

金属材料空蚀试验方法研究进展

骆超¹ 吴建华¹ 吴瑜²

(河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098 ;2. 南京军区联勤部指挥自动化站,江苏 南京 210016)

摘要 根据水流流动的模拟特性,将金属材料空蚀试验设备进行分类,介绍了主要设备的原理、发展、性能和优缺点,探讨了其主要特征参数及影响规律。通过对不同设备所得试验结果的分析比较,总结出金属材料空蚀试验的一些规律。认为当前应致力于各设备试验方法的标准化研究,通过大量标准化的流体-温度-材料-设备试验,确定金属材料空蚀破坏与特征参数的关系,对设备功能的开发等也提出了一些粗浅的认识。

关键词 空蚀;试验设备;金属材料;综述

中图分类号:TV131.66 文献标识码:A 文章编号:1006-764X(2007)05-0090-05

Comparison of cavitation erosion test methods for metallic materials//LUO Chao¹, WU Jian-hua¹, WU Yu² (1. College of Water Conservancy and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Automatic Headquarters, Logistics Department of Nanjing Military Area, Nanjing 210016, China)

Abstract :Based on the characteristics of water flow movement in experimental simulation, the apparatus for cavitation erosion tests were classified. The principle, performance and characteristics of the main apparatus as well as their development were introduced, and the key characteristic parameters and their effects on the test results were discussed. Some laws about cavitation erosion tests of metallic materials were summarized by comparison of test results with different apparatus adopted. It is suggested that the standardization research of the test methods should be emphasized, and that the relationship between cavitation erosion of metallic materials and characteristic parameters should be determined by many standardized fluid-temperature-material-apparatus tests. Finally, some views about the development of the functions of apparatus were presented.

Key words :cavitation erosion; test apparatus; metallic material; review

空蚀是在一定的环境温度条件下,液体介质中因局部压力变化致使空泡形成和溃灭,材料连续受到高压、高速微射流冲击作用产生的表面破坏^[1-2]。长期以来,空蚀严重影响泄水建筑物^[3-7]、水力机械(水泵^[8]、水轮机^[9]、闸门^[10])、船舶螺旋桨的性能和使用寿命。空蚀涉及众多的领域,例如宇航、国防、航海、化工、原子能甚至生物和医学等,成为这些领域遇到的难题之一^[1-2,11]。研究材料抗空蚀性能通常有两种方式:一种是现场原型实验,试验历时较长且费用较大,同时由于现场环境的复杂性,难度较大;另一种是室内试验,也称为“快速空蚀试验”。常用室内空蚀试验设备有磁致伸缩仪、文德里管型空蚀设备、旋转圆盘空蚀设备、水滴冲击设备等。根据水流流动的模拟特性,本文将这些设备分为无主流型空蚀设备和液体流动型空蚀设备两大类,总结比较了这两类空蚀试验设备的性能、特点、主要特征参数和影响规律,对今后

的空蚀试验研究提出了一些看法。

1 无主流型空蚀设备

无主流型空蚀设备不模拟液体流态,它的优势是适合于各种混合液体(如含沙水、液态金属组合等)和在高温条件下金属材料的空蚀试验,试验中同一液体单元在短时间内经过多次空化循环,产生空蚀的时间短,容易达到稳定的空蚀状态,并且设备尺寸小,能量消耗小,试验经费节省。

a. 磁致伸缩仪。1932 年 Gaines 首先研制了这种设备^[12],该设备利用高频振荡使水体产生振荡型空化,致使水中的试件表面产生空蚀。1950 年以来磁致伸缩仪有很大改进,特别是振动频率有所提高^[12]。1957 年对磁致伸缩仪的试验程序作出了一个标准化建议^[13]。转高频率装置的问世促使了“指数型收缩锥”的压电晶体驱动器的发展。目前,磁致

伸缩仪的典型参数是:振动频率 20 kHz,功率 1 000 W,双倍振幅 50 ~ 75 μm ,试件表面的最大加速度约 60 000 g 。最近河海大学对传统磁致伸缩仪进行改进,扩展其功能,研究了掺气、含沙水等对空蚀作用的影响^[14-15]。磁致伸缩仪的优点是空蚀率高、体积小、功耗低、参数易于控制,缺点是无法在原型试验中重现空蚀现象。通常,原型试验涉及由于流速增加致使压力降低而产生空化,并且试验区是流动系统,不断有新的流体进入空化区。然而,磁致伸缩仪涉及的是静止的液体,试验中反复使用的是同一液体。试验中发现,由于磁致伸缩仪的变幅杆高频振动,空化云聚集在试件底部,在长时间的振荡下,端部应力导致镍管的寿命不长。

b. 超声波振动空蚀设备。1965 年 Ellis 研制了固定试件的超声波振动空蚀设备^[12],试件被安装在容器底部,容器的边壁上端用环形激振器产生波列,传到底部引起试件空蚀^[16]。该设备的优点是试件本身不承受振动和相应的应力,空蚀面更为均匀,缺点为无法对空化强度进行量测,不宜采用与试件材料化学活性不适应的试验液体。由于设备无法对空化强度进行量测和试液的局限性,近阶段应用该设备进行材料空蚀研究的并不多见。

2 液体流动型空蚀设备

研究表明,空蚀量与流速的 n 次方成正比^[17]。液体流动型空蚀设备可以模拟实际管道、水轮机、水泵或闸门槽等流速对材料空蚀的影响,能较好地预估原型的空蚀破坏程度,同时还可以方便地研究水流掺气对减免空蚀的影响。

a. 文德里管型空蚀设备(又称为缩放型空蚀设备)。该设备最早由 Fottinger 和 Schroter 使用^[1];1937 年 Moussori^[18]采用双堰文德里管设备进行了广泛的金属材料空蚀试验;1964 年 Hammit^[19]对设备进行了较大改进,研制并使用了圆柱形断面的文德里管型空蚀设备。文德里管管路系统有循环式和直流式两种,喉部断面有多种形式^[12],此类设备常用于研究流动系统对材料空蚀的影响。由于水流情况

与实际管道中水流的流态比较接近,文德里管型空蚀设备似乎更能预估原型空蚀的破坏程度。与无主流型空蚀设备相比,它需要更多的场地和辅助设备,建造和运行成本较高,试验历时也较长。

b. 旋转圆盘空蚀设备(简称为转盘装置)。该设备由丹麦人 Rasmussen^[20]于 1956 年开始采用;20 世纪 70 年代中期被引入水力机械行业后装置得到不断改进和完善,应用于研究各种材料或涂料的相对抗空蚀性能。该设备的优点是在其不同半径处设置空蚀诱发物便可形成所需流速下的空蚀强度,并且其空蚀能力高于文德里管型空蚀设备,大致与振动型空蚀设备所获得的空蚀率相仿;其缺点为设备中的水流流态比文德里管型空蚀设备复杂。

c. 水滴冲击设备。该设备最早由 Honegger 和 Hoff 研制成功^[1],原理是通过固定在转轮周边上的试件高速旋转,垂直地切割通过转轮的射流,射流对试件的冲击使试件剥蚀破坏。设备的优点是其产生空蚀的方法是液滴冲击,与冲击式水轮机斗材料的空蚀类似(水轮机叶片受蒸汽液滴冲击引起空蚀);其缺点是对电动机转速的要求高,消耗动力大。

3 主要特征参数及影响规律

各种设备产生空蚀的原理不同,试验结果有一定的差异,同一设备,试验条件变化,试验结果也不同。将设备的主要特征参数分为设备参数和试验参数,前者反映设备的性能,后者反映设备的适用条件。常用空蚀试验设备的主要特征参数及其影响如下:

a. 表 1 为现阶段国内外磁致伸缩仪的特征参数,反映了当前磁致伸缩仪发展达到的主流水平^[22-24],振动频率为 20 kHz,振幅常见为 30 ~ 60 μm ,试验周期一般 2 ~ 6 h,功率由最初的 100 W,500 W 发展到 1 000 W。近年来,无锡科洁超声电子设备有限公司正在尝试生产功率能达到 3 000 W 的设备,这将大大缩短试验周期。磁致伸缩仪的空化强度是振幅、频率和试件直径的函数($MDPR = kA^{1.2}f^{0.8}D^x$,式中 k 和 x 为系数, A 为振幅, f 为频率, D 为试件直径)^[22]。影响空化强度的因素还有温度、试件表

表 1 国内外磁致伸缩仪设备特征参数

研究机构	设备参数			试液	试验参数				
	输入功率/ W	频率/ kHz	振幅/ μm		试件尺寸/ mm	试件浸入 深度/mm	悬臂与试件 距离/mm	温度/ $^{\circ}\text{C}$	试验历时/ h
HIRO(日本)	100	19.9	28	蒸馏水	$\varnothing 16$		0.4	40	20
中国船舶研究中心	250	20.0	32	自来水	$\varnothing 16$	1.5		20	5
VSΒ(波兰)	250	20.0	40	蒸馏水	$\varnothing 16$		1.0	20	2.5
IMP(波兰)	500	8.1	50	自来水	$\varnothing 12.5$	3.0		20	5
清华大学		19.8	35	自来水	$\varnothing 19.5$	3.0		15 ~ 20	2.5
CISF(意大利)	1 000	20.0	50.8	蒸馏水	$\varnothing 15.8$	10.0		22	10

注:HIRO 和 VSΒ 实验室采用了试件与悬臂分离的设备。

面的淹没深度、液体介质等。表 1 中 CISE 实验室的设备功率、频率和振幅都大于其他实验室,各材料的空蚀程度都远大于其他实验室;IMP 实验室频率较小,是影响试验结果的重要因素;HIRO 实验室中温度的影响不能忽略。在一定范围内,金属材料的空蚀率随着水温的升高而增加,当水温超过某一临界值时,空蚀率降低。其原因可能是温度较低时气体溶解度较大、含量高,对空泡溃灭的缓冲作用大,导致空蚀率降低;此外,温度较高,热力学作用影响加大,导致空蚀破坏减小^[25-27]。

b. 国内外文德里管型空蚀设备的特征参数见表 2,其中进水管直径 100~200 mm,喉前收缩角 20°~23°,喉后扩散角 10.5°,目前喉部最大流速在 59~81.7 m/s 之间^[12-25]。文德里管设备中空蚀通常与流速、液体密度、过流通道的几何形状、水流含气量等相关。文献[17]认为 $\Delta W = k_1 \frac{\rho^2 T^2 v^6}{H}$,其中 ΔW 为试件质量损失, k_1 为系数, v 为流速, T 为试验历时, ρ 为液体密度, H 为材料硬度。可见,流速是最主要的影响因素。

c. 旋转圆盘的常见电动机功率为 30~75 kW,转速为 1500~5000 r/min,转盘直径为 275~600 mm。目前所见圆盘的最大圆周速度在 47~69 m/s 之间^[1-28-30]。近年来研究金属材料空蚀的主要科研机构的旋转圆盘特征参数值见表 3。国内各单位使用的旋转圆盘多在直径约为 300 mm 的圆周上均匀分布 4~6 个直径 14~16 mm 的通孔或突体作为空化诱发源。该设备的空化强度可表示为 $I = kv^n$,其中 k 为系数, v 为流速, n 在 1~5 之间。

4 空蚀试验的对比分析

本文收集整理了 1989~1992 年世界上 14 个实验室 20 个振动装置上的试验资料^[22-24,31-32],其中几乎 1/2 的试验是在磁致伸缩仪上进行的,另 1/2 是利用旋转圆盘、文德里管和冲击式空蚀设备进行的。从对大量空蚀试验资料的对比分析中可得出以下认识。

4.1 设备的研究侧重点

磁致伸缩仪是研究空蚀机理和测定材料抗空蚀性能的重要手段之一。近年来,还用于研究水质对初生空化的影响^[34-36],在水中添加聚合物对空蚀的影响^[37-38],水的表面张力^[39]、温度对空蚀的影响^[25-27],含沙水^[38]对材料磨蚀的影响,材料表面添加涂层后的影响^[41-43]等,应用范围非常广泛。Zhou^[44]指出,不仅空蚀试件表面值得研究,还应关注空蚀发生后的产物(如泥沙、悬浮物、试液等);磁致伸缩仪在保留材料空蚀产物方面具有优势。

文德里管型空蚀设备除了用于研究流速对材料空蚀的影响以外,还可以用来研究水流掺气对减免空蚀的作用^[21,42-43]。随着原子能和航天工程的发展,用文德里管型空蚀设备研究高温液态流动金属的空化特性比其他设备接近实际。

旋转圆盘具有流动装置的一些特性,可以在转盘上同时进行几种流速的磨蚀试验和多种材料抗空蚀性能的同盘对比试验,因此被广泛应用于金属材料的磨蚀试验当中^[44-50],以探索耐空蚀和磨蚀损伤的不锈钢材料的性能。

4.2 材料的空蚀过程

虽然不同设备取得的试验结果难以直接比较,但各设备得出的金属材料空蚀的发生过程大体均可

表 2 国内外文德里管型空蚀设备特征参数

研究机构	设备参数					试验参数	
	进水管直径/ mm	喉部尺寸/mm		喉前收缩角/ (°)	喉后扩散角/ (°)	喉口断面 面积/m ²	喉部最大流速/ (m·s ⁻¹)
		宽	高				流量/ (L·s ⁻¹)
美国垦务局	150	320	6.4	20	10.5	0.0020	33
全苏水工所	150	310	7.0	23	10.5	0.0022	22
南京水利水电科学研究院	150	200	75.0	20	10.5	0.0010	59
中国水利水电科学研究院	200	300	10.0	23	10.5	0.0030	26.6
清华大学	102	100	6.0	23	10.5	0.0006	30

表 3 国内外旋转圆盘设备特征参数

研究机构	设备参数				试验参数	
	电机功率/ kW	转盘直径/ mm	转速/ (r·min ⁻¹)	最大圆周速度/ (m·s ⁻¹)	温度/℃	压强/kPa
中国船舶研究中心	30.0	350	2950	43.0	20	103
东北大学流体研究所(日本)	132.0	300	6000	77.6	120	180
IMR(波兰)	40.0	330	3000	42.5	20	155
KSB(德国)	28.0	500	1537	29.6	40	46
MLCU(加拿大)	74.5	610	1800	50.2		
SIGMA(波兰)	52.5	275	5000	60.2	40	70

分为4个阶段^[33]:空蚀潜伏期,在此阶段金属材料表面有严重的塑性变形,空蚀上升期,在此阶段空蚀率急剧增加,金属材料表面产生局部麻点,空蚀区扩展到整个表面,空蚀衰减期,空蚀率达到峰值后,缓慢地降低或者出现波动,空蚀稳定期,空蚀率接近一个常数,认为试验历时足够长时蚀坑内形成“水垫”。

上述空蚀阶段不是一成不变的,与以下因素有关:①低屈服应力的影响,如大量的合金材料没有潜伏期,在很短的时间内发生空蚀,材料的疲劳效应是失重持续上升的主要原因;②与许多材料(尤其是亚稳定结构)的表面加工硬化处理有关,在破坏初期会延长空蚀潜伏期,减小空蚀率;③与材料表面状态有关,一方面表面粗糙度在初始阶段会提高空蚀率,另一方面在空蚀上升期表面波纹会降低侵蚀强度;④空蚀破坏导致材料表面几何形状的改变会引起荷载增加(尤其在流动系统材料表面),或者因材料在高强受荷地区遭到破坏导致荷载降低;⑤空蚀发展会受化学腐蚀而加重;⑥在多数情况下金属材料空蚀发生过程的稳定期不容易得到,因为试验找不到空蚀率逐渐下降的趋势,在某些情况下不能得到最大空蚀率。

4.3 试验结果的可比性分析

由于试验设备有各种类型,每种类型的设计多种多样,即使是同一设备,试验条件也不一定相同,甚至同种材料、同种工艺、不同批次的试件性能也有差异,比较试验结果时要关注每一细节,难度较大。差异还有可能是由于不同材料有不同的空蚀强度界限,界限以下材料没有明显的空蚀,而超过高空蚀界限可能会有较低的空蚀率,因而在空化强度不同的设备中会产生不同的评价结果。然而,由同一设备在各种试验条件下的试验结果可以定量分析各参数的相关关系,得出材料的相对抗空蚀能力顺序,如在不主型空蚀设备和液体流动型空蚀设备试验中,不锈钢和某些铝青铜均在相对抗空蚀性能等级中居首位,普通钢比铸铁有较高的抗空蚀性能,普通的青铜和黄铜抗空蚀性能较低。

4.4 材料相对抗空蚀性能的顺序对比

不同设备得出的材料相对抗空蚀能力的顺序可能不同,如在对铝合金 PA2、黄铜 M63、低碳纯软铁 E04、45 号钢和耐酸钢 1H18N9T 的空蚀试验中,多数磁致伸缩仪所得的材料抗空蚀性能的顺序是 1H18N9T > 45 号钢 > E04 > M63 > PA2,而多数文德里管和转盘装置所得的结论是 45 号钢 > 1H18N9T > E04 > M63 > PA2^[24]。差别可能是因为文德里管和转盘装置是液体流动型空蚀设备,而磁致伸缩仪是无主型空蚀设备。流动型空蚀设备模拟流动系

统,空蚀通常与流速、压力梯度、过流通道的几何形状等相关,无主型空蚀设备中空蚀主要与设备的振幅、频率等相关。

5 展望

室内试验的目的在于采用比原型试验更为经济、方便和快速的方法取得材料-液体-温度等重要组合的空蚀资料。由于设备的局限性和材料空蚀问题的复杂性,笔者认为,今后研究的工作是:

a. 不仅空蚀试件表面值得关注,空蚀的产物(如泥沙、悬浮物、试液本身等)也是值得研究的,这方面在以往的研究中常常被忽略。磁致伸缩仪试验是保留材料空蚀产物的最好方法,可以从这方面首先开展研究。

b. 开展试验方法的标准化研究,通过大量标准化的流体-温度-材料-设备试验,分析各种试验条件下的材料抗空蚀能力,得出为众多试验室认可的标准化试验方法,最终使得各设备取得的模型试验结果更能准确地预估原型空蚀破坏。

c. 进一步细化材料空蚀破坏和特征参数的关系。同一设备,试验条件不同所得出的材料相对抗空蚀能力差异很大,特征参数对试验结果的影响有待进一步细化研究。

d. 考虑建立一个统一的衡量空化强度的方法。目前,比较各种试验的较好方法是按同一类型材料所产生的空蚀破坏程度来衡量,如质量损失、体积损失、空蚀深度、空蚀麻点、应变能等。

e. 改进现有空蚀设备,进一步扩展设备的研究领域,提高设备的特征参数,以满足空蚀试验细化和优化的要求,如研制具有掺气功能的磁致伸缩仪^[14]和带有泥沙起动装置的磁致伸缩仪^[15],进一步提高磁致伸缩仪的频率和振幅以缩短试验周期等等。

参考文献:

- [1] KNAPP R T, DAILY J W, HAMMITT F G. 空化与空蚀[M]. 中国水利水电科学研究院,译. 北京: 水利出版社, 1981.
- [2] 王再友, 龙冀东, 朱金华. 抗空蚀材料研究应用进展[J]. 材料开发与应用, 2001, 16(6): 34-38.
- [3] 肖兴斌. 三峡工程泄洪深孔掺气减蚀设施研究述评[J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(2): 51-54.
- [4] 纪伟. 龙抬头泄洪洞反弧段空化空蚀研究综述[J]. 水科学与工程, 2006(1): 51-53.
- [5] 张云莲. 泄水建筑物的空蚀破坏和防治方法[J]. 腐蚀与防护, 2001, 22(8): 343-345.
- [6] 刘超, 杨永全, 邓军, 等. 泄洪洞反弧段下游侧墙掺气减蚀试验研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2006(4): 465-472.
- [7] 刘超, 张光科, 冯凌霄, 等. 泄洪洞反弧段上游掺气坎对

- 反弧段下游侧墙的减蚀作用[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(1): 46-49.
- [8] 赵建东, 王立义. 引滦泵站水泵气蚀破坏的修复方案比较[J]. 海河水利, 2005(3): 51-52.
- [9] 段生孝. 我国水轮机空蚀磨损破坏状况与对策[J]. 大电机技术, 2001(6): 56-59.
- [10] 黄金林. 水工闸门的空蚀与防蚀措施[J]. 中国农村水利水电, 2004(8): 51-53.
- [11] 柳伟, 郑玉贵, 姚治铭, 等. 金属材料的空蚀研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2001, 21(4): 250-255.
- [12] 黄继汤. 空化与空蚀的原理及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991: 115-122.
- [13] ASTM Standard G32 - 85, Standard method of vibratory cavitation erosion test[S].
- [14] 骆超. 掺气试验装置的研制和掺气对空蚀作用的实验研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [15] 王荣克. 泥沙起动装置的研制与泥沙特性对磨蚀影响的研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [16] 中国水利水电科学研究院, 南京水利科学研究院. 水工模型试验[M]. 2版. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [17] KAR S, MATHEW J. Cavitation damage in a flow system[J]. Cavitation Forum, 1967, 18: 1-2.
- [18] MOUSSON J M. Pitting resistance of metals under cavitation condition[J]. Trans, ASME, 1937(59): 399-408.
- [19] HAMMITT F G. Cavitation damage and performance research facilities[J]. ASME symp on cavitation research facilities and techniques, 1964(12): 175-184.
- [20] RASMUSSEN R E H. Some experiments on cavitation erosion in water mixed with air[C]//Proc. 1955 NPL symp. on cavitation in hydrodynamics. London: HMSO, 1956.
- [21] HOFF G, LANGBEIN G, RIEGER H. Material destruction due to liquid impact[J]. ASTM Spec Tech Publ, 1967, 408: 42-69.
- [22] STELLER J. International cavitation erosion test[M]. Gdansk: Polish Academy of Sciences Institute of Fluid Flow Machinery, 1998.
- [23] STELLER J. International Cavitation erosion test and quantitative assessment of material resistance to cavitation[J]. Wear, 1999, 233: 51-64.
- [24] STELLER J. International cavitation erosion test: summary of results[C]//Proc 3rd Int Conf on Cavitation. Cambridge: IMechE, 1992: 121-132.
- [25] HAMMITT F G, ROGERS D O. Effects of pressure and temperature variation in vibratory cavitation damage test[J]. J Mech Engr Sci, 1970, 12: 432-439.
- [26] PLESSET M S. Temperature effects in cavitation damage[J]. J Mech Engr Sci, 1972, 14: 559-566.
- [27] WANG Xu-shi, ZHOU Yu-kang, HAMMITT F G. Vibratory cavitation erosion tests at 120-150°C and a bar suppression pressure[J]. Cavitation and Multiphase flow forum, 1984, 9: 18-21.
- [28] 姜胜利, 郑玉贵, 姚治铭. 20SiMn 低合金钢在不同砂粒粒径的多相流中的损伤行为[J]. 金属学报, 2004, 40(2): 163-167.
- [29] 庞佑霞, 刘厚才, 唐果宁. 离心泵叶轮材料 HT 200 的空蚀磨损机理研究[J]. 润滑与密封, 2003(6): 26-27.
- [30] WOOD G M. Cavitation damage studies with rotating disc in water[J]. Journal of Basic Engineering, 1967, 89: 98-110.
- [31] WU Jian-hua, CHAI Gong-chun. Effects of N⁺ ion implantation on surface modification of cavitation damage for 0Cr13Ni9Ti SS of turbine materials[J]. Journal of Fluid Engineering, Trans, ASME, 1997, 119(1): 204-208.
- [32] 吴建华, 陈宇. 动态离子束混合对水轮机材料空蚀改性的研究[J]. 水力发电, 1999(2): 23-26.
- [33] KARIMI A, MARTIN J L. Cavitation erosion of metals[J]. International Metals Reviews, 1986, 31(1): 1-26.
- [34] 骆素珍, 郑玉贵, 姜胜利, 等. 1Cr18Mn14N 不锈钢在 HCl 溶液中的空蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2004, 24(6): 350-355.
- [35] 骆素珍, 敬和民, 郑玉贵, 等. 20SiMn 在蒸馏水和 3% NaCl 溶液中的空蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2003, 23(4): 352-356.
- [36] 骆素珍, 郑玉贵, 敬和民, 等. NaNO₂ 对 20SiMn 低合金钢在 3% NaCl 溶液中空蚀损伤的缓蚀作用[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(6): 347-351.
- [37] ZHENG Da-qiong. Cavitation damage test of silica-fume mortar[C]//Zuo Dong-qi, Chai Gong-chun. Cavitation and Erosion in Hydraulic Structures and Machinery. Nanjing: Hohai University, 1992: 338-341.
- [38] SUN Bong-hwa. Long chain polymer additives effects on cavitation erosion[J]. Cavitation and Multiphase Flow Forum, 1985, 23: 84-86.
- [39] 黄继汤, 丁彤, 田立言. 表面张力对铝材料空蚀的影响[J]. 水利学报, 1997(5): 23-27.
- [40] 邢述彦. 应用磁致伸缩仪进行材料磨蚀试验研究[J]. 太原理工大学学报, 1999, 30(1): 75-78.
- [41] 康进兴, 赵文珍. 镍基覆层材料抗冲蚀气蚀性研究[J]. 材料保护, 2002(6): 9-11.
- [42] 康进兴, 赵文珍, 肖洁. WC 对 CuNiSiB 喷焊覆层材料耐气蚀性的影响[J]. 材料科学与工程, 2002(1): 44-46.
- [43] BOETCHER H N. Failure of metals due to cavitation under experimental condition[J]. Trans, ASME, 1936, 58: 355-360.
- [44] ZHOU Yu-Kang. On mechanism of cavitation damage[J]. Cavitation and Multiphase Flow forum, 1990, 28: 159-163.
- [45] PETERKA J A. The effect of entrained air on cavitation pitting[C]//Proceedings Minnesota International hydraulics convention. Minnesota: Minneapolis, 1953: 507-518.
- [46] 王国玉, 曹树良. 通气对空蚀的影响及高速摄影观察[J]. 水力发电学报, 2001(1): 48-57.
- [47] 梁川, 李伟. 浑水空化流场对复合材料(FRT)的蚀损[J]. 水利水电技术, 2003, 34(5): 17-19.
- [48] 陈文革, 谷臣清, 赵康. 钢的气蚀规律的研究[J]. 机械工程材料, 2002, 26(3): 38-40.
- [49] 柳伟, 郑玉贵, 刘常升, 等. 20SiMn 低合金钢和 0Cr13Ni5Mo 不锈钢的多相流损伤行为[J]. 材料研究学报, 2002, 16(6): 585-589.
- [50] 张小彬, 刘常升, 朱杰, 等. 大型水轮机叶片马氏体不锈钢的多相流损伤行为[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2006, 27(11): 1232-1235.

(收稿日期: 2007-04-02 编辑: 高建群)