

海洋环境下金属材料在多场多相作用下的空蚀研究进展

侯孟扬^{1,2}, 秦真波^{1,2}, 夏大海^{1,2}, 胡文彬^{1,2}

(1.天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300350; 2.天津市材料复合与功能化重点实验室, 天津 300350)

摘要: 首先介绍了目前空蚀的几种损伤机制, 其中空化气泡以冲击波和微射流形式作用于材料表面, 并导致损伤的机械作用占主要地位。在此基础上, 总结归纳了影响海洋环境下金属材料空蚀的影响因素及相关研究进展, 将因素按照环境外因与材料性质内因进行划分, 系统分析了各种因素对空蚀损伤的作用趋势和机制, 明确了各因素间存在协同效应。最后, 提出了今后空蚀研究的发展方向, 如调控温度、盐度等各种环境因素, 进行空化气泡产生、长大、溃灭及能量释放过程的机制研究; 也可以从材料性质入手, 设计合成具有优良表面性能和力学性能的新材料等, 对如何减少海洋工况下的空蚀损伤的科学研究和工程应用具有一定的参考和指导意义。

关键词: 空蚀; 多场多相; 损伤机制; 影响因素; 协同作用; 环境因素; 材料性质

中图分类号: TG172.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)08-0075-15

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.08.011

Cavitation Erosion of Metallic Materials under Multi-field and Multi-phase Action in Marine Environment

HOU Meng-yang^{1,2}, QIN Zhen-bo^{1,2}, XIA Da-hai^{1,2}, HU Wen-bin^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Composite and Functional Materials, Tianjin 300350, China)

ABSTRACT: This paper aims to firstly introduce several damage mechanisms of cavitation erosion, in which cavitation bubbles act on the material surface in the form of shock wave and microjet, and the mechanical action leading to damage plays a major role. On this basis, the influencing factors and related research progress of cavitation erosion of metal materials in marine environment are summarized, and the factors are divided into environmental external factors and material properties internal

收稿日期: 2022-07-17; 修订日期: 2022-08-15

Received: 2022-07-17; Revised: 2022-08-15

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(52031007)

Fund: Key Fund of the National Natural Science Foundation of China (52031007)

作者简介: 侯孟扬(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为金属材料的空蚀损伤与防护。

Biography: HOU Meng-yang (1999-), Male, Postgraduate, Research focus: cavitation damage and protection of metallic materials.

通讯作者: 夏大海(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为金属腐蚀与防护。

Corresponding author: XIA Da-hai (1984-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: corrosion and protection of metallic materials.

通讯作者: 胡文彬(1966—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为材料表面结构与功能一体化。

Corresponding author: HU Wen-bin (1966-), Male, Doctor, Professor, Research focus: material surface structure and function integration.

引文格式: 侯孟扬, 秦真波, 夏大海, 等. 海洋环境下金属材料在多场多相作用下的空蚀研究进展[J]. 装备环境工程, 2022, 19(8): 075-089.

HOU Meng-yang, QIN Zhen-bo, XIA Da-hai, et al. Cavitation Erosion of Metallic Materials under Multi-field and Multi-phase Action in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(8): 075-089.

factors. The action trend and mechanism of various factors on cavitation erosion damage are systematically analyzed, and the synergistic effect among all factors is clarified. Finally, this paper puts forward the development direction of cavitation research in the future, such as the regulation of temperature, salinity and other environmental factors as well as the mechanism research of cavitation bubble for generation, growth, collapse and energy release process. It is also possible to design and synthesize new materials with excellent surface and mechanical properties from the perspective of material properties, which has certain reference and guiding significance for scientific research and engineering application of how to reduce cavitation damage under marine conditions.

KEY WORDS: cavitation erosion; multi-field multi-phase; damage mechanism; influencing factors; synergistic effect; environmental factors; material properties

空蚀, 又称气蚀, 是指流体在高速流动状态下由于压力变化, 导致空泡的产生、生长和溃灭, 并对材料表面产生侵蚀的行为^[1]。空蚀是很多水力设备(如螺旋桨、水轮机等)的主要损伤和失效原因。空蚀损伤不仅破坏了装备材料, 造成了巨大的经济损失, 而且存在很大的安全隐患^[2]。除此之外, 我国确立了建设海洋强国的目标, 对海洋装备的耐空蚀性能提出了更高要求。发展耐空蚀的高性能海洋装备, 是我国巩固好海洋总体布局、抵御外部安全威胁、进行远洋科考、开发深海资源等一系列活动的重要前提, 具有深远的战略意义和应用价值^[3]。

在海洋环境中产生的空蚀, 相比于液压缸、管道等工程环境, 具有明显复杂多样的特点。原因是海洋环境复杂, 受纬度、海域等地理因素作用明显, 在此环境下工作的海洋装备受到来自多个物理场(包括温度场、应力场、腐蚀场)和多相流(包括气、液、固)等多样因素的影响, 比如不同海水含盐量、泥沙量的不同, 都会对空蚀损伤的程度有影响。因此, 本文系统全面分析了影响海洋环境下空蚀的各种影响因素和多场多相的作用机制, 综述了近年来的空蚀研究进展。

1 空蚀的损伤机制

对空蚀现象的关注可以追溯到 20 世纪初, Rayleigh^[4]计算了球形气泡塌陷过程中流体内部的压力, 指出了塌陷产生的瞬时高压足以对材料产生破坏的可能性。同样, Okada 等^[5]也通过实验证明, 气泡溃灭产生的局部压力可以达到 1.2 GPa, 比部分不锈钢的屈服强度还要高。多年来, 人们在各种体系中观察到空蚀现象, 比如过去一直困扰的振荡热管中监测到声学信号的问题, Steve 等^[6]利用 24 根平行的毛细铜管, 将两侧分别设置为冷端和热端, 经长时间工作后, 在散热区域的内表面上观察到蚀坑, 回收液中存在铜碎片, 证明了在内径毫米尺度的毛细管中, 同样存在空蚀现象。

对于空蚀损伤过程, 主要包括空化气泡的产生, 及随后气泡溃灭对材料造成损伤。发展到现在, 关于

金属材料的空蚀损伤的机制, 形成了几种观点, 主要包括机械作用、化学腐蚀作用、电化学腐蚀作用、热效应作用^[7]。

关于空化气泡的产生, 一般来说, 空泡有 2 种形核方式, 一种是通过外部热量注入产生沸腾空泡(非惯性空化), 一种是像螺旋桨在工作时, 其高速旋转加快局部流体流动, 使压力降低到低于饱和蒸汽压^[8](惯性空化)。当空泡遇冷或到达高压位置, 体积收缩, 气泡就会发生内爆。

机械作用主要有冲击波机理和微射流机理。冲击波机理认为, 当空泡溃灭后, 空泡内的势能转化为流体的动能, 巨大的压力脉冲压缩周围液体介质, 产生冲击波, 并以溃灭点为中心向周围辐射传播, 使材料发生塑性变形^[9]。早期的研究中, 冲击波机理占据了主导地位, Okada 等^[10]支持认为冲击波反复撞击材料导致的疲劳损伤和塑性变形是空蚀损伤的主要原因。1944 年, Kornfeld^[11]提出了微射流机理, 基本观点认为, 对于固体表面附近的空泡, 由于不规则使得溃灭速度不同, 远离表面的空泡溃灭较早, 向表面发射类似“水锤”作用的微射流, 进行冲击^[12]。这种观点, 随着高速摄像机的引入, 观察到微射流的存在, 而得到越来越广泛的认可。对于 2 种机理哪一个占主导地位进行了广泛的讨论和研究, 如 Dular 等^[13]利用高速摄像机研究单个气泡塌陷的气泡动力学, 得出结论, 当气泡在材料表面附近内爆时, 微射流机制明显, 而当气泡远离材料表面时, 冲击波作用更重要, 且在剪切流作用的特殊条件下, 即使距离增大, 主要损伤机制仍然为微射流。Osman 等^[14]研究了纯铝上的空蚀损伤, 认为当损伤涉及到几百微米尺度的大塑性变形时, 冲击波机制占据主导地位, 并伴随着气泡团簇的内爆。Zhai 等^[15]研究了气泡在介于刚性表面和自由表面之间的弹性表面附近的塌陷, 认为当冲击波传播到弹性边界时, 与刚性边界相比, 传播距离大, 冲击压力迅速衰减, 因此冲击波机制对弹性材料的影响较小, 微射流机制是此条件下空蚀损伤的主要因素。

腐蚀作用主要包括化学腐蚀作用和电化学腐蚀作用。关于腐蚀与空蚀的关系, 目前普遍观点认为是一种相互促进的机制, 腐蚀会加速空蚀, 空蚀也会加

速腐蚀。对于化学腐蚀作用来说, 金属与腐蚀性介质发生化学反应, 生成腐蚀产物膜, 在空蚀的冲击破坏下, 腐蚀产物保护膜破损剥离, 暴露出新鲜金属表面与腐蚀性物质接触, 促进了腐蚀的进一步发展; 另一方面, 腐蚀产物的疲劳强度一般低于原金属, 且腐蚀后的粗糙表面使空蚀时的力学冲击更集中, 因此腐蚀加剧了空蚀损伤的程度^[16]。对于电化学腐蚀作用来说, 孙冬柏等^[17]认为空泡的溃灭过程使材料表面发生弹塑性变形, 使该区域的局部表面状态与周围区域存在差异, 内能发生变化, 电化学性质不同, 形成电偶电池, 此区域作为腐蚀阳极区, 电流密度高、腐蚀速率大, 导致材料的损伤与破坏。对于腐蚀的作用, 刘海涛^[2]指出, 在绝缘体材料中依然存在空蚀现象, 表明了腐蚀可以加速空蚀损伤, 但并不是空蚀存在的必要条件。

对于热效应作用, 源于气泡溃灭时具有很高的气体温度, 当高温作用于材料表面时, 会使金属材料发生相变, 达到熔点时还会发生熔融, 导致材料力学性能下降, 加剧空蚀损伤^[18]。对于热效应的研究, 例如 Abdel Fattah 等^[19]于空蚀条件下在钛金属表面观察到熔融现象, 考虑到钛金属的熔点高达 725 °C, 表明了空蚀的热效应可以产生足够高的温度。又如, 傅蒙茹等^[20]在空蚀坑周围发现彩虹光晕, 即彩虹环, 是空蚀破坏中热效应的独特体现, 与材料热力学参数急剧变化、温度梯度较大有关。

总而言之, 当空化气泡形核、长大并溃灭后, 可以通过多种作用机制影响到材料表面, 产生侵蚀蚀坑, 导致材料的破坏或失效。众多研究表明, 这些作用机制并不是单一孤立地或简单加和式起作用, 而是以非线性耦合的形式, 协同影响着空蚀损伤^[21]。

2 空蚀的影响因素

空蚀损伤在几种损伤机制作用的基础上, 还受到很多因素的影响, 表现出来, 就是具有不同表面性质、不同结构的材料, 在多场多相的各种不同环境下, 空蚀损伤的程度会有较大差别。本文按照影响因素的性质分类, 将它们分为环境因素(外因)与材料性质因素(内因)来进行讨论。

2.1 环境因素

环境因素又可细分为自然环境因素与工作环境因素, 自然环境因素主要指海水中的各种性质, 如固体颗粒、温度、盐度、黏度、海洋生物污损、腐蚀性杂质离子、含氧量等; 工作环境因素主要包括螺旋桨等水动力设备的各项工作条件, 如空蚀时间、应力。对于多场多相的环境, 温度场与温度因素有关, 应力场与应力因素有关, 腐蚀场主要涉及到盐度、温度等因素。固相主要指固体颗粒的作用; 液相涉及到的因

素有盐度、黏度、海洋生物污损、腐蚀性杂质离子; 气相主要与含氧量有关。

2.1.1 固体颗粒

多场多相中的固相主要指固体颗粒, 研究固体颗粒的性质与作用可以从大小和形状两方面入手。研究表明, 固体颗粒的大小与空蚀有很大关系^[22]。根据 ISO 14688, 将处于 0.002~0.063 mm 的颗粒定义为淤泥, 而在此范围之外的, 小于 0.002 mm 的固体颗粒称为黏土, 大于 0.063 mm 的固体颗粒称为沙子。Stella^[23]通过向溶液中添加氧化铝颗粒, 并利用超声波空化侵蚀设备进行空蚀试验, 探索了 1 μm 以下尺寸的固体颗粒对空蚀侵蚀的影响。关于颗粒在空蚀过程中的状态, Stella 结合之前 Arora^[24]的模型, 提出了 3 种假说, 如图 1 所示。通过能量计算, 预测出直径 1 μm 的固体颗粒碰撞的能量不足, 而尺寸在 30~70 μm 的固体颗粒符合相应的动能阈值, 粒子被微射流推向材料表面。因此得出结论, 认为平均直径接近 1 μm 的颗粒不会显著改变侵蚀速率, 与微射流本身的损伤作用相比可以忽视。

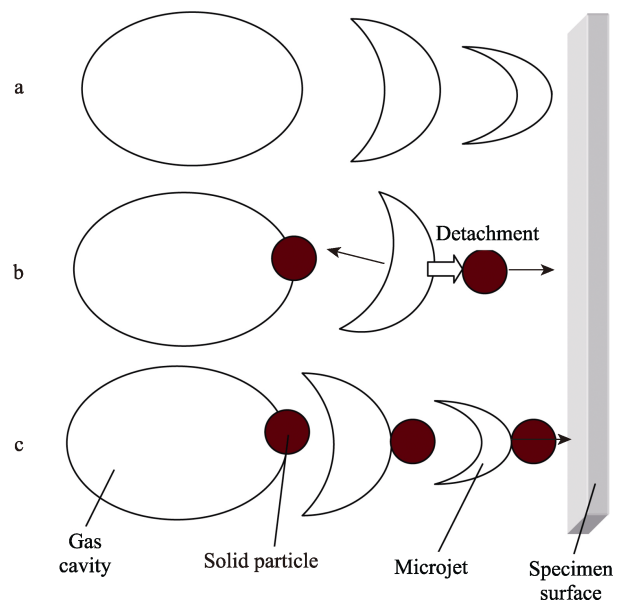


图 1 空泡和粒子撞击固体表面示意图^[23]
Fig.1 Schematic representation of cavities and particles striking against a solid surface^[23]

鉴于不同尺寸的固体颗粒对空蚀的影响不同, 兴起了临界砂粒径的概念。Wang 等^[25]通过设置对照组试验, 探究了不同固体颗粒浓度、大小对空蚀损伤的作用。结果显示, 当砂粒小于其临界粒径时, 侵蚀作用随着砂粒径的减小和砂粒浓度的增加而减少; 大于临界尺寸的砂粒通过空泡坍塌的喷射流机制被推向固体表面, 造成侵蚀。对于 2 种不同趋势, Wang 等解释当尺寸小时, 颗粒通过空化成核不能获得足够的动量, 此时黏度发挥主导作用。颗粒尺寸减小、浓度增大时, 黏度增大, 进而空蚀损伤减弱。他的工作证

明了临界砂粒径的存在,指明空蚀防护的重点应该放在粒径大于临界尺寸的淤泥或沙子。

对于固体颗粒的形状来说,外形很难量化,一般处理方法是引入侵蚀角的概念,将其棱角的作用抽象为不同侵蚀角的影响。研究过程中,空蚀损伤一般是伴随着冲刷侵蚀协同出现,实际工程应用中,例如水轮机中金属材料的质量损失,就是空蚀和冲蚀的耦合作用^[26]。

固体颗粒撞击材料表面时,不同的侵蚀角会导致固体颗粒对材料表面具有不同大小的作用力,进而材料的损伤类型和损伤程度都会有变化,已经有部分研究团队针对侵蚀角进行了相关实验研究。如 Abedini 等^[27]探究了铝-黄铜合金在 $20^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 侵蚀角范围下的侵蚀和侵蚀-腐蚀行为,发现在 40° 侵蚀角下具有最大的侵蚀速率。Huang 等^[28]研究了侵蚀角对 QA19-4 合金侵蚀行为的影响,同样类似在侵蚀角为 30° 时具有最大的质量损失,具有延展性金属的典型特征。此外, Huang 等提出将沙子冲击力分为水平和垂直分量,如图 2 所示。垂直分量在表面层产生变形,导致变形损伤;水平分量类似于从材料表面切割一部分,导致切割损伤,认为失效过程是 2 种损伤机制的组合。

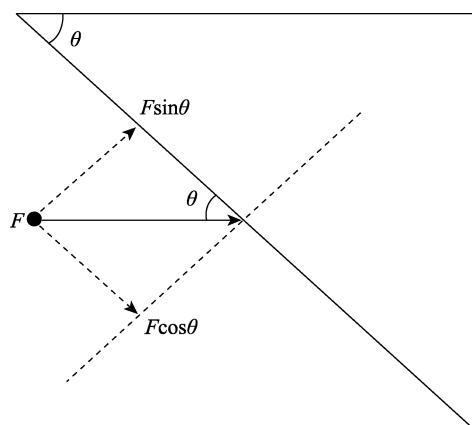


图 2 侵蚀过程示意图^[28]
Fig.2 Schematic of erosion process^[28]

除了设计对比试验进行规律探索外,也有研究团队利用公式推导推测侵蚀角的影响。Huang 等^[29]构建了一种侵蚀模型,将粒子定义为具有球形形状的磨料颗粒,将其冲击速度分为切向速度和法向速度,来预测不同条件下的侵蚀和腐蚀类型。模型预测结果表明,侵蚀角较小时以切向切割损伤为主,如果侵蚀角接近 90° ,侵蚀主要是以法向变形损伤为主,发生最大损失时的侵蚀角在 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$,与其他团队的试验结论也一致。

侵蚀角与冲蚀的影响,会对材料表面造成疲劳损伤与塑性变形,改变材料表面状态,进而对空蚀有一定的促进作用。同时,一些研究表明,材料经历空蚀与冲蚀的交互作用后,会存在加工硬化现象,表现出

抵御空蚀损伤的积极一面^[30]。因此,空蚀与冲蚀间的相互作用问题仍然未解释清楚,需要更进一步的研究。

2.1.2 温度

温度作为最常见的变量之一,是多场多相中温度场、腐蚀场的关键影响因素,早在 20 世纪 60、70 年代就进行了较为系统的研究。例如, Plesset^[31]利用磁致伸缩装置的持续震荡作用营造空蚀条件,研究了 $0 \sim 90^{\circ}\text{C}$ 下温度变化对空蚀损伤的作用。结果显示,空蚀损伤显示峰形结构,损伤最高速率的温度在 $40 \sim 50^{\circ}\text{C}$,此温度对材料类型不敏感,且损伤率越大的材料,峰形结构越明显,如图 3 所示。关于解释, Plesset 认为随温度升高,液体蒸汽压增大,蒸汽密度更高,通过冷凝驱动气泡塌陷需要更多的热量传导,这样抑制了气泡的塌陷;与之相反的另一作用,温度升高,气体溶解度减小,气泡塌陷更剧烈,空蚀破坏性更强。这两者趋势相反的情况共同作用,导致峰形结构。

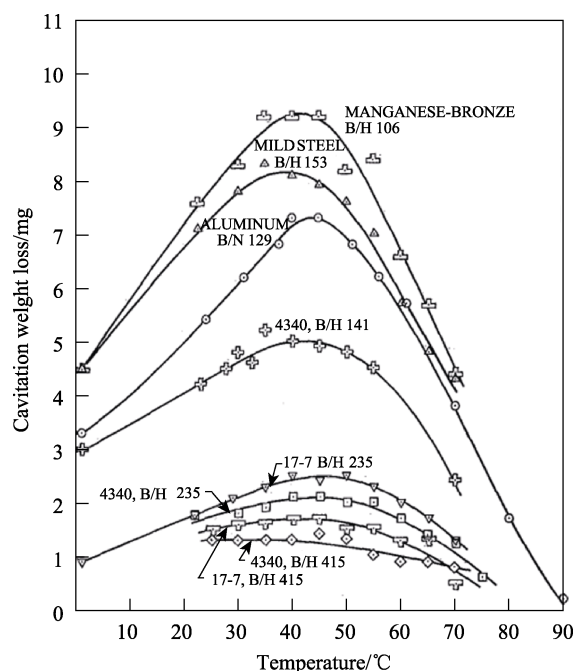


图 3 以蒸馏水为空蚀溶液、空蚀 15 min 后不同材料的质量损失随温度的变化曲线^[31]

Fig.3 Summary of curves for a variety of materials with temperature after cavitation erosion for 15 min with distilled water as the cavitating liquid^[31]

到了 21 世纪初, Hattori^[32]考虑到振动空化装置不能准确反映实际工作条件,因此设计试验进行了流动状态下的温度对空蚀的影响的探究。Hattori 依据相对蒸汽压定义相对温度的概念后,试验结果趋势同样是峰形结构。对相同的试验现象, Hattori 提出了改进的解释,他认为空化损伤增加是因为随温度升高,气泡数量增加,而把峰值以后空蚀损伤减少归因于气泡破裂的热力学效应。

进一步, Dular^[33]研究了高温下的空蚀, 详细地解释了气泡的热力学效应, 并给出了气泡动力学模型。Dular 在论文中提出 2 种模型, 一种是认为空化气泡携带势能, 破裂时通过波辐射的形式传递, 最后的空蚀损伤集中于一个气泡; 另一种认为球形气泡塌陷时释放冲击波, 释放的能量与塌陷速率有关。通过计算, 第 2 种情况更符合实际情况, Dular 理论预测出 70 °C 以后, 气泡最大半径减小, 而不同温度下塌陷时间基本相同。具体来说, 在高温下, 液体蒸汽压增大, 气泡内气压等于液压与大气压之和, 因此气泡内气压变大, 对应于气泡最大半径变小, 在塌陷时间相同的情况下, 塌陷更慢, 释放的冲击波能量更小, 因而损伤变小。

除了上文讨论的温度影响温度场来影响空蚀过程外, 也可以通过影响腐蚀场来控制空蚀损伤。林翠等^[34]在探究温度对 Ti-6Al-4V 的初期空蚀行为中就指出, 温度升高导致更高的腐蚀速率, 腐蚀作用加速了点蚀形成, 导致表面局部应力集中和电化学电池的产生, 促进了空蚀损伤的发展。温度继续升高时, 虽然腐蚀作用仍然促进空蚀损伤, 但微射流的冲击强度明显减弱, 后者在空蚀过程中占据主导地位, 因此导致空蚀损伤速率的减缓。

综合几十年来温度对空蚀的影响的研究进展可以看出, 人们对于温度作用的认识在修正中不断发展完善, 从以气体溶解度等宏观因素考虑转移到气泡热力学和动力学等更本质的原因来解释, 目前较新的研究认为温度通过影响蒸汽压, 进而影响到气泡塌陷过程。考虑温度在温度场和腐蚀场中的作用, 结合前文关于空蚀机制的描述, 可以看出, 在温度场中温度是通过影响微射流和冲击波等机械作用进而影响到空蚀过程, 在腐蚀场中则与化学腐蚀和电化学腐蚀作用机制有关。鉴于多场多相的环境, 当研究温度对空蚀的影响时, 需要重视材料在 2 种场下的协同作用。

2.1.3 盐度

在海洋环境中, 盐度是螺旋桨工作时的一个可变因素, 也会对空蚀损伤有一定的影响。根据 Zakowski 等^[35]在论文中提到的, 海水的盐度随地区不同会有差异, 世界平均水平与实验室模拟海水盐度约为 3.5%, 而一些特殊地区, 如波斯湾盐度可超过 5%, 波罗的海由于蒸发率较低, 其南部一个名叫格但斯克湾的海湾盐度可低至 0.7%~0.8%, 因此探究盐度对空蚀的影响具有一定的现实意义。

Gou 等^[36]设置了 7 组不同盐度的对照组, 用 ASTM 1045 碳钢探究盐度对空蚀的影响, 试验结果如图 4 所示。当 NaCl 的质量分数小于 3.5% 时, 随着 NaCl 浓度的增加, 空蚀侵蚀急剧增加; 但当 NaCl 的质量分数大于 3.5% 时, 趋于稳定。对于这种现象, Rybkin 等^[37]曾对 NaCl 水溶液中空化气泡的形成和动力学试验进行了研究, 发现水中盐的质量浓度的增加

导致产生的惯性空化气泡的平均直径减小, 并且其数量逐渐减少, 在水中盐混合物浓度接近 13% 时几乎完全消失, 饱和盐溶液中只存在非惯性空化气泡。在此基础上, Gou 等^[36]认为, 盐度增加导致空化气泡平均直径减小是高盐度时空蚀损伤作用不再显著增大的原因。

为了探究不同材料对于盐度的影响是否都有一样的趋势, Smith 等^[38]选用低合金钢 (UNS G43400) 和 3 种不锈钢 (UNS S15500、UNS S31600、UNS S32760) 在 0.05%、3.5% 和 10% 3 种不同盐度的溶液中进行空蚀损伤试验。结果显示, 随盐度的增大, 3 种不锈钢的总体积损失量略有增加, 而低合金钢在盐度从 0.05% 变化到 3.5% 时, 体积损失量剧烈增大, 从 3.5% 变化到 10% 时, 空蚀损伤没有明显增加。Smith 等认为低合金钢较大的空蚀损伤, 与其非金属夹杂物分布不均有关。从该试验可以看出, 不同材料对盐度的敏感度是不同的, 但总体趋势类似, 当盐度从极小开始增大时, 空蚀作用由磨损侵蚀为主变为腐蚀-侵蚀共同作用, 因而损伤增大, 但不锈钢等耐腐蚀的材料损伤增大趋势比低合金钢等材料要缓慢。

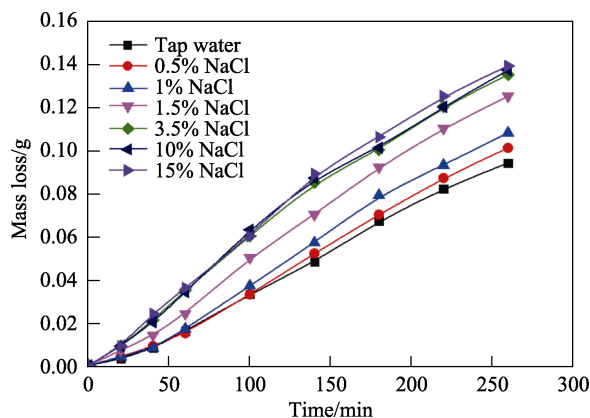


图 4 不同浓度的 NaCl 溶液环境下的累积质量损失与空蚀时间的关系^[36]

Fig.4 Relationships between cumulative mass loss and exposure time for various concentrations of NaCl^[36]

同温度类似, 盐度对空蚀损伤的影响, 不仅是对空蚀过程本身有作用, 也可以通过影响腐蚀过程, 实现空蚀侵蚀-腐蚀协同效应, 导致材料损伤。Kwok 等^[39]进一步将总空蚀侵蚀-腐蚀速率 (T) 分为纯侵蚀速率 (E)、纯腐蚀速率 (C) 和侵蚀与腐蚀协同效应 (S) 产生的贡献速率, 并研究计算了各种工程合金材料对于这 3 种速率的相对大小, 结果见表 1。纯侵蚀速率样品是在蒸馏水环境下进行试验的, 以排除腐蚀的作用。结果表明, 空蚀侵蚀-腐蚀的协同效应对铸铁材料贡献占比 25%, 对低碳钢的贡献占比为 66%。相比之下, 铜合金中腐蚀作用和协同效应的占比都低很多, 对于不锈钢材料更是可以忽略不计。这些结果与前文讨论的内容具有一致性, 不同材料下具

表1 3.5% NaCl 溶液中各种合金侵蚀 (E)、腐蚀 (C)、腐蚀和侵蚀协同作用 (S) 贡献^[39]
Tab.1 Contribution of erosion (E), corrosion (C), interaction between corrosion and erosion (S) of various alloys in 3.5% NaCl solution^[39]

合金类别	损伤率				损伤占比/%		
	E	C	S	T	E/T	C/T	S/T
灰口铸铁	0.28	0.005	0.095	0.38	73.7	1.3	25.0
低碳钢 1050	0.03	0.016	0.086	0.13	21.5	12.3	66.0
工具钢 W1	0.11	0.009	0.021	0.15	78.6	6.4	15.1
铜	0.62	0.003	0.017	0.64	96.8	0.5	2.7
黄铜	0.26	0.002	0.028	0.29	98.7	0.7	9.6
青铜	0.20	0.001	0.009	0.20	95.0	0.5	4.5
不锈钢 316L	0.07	0	0	0.07	100	0	0
不锈钢 304	0.06	0	0	0.06	100	0	0
Zeron 100 双相不锈钢	0.01	0	0	0.01	100	0	0

有不同的腐蚀促进的空蚀损伤率,归根结底还是由材料的耐腐蚀性能决定的。

总而言之,海洋环境下流体具有一定的盐度是不可避免的,这就注定了在此条件下研究空蚀损伤时,不能仅考虑机械损伤,腐蚀损伤机制同样需要重视,且机械空蚀侵蚀与腐蚀之间,不是简单的加和关系,对于部分耐蚀性能差的材料来说,两者之间的协同效应甚至会有决定作用。因此,在进行空蚀研究与防护时,有必要根据环境的性质,选用合适的材料,把握好腐蚀在此过程中的作用。

2.1.4 黏度

Liu 等^[40]利用纤维耦合光束偏转技术,探究了黏度对气泡塌陷的影响,结果表明,黏度的增加减缓了气泡的膨胀和坍塌,降低了液体微射流的冲击力,气泡的最大半径也会随着黏度的增加而急剧减少。因此,在多方面上,黏性液体可以有效抑制空蚀侵蚀。

此外,有研究表明,空蚀过程也会影响黏度。Mercantili 等^[41]利用超声波处理多种黏度较大的油性液体,发现超声波可以有效切割碳基有机油的碳链,而使黏度下降。当超声停止后,液体黏度又会恢复。Mercantili 等认为这种反应为自由基反应,并当加入自由基清除剂后,有效防止了后续黏度增加。这种现象只出现于碳基油,对硅油等非有机油无效, Mercantili 等认为是与 C—C 和 Si—O 的键能差异有关。

Gou^[36]在研究含固体颗粒的液体在空蚀下的表现时发现,含有小于 0.04 mm 砂颗粒悬浮液的黏度随着砂粒径的减小和砂浓度的增加而增加。向自来水中加入高浓度细砂,可以抑制空化侵蚀。结合前文对固体颗粒的影响的讨论,得出结论,低于临界尺寸的颗粒是通过影响悬浮液的黏度来减少空蚀损伤的。

2.1.5 海洋生物污损

螺旋桨在海洋环境中进行工作时,海洋生物污损的作用是一个不可忽视的因素。在过去的研究工作中,主要集中于海洋生物污损对电化学腐蚀的影响,

总结出微生物影响腐蚀和微生物影响腐蚀抑制 2 种作用^[42]。对于微生物影响腐蚀,一方面微生物的代谢产物可能作为电子导体加速电子转移,加快腐蚀电化学反应速率;另一方面,微生物堆积形成的非均相表面可能会加大局部腐蚀的风险^[43]。例如, Zhang 等^[44]发现通过添加核黄素等电子介质,可以加快普通脱硫弧菌生物膜对 304 不锈钢的腐蚀作用。对于微生物影响腐蚀抑制,研究人员认为微生物生物膜的形成可以抑制电子转移,本身也可以作为保护屏障避免基体材料与海水环境的直接接触,提高耐腐蚀性能^[42]。例如, Li 等^[45]详细研究了蜡样芽孢杆菌生物膜对 316L 不锈钢的腐蚀作用,发现生物膜可以阻断细胞外电子转移,进而抑制点蚀。

目前关于海洋生物粘附对空化侵蚀的影响的研究鲜见报道。Tian 等^[46]注意到了这一点,因此探究了芽孢杆菌附着在空蚀条件下对镍铝青铜的腐蚀的影响。试验结果表明,芽孢杆菌生物膜显著降低了空蚀损伤。对于作用机制, Tian 等认为生物膜抑制了表面 Cu 和 Al 的溶解,延缓了腐蚀过程,这一点与上文提到的微生物影响腐蚀抑制类似。更重要的一点是,这种延迟腐蚀也保护镍铝青铜中的硬质 κ 相更少地剥离,保证了基体材料有足够的硬度抵御空化侵蚀作用,空蚀损伤程度大大减少。

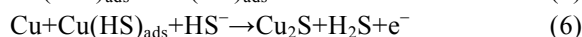
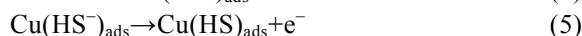
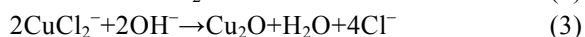
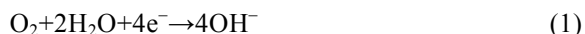
然而,只有部分细菌粘附展现出微生物影响腐蚀抑制作用,其他的细菌表现出微生物影响腐蚀作用,腐蚀速率的加快可能会对空化侵蚀产生不利影响。此外,随着生物粘附程度的加深,材料表面不仅会有各种细菌、真菌生物膜,还会粘附藤壶、苔藓等大型海洋生物,总体的对空蚀的影响机制会更加复杂。这就要求未来需要更多关于此领域的研究来进行深入探索。针对海洋生物污损,目前较为广泛的措施还是添加各种防污涂层,消除海洋生物污损的影响,提高螺旋桨的效率^[47]。例如, Yang 等^[48]向聚氨酯中加入 ZIF 纳米颗粒构成的复合涂料,同时具有较好的抗污和抗气蚀性能。

2.1.6 腐蚀性杂质离子

20 世纪时, 铜合金凭借优异的耐腐蚀性能和力学性能, 占到螺旋桨材料的 70% 以上。但近年来随着工业废物的大量排放, 加上海洋微生物产生的代谢废物, 海水成分发生变化, 硫化物含量显著提高。硫化物在铜合金表面形成的铜氧化物和硫化物薄膜结构疏松, 导致耐空蚀性能明显变差^[49]。因此, 研究以硫化物为代表的腐蚀性杂质离子对空蚀损伤的作用, 对螺旋桨乃至对海洋装备工程来说都有十分重要的意义。

2017 年, Song 团队^[50]研究了镍铝青铜 (NAB) 和锰镍铝青铜 (MAB) 在硫化物污染的人工海水中的腐蚀和空蚀损伤行为, 发现当硫化物存在时, 会产生更严重的腐蚀, 导致表面粗糙度增大, 降低了不同相之间的内聚力, 增加了空蚀损伤程度。对于 MAB 来说, 无论是含硫化物与否, 空蚀条件下均以机械损伤为主导。相比之下, NAB 对空蚀条件下硫化物的存在较为敏感, 硫化物的存在使 NAB 发生严重腐蚀、表面粗糙, 随着硬质 κ 相的脱落, 空蚀损伤程度大大加深。在硫化物污染严重的海水中, 对于 NAB 螺旋桨必须采取防护措施。

在此工作基础上, Song 等^[51]进一步研究了不同硫化物浓度对 MAB 腐蚀和空蚀损伤的影响程度的问题。对于纯腐蚀来说, 当硫化物质量浓度低于 20 mg/L 时, HS^- 含量较少, 阴极过程为氧还原反应, 反应式见式 (1), 阳极过程为 Cl^- 主导, 反应式如 (2)、(3); 随着硫化物浓度的增大, 阳极过程逐步转变为由 HS^- 主导, 反应式见式 (4)–(6), 当质量浓度达到 50 mg/L 时, 阴极过程由析氢反应主导, 腐蚀电位很负, 反应式见式 (7)。此外, 可以形成硫化铜膜, 膜的形成受到 HS^- 扩散过程的控制, 表现在极化曲线中为存在极限电流区域。当硫化物质量浓度低于 100 mg/L 时, 形成的腐蚀产物膜厚而不均匀, 导致浸泡一段时间后的质量损失率高于对比样; 当硫化物质量浓度增大到 200 mg/L 时, 形成薄而均匀的硫化铜膜, 因此表现出更低的质量损失。当考虑空蚀条件时, 腐蚀和磨损侵蚀间存在正协同效应, 腐蚀增大了表面粗糙度, 降低相界内聚力, 促进了磨损侵蚀。磨损侵蚀引起材料表面变形, 增大了腐蚀的活性面积。此外, 空蚀也破坏了腐蚀产物保护膜, 因此腐蚀速率增大。总而言之, 不同硫化物浓度下的空蚀损伤比蒸馏水对比组要大, 但由于 MAB 的空化损伤以 κ 相的剥离和 β 相的断裂导致的机械损伤为主, 当硫化物质量浓度大于 50 mg/L 时, 形成的腐蚀产物膜具有保护作用, 减小了空化侵蚀的影响, 腐蚀和空化侵蚀的协同作用反而比低浓度时要小。



从上文的讨论中可以看出, 硫化物对铜合金空蚀的影响, 也是通过影响腐蚀过程间接影响到空蚀。低浓度时, 腐蚀促进了空蚀损伤, 而达到一定浓度后, 形成的腐蚀产物膜反而起到了保护作用。这样就为铜合金在海水中的空蚀防护提供了解决思路, 比如添加涂层、构筑人工保护膜。除此之外, 也可以合理选用材料, 比如上文提到的 MAB 就比 NAB 对硫化物的敏感性要小, 锰元素的引入, 如何影响硫化物的腐蚀过程, 这类机理层面的问题, 值得进一步探究。

2.1.7 空蚀时间

时间因素是影响空蚀损伤程度的较为直观的一个因素, 随着空蚀时间的增加, 空蚀损伤程度也会加深、质量损失率不断提高, 但空蚀损伤速率可能在不同阶段会有所变化。例如, Dong 等^[52]研究了钛合金辐射棒在空蚀侵蚀条件下不同处理时间与质量损失的关系 (见图 5), 可根据曲线斜率将侵蚀过程分为 4 个阶段: 潜伏期、加速期、稳定期、下降期。

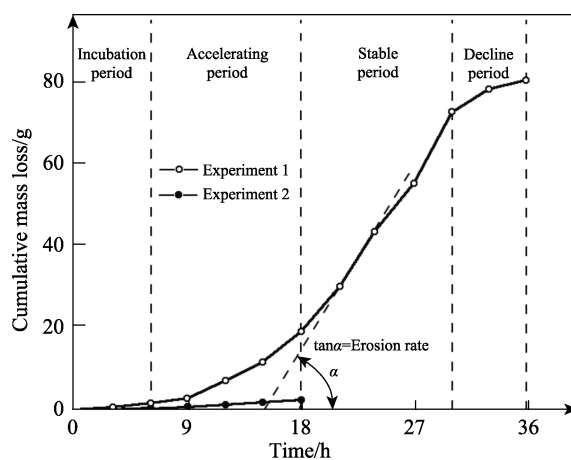


图 5 不同侵蚀时间下的累计质量损失-时间关系曲线^[52]
Fig.5 Cavitation period in cumulative mass loss-time curve^[52]

4 个阶段的侵蚀速率不同, 也与形貌特征有一定的对应关系。Al-Hashem 等^[53]研究了镍铝青铜合金在海水中的空化腐蚀行为, 扫描电镜结果显示, 随着空化时间的增加, 表面形貌逐渐经历了表面粗糙度增大 (3 h 后)、开始产生空腔 (13 h 后)、局部产生体积更大的空腔 (25 h 后)、空腔数量进一步扩大 (40 h 后)、覆盖整个表面、表面变形等具有不同特征的阶段。Park 等^[54]研究了铝青铜在海水中的空化腐蚀行为, 发现只有空化时间超过 25 h 才能显示出宏观视觉上可识别的损伤。根据 Dong 等^[52]的观点, 潜伏期内空化效应导致材料表面形成球形颗粒并剥落, 主要是粗糙度增加; 当形成性质较脆的金属间化合物时, 促进空腔蚀坑产生, 质量损失速率明显增加, 会进入

空蚀的加速阶段；随着时间进一步延长，空腔变大变深，才会出现宏观损伤。

由此可见，时间因素影响下的4个阶段，是反映质量损失速率的一种表现现象，归根结底还是受材料本身性质决定，材料不同，4个阶段的时间跨度、峰值、斜率等曲线信息也会有所不同。微观上抵御空腔产生与发展的能力越强，一般潜伏期也较长，加速阶段的斜率较缓，稳定下降期的累积质量损失也会较小。

2.1.8 应力

当螺旋桨工作时，叶片会受到海水的反作用力，导致叶片表面会存在拉伸应力和压缩应力。应力场是海洋环境中多场的重要组成部分，会对空蚀损伤的效果有较大的影响，其中拉应力和压应力作用效果不同，需要分别研究。

对于拉应力，Matsumura等^[55]早在20世纪70、80年代就研究了其对空蚀的影响。他们的研究表明，拉应力可以显著加快空蚀损伤，对脆性材料施加拉应力会导致潜伏期缩短、损伤加剧；而对塑性材料施加拉应力，Matsumura等认为，拉应力一定程度上阻碍了材料表面的塑性变形，潜伏期会延长，但一旦进入加速期，材料开始发生明显质量损失，拉应力同样会加快空蚀损伤。拉应力对材料抗空蚀性能的毒害作用，可以参考纯腐蚀下的应力腐蚀开裂。Panahi等^[56]的研究表明，拉应力会破坏具有保护性的产物膜，导致腐蚀加剧，而在空蚀条件的腐蚀-侵蚀的协同作用下，这种破坏作用带来的影响可能会更严重。

对于压应力，Qin等^[57]进行了最新研究，探究了压应力对304不锈钢的空蚀损伤的影响，结果表明，压应力明显降低了空化损伤的程度，质量损失率减小。据此，Qin等提出了压应力的作用机制，无压应力时，在空蚀反复机械冲击作用下，材料表面发生塑性变形，不仅因疲劳导致材料撕裂而形成空腔，而且变形诱导的马氏体作为坚硬而脆的相，在空化冲击下导致晶间断裂。相比之下，当存在压应力时，产生的晶格畸变使原子能增加，诱导马氏体转变。马氏体不仅可以吸收塌陷气泡的能量，起到缓冲作用，而且提高了材料的硬度，综合作用，压应力降低了304不锈钢的空蚀损伤。

总结应力的作用来看，更需要明晰条件，具体情况具体分析。比如应力本身，就需要明确是拉应力还是压应力，两者对空蚀损伤产生相反的作用效果。对于马氏体来说，需要明确是由于空蚀作用导致的变形马氏体，还是由于压应力的晶格畸变诱导产生的马氏体，2种条件下产生的马氏体也会对材料的抗空蚀性能有不同的作用。应力场作为螺旋桨等装备在工作时的外部环境，可能不容易改变，但可以通过各种材料处理技术来人工引入残余压应力。

2.1.9 含氢量

对于多场多相的海洋环境来说，气相主要体现在含氢量的多少。研究表明，氢气会影响金属材料的力学性能，氢气会集中在晶界、裂纹尖端等地方，促进晶间裂纹和疲劳裂纹的扩展，对力学性能有不利影响，这也是所谓的“氢脆”^[58]。如对于NiTi改性的316L不锈钢，空蚀电阻降低是由于硬度下降，而对于块体NiTi来说，氢化物形成而产生的表面裂纹是空蚀电阻降低的主要原因。

关于空蚀过程中氢气的来源，Wang等^[59]给出了解答，他们认为不仅水中含有溶解氢，而且可以通过空蚀过程由水分解产生。在试验中选用了纯Ti和高氮奥氏体不锈钢2种具有易于溶解氢气的晶体结构的金属材料，与对比样相比，经历空蚀以后，2种材料的吸氢率提高。Wang等认为，在空蚀过程中产生的瞬时高温足以使水分解产生氢，增加液相中的氢浓度；微射流可以携带溶解氢以高速移向材料表面；高密度位错、孪晶等缺陷为氢提供了扩散路径；空蚀过程中表面钝化膜被破坏，也有利于吸氢率的提高。这些综合因素的共同作用，促进了金属材料表面氢的富集，降低了空蚀电阻，增大了空蚀损伤的程度。

为了降低材料表面的含氢量，进而抑制空蚀损伤，研究人员也进行了相关探索。如Takakuwa等^[60]利用气蚀喷丸技术引入了表面残余压应力，一方面残余压应力本身对空蚀损伤起到抑制作用；另一方面，氢含量与残余压应力也存在线性相关性，残余压应力对含氢量起到抑制作用。Takakuwa等认为，残余压应力带来的裂纹闭合效应减轻了裂纹尖端的应力集中，降低了裂纹尖端附近的氢浓度。此外，残余压应力使原子间距变小，氢气更难被富集在材料表面。

总结一下关于含氢量对空蚀的作用的研究，考虑的内容已经较为全面，从氢脆的危害、氢气分布到产生的原因，以及如何抑制，为如何针对某一因素开展研究提供了良好的范例。当然，针对一些细节问题还有待更深入研究，比如对于氢富集的原因，究竟何种因素占据主导地位、除残余压应力外，氢富集还可以通过什么方法抑制等。

2.2 材料性质因素

材料性质因素，是指与材料本身有关的各种因素，如表面状态（缺陷、表面钝化膜、粗糙度）、晶体结构、晶粒大小、元素组成、残余应力、润湿性等，它们对空蚀损伤的影响可以认为是内因。

2.2.1 晶粒大小

关于晶粒大小对空蚀损伤的影响，Bregliozzi等^[61]曾选用氮合金奥氏体不锈钢作为研究材料进行了探索。试验结果表明，奥氏体不锈钢抗空蚀性随晶粒尺寸的减小而增加。据此，Bregliozzi等认为，空蚀损

伤是由于发生塑性变形, 导致产生空腔等损伤, 晶界作为滑动障碍物限制了位错的运动, 晶粒尺寸越小, 晶界数量越多、越密集, 对位错的抑制作用越大, 因此抗空蚀能力越强。此外, 该团队还探究了抗空蚀性、晶粒尺寸与硬度、抗拉强度、屈服强度等力学性能间的相关性, 普遍观点认为小尺寸晶粒由于细晶强化作用从而具有更好的力学性能。试验结果也表明, 硬度等力学性能的改善可以提高抗空蚀能力, 但存在的问题是, 所有力学性能都有促进作用, 还未找到一个力学性能物理量来最适宜地描述抗空蚀性。

Lo 等^[62]利用不同温度固溶处理后淬火的方法获得了具有不同晶粒尺寸的材料, 并研究了不同晶粒尺寸对空蚀侵蚀的影响。在结论上, 对晶粒尺寸的作用进行了补充, 认为大晶粒尺寸不仅会降低钢的强度等力学性能, 而且不易产生稳定的钝化层; 此外, 大晶粒尺寸在淬火后更易形成硬而脆的马氏体相, 容易引发空蚀蚀坑。关于马氏体的作用, 前文也曾提到, 但有很大不同, 如果马氏体是在空蚀环境前材料本身就存在的, 会作为脆相削弱抗空蚀能力; 如果马氏体是在空蚀过程中形成的, 会吸收冲击波的能量, 起到缓冲作用, 进而提高抗空蚀能力。

鉴于小晶粒尺寸对抗空蚀性能的优良作用, 减少晶粒尺寸就成了改善耐腐蚀或空蚀性能的一种重要途径。Kwok 等^[63]利用空化退火技术制备了具有纳米结构层的 316L 不锈钢, 获得了尺寸仅为 91 nm 的超细晶粒, 表现出优良的耐点蚀性能。Wang 等^[64]对 Ti6Al4V 合金在大气环境中进行了热处理, 发生重结晶后得到了尺寸较小的晶粒, 与处理前相比具有更好的钝化能力和耐空蚀能力。

2.2.2 元素组成

传统的金属材料一般是基于单相或双相基体, 掺入少量其他元素而构成的合金, 如铜合金、铝合金、钛合金等, 这些类型的合金对元素的掺入数量有限制, 防止形成复杂的金属间化合物, 影响材料的力学性能。与之相反, 10 多年前兴起了高熵合金的概念, 这种合金至少含有 5 种元素, 常见的是由过渡金属元素 (如 Fe, Ni, Co 和 Cr) 和其他一些合金元素 (如 Al, Mn, Mo, V 和 Ti) 混合组成的, 每种元素的原子分数在 5%~35%, 接近等比例^[65]。由于高构型熵和缓慢扩散的影响, 高熵合金倾向于形成面心立方、体心立方、密排六方等简单结构的晶体物相, 具有高强度和高硬度, 展现出良好的耐蚀性能、力学性能等。

近年来, 高熵合金的优良性能引起了空蚀领域的研究学者的注意, 并进行了相关耐空蚀性能的试验研究。考虑到高熵合金中掺入了很多昂贵的合金元素, 一般在利用时是通过表面合金化或高熵合金涂层的形式, 集中于表面合成。空蚀损伤一般是材料表面被微射流或冲击波反复冲击而疲劳破坏, 主要由材料的表面特性而不是本体特性决定, 因此与高熵合金在抗

空蚀损伤的应用恰好适配。

例如, Wu 等^[66]通过激光表面合金化在 304 不锈钢上涂覆了一层 FeCoCrAlNiTi_x 高熵合金涂层, 通过改变 Ti 元素的含量来研究其对相变和空化侵蚀-腐蚀行为的影响。Fe、Cr、Ni、Co 元素具有几乎相同的原子大小, 并且这 4 种元素之间的原子间的混合焓近似于 0, 因此 FeCrNiCo 倾向于表现出固溶状态^[67]。相比之下, Ti 和 Al 的原子半径远大于其他元素。当 Ti 元素掺入时, 一方面由于原子半径差异大, 产生固溶强化效应; 另一方面, 形成较硬的 Ti₂Ni 金属间化合物, 明显提高了高熵合金的硬度。基于此, 当在蒸馏水条件下进行空蚀时, 损伤形式本质上是机械损伤, Ti 含量越多, 抗空蚀能力越强; 但在人工海水条件下进行空蚀时, 腐蚀诱导侵蚀作用明显, 高 Ti 含量下生成的金属间化合物作为阴极相, 破坏了表面的钝化状态, 耐空蚀性能反而不如低 Ti 含量时的情况。类似地, Nair 等^[68]通过真空电弧熔炼合成了掺有 Al 的高熵合金 Al_{0.1}CoCrFeNi, 与 316L 不锈钢相比, 表现出更高的抗纯侵蚀性(9 倍)、抗侵蚀腐蚀性(4 倍)、更长的潜伏期和加工硬化能力, 是一种有前途的耐空蚀材料。

对于应用高熵合金涂层来实现空蚀防护, 限制因素还是由于高熵合金的高成本问题, 涂层本身比基体材料更昂贵。因此, 可以考虑改进点在于, 优化高熵合金涂层制备工艺、降低生产成本, 引入陶瓷材料、高分子材料、碳材料等构筑复合材料涂层, 实现经济成本与优良性能的交通共存。

2.2.3 残余应力

残余应力也是影响空蚀损伤的一个因素, 与工作环境中的应力场不同, 残余应力是由于材料在制备和处理过程中, 或主观或客观地被引入材料中的。比如, 高速氧燃料喷涂工艺中, 在基体材料上沉积涂层会产生沉积应力, 是一种压应力; 冷却过程中, 涂层和基体材料间热膨胀不匹配, 会产生热应力, 其是一种拉应力, 两者相互抵消后, 材料内部仍剩余的应力就为残余应力。Pukasiewicz 等^[69]就利用高速氧燃料喷涂工艺涂覆 FeMnCrSi 涂层, 并探究了残余应力对涂层空化的影响。结果表明, 较大的压缩残余应力对应于更好的抗空蚀性, 此涂层也具有更高的显微维氏硬度。Pukasiewicz 等解释是压缩应力促使涂层的粘附力增加, 且空化气泡内爆产生的应力与压缩残余应力相互抵消, 导致裂纹尖端的应力降低, 减少了空蚀疲劳损伤对涂层的影响。鉴于压缩残余应力在抗空蚀过程中的积极作用, Pukasiewicz 等据试验结果提出在喷涂过程中需要注重降低进料速率、提高燃料流量、原位监测涂层沉积过程中的残余应力等方式, 尽可能获得更大的压缩残余应力。

对于一些高热输入喷涂技术, 如电弧喷涂和等离子喷涂, 如果冷却淬火时的拉伸热应力效果更明显,

则残余应力为拉应力,此时对涂层的抗空蚀性有不利影响。如 Hauer 等^[70]研究了电弧喷涂铝青铜涂层时残余应力状态和空蚀侵蚀行为的影响,发现当喷涂时横移速度较低时,热应力较小,弹性模量更高,具有更好的内聚性能,残余拉伸应力较低,表现出更高的抗空蚀性。

除此之外,也有一部分研究人员采取各种喷丸技术,主动向材料中引入压缩残余应力,喷丸技术主要有气蚀喷丸^[71]、喷丸强化^[72]和激光喷丸^[73]。Kumagai 等^[74]对此 3 种喷丸技术进行了详细的对比研究,结果表明,气蚀喷丸表面存在最大的压缩残余应力,喷丸强化可以引入更大的表面硬度和位错密度,气蚀喷丸和激光喷丸穿透深度较喷丸强化更深。

综上残余应力的作用,关键思想是促进压缩残余应力、抑制拉伸残余应力。到目前为止,压缩残余应力对于抑制空蚀的微观层面的作用机理,还有待进一步研究。比如前文就曾提到压缩残余应力可以抑制氢富集,因此可以考虑压缩残余应力是否对材料表面相结构等有作用。此外,对于工艺问题来讲,在喷涂时如何更有效地降低热应力,始终是改善材料力学性能的重要途径。

2.2.4 表面状态

考虑到空蚀损伤是空化气泡产生的微射流或冲击波反复撞击材料表面而导致的材料疲劳损伤或剥落,因此材料的表面状态是影响空蚀损伤程度的重要因素之一。一般来说,对于空蚀条件,可能会有影响作用的表面状态涉及到缺陷、表面钝化膜、粗糙度等多个方面。

对于缺陷来说,金属材料的孔隙、微裂纹等缺陷会对抗空蚀性能有不利影响,因为空蚀损伤过程中就涉及到空腔、裂纹的产生与发展,比如空蚀的 4 个阶段中的加速期时,其中一个特征就是有空腔和微裂纹的产生。如果材料本身就存在这些缺陷,相当于跳过了 4 个阶段中的潜伏期,直接进入损伤和质量损失加速增长的阶段,不利于抗空蚀性能。因此,研究人员进行了各种尝试来减少缺陷的影响。Tian 等^[75]利用环氧树脂对高速氧燃料喷涂制备出的 WC-10Co4Cr 涂层进行密封处理,与密封前 2.52% 的孔隙率相比,密封后,孔隙率低至 0.78%,并展现出更高的耐腐蚀性和抗空蚀性。当没有密封处理时,氧气和氯化物很容易通过孔隙和裂纹渗入涂层内部,发生腐蚀,在空蚀下也会优先在涂层缺陷处生长蚀坑;当有密封处理时,腐蚀性介质的渗透率大大降低,从而降低了腐蚀和空蚀损伤的速率。此外, Takahashi 等^[76]利用气蚀喷丸和喷丸强化处理具有裂纹状表面缺陷的铝合金,结果表明,2 种方法可以分别使深度为 0.1、0.2 mm 的裂纹疲劳强度增加,即将缺陷无害化,延缓了裂纹的发展与失效,提高了抗空蚀能力。

对于表面钝化膜的作用, Cao 等^[77]进行了专门研

究,基体材料选用 316L 不锈钢,采用脉冲和连续空化模式进行对比。结果表明,当采用脉冲空化模式时,钝化膜周期性地产生与破坏,而在连续空化模式下,材料表面不断受到气泡的机械冲击作用而不能形成钝化膜。脉冲模式下空蚀间歇形成的钝化膜抵抗了空蚀损伤,减小了质量损失,空蚀侵蚀与腐蚀间表现出负协同效应;而连续空化模式下,无钝化膜保护作用,损伤较前者多,且空蚀侵蚀与腐蚀间表现出正协同效应。

对于粗糙度,普遍观点认为粗糙度较高时,会产生局部应力集中,促进疲劳裂纹的生长,对抗空蚀能力有不利影响^[78]。Lin 等^[79]探究了不同表面粗糙度对电弧喷涂制备的铁基非晶纳米晶涂层在空化条件下的腐蚀和侵蚀行为,结果表明,随着初始表面粗糙度的增加,涂层累积质量损失增大。因此,为减少粗糙度较大造成的不利影响,有部分研究针对于降低材料表面粗糙度。Zhang 等^[80]采用激光冲击加工法处理 ANSI 304 不锈钢,对表面进行改性,与冲击处理前相比,粗糙度下降,经历空蚀后形成的蚀坑大小和分布均匀,且尺寸较小,表面抗空蚀性能得到改善。粗糙度不仅会影响空蚀损伤程度,反过来,空蚀损伤也会增大材料的粗糙度,空蚀潜伏期内的一个明显特征就是粗糙度增大。再者,最近 Altay 等^[81]研究粗糙度对空化气泡动力学的影响时发现,当粗糙度增大时,表面波传播速度较慢、散射增加,导致气泡尺寸减小,体现出有利于抗空蚀损伤的一面。总而言之,粗糙度的影响是一个机制复杂的因素,有待更多更深入的研究。

2.2.5 晶体结构

晶体物相结构也会影响到空蚀损伤,因为不同物相结构对空蚀的敏感性不同。材料的结构决定了空蚀下的变形模式和应变速率,进而影响到材料缓解气泡塌陷的冲击能量的能力。一般来说,从晶体结构的种类角度看,体心立方和密排六方晶格结构的材料具有高应变率敏感性,容易发生裂解断裂,抗空蚀能力差;面心立方晶格结构的材料具有良好的塑性变形能力,潜伏期更长,因而抗空蚀能力较强^[82]。从晶体结构的形态角度看,等轴晶粒比柱状晶粒表现出更好的抗空蚀性。对于相关的研究工作,如 Peng 等^[83]在 TC11 钛合金基体上制备了具有等轴晶粒结构的 TiCN 纳米晶涂层,认为柱状晶粒结构的失效变形模式为柱状晶界的剪切,裂纹很容易通过柱间向更深处发展,晶间内聚强度很低。相比之下,等轴晶粒结构裂纹路径曲折,裂纹扩展需要更多的能量,因而提高了断裂韧性。

在实际材料应用中,很多材料的晶体结构一般不只是单一物相结构,比如合金中含有金属间化合物,或者研究人员利用各种方法使晶体发生相变,制备具有多相结构的材料。Selvam 等^[84]采用固定式摩擦搅拌处理,使局部区域发生重结晶而晶粒细化,其他部

分保持不变, 最终获得粗粒基质中嵌入细粒的双峰晶粒结构, 具有比超细晶粒钢更高的屈服强度和更优异的力学性能, 抗空蚀性能是 316L 不锈钢的 4~7 倍。Zheng 等^[85]对高速氧燃料喷涂的铁基非晶涂层进行了热处理, 实现了非晶涂层结晶化, 在不同温度下分别获得马氏体、碳化物、硼化物等硬质相, 提升了涂层的硬度, 在蒸馏水中表现出更好的抗空蚀性。Zhang 等^[82]详细研究了镍铝青铜微观结构对抗空蚀性的影响, 镍铝青铜主要由软质 α 相和硬质 κ 相构成。 α 相堆垛层错能低, 塑性变形时容易产生扩展位错, 防止疲劳裂纹形核和生长; 尺寸较小的 κ 相均匀分布在 α 相中, 阻碍位错运动, 抑制垂直裂纹膨胀, 使镍铝青铜成为一种优良的耐空蚀材料。

除了晶体物相结构以外, 晶界和相界也是在空蚀损伤中不容忽视的因素。一般来说, 材料中的晶界或孪晶边界是空蚀攻击的首选部位^[86], 如镍铝青铜的腐蚀侵蚀破坏优先集中在 α 相和 κ 相的相界面。Qin 等^[87]通过在 450 °C 下淬火和老化处理后, 对铸造镍铝青铜显微组织进行了细化均质化, 有效消除了选择性相腐蚀, 空化腐蚀速率是无热处理镍铝青铜样品的 1/8, 归因于精细的微观结构提升了材料的硬度。Wang 等^[88]对晶界特性进行了研究, 引入了泰勒系数的概念, 其描述了晶体相对于参考晶体取向滑动的趋势, 较大的泰勒系数表示更硬的颗粒。结果表明, 泰勒系数中 2 个晶粒或孪晶之间的较大差异对其共同边界产生较大的开裂风险, 且空化损伤主要发生于泰勒系数低的晶粒和孪晶。此外, 边界相干的柱形晶界抗空蚀能力较差, 因此指出在热机械加工时, 需要控制退火温度和退火时间, 保证具有足够的冷应变, 抑制相干边界的产生。

2.2.6 润湿性

表面润湿性是近年来在空蚀研究中人们新关注的一种特性, 源于注意到润湿性与表面粗糙度之间存在一定的相关性。Zhang 等^[89]通过研究发现, 表面粗糙度在涂层从亲水性转变为疏水性过程中起着关键作用。如果粗糙度小于 5.4 μm , 则涂层为亲水性; 如果粗糙度大于 9 μm , 则涂层变为疏水性。他们制备出的无定形铁基疏水涂层, 其具有高硬度和优良的耐腐蚀性能。Chen 等^[90]的试验也验证了这一观点, 随着空化时间的增加, 材料的表面粗糙度增大, 侵蚀面的接触角也增大, 被认为是通过空化侵蚀获得超疏水性金属表面的新方法。除此之外, 有观点认为疏水性表面本质上减小了材料与海水等介质的接触面积, 从而降低了腐蚀性离子攻击材料表面的可能性, 具有更高的化学惰性, 促进凹坑再钝化, 导致更高的极化电阻^[91]。Liang 等^[92]研究了电弧喷涂铁基非晶涂层的润湿性和腐蚀行为, 根据试验结果发现了喷涂涂层的电位变化与涂层的润湿性变化高度吻合, 揭示了润湿性与耐蚀性之间的内在相关性。

由此, 出现了部分研究工作, 致力于制备超疏水涂层, 来改善材料的抗空蚀能力。如 Fahim 等^[93]采用硫酸阳极氧化和硅烷表面化学改性两步法在 5083 铝合金上制备了疏水涂层, 结果显示, 疏水涂层使产生的空化气泡较小, 涂层表面形成的空腔深度低, 没有影响到基体材料, 展现出良好的抗空蚀性能。

3 多因素耦合抗空蚀应用

在多场多相的海洋环境中, 影响因素的复杂多样性注定了空蚀过程的耦合与协同效应。这种耦合与协同效应不仅像前文中所提到的, 空蚀可以与冲蚀、腐蚀等其他形式的损伤过程相互促进, 也体现在当考虑实际应用问题时, 需要利用各种影响因素间的耦合作用, 实现优异的抗空蚀性能。

例如前文提到的 Yang 等^[48]人设计制备了 ZIF-8 增强的聚氨酯抗空蚀涂料, 来优化抗空蚀性能。其中, 聚氨酯基体涂层赋予材料良好的表面疏水性能, ZIF-8 作为一种纳米尺度的金属有机框架, 掺入聚氨酯中构成的复合涂层表现出良好的力学性能和热稳定性。除此之外, ZIF-8 具有良好的抗菌性能, 与聚合物复合后, 水解速率降低, 可以更稳定地连续释放锌离子, 破坏细菌结构, 抑制硅藻等生物污损作用。这样一种涉及到疏水性、力学性能、生物污损等多因素的涂层, 实现了抗空蚀与抗污性能的高效复合。

4 结论

本文综述了空蚀的几种作用机制, 并讨论分析了多场多相条件下影响空蚀损伤程度的各种影响因素, 主要结论如下:

1) 空蚀损伤过程包括空化气泡的产生、生长及溃灭后对材料的破坏, 对材料的损伤机理主要有微射流和冲击波的物理作用、化学腐蚀和电化学腐蚀作用、热作用等, 它们以非线性耦合的形式, 协同影响着材料的损伤破坏。

2) 在多场多相的海洋环境中, 各种影响因素间协同作用, 且同一影响因素在不同条件下也会表现出不同的作用。比如依据固体颗粒的大小, 小于临界尺寸时, 黏度起主要作用; 大于临界尺寸时, 喷射机制引发的固体颗粒的侵蚀起主导作用。

3) 膜可以用来保护材料、减少空蚀损伤。无论是海洋生物因素中提到的生物膜, 或者是材料在海水中生成的钝化膜, 都对抗空蚀起到了积极的作用。对基体材料添加涂层, 实质上就是引入了“人工膜”, 将基体材料与腐蚀性介质隔离开来, 起到保护作用。

4) 环境因素与材料因素的作用各有侧重点。如果说环境因素决定了总体趋势, 比如时间因素, 随时间延长, 逐渐出现失重速率不同的 4 个阶段, 那么材

料因素的作用就是决定每个阶段的细节,硬度大、有涂层防护的材料,一般来说潜伏期更长,达到的峰值也更低。

5)在对空蚀的研究过程中,空蚀损伤主要影响的是材料表层的性质。在空蚀防护时,目前主流的也是采用各种表面方法(如表面加工、表面改性、添加涂层等),来改变材料表面的微观结构和性质(如相结构、粗糙度、润湿性、表面压应力状态等),进而提高材料的抗空蚀性能。

对于多场多相的空蚀环境来说,根据本文综述各种因素的作用,未来关于空蚀研究的方向主要有以下几个方面:

1)表面结构与性质优化。空蚀损伤主要针对材料的表面造成破坏,因此研究重点应放在表面结构和性质的改进。从结构上,可以改变材料表面相结构、残余应力等状态来提高抗蚀能力,也可以添加防护涂层、促进钝化膜形成等形成保护屏障;从性质上,可以从表面吸氢率、疏水性等表面性质入手。

2)影响因素机制研究。文中详细介绍了目前诸多影响因素的研究进展,机制研究是需要不断探求真理的基础的科学研究,明确弄清每个因素的作用,重视各个因素间协同效应的影响,秉持继承与批判的态度来对待前人的结论,不断发展完善空蚀机制。

3)高性能材料制备工艺改进。制备具有高强度、高硬度等优良的力学性能的材料来抵御空蚀侵蚀损伤,同时兼顾成本、寿命等问题,满足材料的应用化需求。高力学性能需要不断优化工艺参数,同时降低材料的热应力,减少空蚀损伤。高熵合金涂层等存在的成本问题,可以考虑与陶瓷等其他材料复合来实现,除此之外,近年来兴起的3D打印,也为解决成本问题提供了新途径。

参考文献:

- [1] 崔珊. 金属材料表面抗空蚀涂层的研究进展[J]. 中国金属通报, 2018(11): 68.
CUI Shan. Research Progress of Anti Cavitation Coatings on Metal Materials[J]. China Metal Bulletin, 2018(11): 68.
- [2] 刘海涛. 镍基合金喷熔层在海洋环境下的抗空蚀性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
LIU Hai-tao. Research on Cavitation Erosion Resistance of Ni-Based Alloy Sprayed and Fused Coatings in Marine Environment[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [3] 刘占先. 铝合金材料在船舶与海洋工程装备中的应用[J]. 船舶物资与市场, 2021, 29(6): 47-48.
LIU Zhan-xian. Application of Aluminum Alloy Materials in Ship and Marine Engineering Equipment[J]. Marine Equipment/Materials & Marketing, 2021, 29(6): 47-48.
- [4] RAYLEIGH L. VIII. on the Pressure Developed in a Liquid during the Collapse of a Spherical Cavity[J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1917, 34(200): 94-98.
- [5] OKADA T, IWAI Y, AWAZU K. A Study of Cavitation Bubble Collapse Pressures and Erosion Part 1: A Method for Measurement of Collapse Pressures[J]. Wear, 1989, 133(2): 219-232.
- [6] CAI S Q. Cavitation Occurring in Capillary Tubes[J]. Physics Letters A, 2019, 383(6): 509-513.
- [7] 张志萍, 周勇, 张健. 抗空蚀金属材料的研究进展[J]. 热处理技术与装备, 2011, 32(6): 1-3.
ZHANG Zhi-ping, ZHOU Yong, ZHANG Jian. Research and Development on Metallic Material of Cavitation Erosion Resistant[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2011, 32(6): 1-3.
- [8] CAI S Q. Acoustic Radiation, Cavitation Collapses, and Dryout in a Capillary Oscillating Heat Pipe[J]. Journal of Heat Transfer, 2020, 142(4): 042101.1-042101.8.
- [9] 张法星, 许唯临, 朱雅琴, 曾华. 空蚀冲击波模式下气泡尺寸在掺气减蚀中的作用[J]. 水利水电技术, 2005, 36(10): 5-7.
ZHANG Fa-xing, XU Wei-lin, ZHU Ya-qin, et al. Effects of Bubble Size Distribution on Aeration for Cavitation Alleviation under Cavitating Shock Wave[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(10): 5-7.
- [10] OKADA T, HAMMITT F G. Cavitation Erosion in Vibratory and Venturi Facilities[J]. Wear, 1981, 69(1): 55-69.
- [11] KORNFELD M, SUVOROV L. On the Destructive Action of Cavitation[J]. Journal of Applied Physics, 1944, 15(6): 495-506.
- [12] VAN WIJNGAARDEN L. Mechanics of Collapsing Cavitation Bubbles[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, 29: 524-527.
- [13] DULAR M, POŽAR T, ZEVIK J, et al. High Speed Observation of Damage Created by a Collapse of a Single Cavitation Bubble[J]. Wear, 2019, 418-419: 13-23.
- [14] OSMAN O O, ABOUEL-KASEM A, AHMED S M. Shock Waves as Dominant Mechanism for Cavitation Damage[J]. Journal of Tribology, 2022, 144(6): 1-12.
- [15] ZHAI Yan-wei, XU Wei-lin, LUO Jing, et al. Experimental Study on the Characteristics of Microjets and Shock Waves of Cavitation Bubbles near Elastic Boundaries[J]. Ocean Engineering, 2022, 257: 111664.
- [16] 偶国富, 周永芳, 郑智剑, 等. 空蚀机理的研究综述[J]. 液压与气动, 2012(4): 3-8.
OU Guo-fu, ZHOU Yong-fang, ZHENG Zhi-jian, et al. Review on the Mechanism of Cavitation Erosion[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2012(4): 3-8.
- [17] 孙冬柏, 张秀丽, 俞宏英, 等. 空蚀过程中电化学电位变化规律研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2000, 20(5): 308-311.
SUN Dong-bai, ZHANG Xiu-li, YU Hong-ying, et al. Experimental Study on Electrochemical Potential in the Process of Cavitation Damage[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2000, 20(5): 308-311.
- [18] 汤大友. 浅谈金属材料的空蚀研究进展分析[J]. 科技

- 创新与应用, 2014(18): 76.
- TANG Da-you. Analysis on Research Progress of Cavitation Erosion of Metal Materials[J]. *Technology Innovation and Application*, 2014(18): 76.
- [19] ABDEL FATTAH A M, SIDKEY M A. Cavitation Damage of Titanium in Molten Lead[J]. *Bulletin of Materials Science*, 1983, 5(2): 179-184.
- [20] 傅蒙茹. 空蚀过程中不同损伤形式及“彩虹环”形成机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- FU Meng-ru. Study on Damage Types and Formation of Iridescent Ring during Cavitation Erosion[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [21] CHEN Hao-sheng, LI Jiang, CHEN Da-rong, et al. Damages on Steel Surface at the Incubation Stage of the Vibration Cavitation Erosion in Water[J]. *Wear*, 2008, 265(5/6): 692-698.
- [22] JIN Heng-yun, ZHENG Feng-zhen, LI Shi-yun, et al. The Role of Sand Particles on the Rapid Destruction of the Cavitation Zone of Hydraulic Turbines[J]. *Wear*, 1986, 112(2): 199-205.
- [23] STELLA J, ALCIVAR R. Influence of Addition of Microsized Alumina Particles on Material Damage Induced by Vibratory Cavitation Erosion[J]. *Wear*, 2019, 436-437: 203027.
- [24] ARORA M, OHL C D, MØRCH K A. Cavitation Inception on Microparticles: A Self-Propelled Particle Accelerator[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(17): 174501.
- [25] WANG Yu, WU Jian-hua, MA Fei. Cavitation-Silt Erosion in Sand Suspensions[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2018, 32(12): 5697-5702.
- [26] 杜晋, 张剑峰, 张超, 等. 水轮机金属材料及其涂层抗空蚀和沙浆冲蚀研究进展[J]. *表面技术*, 2016, 45(10): 154-161.
- DU Jin, ZHANG Jian-feng, ZHANG Chao, et al. Research Progress of Cavitation and Slurry Erosion Resistance of Metal Materials and Coatings of Hydro Turbine[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(10): 154-161.
- [27] ABEDINI M, GHASEMI H M. Synergistic Erosion-Corrosion Behavior of Al-Brass Alloy at Various Impingement Angles[J]. *Wear*, 2014, 319(1/2): 49-55.
- [28] HUANG Wei-jiu, ZHOU Yong-tao, WANG Zhen-guo, et al. Erosion Behavior of a Ship Propeller Material of QAl9-4 Alloy[J]. *Rare Metals*, 2018: 1-6.
- [29] HUANG Cun-kui, CHIOVELLI S, MINEV P, et al. A Comprehensive Phenomenological Model for Erosion of Materials in Jet Flow[J]. *Powder Technology*, 2008, 187(3): 273-279.
- [30] 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.
- [31] PLESSET M S. Temperature Effects in Cavitation Damage[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1972, 94(3): 559-563.
- [32] HATTORI S, GOTO Y, FUKUYAMA T. Influence of Temperature on Erosion by a Cavitating Liquid Jet[J]. *Wear*, 2006, 260(11/12): 1217-1223.
- [33] DULAR M. Hydrodynamic Cavitation Damage in Water at Elevated Temperatures[J]. *Wear*, 2016, 346-347: 78-86.
- [34] 林翠, 赵晓斌, 杜楠, 等. 温度对溴化锂溶液中 Ti-6Al-4V 初期空蚀行为的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27(7): 1376-1384.
- LIN Cui, ZHAO Xiao-bin, DU Nan, et al. Effect of Temperature on Initial Cavitation Corrosion for Ti-6Al-4V in Lithium Bromide Solution[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(7): 1376-1384.
- [35] ZAKOWSKI K, NAROZNY M, SZOCINSKI M, et al. Influence of Water Salinity on Corrosion Risk—the Case of the Southern Baltic Sea Coast[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(8): 4871-4879.
- [36] GOU Wen-juan, ZHANG Hui, LI Hui-ping, et al. Effects of Silica Sand on Synergistic Erosion Caused by Cavitation, Abrasion, and Corrosion[J]. *Wear*, 2018, 412-413: 120-126.
- [37] RYBKIN K A, BRATUKHIN Y K, LYUBIMOVA T P, et al. Experimental Study of Formation and Dynamics of Cavitation Bubbles and Acoustic Flows in NaCl, KCl Water Solutions[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 879: 012026.
- [38] SMITH F, BROWNLIE F, HODGKIESS T, et al. Effect of Salinity on the Corrosive Wear Behaviour of Engineering Steels in Aqueous Solutions[J]. *Wear*, 2020, 462-463: 203515.
- [39] KWOK C T, CHENG F T, MAN H C. Synergistic Effect of Cavitation Erosion and Corrosion of Various Engineering Alloys in 3.5% NaCl Solution[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2000, 290(1/2): 145-154.
- [40] LIU Xiu-mei, HE Jie, LU Jian, et al. Effect of Liquid Viscosity on a Liquid Jet Produced by the Collapse of a Laser-Induced Bubble near a Rigid Boundary[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2009, 48(1): 016504.
- [41] MERCANTILI L, DAVIS F, COLLYER S D, et al. Ultrasonic Modification of the Viscosity of Vegetable, Mineral and Synthetic Oils—Effects of Nucleating Agents and Free-Radical Scavengers[J]. *Lubrication Science*, 2015, 27(3): 177-191.
- [42] YAN Shao-kun, SONG Guang-ling, LI Zheng-xian, et al. A State-of-the-Art Review on Passivation and Biofouling of Ti and Its Alloys in Marine Environments[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(3): 421-435.
- [43] ZHANG Da-wei, ZHOU Fei-chi, XIAO Kui, et al. Microbially Influenced Corrosion of 304 Stainless Steel and Titanium by *P. Variotii* and *A. Niger* in Humid Atmosphere[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, 24(7): 2688-2698.

- [44] ZHANG Pei-yu, XU Da-ke, LI Ying-chao, et al. Electron Mediators Accelerate the Microbiologically Influenced Corrosion of 304 Stainless Steel by the *Desulfovibrio Vulgaris* Biofilm[J]. *Bioelectrochemistry*, 2015, 101: 14-21.
- [45] LI Shun-ling, LI Lei, QU Qing, et al. Extracellular Electron Transfer of *Bacillus Cereus* Biofilm and Its Effect on the Corrosion Behaviour of 316L Stainless Steel[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2019, 173: 139-147.
- [46] TIAN Ye, ZHAO Hang, YANG Rui, et al. Effects of *Bacillus Sp.* Adhesion on Cavitation Erosion Behaviour of Nickel Aluminium Bronze in Artificial Seawater[J]. *Wear*, 2022, 498-499: 204344.
- [47] KORKUT E, ATLAR M. An Experimental Investigation of the Effect of Foul Release Coating Application on Performance, Noise and Cavitation Characteristics of Marine Propellers[J]. *Ocean Engineering*, 2012, 41: 1-12.
- [48] YANG Hao-cheng, GUO Xue-jie, CHEN Rong-rong, et al. Enhanced Anti-Biofouling Ability of Polyurethane Anti-Cavitation Coating with ZIF-8: A Comparative Study of Various Sizes of ZIF-8 on Coating[J]. *European Polymer Journal*, 2021, 144: 110212.
- [49] SONG Q N, TONG Y, XU N, et al. Synergistic Effect between Cavitation Erosion and Corrosion for Various Copper Alloys in Sulphide-Containing 3.5% NaCl Solutions[J]. *Wear*, 2020, 450-451: 203258.
- [50] SONG Qi-ning, XU Nan, BAO Ye-feng, et al. Corrosion and Cavitation Erosion Behaviors of Two Marine Propeller Materials in Clean and Sulfide-Polluted 3.5% NaCl Solutions[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2017, 30(8): 712-720.
- [51] SONG Q N, XU N, JIANG X, et al. Effect of Sulfide Concentration on the Corrosion and Cavitation Erosion Behavior of a Manganese-Aluminum Bronze in 3.5% NaCl Solution[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, 28(7): 4053-4064.
- [52] DONG Fang, LI Xiao-qian, ZHANG Li-hua, et al. Cavitation Erosion Mechanism of Titanium Alloy Radiation Rods in Aluminum Melt[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 31: 150-156.
- [53] AL-HASHEM A, RIAD W. The Role of Microstructure of Nickel-Aluminium-Bronze Alloy on Its Cavitation Corrosion Behavior in Natural Seawater[J]. *Materials Characterization*, 2002, 48(1): 37-41.
- [54] PARK J C, HAN Min-su, KIM S J. Investigation on the Cavitation Damage Behavior with Temperature and Cavitation Time in Seawater[J]. *Surface and Interface Analysis*, 2012, 44(11/12): 1407-1410.
- [55] MATSUMURA M, OKUMOTO S, SAGA Y. Effects of Tensile Stress on Cavitation Erosion[J]. *Materials and Corrosion*, 1979, 30(7): 492-498.
- [56] PANAH I, ESLAMI A, GOLOZAR M A. Corrosion and Stress Corrosion Cracking Initiation of Grade 304 and 316 Stainless Steels in Activated Methyl Diethanol Amine (aMDEA) Solution[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 55: 106-112.
- [57] QIN Z, LI X, XIA D H, et al. The Effect of Compressive Stress on Cavitation-Erosion Corrosion Behavior of 304 Stainless Steel[J]. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 2022, 69(4):434-441.
- [58] CHIU K Y, CHENG F T, MAN H C. Hydrogen Effect on the Cavitation Erosion Resistance of AISI 316L Stainless Steel Laser Surface-Modified with NiTi[J]. *Materials Letters*, 2007, 61(1): 239-243.
- [59] WANG Zhen-hua, WANG Yong. Hydrogen Participates in Cavitation Erosion in Water[J]. *Wear*, 2022, 504-505: 204435.
- [60] TAKAKUWA O, SOYAMA H. Preventing Hydrogen Embrittlement in Stainless Steel by Means of Compressive Stress Induced by Cavitation Peening[J]. *The Journal of Engineering*, 2015, 2015(13): 106-109.
- [61] BREGLIOZZI G, SCHINO A D, AHMED S I U, et al. Cavitation Wear Behaviour of Austenitic Stainless Steels with Different Grain Sizes[J]. *Wear*, 2005, 258(1/2/3/4): 503-510.
- [62] LO K H, KWOK C T, WANG K Y, et al. Implications of Solution Treatment on Cavitation Erosion and Corrosion Resistances and Synergism of Austenitic Stainless Steel[J]. *Wear*, 2017, 392-393: 159-166.
- [63] KWOK C T, CHENG F T, MAN H C, et al. Corrosion Characteristics of Nanostructured Layer on 316L Stainless Steel Fabricated by Cavitation-Annealing[J]. *Materials Letters*, 2006, 60(19): 2419-2422.
- [64] WANG Yi-jing, HAO En-kang, ZHAO Xiao-qin, et al. Effect of Microstructure Evolution of Ti₆Al₄V Alloy on Its Cavitation Erosion and Corrosion Resistance in Artificial Seawater[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 100: 169-181.
- [65] XU Jiang, PENG Shuang, LI Zheng-yang, et al. Remarkable Cavitation Erosion-Corrosion Resistance of CoCrFeNiTiMo High-Entropy Alloy Coatings[J]. *Corrosion Science*, 2021, 190: 109663.
- [66] WU C L, ZHANG S, ZHANG C H, et al. Phase Evolution and Cavitation Erosion-Corrosion Behavior of FeCoCrAlNiTi_x High Entropy Alloy Coatings on 304 Stainless Steel by Laser Surface Alloying[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 698: 761-770.
- [67] FAN Q C, LI B S, ZHANG Y. Influence of Al and Cu Elements on the Microstructure and Properties of (Fe-CrNiCo)Al_xCu_y High-Entropy Alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 614: 203-210.
- [68] NAIR R B, ARORA H S, MUKHERJEE S, et al. Exceptionally High Cavitation Erosion and Corrosion Resistance of a High Entropy Alloy[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 41: 252-260.
- [69] PUKASIEWICZ A G M, DE BOER H E, SUCHARSKI G B, et al. The Influence of HVOF Spraying Parameters on the Microstructure, Residual Stress and Cavitation Re-

- sistance of FeMnCrSi Coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 327: 158-166.
- [70] HAUER M, HENKEL K M, KREBS S, et al. Study of Traverse Speed Effects on Residual Stress State and Cavitation Erosion Behavior of Arc-Sprayed Aluminum Bronze Coatings[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017, 26(1/2): 217-228.
- [71] SOYAMA H, KIKUCHI T, NISHIKAWA M, et al. Introduction of Compressive Residual Stress into Stainless Steel by Employing a Cavitating Jet in Air[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2011, 205(10): 3167-3174.
- [72] KOBAYASHI M, MATSUI T, MURAKAMI Y. Mechanism of Creation of Compressive Residual Stress by Shot Peening[J]. *International Journal of Fatigue*, 1998, 20(5): 351-357.
- [73] SANO Y, MUKAI N, OKAZAKI K, et al. Residual Stress Improvement in Metal Surface by Underwater Laser Irradiation[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms*, 1997, 121(1/2/3/4): 432-436.
- [74] KUMAGAI M, CURD M E, SOYAMA H, et al. Depth-Profiling of Residual Stress and Microstructure for Austenitic Stainless Steel Surface Treated by Cavitation, Shot and Laser Peening[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 813: 141037.
- [75] TIAN Ye, ZHANG Hai-jun, CHEN Xiu-yong, et al. Effect of Cavitation on Corrosion Behavior of HVOF-Sprayed WC-10Co₄Cr Coating with Post-Sealing in Artificial Seawater[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 397: 126012.
- [76] TAKAHASHI K, OSEDO H, SUZUKI T, et al. Fatigue Strength Improvement of an Aluminum Alloy with a Crack-Like Surface Defect Using Shot Peening and Cavitation Peening[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, 193: 151-161.
- [77] CAO Li-fang, . Effect of Passive Film on Cavitation Corrosion Behavior of 316L Stainless Steel[J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2020: 628-638.
- [78] BRUNATTO S F, ALLENSTEIN A N, ALLENSTEIN C L M, et al. Cavitation Erosion Behaviour of Niobium[J]. *Wear*, 2012, 274-275: 220-228.
- [79] LIN Jin-ran, WANG Ze-hua, CHENG Jiang-bo, et al. Effect of Initial Surface Roughness on Cavitation Erosion Resistance of Arc-Sprayed Fe-Based Amorphous/Nanocrystalline Coatings[J]. *Coatings*, 2017, 7(11): 200.
- [80] ZHANG L, ZHANG Y K, LU J Z, et al. Effects of Laser Shock Processing on Electrochemical Corrosion Resistance of ANSI 304 Stainless Steel Weldments after Cavitation Erosion[J]. *Corrosion Science*, 2013, 66: 5-13.
- [81] ALTAY R, SADAGHIANI A K, SEVGEN M I, et al. Numerical and Experimental Studies on the Effect of Surface Roughness and Ultrasonic Frequency on Bubble Dynamics in Acoustic Cavitation[J]. *Energies*, 2020, 13(5): 1126.
- [82] ZHANG L M, MA A L, YU H, et al. Correlation of Microstructure with Cavitation Erosion Behaviour of a Nickel-Aluminum Bronze in Simulated Seawater[J]. *Tribology International*, 2019, 136: 250-258.
- [83] PENG Shuang, XU Jiang, JIANG Shu-yun, et al. Unlocking the Cavitation Erosion-Corrosion Resistance of a TiCN Nanocrystalline Coating with an Equiaxed Grain Structure[J]. *Corrosion Science*, 2022, 195: 109978.
- [84] SELVAM K, SAINI J, PERUMAL G, et al. Exceptional Cavitation Erosion-Corrosion Behavior of Dual-Phase Bimodal Structure in Austenitic Stainless Steel[J]. *Tribology International*, 2019, 134: 77-86.
- [85] ZHENG Z B, ZHENG Y G, SUN W H, et al. Effect of Heat Treatment on the Structure, Cavitation Erosion and Erosion-Corrosion Behavior of Fe-Based Amorphous Coatings[J]. *Tribology International*, 2015, 90: 393-403.
- [86] CHANG S C, WENG W H, CHEN H C, et al. The Cavitation Erosion of Fe-Mn-Al Alloys[J]. *Wear*, 1995, 181-183: 511-515.
- [87] QIN Zhen-bo, ZHANG Qi, LUO Qin, et al. Microstructure Design to Improve the Corrosion and Cavitation Corrosion Resistance of a Nickel-Aluminum Bronze[J]. *Corrosion Science*, 2018, 139: 255-266.
- [88] WANG Zhen-hua, ZHANG Bing. Cavitation Erosion Behavior of High-Nitrogen Austenitic Stainless Steel: Effect and Design of Grain-Boundary Characteristics[J]. *Materials & Design*, 2021, 201: 109496.
- [89] ZHANG C, WU Y, LIU L. Robust Hydrophobic Fe-Based Amorphous Coating by Thermal Spraying[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(12): 121603.
- [90] CHEN Feng-jun, DU Jian-hua, ZHOU Shan-zi. Cavitation Erosion Behaviour of Incoloy Alloy 865 in NaCl Solution Using Ultrasonic Vibration[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 831: 154783.
- [91] LIANG Dan-dan, LIU Xiao-di, ZHOU Ying-hao, et al. Effects of Annealing below Glass Transition Temperature on the Wettability and Corrosion Performance of Fe-Based Amorphous Coatings[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2022, 35(2): 243-253.
- [92] LIANG Dan-dan, ZHOU Ying-hao, LIU Xiao-di, et al. Wettability and Corrosion Performance of Arc-Sprayed Fe-Based Amorphous Coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2022, 433: 128129.
- [93] FAHIM J, HADAVI S M M, GHAYOUR H, et al. Cavitation Erosion Behavior of Super-Hydrophobic Coatings on Al5083 Marine Aluminum Alloy[J]. *Wear*, 2019, 424-425: 122-132.