018, 50505020)

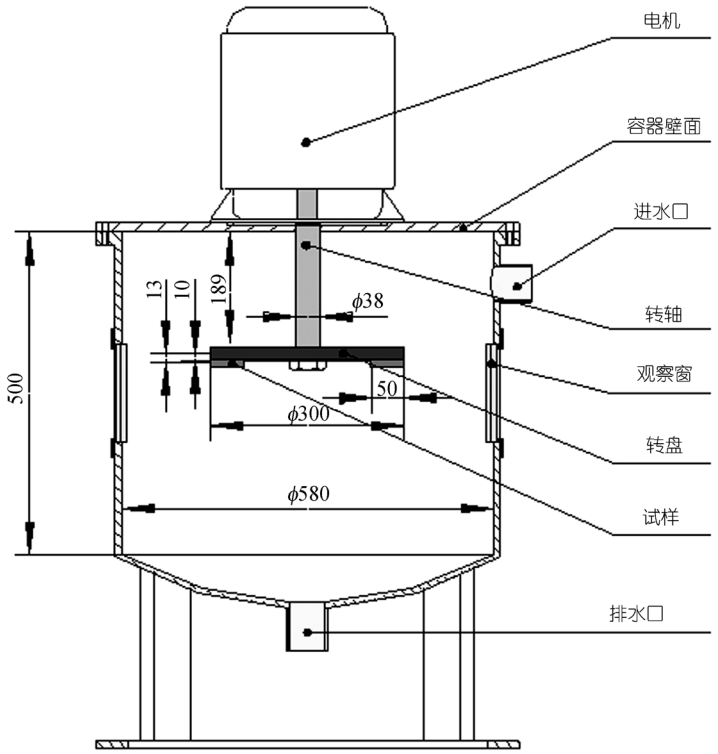


图 1 实验装置示意图(单位: mm)

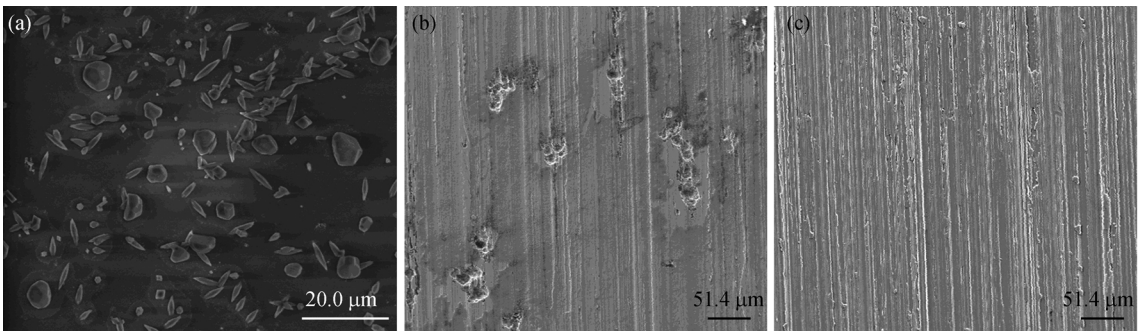


图 2 空蚀实验结果电子显微镜图

(a) 自来水中的颗粒(FEI Quanta 200); (b) 自来水中空蚀实验后钢样表面的蚀坑; (c) 去离子水空蚀实验后的钢样表面

的颗粒. 经过 10 min 实验以后, 试样表面出现大量的空蚀坑洞(图 2(b)). 将自来水经过多层反渗透膜过滤后制成去离子水, 其中基本不含微颗粒. 改用去离子水作为实验介质, 经过 60 min 的实验, 试样表面仍然没有出现空蚀坑洞(图 2(b)). 这些结果证明, 微颗粒确实对空蚀的发生有显著的作用.

在去离子水中加入不同粒径的颗粒然后进行实验, 研究了颗粒粒径对空蚀的影响. 实验中使用 CeO_2 颗粒, 它们分别具有以下几种不同的粒径: 100 nm, 500 nm, 1.2 μm, 1.8 μm, 2.6 μm 和 4 μm. 图 3 给出了其中一部分颗粒的电子显微镜照片. 实验中, 颗粒的质量浓度为 1 kg/m^3, 每组实验进行 10 min. 图 4(a)~(f)分别显示了实验后试样表面的情况.

实验结果表明, 不同标称粒径的颗粒, 对形成空化坑有着不同的作用. 粒径约为 1 μm 的颗粒引起的表面破坏最为严重(图 4(c), (d)); 而较小的颗粒, 如 100 和 500 nm 的颗粒, 只引起轻微的侵蚀, 钢样表现的蚀坑数量也较少; 一个重要的发现是, 较大的颗粒,

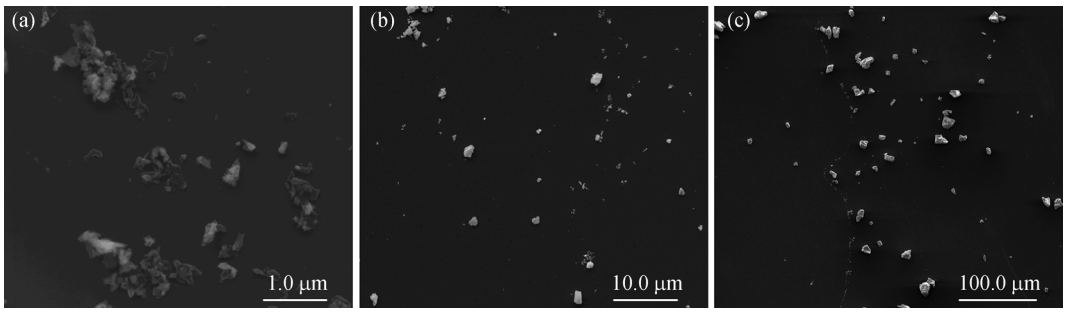


图 3　不同粒径颗粒的电镜图

(a) 100 nm 颗粒; (b) 1.2 μm 颗粒; (c) 4 μm 颗粒

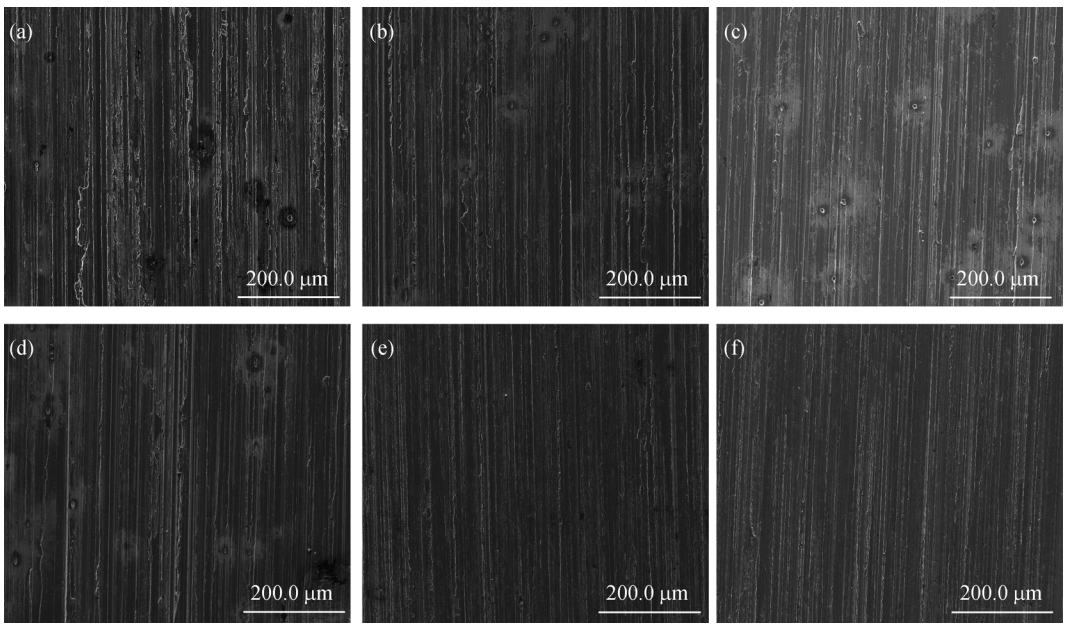


图 4　加入不同粒径颗粒后空蚀实验试样表面的电子显微镜图

(a) 100 nm 颗粒; (b) 500 nm 颗粒; (c) 1.2 μm 颗粒; (d) 1.8 μm 颗粒; (e) 2.6 μm 颗粒; (f) 4 μm 颗粒

尤其是 4 μm 的颗粒, 实验后试样表面没有明显的空蚀痕迹. 综合上面的实验观察结果发现, 1 μm 左右的颗粒在空蚀的发生中具有极其重要的作用, 而更大粒径的颗粒对空蚀的影响不显著. 造成这种现象的原因是什么, 目前还不清楚.

2　颗粒运动引起的空泡溃灭

微颗粒的存在是流动系统中出现空蚀的必要条件. 实验结果显示, 空蚀坑洞常常发生在固壁表面微突体的下降沿周围 [1]. 我们认为这一现象与流体中的微颗粒有着密切的联系, 下面将给出数值仿真的结果来加以解释.

根据欧拉多项流模型和湍流 k-ε RNG (Renormalization Group, 重整化群)模型, 对高 50 μm、宽 250 μm 的微突体周围的流场进行分析. 利用 FLUENT 软件对固壁附近的微颗粒的运动进行仿真和分析. 计算模型为 2 维通道流模型, 入口处的流速为 30 m/s, 通道的上下壁面保持静止. 流动介质由水和粒径为 500 nm、密度为 3260 kg/m^3 的 CeO_2 颗粒组成. 颗粒的初始体积分率为 0.0001. 假设颗粒与壁面之间没有滑移, 可以得到对应条件下的计算结果. 如图 5(a)所示, 在突起的下降沿形成了微旋涡. 图 5(b)显示, 沿流动方向, 距离壁面不同距离的位置上, 流速变化很大.

在下降沿后方, 分别距离上壁面 1 μm 的位置(图 5 中圆圈标出的位置)处, 流体 x 方向的流速(切向速度)

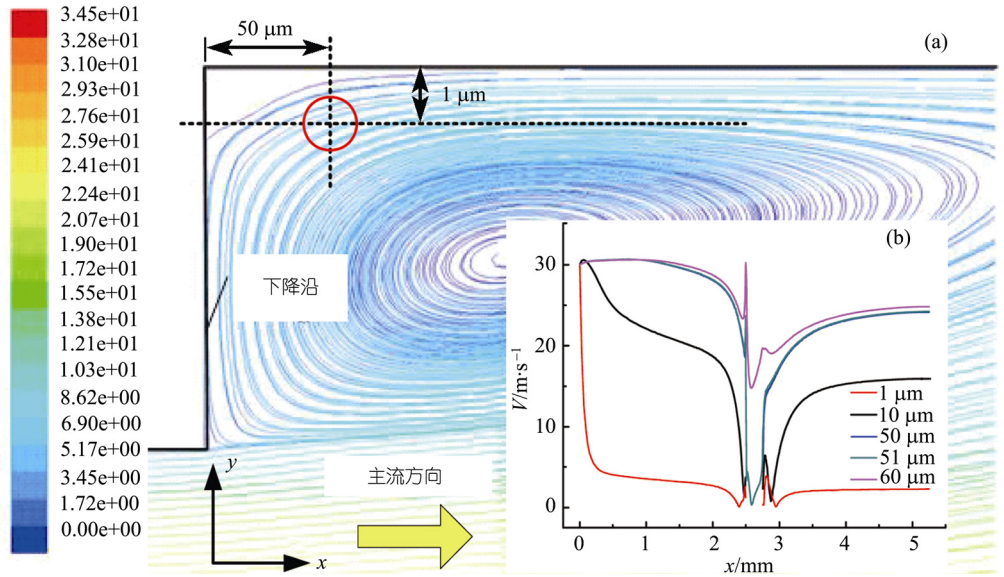


图 5 下降沿附近的旋涡的数值仿真结果

(a) 流场流线图(颜色反映速度分布, 单位: m/s); (b) 距上壁面不同距离处, 沿流动方向(x 方向)的速度曲线

大于 5 m/s, 而y方向上指向壁面的流速(法向速度)也超过 1 m/s. 根据以上计算, 颗粒将在接近壁面的过程中形成高压区. 事实上, 很多研究者已经证明, 气泡很容易吸附在颗粒的表面 [10]. 这里, 假设颗粒为刚性球体[6], 而水的黏度保持在 1.0 mPa·s, 颗粒与壁面的距离大于 10 nm, 以保证连续方程的适用性. 于是, 计算得到当颗粒与壁面的距离为 10~1000 nm时, 切向速度引起的最大压力峰值为 43 kPa~2.54 MPa. 如果进一步考虑挤压效应, 则压力峰值将增加到 121 kPa~14.78 MPa. 计算结果显示, 极高的压力将在邻近壁面的区域产生. 从这一计算结果可以解释和证明空蚀坑洞常常出现在微突体下降沿的现象 [1]. 据此认为, 表面微突体的存在也是空蚀发生的一个必要条件.

3 空蚀中的力学作用

关于空蚀的机理, 各个领域的研究者先后提出了多种解释, 主要包括电化学腐蚀 [7]、力化学作用 [8]、液相传质过程作用 [9]、力学作用等等. 本研究的实验结果显示, 微激波攻击固体表面形成冲击波. 固壁表面受冲击的区域承受了强烈的压力波, 因而处于绝压状态. 当压力超过材料的屈服应力时, 固壁表面将被破坏而形成空蚀坑. 空蚀坑洞的形成是一个力学过程, 图 6(a)中表面出现的裂纹和变形证明了这一机制. 同时, 在高压作用下, 材料亚表层受到由应力波传递的巨大压力. 由于材料微元体的惯性作用, 外部压力会急剧下降, 压缩波被反射后形成的强大拉力, 导致亚表层材料破损(图 6(b)). 在使用聚焦离子束(FIB)获得的空蚀损伤坑截面照片中, 可以清晰地看到亚表层材料中产生的空隙(图 6(c)), 表明材料亚表层不仅受到压力, 同时也受到拉力, 属于应力波传播过程. 结果表明, 空蚀过程中材料表层与亚表层破坏取决于材料的本构关系, 以及材料表面所受到的冲击波与应力波之间的耦合关系. 可以确定, 空蚀过程中的材料破坏过程主要是由力学行为造成的.

4 结论

根据以上实验结果和数值分析, 可以得出以下结论:

(ⅰ) 空化是空蚀的必要条件之一, 但并非充分条件, 颗粒尺度对空蚀发生具有显著影响;

(ⅱ) 计算结果表明, 颗粒和气泡联合体可以在近壁面形成高压区, 从而导致空泡溃灭, 产生微射流;

(ⅲ) 在影响材料空蚀的众多因素中, 力学因素是最主要的作用因素; 作用在固壁表面的微激波是造成材料表层撕裂和亚表层粉碎的主要原因;

(ⅳ) 通过合理的表面形貌设计, 防止颗粒接近壁面, 将有助于避免空蚀的发生.

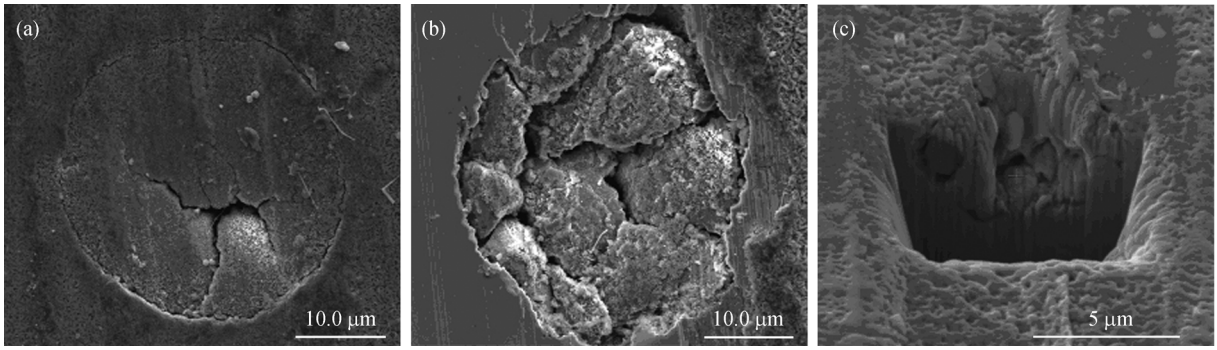


图 6 Q235 钢样表面的空蚀

(a) 空蚀造成的试样表面的裂纹和变形(SEM); (b) 材料亚表层粉碎(SEM); (c) 拉应力形成空隙(FIB, 试样表面倾斜 45°观察)

参 考 文 献

1 Knapp R T. Cavitation. New York: McGraw Hill Book Co, 1970

2 Bruno G, Pecha R. Mie scattering from a sonoluminescing bubble with high spatial and temporal resolution. Phys Rev E, 2000, 61(5): 5253—5256[DOI]

3 Harvey E N, McElroy W D, Whiteley A H. On cavity formation in water. J Appl Phys, 1947, 18: 162—172

4 Arora M, Ohl C D, Morch K A. Cavitation inception on microparticles: A self-propelled particle accelerator. Phys Rev Lett, 2004, 92: 174501[DOI]

5 Jones S F, Evans G M, Galvin K P. Bubble nucleation from gas cavities—A review. Adv Coll interf Sci, 1999, 80: 27—50[DOI]

6 Gniloskurenko S V, Raichenko A I, Nakamura T, et al. Theory of initial microcavity growth in a liquid metal around a gas-releasing particle. II Bubble initiation conditions and growth kinetics. Powd Metall Metal Ceram, 2002, 41(1-2): 90—96[DOI]

7 Mørch K A. Cavitation nuclei and bubble formation—A dynamic liquid-solid interface problem. J Fluids Eng, 2000, 122: 494—498[DOI]

8 Huang S, Ihara A. Effects of solid particle properties on cavitation erosion in solid-water mixture. J Fluids Eng, 1996, 118: 749—755

9 Chen H S, Liu S H, Chen D R, et al. Study on effect of microparticle's size on cavitation erosion in solid-liquid system. J Appl Phys, 2007, 101: 103510[DOI]

10 Zhou Z A, Xu Z H, Finch J A. Effect of surface properties of fine particles on dynamic bubble formation in gas-supersaturated systems. Ind Eng Chem Res, 1998, 37: 1998—2004[DOI]