

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.11.006

# 含沙水流中翼型空蚀磨损试验\*

张涛<sup>1</sup> 陈次昌<sup>2</sup> 郭清<sup>3</sup>

(1. 西南石油大学石油工程学院, 成都 610500; 2. 西南石油大学机械工程学院, 成都 610500;  
3. 中国石油大学石油天然气工程学院, 北京 100011)

**【摘要】** 模拟水力机械内部流动环境,在收缩-扩散型试验段中对翼型进行了空蚀、磨损及两者联合作用破坏试验,观测表面破坏微观形貌并测量破坏深度分布规律。空蚀形貌呈较为规则的近圆独立蚀坑,其分布较为随机。根据颗粒对表面作用的不同,磨损形貌表现为冲击、铲削、犁耕及切削等类型。在较高固相质量浓度下,联合作用破坏形貌大多在极端的角度(90°或0°)以颗粒磨损形式出现,其尺度特征在翼型表面随位置后移远大于磨损形貌,宏观破坏深度明显比单纯磨损大;而在低固相质量浓度下,微观形貌为空蚀磨损共存。

**关键词:** 翼型 含沙水流 空蚀 磨损 微观形貌

**中图分类号:** TV131 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)11-0031-07

## Experiment on Damage of Cavitation and Silt Abrasion for Hydrofoil in Silt-laden Water Flow

Zhang Tao<sup>1</sup> Chen Cichang<sup>2</sup> Guo Qing<sup>3</sup>

(1. School of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2. Mechatronic Engineering College, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

3. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 100011, China)

### Abstract

With the simulation of the flow in hydraulic machinery, experiments of cavitation, silt abrasion and their synergism on hydrofoil in the converging-diverging testing section were performed, and microscopic appearance along the damage surface was observed and depth distribution of damage was measured. The cavitation appearance shows like normal approximate round, and distributes randomly. According to the difference of action parameter on surface, silt abrasion appearance registers as wedging, relieving, ploughing, and cutting, etc. On the high particle content, the appearance of synergism mostly appears as particle wear in extreme angles (90° or 0°), and scale character on hydrofoil surface becomes more and more large than silt abrasion appearance along the position, and the depth of macro-damage is obviously bigger than single wear. On the low particle content, the microstructure probably appears as the coexistence of cavitation and silt abrasion.

**Key words** Hydrofoil, Silt-laden water flow, Cavitation, Silt abrasion, Microstructure

### 引言

空化现象在水力机械中难以避免,其大多会引起过流表面空蚀等后果<sup>[1]</sup>。空蚀的机理仍存在争

议,但微射流造成空蚀蚀坑的行为已被理论和试验验证<sup>[2]</sup>。空穴结构溃灭时发射的压力波是诱导壁面空泡形成微射流的原因,文献<sup>[3]</sup>提出了对空蚀破坏程度的量化方法。泥沙磨损是水力机械破坏的

收稿日期:2009-10-22 修回日期:2010-01-24

\* 国家自然科学基金资助项目(90410013)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20060615001)和四川省科技厅应用基础基金资助项目(2008JY0113)

作者简介:张涛,讲师,主要从事流体机械及计算流体力学研究,E-mail: zhangt@swpu.edu.cn

另一重要因素,单个泥沙颗粒磨损时会产生诸如沟槽、划痕、冲击坑等微观形貌,取决于材料性质与颗粒的运动<sup>[4]</sup>。通过磨损破坏试验分析及理论推导,已建立了一些磨损模型用于磨损预测<sup>[5]</sup>。

文献[6]研究了空蚀磨损同时存在时颗粒含量对空化初生的影响。文献[7]对附着在颗粒上的空泡生长过程进行分析,计算了空泡生长对颗粒的加速作用;文献[8]对单空泡溃灭过程所发射的压力波对颗粒的加速作用进行了建模求解。文献[9]认为部分颗粒会被微射流捕获并加速,从而促进磨损破坏。可见空蚀磨损联合作用时颗粒与空化相互作用方式还没有统一的认识。

本文对翼型开展空蚀磨损破坏试验,结合流场测试分析空蚀磨损相互作用的流场机理。

## 1 试验装置及方法

### 1.1 试验装置

开展试件破坏试验的装置为闭式试验台,试验段为收缩-扩散型(图1),试验段前后装备阀门以调节其进出口压力及内部压力分布,从而控制试件表面的空化空蚀行为。试验对象为Raf6-1翼型试件,取自轧制铝板(成分:95% Al, 5% Ni),弦长为120 mm。翼型水平置于试验段之中,其头部距喉部30 mm,在流向的右侧有约7°的扩散角<sup>[10]</sup>。

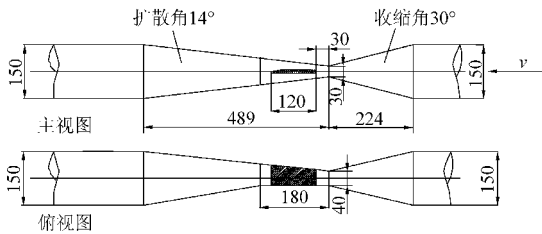


图1 试验段示意图

Fig. 1 Sketch of testing section

### 1.2 试验方法

试验前对翼型表面采用500、1000和2000目砂纸依次打磨,空蚀翼型沿垂直流动方向而磨损及联合作用则沿流动方向,采用XL300型电子扫描显微镜观测表面的微观形貌。试验后,对位于距翼型非扩散侧20 mm位置的断面从头部到尾部进行显微观测,获取破坏后的微观形貌,采用三维坐标测量仪测量该断面磨损及联合作用试验下的破坏深度。

翼型的破坏试验内容包括空蚀、磨损及联合作用破坏,其中磨损及联合作用破坏时水中添加均径为45 μm的石英砂,试验温度为27℃,试验对应的工况参数如表1所示。

表1 不同试验工况参数值

Tab. 1 Parameters for different experimental conditions

| 进出口压力<br>$p_1/p_2/\text{MPa}$ | 喉部平均速度<br>$v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 固相质量<br>浓度/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ | 试验时间<br>$t/\text{h}$ | 空化状态 |
|-------------------------------|--|--|----------------------|------|
| 0.321/0.093                   | 25                                       | /  | 10                   | 中等空化 |
| 0.547/0.390                   | 25                                       | 5/15                                     | 5/15                 | 无空化  |
| 0.321/0.093                   | 25                                       | 15                                       | 5/15                 | 中等空化 |

## 2 微观破坏形貌试验结果

### 2.1 材料原始表面形貌

图2为翼型表面初始微观形貌,其在竖直方向上有较长的打磨痕迹,痕迹较浅且宽度均远远小于1 μm。材料表面局部有缺陷坑(大小约几微米),坑周边较粗糙,坑的分布和形状无任何规律。总体上讲,原始材料表面平整而致密。

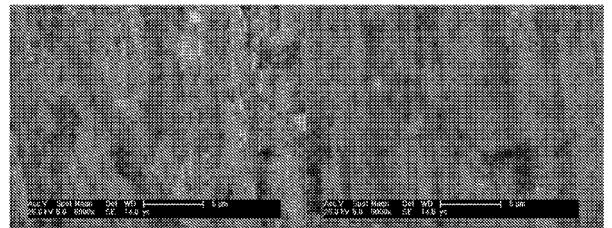


图2 试验前翼型表面微观形貌

Fig. 2 Original microscopic appearance on hydrofoil

### 2.2 空蚀破坏微观形貌

单纯空蚀破坏时,流场中翼型表面空穴结构自距头部20 mm初生,生长发展到80 mm处不断脱落,到尾部主流中溃灭,周期性重复该过程导致空蚀破坏。对翼型空蚀微观形貌的观测发现,微观形貌呈相互独立的近圆蚀坑,不同位置处形貌的差异仅为蚀坑个数不同。图3为有代表性的某位置不同放大倍数下空蚀破坏微观形貌,图中蚀坑小至几乎难以分辨到大至3~4 μm均有,但大小为1~2 μm的蚀坑占据了主导地位;在蚀坑深度(以图灰度进行判断)上却差异较大,无任何规律;蚀坑的分布随机性较大,图中相同大小圆个数多达十几个而少却只有4,5个。此外,材料表面未受破坏的形貌比原始形貌更加致密平整。

### 2.3 翼型磨损破坏微观形貌

根据颗粒的运动速度及冲击角度,材料磨损破坏微观形貌可划分为冲击坑、铲削、沟槽、划痕及切削形貌等类型<sup>[4]</sup>,如图4所示。本文对翼型测试断面从头部( $x$ 值为零)到尾部( $x$ 值为120 mm)进行磨损破坏微观形貌观测及分析。

图5a~5f分别为翼形头部及前部附近 $x$ 值约2.5、10、15、25及45 mm处磨损微观形貌。图5a主要以大角度(近垂直)冲击楔入坑为主,冲击坑尺寸

约在  $3\ \mu\text{m}$ , 且四周材料被挤压突出, 表面形貌较为粗糙, 也有部分不明显小凹坑。图 5b 主要是不同宽度和深度的中等角度冲击楔入坑 (宽可达  $4\sim 5\ \mu\text{m}$ ), 坑后侧有大量材料的堆积。图 5c 与图 5b 有较为类似的形貌特征, 但冲击角度减小、痕迹更长。图 5d 是冲击角度进一步减小情况下产生的, 出现一种切削和犁耕共同作用的形貌特征, 但切削作用较强, 表面光滑平整。图 5e 中冲击楔入坑少且

小, 沿流向犁耕形成的沟槽和划痕增多, 其特征是窄、浅但较长, 少量材料在其两边淤积; 同时, 材料碎屑在表面杂乱无章分布。图 5f 中材料在大量颗粒小角度 (约  $20^\circ$  乃至更小) 的冲击下形成小角度冲击坑, 坑的宽度小于  $1\ \mu\text{m}$ , 但长度可达  $3\sim 4\ \mu\text{m}$ ; 同时表面更多存在犁耕产生的沟槽及小划痕, 其长度大到  $5\ \mu\text{m}$  以上, 而宽度远小于  $1\ \mu\text{m}$ , 材料未被去除而置于沟的两侧; 总体上试件表面材料分布杂乱无章。

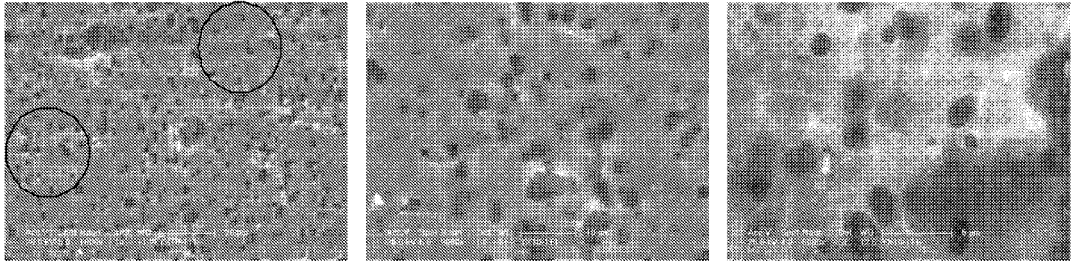


图 3 翼型中部不同放大倍数空蚀微观形貌

Fig. 3 Cavitation erosion appearance observed with different amplified times on hydrofoil

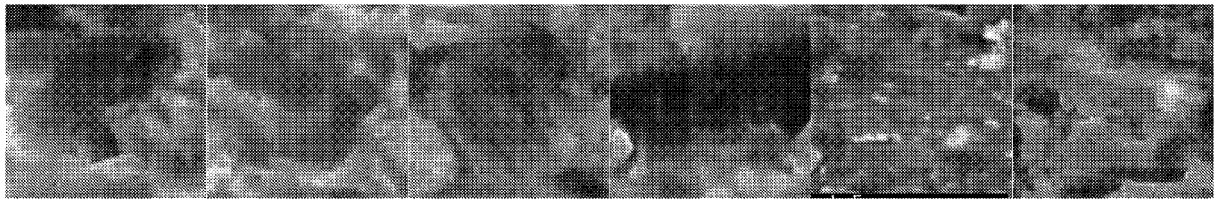


图 4 不同磨损破坏微观形貌

Fig. 4 Different types of microscopic appearance of silt abrasion

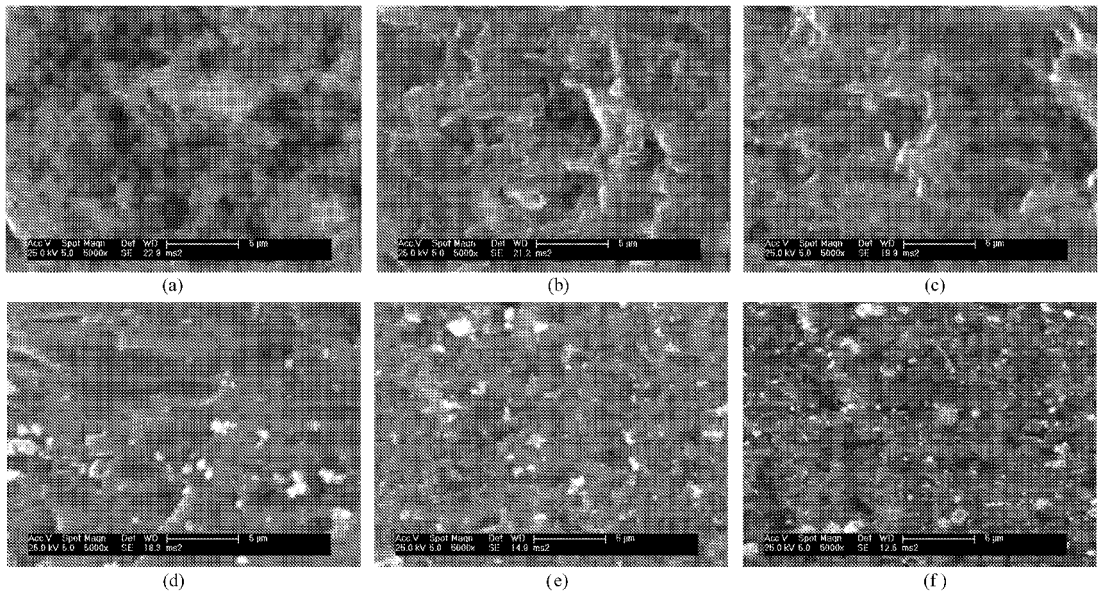


图 5 翼型头部及前部附近磨损微观形貌 (流向由左向右, 下各图同)

Fig. 5 Silt abrasion appearance around the leading edge of hydrofoil (fluid flows from left to right)

图 6a ~ 6f 分别为翼形中后部  $x$  约 65、70、75、95、105 和 110 mm 处的微观形貌。图 6a 中小角度的冲击坑仍大量存在, 其冲击角度与图 5f 比有所增大; 细长的沟槽和小划痕大量存在, 但其长度变短 (不超过  $3\ \mu\text{m}$ ) 而宽度更大 (达  $1\ \mu\text{m}$ ); 同时图中出

现了铲削形貌, 其大小可达  $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 。图 6b 与图 6a 形貌特征较为类似, 不过从该图中可以看到部分切削破坏的形貌特征。图 6a 及图 6b 中破坏形貌的方向都稍向流向的右侧偏转。图 6c 中小角度冲击坑和沟槽 (大小不超过  $2\ \mu\text{m}$ ) 是表面粗糙形貌的表现,

颗粒进一步在粗糙表面上作用产生了大量切削和铲削类型的破坏特征。图 6d 和图 6e 中,翼型表面在较大角度(约在  $40^\circ$ )的颗粒冲击下形貌变得非常粗糙,形成大量的冲击楔入坑,冲击坑的尺寸可达  $2 \sim$

$3 \mu\text{m}$ ;在此基础上一些铲削及沟槽对这些粗糙形貌进行了材料的去除,这些形貌的尺寸同样可达  $3 \mu\text{m}$  左右。图 6f 中翼型表面破坏形貌与前两幅图并无太大的差异,表现为较大尺度的破坏。

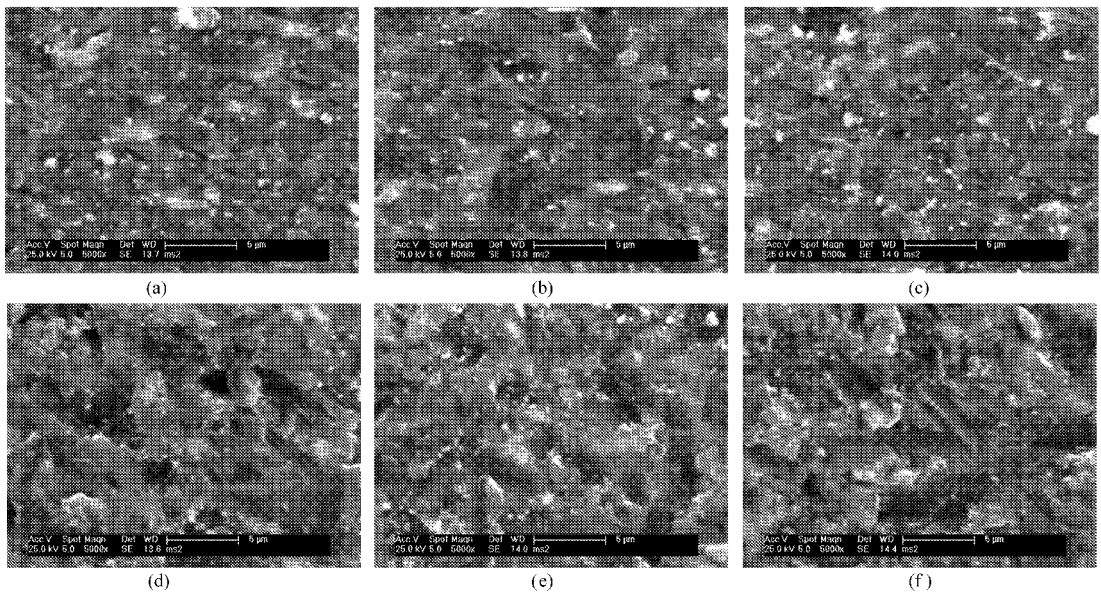


图 6 翼型中后部磨损破坏微观形貌

Fig. 6 Silt abrasion appearance of middle part to leading edge of hydrofoil

## 2.4 联合作用破坏微观形貌

### (1) 低固相质量浓度

在表 1 中颗粒质量浓度为  $5 \text{ g/L}$  的试验条件下,开展空蚀磨损联合作用破坏试验,此时空化数与单纯空蚀时相同。图 7a ~ 7c 为该试验条件下  $x$  约 40、75 及  $100 \text{ mm}$  处联合作用破坏形貌。图 7a 中存在较为明显和完整的空蚀蚀坑形貌,材料表面与空蚀破坏时一样具有平整致密的特征;同时存在颗粒磨损所带来小冲击坑和划痕形貌,但其作用力度较弱。图 7b 中仍然可以观测到空蚀蚀坑,但已受到大尺度磨损形貌的影响;磨损破坏形貌在图中占据了主导地位,主要表现是小角度(小于  $20^\circ$ )条件下的冲击楔入坑(尺寸在  $2 \sim 3 \mu\text{m}$ )、切削及大尺度沟槽(长达  $8 \sim 9 \mu\text{m}$ ,宽度可达  $2 \mu\text{m}$ )。图 7c 中空蚀破坏蚀坑形貌不复存在,颗粒对试件表面的冲击磨损破坏形貌占据了绝对主导地位。磨损破坏形貌类型

有大尺度的切削破坏(长宽可达  $10 \mu\text{m}$ )、小角度(小于  $20^\circ$ )的冲击楔入坑、犁耕类沟槽(大小十几个微米)以及划痕等。与同位置单纯的磨损相比,该位置的破坏联合作用方式发生巨大变化。

### (2) 较高固相质量浓度

同样在与单纯空蚀空化数相同工况下,以含沙质量浓度  $15 \text{ g/L}$  进行翼型的空蚀磨损联合作用破坏试验。由于翼型头部附近只存在泥沙磨损破坏,与单纯磨损特征应较为类似,本文不作重复描述。图 8a ~ 8i 分别为  $x$  值约 30、38、50、60、70、80、90、105 和  $110 \text{ mm}$  处空蚀磨损联合作用破坏微观形貌。

图 8a 中破坏形貌没有体现空蚀破坏的形貌特征,主要表现为颗粒冲击磨损破坏,但与单纯磨损破坏有着较大的差异;形貌主要以不同角度及大小的冲击坑、小划痕以及沟槽构成,这些形貌共同点是尺度小、特征不明显,小角度的冲击坑、划痕及沟槽也

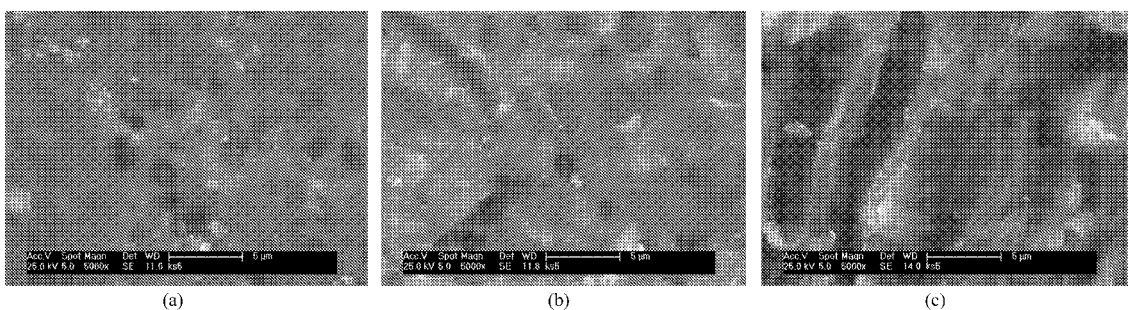


图 7 颗粒质量浓度  $5 \text{ g/L}$  条件下联合作用形貌

Fig. 7 Microscopic appearance of cavitation and silt synergetic erosion, silt content equal  $5 \text{ g/L}$

起到了主要的破坏作用;同时,图中体现部分较弱的大角度冲击坑。图 8b 的破坏形貌与前者类似,但大角度的冲击坑增多且力度有所增大。图 8c 中同样没有出现空蚀蚀坑,而大量达  $4 \sim 5 \mu\text{m}$  的大角度冲击坑特征最为明显,一些相对小的大角度冲击坑分布在不同的位置;坑周围粗糙材料被切削、铲削和划痕沟槽等方式破坏,这些形貌根据位置不同变化较大,也可达  $3 \sim 4 \mu\text{m}$ ;可以看出,破坏形貌被颗粒冲击时的角度表现出了两种极端(接近  $90^\circ$  的冲击楔入坑及近  $0^\circ$  的切削破坏)。图 8d 的微观破坏形貌与图 8c 无太大的差异。

图 8e 中达  $3 \sim 4 \mu\text{m}$  大尺度大角度冲击坑及大量的小尺度大角度冲击坑仍是破坏形貌的主要特

征,但与上两幅图不同的是,大面积的小角度切削破坏形貌特征表现非常明显。图 8f 中的微观破坏形貌与图 8e 非常相似,只是切削破坏形貌特征稍有减弱。图 8g 中破坏微观形貌的主要特征是较大角度不同尺度(大到  $4 \mu\text{m}$  左右)的冲击楔入坑,坑周围突出的粗糙部分随之被切削类型、沟槽及铲削等方式进一步破坏,同时形貌开始具有一定的方向性(流动方向右侧)。图 8h 和图 8i 两图的破坏形貌较为相似,均为包括较大角度的冲击楔入坑、犁耕类沟槽和铲削形貌在内的大尺度形貌,其尺寸一般可达  $4 \sim 5 \mu\text{m}$ ,大到  $10 \mu\text{m}$ ,同时其方向稍稍偏向流动方向的右侧;同时大量的小冲击坑、划痕及切削形貌仍然在图中有较为明显的体现。

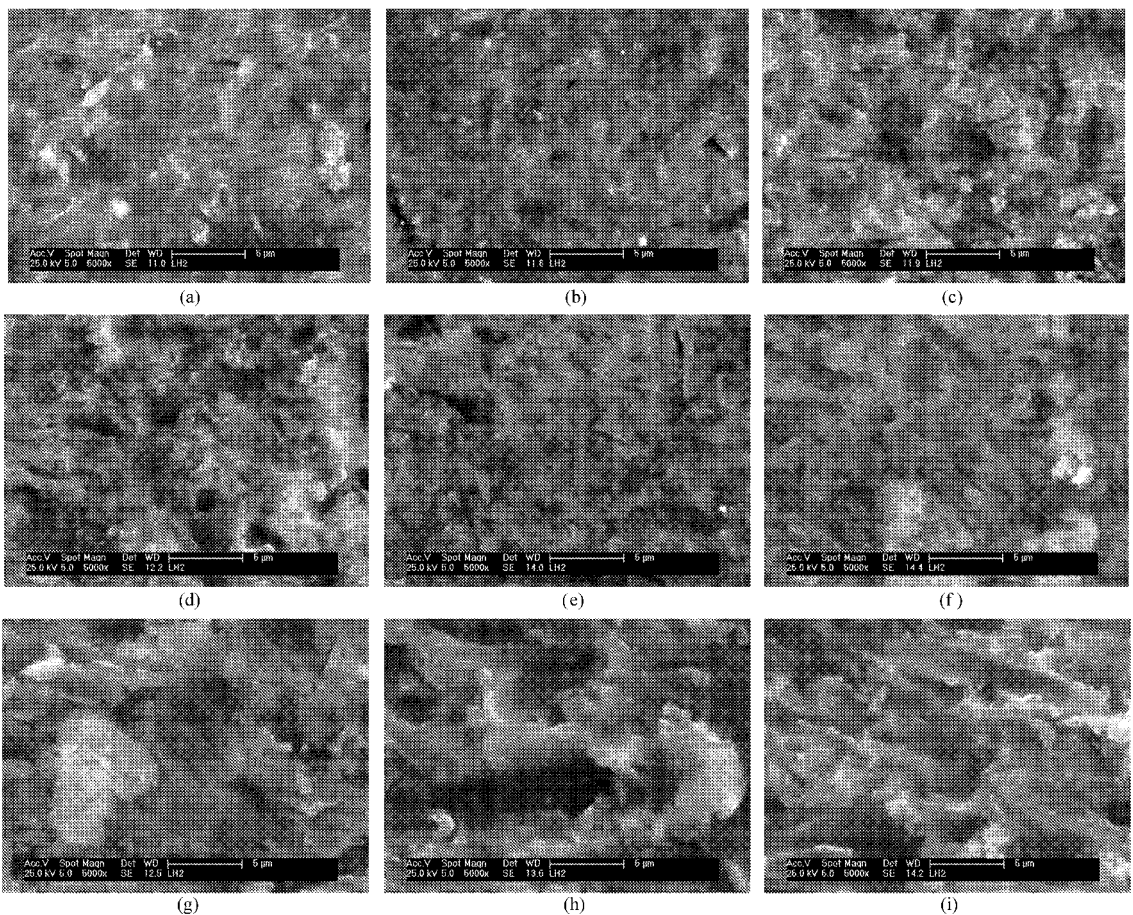


图 8 颗粒质量浓度  $15 \text{ g/L}$  时联合作用破坏形貌

Fig. 8 Microscopic appearance of cavitation & silt synergistic erosion, silt content equal  $15 \text{ g/L}$

### 3 空蚀磨损宏观破坏特征

#### 3.1 翼型空蚀特征

图 9 展示了经  $15 \text{ h}$  空蚀破坏后翼型全貌。对比破坏前后翼型全貌看出,翼型整体结构无宏观变形,材料色泽变化不明显。但在翼型中后部出现了肉眼能够观测到的材料空蚀破坏特征。

#### 3.2 翼型磨损破坏特征

在表 1 工况下的磨损破坏后,翼型头部发生了

整体塑性变形(图 10)。测量由  $x$  约  $40 \text{ mm}$  到尾部磨损深度分布(图 11)可见,从  $x$  约  $40 \text{ mm}$  到  $60 \text{ mm}$  段破坏程度较弱,每小时破坏深度约  $0.005 \text{ mm}$ ,且这区段内破坏程度的变化也不大。从  $x$  约  $60 \text{ mm}$  到  $110 \text{ mm}$  位置,破坏程度急剧增大,由  $60 \text{ mm}$  处的  $0.005 \text{ mm/h}$  增大到  $110 \text{ mm}$  处的  $0.027 \text{ mm/h}$ ,达到最大破坏值。由  $x$  约  $110 \text{ mm}$  到尾部,翼型表面破坏程度有减小的趋势,但破坏仍然较大。

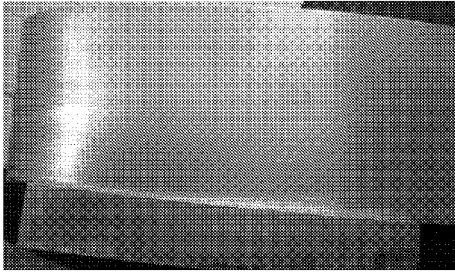


图9 空蚀后翼型全貌

Fig. 9 Hydrofoil after cavitation erosion

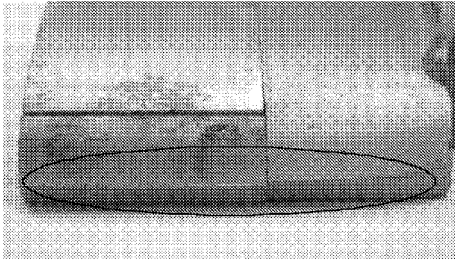


图10 磨损翼型头部的整体变形(已切割)

Fig. 10 Leading edge of hydrofoil after silt abrasion

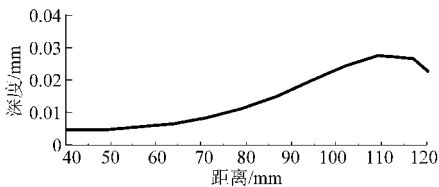


图11 翼型磨损破坏深度分布

Fig. 11 Distribution of silt abrasion depth

### 3.3 联合作用破坏深度

图12为空蚀磨损联合作用破坏后翼型全貌图。此时头部为与磨损时相同的整体变形,而其他位置肉眼不能识别到破坏特征,但翼型整体明显变薄。

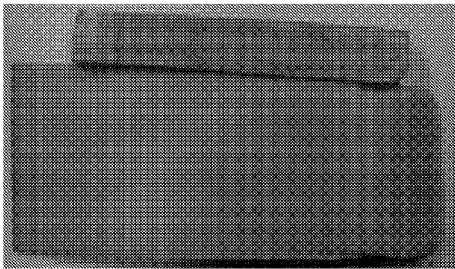


图12 空蚀磨损后翼型全貌

Fig. 12 Hydrofoil after cavitation &amp; silt synergistic erosion

破坏深度的测试范围为从距头部40 mm处到尾部。图13是该断面中后部破坏深度分布。由图中可见,在40 mm处破坏只有0.005 mm/h,与磨损时较接近;但随位置的不不断后移,联合作用破坏的深度不断增大,110 mm左右达到0.05 mm/h的水平,是40 mm处破坏能力的10倍;在110 mm以后,破坏深度的变化不显著。

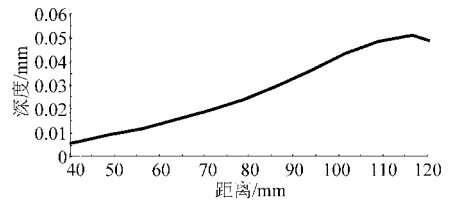


图13 翼型联合作用破坏深度分布

Fig. 13 Distribution of cavitation &amp; silt synergistic erosion depth

## 4 试验结果分析

通过对翼型表面受空蚀磨损破坏的微观形貌观测分析可知,空蚀微观形貌规律性强,表现为相互独立且近圆形规则坑,坑大小以 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 为主;坑数目密集程度随翼型表面位置(对应空化过程中生长、发展、脱落及溃灭位置)变化,但在局部位置的分布则无规律可言。

单纯磨损破坏时,破坏形貌主要取决于颗粒随流体绕流时的运动速度及冲击角度,头部附近以大角度冲击形成 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 的冲击坑为主;绕流时主要形成长达 $5 \sim 6 \mu\text{m}$ 而宽度极小的小角度划痕、沟槽等形貌;到达翼型中后部,作用方式再次逐渐变为中小角度的冲击,形成了较为明显的冲击坑、铲削等类型形貌,其尺度也达 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 。在破坏深度上,除头部发生整体的变形外,尾部的中小角度冲击破坏带来最大的破坏深度。

颗粒质量浓度为 $5 \text{ g/L}$ 时,翼型中前部微观形貌体现了空蚀和磨损单独破坏时的特征,但空蚀坑不如单纯空蚀时数目多,而磨损形貌特征与单纯磨损明显不同;翼型尾部只表现出颗粒磨损破坏,其形貌在尺度上远大于单纯磨损。含沙质量浓度为 $15 \text{ g/L}$ 时,整个表面无空蚀蚀坑,微观形貌表现为颗粒对材料的直接磨损破坏;从翼型中前部到尾部,占主导的大角度冲击磨损形貌尺度随位置后移不断增大且远大于单纯磨损破坏时的形貌尺度;此外,在翼型中部大面积的切削磨损形貌体现了极小角度的磨损破坏方式。从宏观破坏看,头部仍是整体变形,中后部破坏深度随位置后移而迅速增大,尾部最大处是磨损最大处的两倍。

## 5 结束语

在收缩-扩散型试验段中,得到翼型空蚀、磨损及两者联合作用下微观破坏形貌特征及破坏深度分布。微观形貌源于流场中单个破坏行为(微射流或泥沙颗粒冲击等)对材料的作用,因此其特征体现了微射流或泥沙颗粒在流场中的运动规律,通过其可以推测空化行为和泥沙颗粒流场中相互作用的机

理。进一步对流场的研究将可以结合分析得到水力基础。  
机械空蚀磨损破坏的机理,为解决工程问题打下

## 参 考 文 献

- 1 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):56~64.  
Duan S X. The cavitation and abrasion damage condition of hydraulic turbine and countermeasures in China[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2001(6):56~64. (in Chinese)
- 2 Dular M, Bachert B, Stoffel B, et al. Relationship between cavitation structure and cavitation damage [J]. Wear, 2004, 257(11):1 176~1 184.
- 3 Dular M, Stoffel B, Širok B. Development of a cavitation erosion model [J]. Wear, 2006, 261(5~6):642~655.
- 4 Sato J, Usami K, Okamura T, et al. Basic study of coupled damage caused by silt abrasion and cavitation erosion[J]. JSME International Journal: A, 1991, 57(539):20~25.
- 5 服部修次, 原田健司, 杉山宪一. スラリー摩耗の衝突角度依存性に関する簡易予測法[J]. ターボ機械, 2005, 33(7):443~451.
- 6 Toshima M, Okamura T, Satoh J, et al. Basic study of coupled damage caused by silt abrasion and cavitation erosion[J]. JSME International Journal: B, 1991, 57(539):20~25.
- 7 Borkent B M, Arora M, Ohl C D, et al. The acceleration of solid particles subjected to cavitation nucleation[J]. J. Fluid Mech., 2008, 610:157~182.
- 8 倪汉根, 何子干. 空泡溃灭冲击波对流场携带颗粒的作用[J]. 大连理工大学学报, 1994, 34(6):727~731.
- 9 Li Shengcai. Cavitation enhancement of silt erosion—an envisaged micro model [J]. Wear, 2005, 260(9~10):1 145~1 150.
- 10 陈丰, 陈次昌, 张涛. 空蚀磨损试验装置及其数据处理系统[J]. 农业机械学报, 2007, 38(8):93~96.  
Chen F, Chen C C, Zhang T. Experimental system of wear-cavitation and system of data real-time disposal[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8):93~96. (in Chinese)

(上接第 7 页)

- 7 Qian J, Law C K. Regimes of coalescence and separation in droplet collision[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 331:59~80.
- 8 Chen R. Diesel-diesel and diesel-ethanol drop collisions[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(2~3):604~610.
- 9 Cecilie G, Pavel H, Hugo A. Effect of viscosity on droplet-droplet collision outcome; experimental study and numerical comparison[J]. Physics of Fluids, 2007, 19(10):1 021 061~1 021 067.
- 10 Brenn G. The formation of satellite droplets by unstable binary drop collisions[J]. Physics of Fluids, 2001, 13:2 463~2 477.
- 11 Brenn G, Kolobaric V. Satellite droplet formation by unstable binary drop collisions[J]. Physics of Fluids, 2006, 18(8):0871011~0871018.
- 12 Pan Y, Suga K. Numerical simulation of binary liquid droplet collision[J]. Physics of Fluids, 2005, 17(8):0821051~0821054.
- 13 Ko G H, Ryou H S. Droplet collision processes in an inter-spray impingement system[J]. Journal of Aerosol Science, 2005, 36(11):1 300~1 321.
- 14 Ko G H, Ryou H S. Modeling of droplet collision-induced breakup process[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2005, 31(6):723~738.
- 15 Munnannur A. Droplet collision modeling in multi-dimensional engine spray computations[D]. Madison: University of Wisconsin, 2007.
- 16 Schmidt D P, Rutland C J. A new droplet collision algorithm[J]. J. Comput. Phys., 2000, 164(1):62~80.
- 17 Schmidt D P, Rutland C J. Reducing grid dependency in droplet collision modeling[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(2):227~233.
- 18 Nordin N. A mesh independent collision condition for Lagrangian sprays[D]. Gothenburg, SE: Chalmers University of Technology, 2000.
- 19 Hiroyasu H, Arai M. Structures of fuel sprays in diesel engines[C]. SAE Paper 900475, 1990.
- 20 Su T F. An experimental study of high injection pressure diesel sprays[D]. Madison: University of Wisconsin, 2005.