

# 铅黄铜合金在不同液体介质中的 超声空蚀行为及机理

张桃<sup>a</sup>, 刘海霞<sup>a</sup>, 康灿<sup>b</sup>, 李秀阁<sup>a</sup>

(江苏大学 a.材料科学与工程学院 b.能源与动力工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘 要:** **目的** 探讨铅黄铜合金在不同液体介质中的超声空蚀行为及机理。**方法** 利用超声波振动空蚀装置, 分别研究铅黄铜材料在去离子水、自来水以及 3.5%NaCl 溶液中的超声空蚀行为, 借助金相显微镜、体视显微镜、扫描电子显微镜以及显微硬度计检测空蚀后的材料表面参数。**结果** 经过 300 min 空蚀作用后, 铅黄铜试样在自来水中的累计质量损失最大, 在 3.5%NaCl 溶液中的累计质量损失最小, 在去离子水中的累计质量损失居中。铅黄铜在去离子水和自来水中空蚀初期主要表现为大量的塑性变形, 裂纹在晶界处萌生并沿横向和纵向不断扩展, 蚀坑细小且形状不规则。在 3.5%NaCl 溶液中, 铅黄铜空蚀初期的塑性变形和裂纹发展不明显, 但有明显的选择性空蚀倾向, 蚀坑形状以唇状为主, 蚀坑口径更大, 深度更深。铅黄铜在 3 种液体介质中空蚀后都产生了几百微米的加工硬化层, 其中, 在 3.5%NaCl 溶液中空蚀后的硬化层最厚, 最大硬度值增幅达 13.6%。随着空蚀时间的延长, 材料近表层逐渐软化。**结论** 铅黄铜在 3 种液体介质中的抗空蚀性能高低顺序为 3.5%NaCl 溶液>去离子水>自来水。

**关键词:** 超声空蚀; 液体介质; 铅黄铜合金; 表面形貌; 加工硬化

**中图分类号:** TG172.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)01-0109-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.01.017

## Ultrasonic Cavitation Erosion Behavior and Mechanism of Pb-Brass Alloy in Different Liquids

ZHANG Tao<sup>a</sup>, LIU Hai-xia<sup>a</sup>, KANG Can<sup>b</sup>, LI Xiu-ge<sup>a</sup>

(a.School of Material Science and Engineering,

b.School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**ABSTRACT:** The work aims to explore ultrasonic cavitation erosion behavior and mechanism of Pb-Brass alloy in different liquid media. Ultrasonic cavitation erosion behavior of brass in deionized water, tap water and 3.5% NaCl solution was studied respectively with an ultrasonic vibration cavitation experimental rig. Surface parameters of eroded material were measured with metallographic microscope, stereomicroscope, scanning electron microscope and microhardness tester. After 300 min of cavitation erosion, the lead brass specimen had maximum cumulative mass loss in tap water, minimum cumulative mass loss in 3.5% NaCl solution, and intermediate cumulative mass loss in deionized water. In the initial stage, the cavitation erosion of Pb-brass

收稿日期: 2017-07-20; 修订日期: 2017-10-22

Received: 2017-07-20; Revised: 2017-10-22

基金项目: 国家自然科学基金 (51376081)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51376081)

作者简介: 张桃 (1989—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为超声空化与空蚀。

Biography: ZHANG Tao(1989—), Male, Master graduate student, Research focus: ultrasonic cavitation and cavitation erosion.

通讯作者: 刘海霞 (1977—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为空化射流强化与空蚀机理。

Corresponding author: LIU Hai-xia(1977—), Female, Ph. D., Associate professor, Research focus: cavitation jet enhancement and cavitation erosion mechanism.

mainly appeared as gross plastic deformation in deionized water and tap water. The cracks of the Pb-brass alloy appeared at grain boundary and then developed along the horizontal and vertical directions. Cavitation erosion pits were small and irregular. However, in the 3.5% NaCl solution, the cracks and plastic deformation developed slightly in early stage, but showed obvious tendency of selective cavitation erosion. The cavitation erosion pits were mainly lip-type, and of larger diameter and depth. The Pb-brass alloy produced hundreds of microns thick work-hardened layer subject to cavitation erosion in the three liquids. The hardened layer was the thickest in the 3.5% NaCl solution, and the maximum hardness increased by 13.6%. As cavitation erosion prolonged, material was gradually softened beneath the material surface. Cavitation resistance of the Pb-brass alloy in the three liquids, from high to low, is in the sequence of 3.5% NaCl solution, deionized water, tap water.

**KEY WORDS:** ultrasonic cavitation; liquid medium; Pb-brass alloy; surface morphology; work hardening

铜及铜合金具有良好的抗腐蚀性和持久耐用性,被广泛应用于海洋装备制造。以铜合金阀门为例,作为流体输送系统中的关键设备,其过流部件表面常因空蚀而出现麻点或蜂窝状的蚀坑。而且,在水力机械的运行过程中,空蚀的频繁发生严重影响了机械设备的使用寿命和安全运行。

空蚀问题涉及多个学科,影响因素也错综复杂<sup>[1]</sup>。研究其机理是解决空蚀问题的根本途径。现阶段科研工作者从不同角度对铜合金材料的空蚀行为及抗空蚀性能的提高进行了研究。Jasionowski R 等发现 BA1055 青铜经过热处理后,其空蚀孕育期增加,抗空蚀性能增强<sup>[2]</sup>。Hanke S 等采用摩擦堆焊技术制成的镍铝青铜涂层具有良好的抗空蚀能力<sup>[3]</sup>。Mitelea I 等在铝青铜合金的表面涂金属陶瓷层可以提高其抗空蚀性能<sup>[4]</sup>。Tang C H 等对 Mn-Ni-Al 青铜进行激光表面熔覆,其抗空蚀能力是未经处理镍铝青铜的 2.2 倍<sup>[5]</sup>。周青等研究锡黄铜的空蚀与冲蚀交互作用时,发现材料表面存在着方向性不明显的短程犁沟状、鱼鳞状凹坑<sup>[6]</sup>。刘海霞等采用淹没水射流的方法对黄铜进行冲击实验,发现不同的工艺参数对黄铜表面产生的空蚀效果大不相同<sup>[7]</sup>。Hucińska J 等发现铝元素和镍元素的添加,可以提高纯铜的抗空蚀性能<sup>[8]</sup>。

Song Q N 等采用摩擦搅拌处理(FSP)技术对镍铝青铜表面进行了强化,表面晶粒细化,抗空蚀性能显著增强<sup>[9]</sup>。目前,对铜合金的空蚀研究多数集中在

镍铝青铜合金上,而对铅黄铜合金的空蚀行为和抗空蚀性能改善等方面的研究却鲜有报道,尤其是在不同液体介质中的空蚀研究。

铅黄铜作为一种典型的制造阀门的合金材料,具有良好的耐蚀性、减摩性和成形性<sup>[10]</sup>,常在各种流动液体介质中使用,容易遭受空蚀破坏。因此,研究其在液体介质中的空蚀行为和机理具有重要的现实意义。

本文选取铅黄铜合金材料为研究对象,重点研究其在超声空化环境中的空蚀行为和空蚀机理,采用去离子水、自来水以及 3.5%NaCl 溶液 3 种液体介质进行空蚀行为的对比研究和分析。借助光学显微镜、体视显微镜、扫描电子显微镜和显微硬度计等测试设备,研究铅黄铜材料在空蚀过程中的材料移去机理、表面形貌和表面硬化特征,并获得定量的结论,为抗空蚀材料的开发及机械设备在空蚀条件下的安全运行提供了参考依据。

## 1 实验材料及方法

本实验所采用的材料为铅黄铜板,通过线切割手段获取一定尺寸的实验试样,试样形状与尺寸如图 1a 所示。实验前先用清洗剂去除试样表面的油污,然后吹干,进而在 300 °C 下进行 2 h 的去应力退火,最后进行空冷。试样的初始金相组织和主要化学成分如图 1b 和表 1 所示。

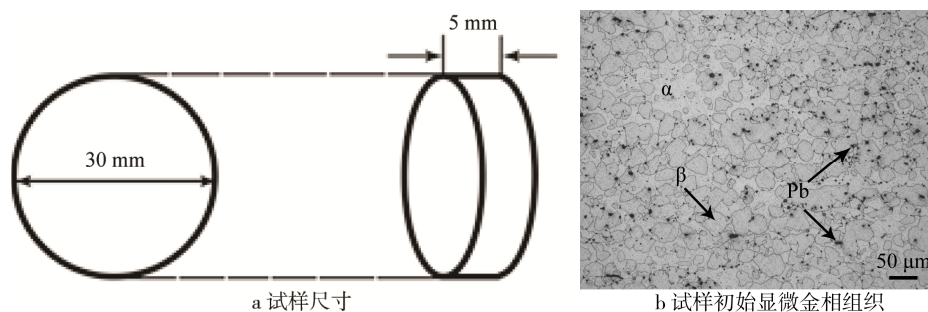


图 1 试样尺寸及初始显微金相组织

Fig.1 Dimensions (a) and initial metallographic microstructure of Pb-brass specimen (b)

表 1 铅黄铜主要化学成分表  
Tab.1 Main chemical compositions of Pb-brass alloy

成分	Cu	Zn	Pb	Sn	Fe	Ni	Al	Impurity	Others
质量分数/%	57.5~59.5	34.3~37.5	2.0~3.0	0.70	0.40	0.40	0.3	≤1.2	≤0.15

实验研究中将铅黄铜试样平均分为 A、B、C 三组，每组包含 10 个试样，均采用 240<sup>#</sup>—1500<sup>#</sup>水砂纸逐级打磨，然后用 1.0 μm 金刚石喷雾抛光剂抛光至镜面级别，再用无水乙醇超声清洗 15 min，电吹风吹干，最后用精度为 0.1 mg 的德国赛多利斯 BSA124S 分析天平进行称量，称量 3 次，取平均值。

将试样分别在去离子水、自来水以及 3.5%NaCl 溶液中进行超声空蚀实验。其中，实验所用自来水的主要理化指标如表 2 所示，3.5%NaCl 溶液由去离子水和分析纯 NaCl 试剂按比例配制而成。3 组试样的空蚀时间均设置为 15、30、45、60、90、120、150、180、240、300 min。空蚀实验结束后，试样用无水乙醇超声清洗 15 min，再用电吹风吹干。然后对其进行称重并记录质量。最后，将称完质量的试样统一放入密封袋中保存备用，以待后续检测。

实验研究所采用的超声空蚀设备是在 ASTM G32—2010 标准基础上自制而成<sup>[1]</sup>，装置如图 2 所示。其中，超声频率为(27.4±0.3) kHz，功率为 500 W，峰振幅为(55±3) μm，工具头下端面直径为(15.9±0.05) mm，浸入溶液深度 12 mm，试样空蚀面与工具头下端面间的垂直距离为 0.5 mm。实验过程中借用空气压缩机对超声波换能器进行辅助降温，采用自制的循环冷却水装置将液体温度控制在(25±2) ℃。

实验后根据空蚀前后试样的质量变化，计算试样的累计失重和累计失重率。用日本 Nikon SMZ25 体式显微镜和日立 S-3400N 钨灯丝扫描电子显微镜对不同空蚀时间后的试样表面形貌进行观察，通过 FM-

表 2 实验所用自来水的主要理化指标  
Tab.2 Main physical and chemical indices of tap water for experiment use

项目名称	含量/ (mg·L <sup>-1</sup> )	项目名称	含量/ (mg·L <sup>-1</sup> )
铬（六价）	0.002	铝	0.0019
砷	0.00023	铁	0.0268
硒	0.00017	锰	0.00062
铅	0.00024	铜	0.00242
氟化物	0.19	锌	0.0052
三氯甲烷	0.008	氯化物	19.51
氰化物	0.005	硫酸盐	44.65
硝酸盐氮（以 N 计）	2.97	溶解性总固体	201
耗氧量（COD <sub>Mn</sub> 法）	1.27	总硬度（以 CaCO <sub>3</sub> 计）	133.4

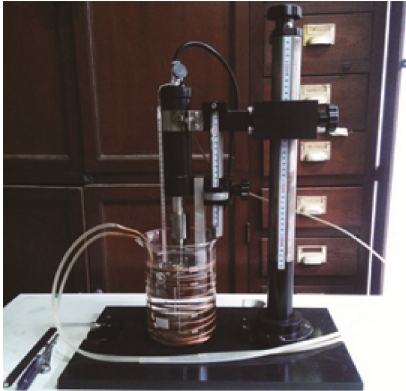
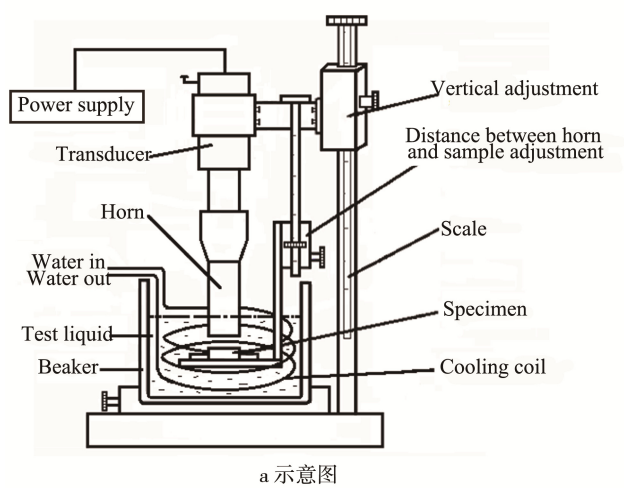


图 2 超声振动空蚀装置图  
Fig.2 Diagrams of ultrasonic vibration cavitation erosion device:a) schematic diagram, b) image of experimental apparatus

ARS900 全自动显微维氏硬度计测量距空蚀后试样表面不同距离的纵截面硬度，分析超声空蚀过程中材料的失重情况和破坏机理。

2 超声空蚀实验结果与分析

2.1 失重及失重率分析

图 3 为铅黄铜在去离子水、自来水以及 3.5% NaCl 溶液中空蚀后累计失重随时间的变化曲线。从曲线的整体变化趋势来看，铅黄铜在 3 种不同溶液中的累计失重均随着空蚀时间的延长而逐渐增加，3 条曲线近似呈线性增长趋势。其中，自来水对应的失重变化曲线斜率最大，3.5%NaCl 溶液对应的斜率最小，去离子水居中。空蚀 300 min 后，自来水中试样的累

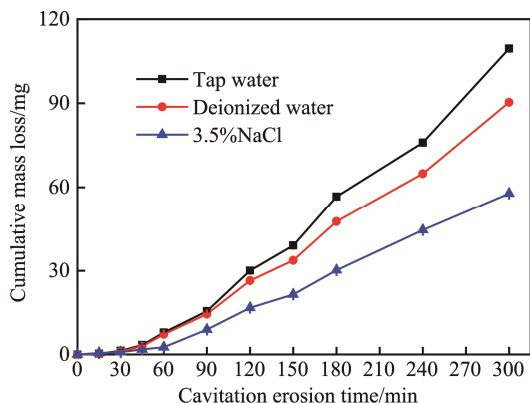


图3 铅黄铜在3种液体介质中空蚀后的累计失重变化  
Fig.3 Cumulative mass loss of Pb-brass alloy subject to cavitation erosion in three liquids

计质量损失最大，达到 109.6 mg；3.5%NaCl 溶液中试样的累计质量损失最小，为 57.8 mg；去离子水中试样的累计质量损失居中，为 90.4 mg。3.5%NaCl 溶液和去离子水中试样累计质量损失分别为自来水中试样累计质量损失的 1/2 和 4/5。由此可以看出，铅黄铜试样在自来水中的超声空蚀破坏最为严重。

实验研究表明空蚀过程可分为孕育期、增长期、衰减期和稳定期<sup>[12]</sup>。累计失重率为累计失重与对应空蚀时间的比值，可以更为直观地反映材料在空蚀过程中单位时间内质量损失的快慢。图4为铅黄铜在3种液体中空蚀后的累计失重率变化。由图可见，在空蚀初期（0~45 min），铅黄铜在自来水和去离子水中的累计失重率呈直线上升；空蚀45~120 min时，失重率的上升趋势增强；空蚀120~180 min时，失重率仍呈增加趋势，但增加程度减缓；空蚀180 min之后，失重率基本保持平稳。而在3.5%NaCl溶液中，铅黄铜试样在空蚀初期（0~45 min）的累计失重率变化整体比较缓慢，仅在初始阶段有短暂的迅速上升，失重率开始持续增加的时间节点在60 min，与在自来水和去离子水中的空蚀相比，时间推迟了15 min。说明铅黄铜在3.5%NaCl溶液中抗空蚀能力更好。

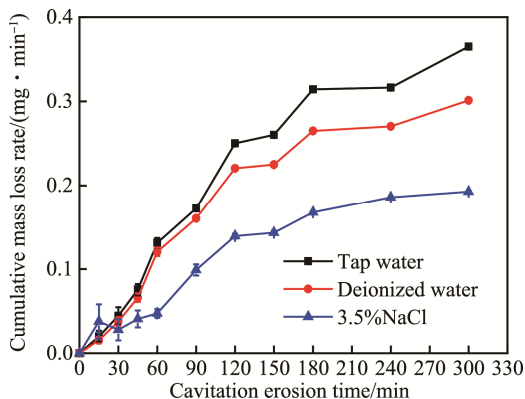


图4 铅黄铜在3种液体介质中空蚀后的累计失重率变化  
Fig.4 Cumulative mass loss rate of Pb-brass alloy subject to cavitation erosion in three liquids

## 2.2 试样表面空蚀形貌分析

### 2.2.1 宏观形貌

图5为铅黄铜试样分别在自来水、去离子水以及3.5%NaCl溶液中经过15、60、180和300 min空蚀后的表面宏观形貌图，图片由Nikon SMZ25体视显微镜在相同光照条件下拍摄所得。整体来看，在自来水和去离子水中空蚀后的试样表面色泽鲜亮，随着空蚀时间延长，圆形空蚀区域的颜色逐渐加深，试样表面的粗糙程度增加，如图5a—5h所示。而在3.5%NaCl溶液中，试样表面在空蚀初期呈紫红色，之后颜色逐渐变为棕黄色，如图5i—5l所示。在铅黄铜试样表层，锌比铜的活性强。在空蚀过程中，锌优先溶解而显露出机械强度较低的疏松铜层，空蚀过程的持续使脆性铜层在强大冲击力和高速微射流作用下逐渐剥落，紫红色慢慢减淡。

从3种液体中各个阶段的空蚀情况来看，空蚀15 min时，试样表面图像模糊，但仍可辨识未被空蚀的表面区域（圆形区域中的黑色纹路）。空蚀60 min时，试样表面的圆形区域内接近完全空蚀，黑色纹路基本消失。空蚀180 min时，空蚀速率加快，颜色加深。空蚀300 min时，圆形空蚀区域出现多个小尺寸蚀坑，在图中表现为肉眼可见的黑色小麻点或黑点，且尺寸大小不一，分布不均匀。这主要取决于三个因素——空泡溃灭对试样的作用强度、空泡距试样的表面距离和空泡尺寸，只有较大气泡在靠近试样表面溃灭时，才会对试样表面产生破坏作用，这也表明空蚀的发生需要具备一定的条件。

在实验过程中还在试样表面观察到了“环形光晕”，颜色由试样圆形空蚀区域沿径向向外逐渐变淡，如图5c、5d、5g、5h和5l所示。这是因为氧化层厚度不同，其氧化膜的颜色就不同，空蚀过程中产生的高速微射流冲击试样表面时，试样表面产生大量塑性变形，材料微观表层的温度急剧上升造成表面严重氧化，形成厚度不同的氧化膜，颜色出现分层，形成“环形光晕”。

### 2.2.2 微观形貌

图6是铅黄铜在去离子水、自来水和3.5%NaCl溶液中空蚀后的SEM图。由图6a和6b可见，空蚀15 min时，去离子水和自来水中的试样表面发生了大量塑性变形，表面光泽变暗，粗糙度增加，且在晶界处萌生了细小裂纹，细微裂纹在空泡溃灭产生的微射流和冲击波作用下沿着晶界逐步扩展，并形成一些微小且不规则的蚀坑，但未见材料的大块剥落。说明材料在空蚀初期的质量损失较小，这与前面的试样失重分析结果一致。而在3.5%NaCl溶液中，如图6c所示，试样表面的塑性变形较弱，裂纹较少，出现了大尺寸



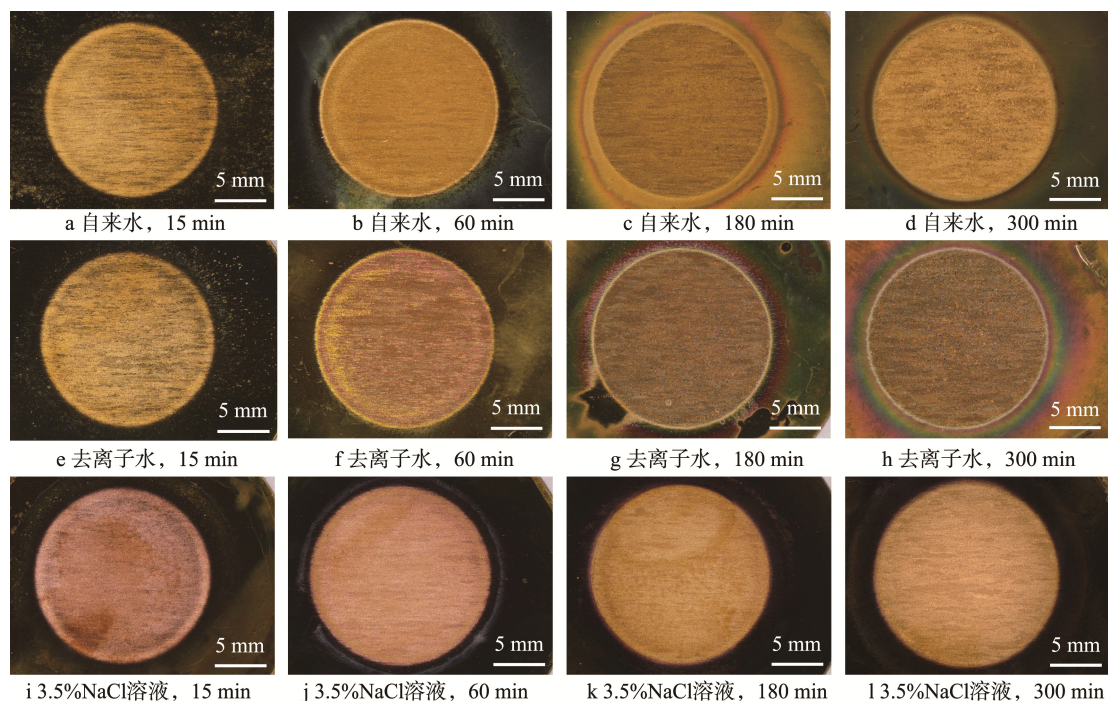


图 5 铅黄铜试样在自来水、去离子水和 3.5%NaCl 溶液中空蚀后的宏观形貌图

Fig.5 Macromorphology of Pb-brass alloy subject to cavitation erosion in tap water, deionized water and 3.5%NaCl solution: a) tap water, 15 min, b) tap water, 60 min, c) tap water, 180 min, d) tap water, 300 min, e) deionized water, 15 min, f) deionized water, 60 min, g) deionized water, 180 min, h) deionized water, 300 min, i) 3.5%NaCl solution, 15 min, j) 3.5%NaCl solution, 60 min, k) 3.5%NaCl solution, 180 min, l) 3.5%NaCl solution, 300 min

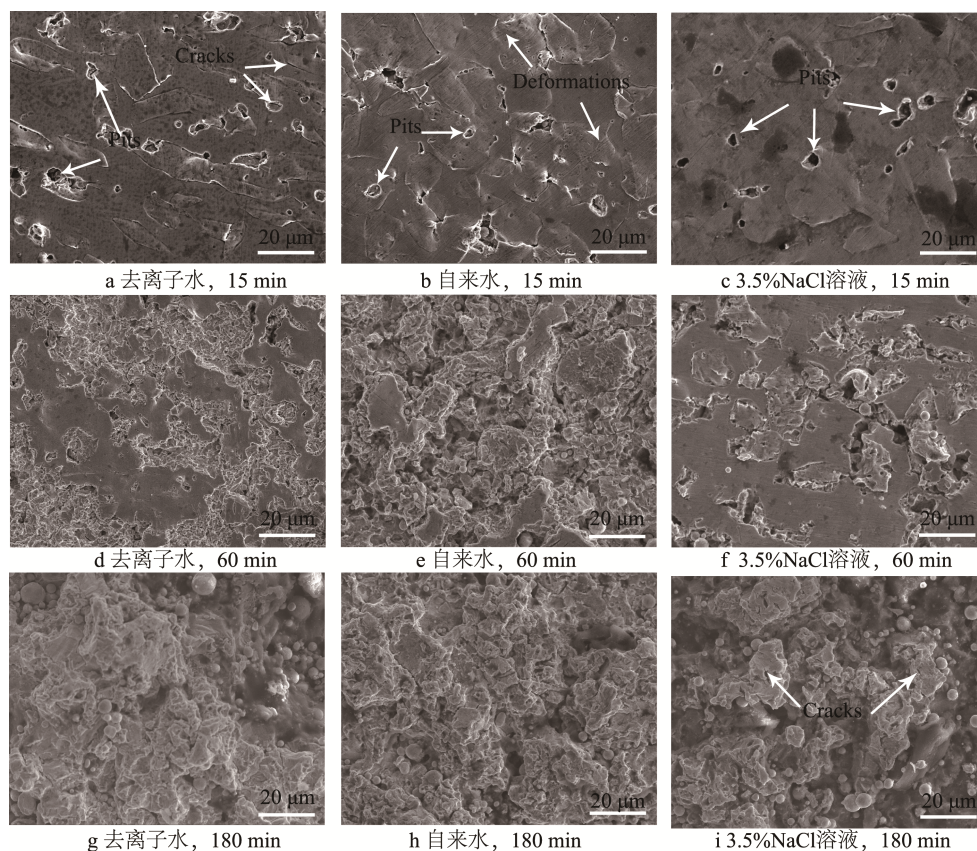


图 6 铅黄铜在去离子水、自来水和 3.5%NaCl 溶液中空蚀后的 SEM 图

Fig.6 SEM images of Pb-brass alloy surface subject to cavitation erosion in deionized water, tap water and 3.5% NaCl solution: a) deionized water, 15 min, b) tap water, 15 min, c) 3.5%NaCl solution, 15 min, d) deionized water, 60 min, e) tap water, 60 min, f) 3.5%NaCl solution, 60 min, g) deionized water, 180 min, h) tap water, 180 min, i) 3.5%NaCl solution, 180 min



的唇状蚀坑。与去离子水和自来水中的空蚀形貌相比,该唇状蚀坑的口径更大,深度更深。空蚀 60 min 时,3 种液体中的试样表层空蚀区域均变大。其中,去离子水和自来水中试样的表面裂纹深度加深,缝隙变宽并沿着横、纵双向不断发展,蚀坑多且密集。但是,在去离子水中空蚀后的试样仍然可见大块完好的表层材料,而在自来水中空蚀后的试样的完好表层材料略少,如图 6d 和 6e 所示。在 3.5%NaCl 溶液中,材料的空蚀则有明显的选择性倾向,根据金相学知识可知铅黄铜主要由 $\alpha$ 相、 $\beta$ 相和单质铅组成,由于 $\beta$ 相中含锌量比 $\alpha$ 相高,电极电位较低, $\beta$ 相在氯离子的作用下容易发生微电池效应而优先被空蚀,裸露出的脆性铜残渣层在高速微射流和冲击波反复作用下萌生出新的裂纹并快速延伸,表层材料逐步被破坏,并慢慢剥落,从而在原来的地方形成新的蚀坑,这与图 6f 所示的形貌特点相吻合。空蚀 180 min 与 300 min 后试样的表面微观形貌基本相似,3 种液体中的试样表层材料均已完全被空蚀,试样表面变得非常粗糙。在去离子水和自来水中的试样裂纹继续向着易于扩展的方向发展、变长,小的蚀坑逐步扩大形成更大的蚀坑,空蚀加重。而 3.5%NaCl 溶液中的材料表层 $\beta$ 相空蚀之后向相邻的 $\alpha$ 相延展,直至空蚀区域连成一片。

此外,铅黄铜在 3 种溶液的空蚀过程中均出现大量颗粒状物质,如图 6g、6h 和 6i 所示。根据空蚀破坏的热作用理论<sup>[13]</sup>,这些物质的出现与空泡溃灭时产生的高温有关,瞬时高温的产生使表层材料迅速达到其熔点,表层材料熔化后在表面张力作用下凝固成球状物,高速涡旋水流在蚀坑内推动使其旋转,最终使其被研磨成光滑球体。

### 2.3 空蚀后截面硬度分析

将空蚀后的试样沿空蚀面中心线纵向切开,用 FM-ARS900 全自动显微硬度计测量距空蚀表面不同距离的纵截面硬度,测量时在同一水平线上测量 3 次,取平均值。

图 7 为在自来水、去离子水以及 3.5%NaCl 溶液中空蚀 45 min 后的试样纵截面硬度距空蚀表面距离的变化曲线,可以看出材料表面均出现了 200  $\mu\text{m}$  左右厚度的加工硬化层,随着距空蚀表面距离的增加,材料的硬度值慢慢减小,最终趋于其空蚀之前的硬度。

空蚀 300 min 后的纵截面硬度变化如图 8 所示,在 3 种液体中材料的加工硬化层向内部逐渐转移,其中,NaCl 溶液中材料的硬化层最厚,自来水中材料的硬化层最薄,去离子水中材料的硬化层居中。但 3 种液体中材料的硬化层厚度均明显增加,且硬化层厚度基本都达到几百微米。随着空蚀时间的延长,靠近空蚀表面的材料逐步剥落,硬度也随之减小,说明材料近表层发生了软化现象。

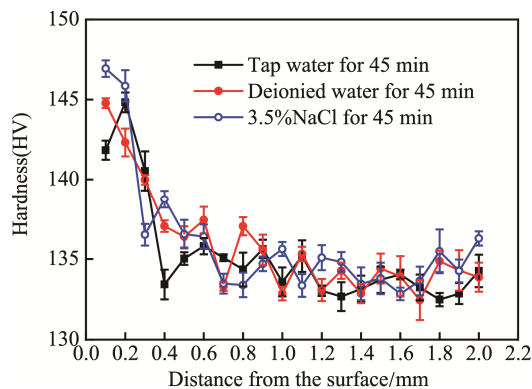


图 7 铅黄铜在自来水、去离子水和 3.5%NaCl 溶液中空蚀 45 min 后的纵截面硬度变化曲线

Fig.7 Variation curve of longitudinal section hardness of Pb-brass alloy subject to 45 min cavitation erosion in tap water, deionized water and 3.5% NaCl solution

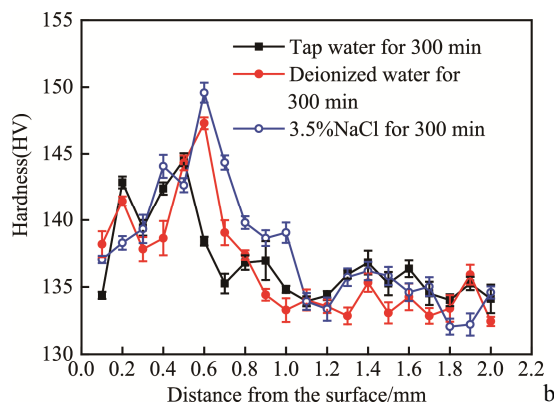


图 8 铅黄铜在自来水、去离子水和 3.5%NaCl 溶液中空蚀 300 min 后的纵截面硬度变化曲线

Fig.8 Variation curve of longitudinal section hardness of Pb-brass alloy subject to cavitation erosion of 300 min in tap water, deionized water and 3.5% NaCl solution

材料的加工硬化能力对材料的抗空蚀性能有一定影响<sup>[14]</sup>。空蚀过程中空泡溃灭产生的高幅值脉冲应力作用在材料表面,这样势必造成材料表面的剧烈变形,而相邻晶界的挤压反过来阻碍变形的继续,表面就产生了加工硬化。随着空蚀的进行,材料表面硬度不断增加,硬化层向材料内部移动,空蚀一定时间后,材料表面裂纹的萌生和扩展使近表层硬度不再上升反而开始下降,出现了软化现象。铅黄铜在 3.5%NaCl 溶液中空蚀后形成了几百微米厚度的加工硬化层,最大硬度值由基体的 132HV 增加到 150HV 左右,增幅为 13.6%,表明铅黄铜在空蚀过程中能够部分吸收并转移作用于表面的能量,表现出了良好的抗空蚀性能。

### 3 结论

1) 在超声空蚀条件下,铅黄铜在自来水中空蚀后的累计失重最大,在 3.5%NaCl 溶液中的累计失重最小,在去离子水中的累计失重居中。在 NaCl 溶液

中形成的致密  $\text{PbCl}_2$  钝化膜附着在铅黄铜试样表面, 有效阻止了材料表面的继续空蚀、裂纹的扩展和蚀坑的形成, 而自来水中含有的气体和杂质加剧了空蚀, 试样表面的裂纹发展更快, 材料脱落更迅速。

2) 在去离子水和自来水中, 空蚀初期试样主要表现为大量的塑性变形, 在晶界处裂纹萌生并扩展, 蚀坑细小且形状不规则; 在 3.5%NaCl 溶液中, 空蚀初期试样的塑性变形和裂纹发展不明显, 以唇状的蚀坑为主,  $\beta$  相优先发生空蚀, 再延伸到  $\alpha$  相, 有明显的选择性空蚀倾向。

3) 铅黄铜试样在 3 种液体介质中发生空蚀后都产生了明显的加工硬化层。在相同的空蚀时间内, 试样在 3.5%NaCl 溶液中经过空蚀后得到的硬化层最厚, 表现出良好的抗空蚀性能, 随着空蚀时间的延长, 近表层材料发生明显的软化现象。

#### 参考文献:

- [1] 林翠, 赵晓斌, 张翼飞. 金属材料的空化腐蚀行为及影响因素研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2016, 36(1): 11-19.  
LIN Cui, ZHAO Xiao-bin, ZHANG Yi-fei. Research Progress on Cavitation-corrosion of Metallic Materials[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2016, 36(1): 11-19.
- [2] JASIONOWSKI R, PRZETAKIEWICZ W, PRZETAKIEWICZ W, et al. The Influence of Heat Treatments on Cavitation Erosion Resistance of BA1055 Alloy[J]. Archives of Foundry Engineering, 2009, 9(4): 64-68.
- [3] HANKE S, FISCHER A, BEYER M, et al. Cavitation Erosion of NiAl-bronze Layers Generated by Friction Surfacing[J]. Wear, 2011, 273(1): 32-37.
- [4] MITELEA I, OANCA O, BORDEAȘU I, et al. Cavitation Erosion of Cermet-coated Aluminium Bronzes [J]. Materials, 2016, 9(3): 204.
- [5] TANG C H, CHENG F T, MAN H C. Improvement in Cavitation Erosion Resistance of a Copper-based Propeller Alloy by Laser Surface Melting[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 182(2-3): 300-307.
- [6] 周青, 刘成龙, 廖志康, 等. 空蚀与冲蚀交互作用下锡黄铜的材料流失及力学性能研究[J]. 润滑与密封, 2014, 39(8): 81-85.
- ZHOU Qing, LIU Cheng-long, LIAO Zhi-kang, et al. Research on the Variation of Weight Loss and Mechanical Property of Tin Brass Caused by Cavitation and Erosion[J]. Lubrication Engineering, 2014, 39(8): 81-85.
- [7] 刘海霞, 李秀阁, 张桃, 等. 射流压力对淹没水射流冲击与空蚀效果的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(12): 104-110.  
LIU Hai-xia, LI Xiu-ge, ZHANG Tao, et al. Effects of Jet Pressure on Impingement and Cavitation Erosion Effects of Submerged Water Jet[J]. Surface Technology, 2016, 45(12): 104-110.
- [8] HUCIŃSKA J, GŁOWACK M. Cavitation Erosion of Copper and Copper-based Alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2001, 32(6): 1325-1333.
- [9] SONG Q N, ZHENG Y G, NI D R, et al. Corrosion and Cavitation Erosion Behaviors of Friction Stir Processed Ni-Al Bronze: Effect of Processing Parameters and Position in the Stirred Zone[J]. Corrosion, 2014, 70(3): 261-270.
- [10] TOULFATZIS A I, PANTAZOPOULOS G A, PAIPETIS A S. Fracture Behavior and Characterization of Lead-free Brass Alloys for Machining Applications[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(9): 3193-3206.
- [11] ASTM G32—2010, Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus[S].
- [12] KIM K H, CHAHINE G, FRANCE J P, et al. Advanced Experimental and Numerical Techniques for Cavitation Erosion Prediction[J]. Fluid Mechanics and Its Applications, 2014, 106: 3-18.
- [13] 陈卫. 几种海洋工程常用金属的空泡腐蚀性能[J]. 热加工工艺, 2015(8): 17-20.  
CHEN Wei. Cavitation Corrosion Performance of Several Oceanengineering Metals[J]. Hot Working Technology, 2015 (8): 17-20.
- [14] 雷玉成, 秦敏明, 徐桂芳, 等. Cr-Ni-Co 奥氏体堆焊材料的空泡腐蚀行为[J]. 焊接学报, 2011, 32(6): 21-24.  
LEI Yu-cheng, QIN Min-ming, XU Gui-fang, et al. Cavitation Erosion Behavior of Cr-Ni-Co Austenite Deposited Metal[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(6): 21-24.