

# 抗磨蚀材料失效过程的微观特性

王 颺<sup>1</sup>, 王宇栋<sup>1</sup>, 张自华<sup>1</sup>, 何筱奎<sup>2</sup>, 诸小丽<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学机械学院, 昆明 650051; 2. 黄河水利科学研究院, 郑州 450000)

**[摘要]** 用光学显微镜、扫描电镜、电子探针和 X 射线衍射, 对抗汽蚀较优的硼不锈钢堆焊层和抗磨蚀较优的碳化钨陶瓷堆焊层的原样、汽蚀后样和磨蚀后样进行了微观分析研究。结果表明, 硼不锈钢堆焊层是较好的抗汽蚀材料, 但抗磨蚀效果不理想; 碳化钨对磨蚀损坏有良好的屏障作用; 磨蚀坑是气泡溃灭产生的脉冲式法向负压力和脉冲式泥沙冲击切向分力联合作用的结果。

**[关键词]** 抗汽蚀; 抗磨蚀; 微观特性

## 1 引言

瑞士学者 A. Karimi 根据汽蚀合金的电镜分析资料, 提出了在汽蚀环境下, 材料破损的机理<sup>[1]</sup>。但关于在含泥沙水介质中, 材料磨蚀损坏机理的研究, 至今不见报道。本文试图对文献 [2] 中得出的代表性抗汽蚀材料 (堆焊硼不锈钢) 和抗磨蚀材料 (堆焊碳化钨陶瓷), 经汽蚀或磨蚀作用后, 观察其微观特性变化, 所获得的有关微观资料, 可作为提出材料磨蚀损坏机制的试验基础。另外, 上述代表性材料的微观特性研究中所获得的信息, 也可作为材料抗汽蚀和抗磨蚀性优劣的评判依据, 为设计更抗磨蚀的新材料提供思路。

## 2 材料与研究方法

代表性抗磨蚀材料是在 18-8 不锈钢基材上, 用电弧焊堆焊上碳化钨 (WC) 陶瓷片, 以 102 不锈钢焊条作粘结相 (简称“堆 WC”)。代表性抗汽蚀材料是在 18-8 不锈钢基材上, 用电弧焊堆焊上硼不锈钢焊条 (简称“堆 BSS”)。上述 2 种复合材料形成后, 车削和磨削加工成  $\phi 30$ , 厚 6 mm 的汽蚀或磨蚀试样, 机加工后, 堆焊层的厚度不小于

1.0 mm。磨蚀和汽蚀在 30 kW 电机驱动的  $\phi 350$  转盘式 NC 型空蚀机上进行。汽蚀试验在不含泥沙的自来水中进行, 磨蚀试验在含泥沙  $35 \text{ kg/m}^3$  的天然水中进行。上述 2 种堆焊材料的每一种均做成 3 种试样 (堆焊原样、堆焊并汽蚀损坏的试样、堆焊并磨蚀损坏的试样), 分别用金相显微镜、扫描电镜、电子探针和 X 射线衍射等手段, 对每种材料的 3 种试样进行分析研究。

## 3 结果与讨论

### 3.1 代表性抗磨蚀材料堆焊 WC 的微观特征研究

松脆的 WC 陶瓷片, 堆焊于 18-8 不锈钢母材上, 所形成的堆焊层是 WC 陶瓷相与粘结合金相的混合物, 不再松脆, 而变为具有较好的韧性和较高硬度。堆焊后表面是凸凹不平的 (类似菠萝表层), 需经过磨削加工到光滑。

图 1 为堆焊磨削后, WC 堆焊层原样的显微图片。从整体上看, WC 堆焊层主要由块状或条状的 WC 陶瓷片和包围着这些陶瓷片的低熔点粘结相组成。粘结相成分即为焊条成分。堆焊层中 WC 陶瓷块的大小差异很大, 小的等效直径仅  $1.5 \mu\text{m}$ , 大的达  $30\sim 35 \mu\text{m}$  长的条状和  $15\sim 25 \mu\text{m}$  的块状。

**[收稿日期]** 2000-03-18; 修回日期 2000-12-18

**[基金项目]** 国家自然科学基金资助项目 (59461002)

**[作者简介]** 王 颺 (1940-), 男, 云南昆明市人, 昆明理工大学机械学院教授



图 1 WC 堆焊层原样显微图片 (×600)  
Fig.1 Micrograph of weld deposited WC

此外，堆焊层中尚有部分鱼骨状枝晶，这是因堆焊熔池中存在较大的成分偏析和过冷度所致。在电弧高温下，部分 WC (熔点 1 600℃) 已熔化，并与粘合金相互融。但因熔池存在时间短，不足以达到熔体中合金成分扩散均匀，含 WC 较多的高熔点区域，优先结晶成枝晶骨架，未熔化完的 WC

固体颗粒也会成为优先结晶的核心，形成枝晶的主枝，含焊条成分较多的低熔点粘结相，最后结晶充填于枝晶之间。此外，在 WC 堆焊层内，尚有少量黑块，这是焊条药皮带入的夹杂物或孔洞<sup>[3]</sup>。

图 2 为 WC 堆焊层经汽蚀损坏后的扫描电镜图片。图 2 (a) 为样品表面 50 倍放大，图中可看出样品表面分布着较多近于圆形，边缘较圆滑的汽蚀坑，坑孔直径在 40~100 μm 之间。图 2 (b) 为图 2 (a) 中个别汽蚀坑的高倍放大。从图 2 (b) 中可见，汽蚀坑较深，借助扫描电镜，也看不到坑内深部或坑底的细节，另外，也可看出，在一个汽蚀坑内部，尚包含几个更小的汽蚀坑，这是紧靠的几个汽蚀坑合并所致。

图 3 为 WC 堆焊层经泥沙水磨蚀损坏后的扫描电镜图片。图 3 (a) 为样品表面低倍放大。从图 3 (a) 中可见，在样品表面分布着密集的磨蚀坑，磨蚀坑与汽蚀坑所不同的是，坑孔面积大，孔深浅，坑孔边缘破损不规则。这是因在早期汽蚀形成坑孔

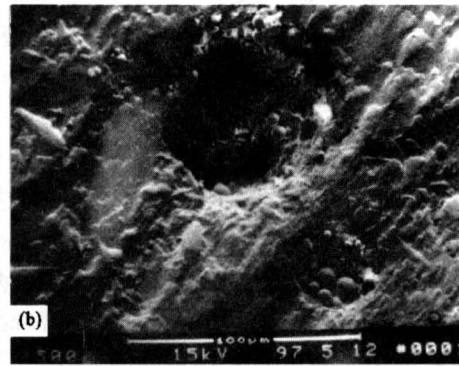
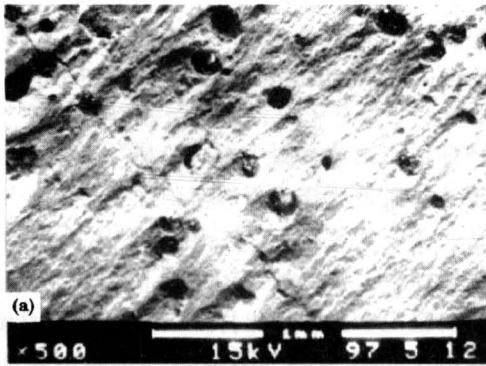


图 2 堆 WC 汽蚀 23 h 后的 SEM 二次电子像  
Fig.2 SEM micrograph of weld deposited WC after cavitation

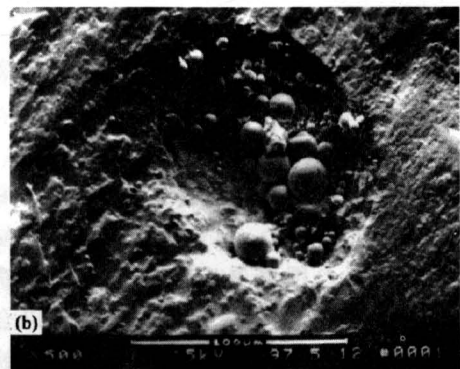
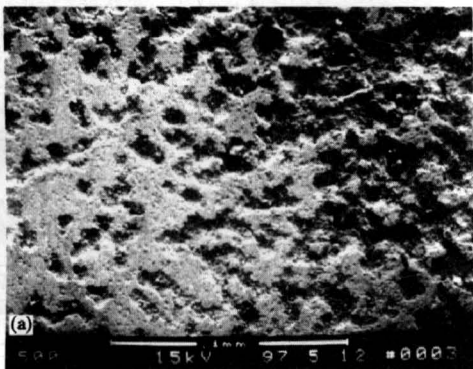


图 3 堆 WC 磨蚀 23 h 后的 SEM 二次电子像  
Fig.3 SEM micrograph of weld deposited WC after erosion

的基础上,掺入了泥沙冲刷磨损样品表面的作用,使磨蚀坑孔周边受到严重损伤。因此,磨蚀坑具有汽蚀损坏特征(坑孔),也具有磨损损坏特征(破边)。图3(b)为图3(a)的个别磨蚀坑的高倍放大,与汽蚀坑相比,坑孔面积较大,孔径在80~150 $\mu\text{m}$ 之间,但坑孔较浅,坑内充满的小球是泥沙水中的沙粒进入坑孔的结果。

图4(a)和图4(b)分别为堆WC原样与磨蚀后样的钨元素面分布电子探针扫描图,在堆焊原样中,钨元素的分布大体是均匀的。图4(b)是

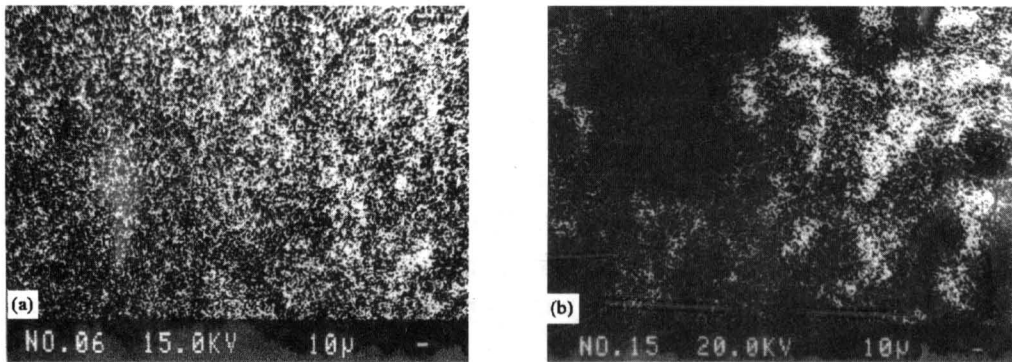


图4 堆WC原样(a)和磨蚀后样(b)的W元素EP面扫描图

Fig.4 EP micrograph of W distribution in welded deposited WC before (a) and after Erosion (b)

堆WC原样和磨蚀后样的X射线衍射相分析结果,笔者已在文献[4]中作过详细报道。在堆焊原样中有 $\text{Fe}_3\text{C}$ ,  $(\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}\cdot\text{Fe}_3\text{W}_2\text{C})$ 和 $\text{CoW}_3\text{C}$ 3个主体相,在经23h磨蚀过的磨蚀后样中,由焊条带入的主体相 $\text{Fe}_3\text{C}$ 因抗磨蚀性能差而被磨蚀脱落,其衍射峰消失。而由陶瓷片带入的 $\text{CoW}_3\text{C}$ 和在堆焊过程中由陶瓷片与焊条成分反应合成的复合相 $(\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}\cdot\text{Fe}_3\text{W}_2\text{C})$ ,则因抗磨蚀性能优而继续保留于基材表面,其衍射峰强度变化不大。由此也可看出钨钴碳化物陶瓷相对磨蚀的屏障作用。

### 3.2 代表性抗汽蚀材料, 硼不锈钢堆焊层的微观特性研究

硼不锈钢堆焊层的硬度为HRC46—49<sup>[2]</sup>,因没有坚硬相存在,打磨表面比较容易。图5为硼不锈钢堆焊原样的显微图片。从图5可见,堆焊层中主体相是奥氏体,包围着奥氏体的是 $\alpha$ 相(铁素体),因硼不锈钢焊条含硼量并不高,硼仅以合金元素形式固溶于 $\gamma$ 相(奥氏体)中或者 $\alpha$ 相(铁素体)中,而未形成单独的硼化物。

图6为硼不锈钢堆焊层经23h汽蚀后样品表面的扫描电镜图片。从图6可见,堆焊表层并未出

与图3(b)对应的磨蚀坑部位拍下的钨元素分布图片。图4(b)与图3(b)和图4(a)对照,便可看出,出现磨蚀坑的部位,WC已被磨蚀脱落,而WC尚存在的区域,则尚未出现明显磨蚀坑,这表明WC硬面层是抵抗磨蚀损坏的屏障。一般而言,磨蚀坑总是优先在原样中因堆焊成分不均匀或因存在堆焊裂纹而使WC缺空的部位出现,或是虽有WC,但因WC层与基材结合不够牢固而优先脱落的部位出现。

现任何汽蚀坑,图中的“阶梯”状表面,并非汽蚀损坏,而是原样表面的车削加工刀痕。从图6还可见,硼不锈钢的抗汽蚀性能是比较好的,经23h强汽蚀后,仅机加工刀痕台阶顶部受到少量损伤。用肉眼观察,看不出样品表面有任何明显变化。对照图2(a)和图6可看出,堆硼不锈钢比堆WC有更优的抗汽蚀性能。这结果与文献[2]中失重检测结果一致。

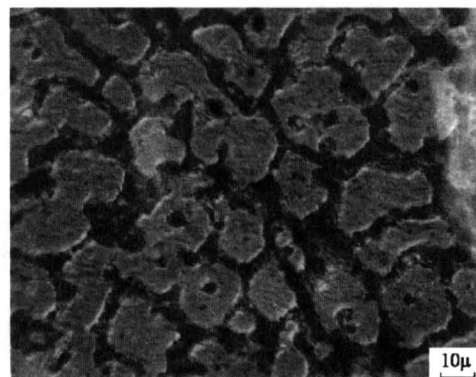


图5 硼不锈钢堆焊层显微图片( $\times 500$ )

Fig.5 Micrograph of welded deposited BSS ( $\times 500$ )

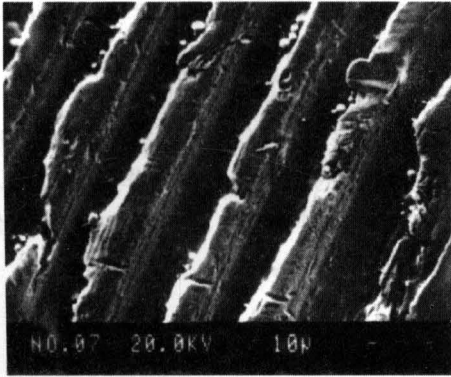


图 6 堆 BSS 汽蚀 23 h 后的二次电子像 ( $\times 100$ )

Fig.6 SEM micrograph of weld deposited BSS after cavitation

图 7 为硼不锈钢堆焊层经 23 h 磨蚀后的表面扫描电镜图片。从图 7 可见，经泥沙水磨蚀作用后，样品受到泥沙的严重冲刷磨损，边缘已出现明显的宏观磨蚀沟槽和塌陷。样品中心部位，原机加工的刀痕已被泥沙磨损接近消失，表面受到大面积不均匀减薄，样品中心部位的磨蚀痕迹密集分布，周边有不规则的浅表坑，其等效直径在  $60 \sim 200 \mu\text{m}$  之间，并且个别边缘部分深宽的磨蚀沟正在向中心部位发展。上述磨蚀特征可认为是以泥沙冲刷磨损为主的失效特征。由于磨蚀坑周边较长、坑浅，类似球压痕迹，因此泥沙水介质中所含泥沙在坑内无法停留和集存。磨损浅坑可认为是材料表面受到介质中泥沙颗粒的多次脉冲式冲击碰撞，使受冲击微区产生疲劳断裂（掉片）而形成的，靠近的几个磨蚀坑合并变成较大磨蚀坑。沿泥沙冲刷方向的若干磨蚀坑合并，则变成磨蚀沟槽。上述结果与文献 [2] 中失重法测出的结果一致。

图 3 (a) 和 (b) 与图 7 对照，可看出，堆 WC 陶瓷与堆硼不锈钢的磨蚀特征是完全不同的：前者既有明显的汽蚀损坏特征，也有较明显的泥沙磨损特征，但汽蚀起先导作用；而后者主要是泥沙冲刷全面积磨蚀失效，汽蚀损坏的成分较少。此外，从图 3 和图 7 的分析结果还可看出，在同等的磨蚀条件下（含泥沙量、流动速度、磨蚀时间均相同），堆 WC 与堆硼不锈钢的磨蚀样显著不同：前者仅在汽蚀坑周边区域有明显的磨蚀脱落或材料迁移；而后者则整个暴露表面均受严重冲刷磨损，出现全面积的磨蚀脱落或材料迁移。由此可看出，WC 硬面层因其较高的硬度和抗磨蚀性，对含泥沙水介质的冲击磨损有较好抵抗力，对基材免受磨蚀

起到保护或屏障作用。

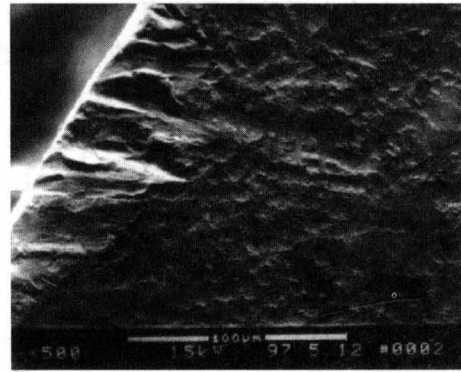


图 7 堆 BSS 磨蚀 23 h 的 SEM 二次电子像 ( $\times 50$ )

Fig.7 SEM micrograph of weld deposited BSS after Erosion ( $\times 50$ )

硼不锈钢堆焊原样和磨蚀后样的 X 射线衍射相分析结果为：在堆焊原样中有 CrFeNi,  $\alpha\text{Fe}$ , FeNi 和 NiCrFe 4 种主体相，经 23 h 的强磨蚀作用后，NiCrFe 相的衍射峰已近完全消失。 $\alpha\text{Fe}$  和 FeNi 两主体相的衍射峰强度已损失近 80%，只有 CrFeNi 主体相的衍射峰变化不大。

### 3.3 分析讨论

据上述试验结果，对汽蚀和磨蚀损坏机理可作出如下分析：比较图 2 (a) 和图 3 (a) 并比较图 2 (b) 和图 3 (b)，明显看出汽蚀坑是边缘近于圆形的深孔，而磨蚀坑是边缘较宽大破烂的，周边较浅而中心较深的台式孔，形如局部掉片后的痕迹。由此可预测，在汽蚀环境下，样品表面局部位置受脉冲式法向拉应力的多次作用，这种力来自汽泡溃灭时产生的负压。在磨蚀环境下，样品表面除受上述脉冲式法向负压力（拉应力）的作用外，还受高速运动泥沙冲击力的作用。脉冲式法向负压力多次作用的结果是使材料表面局部疲劳破断，出现近于圆形的坑孔。泥沙冲击力一般是非法向力，非法向冲击力的切向分力作用于材料表面时，首先使结合力不对称的坑孔周边部分（最薄弱的部分）逐步破断脱离母体。其逐步破断过程为：冲刷时，泥沙颗粒的动能传递给材料局部区域，并转变为材料的势能（弹性应变能），泥沙颗粒的冲击也是脉冲式和多次性的。泥沙颗粒多次脉冲式冲击的结果，使材料产生塑性应变以致加工硬化，最后逐步破断。法向负压力和泥沙冲击切向分力，哪个作用更大？汽蚀损坏与泥沙磨损损坏，哪个作用大？这需根据流体的



状况和材料的性能综合考虑才能回答。两个极端的情况是：当水流中泥沙含量较高（如  $35 \text{ kg/m}^3$ ），材料的硬度又较低时，材料的损坏以泥沙磨损为主，上述硼不锈钢堆焊磨蚀损坏属此情况；反之，当水流中不含泥沙，而材料本身的硬度又较高时，法向力的作用更大，材料的损坏以汽蚀为主，上述堆焊 WC 陶瓷片的汽蚀试验属此情况。

#### 4 结论

1) 上述研究结果表明，硼不锈钢是抗汽蚀优良的材料。这一结论与失重法和宏观性能测试的结果一致。但须指出，因这类钢中缺乏抗磨蚀的强化陶瓷相，硬度不够高，抗磨蚀性差，不宜在含泥沙较多的水流中使用。

2) 研究表明，WC 陶瓷材料对磨蚀有很好的防护屏障作用。把 WC 牢固地固定在母材（钢）上，形成硬面陶瓷有各种方法。堆焊法因有 WC 在堆焊层中宏观上分布不均匀，内裂纹较多，支持固定 WC 的粘结相抗汽蚀和抗磨蚀性差以及表面

严重凸凹等缺点，使 WC 的上述屏障作用未获得充分发挥，有必要开发能克服堆焊 WC 上述缺点的新型硬面材料。

3) 材料的磨蚀损坏是气泡溃灭产生的法向负压力与泥沙冲刷的切向分力联合作用的结果。法向负压力使材料产生汽蚀坑，而切向冲刷分力使坑孔的周边首先逐步破断。

#### 参考文献

- [1] Karimi A. Cavitation erosion of materials[J]. *Inter Materials Rev*, 1996, 41(2): 154~162
- [2] 王 飏. 金属材料的抗磨蚀性判据研究[A]. 1996 中国材料科学研讨会论文集(IV)[C]. 化学工业出版社, 1997. 485~489
- [3] Cheng Beli. 焊接冶金学原理[M]. 清华大学出版社, 1991. 297~316
- [4] 王 飏. (WC-M)硬面陶瓷复材及其在水轮机中的应用研究[A]. 1998 中国材料科学研讨会论文集(下卷)[C]. 化学工业出版社, 1999. 864~868

## Failure Processes Micro-characteristic Studies of Two Materials to Resist Cavitation Erosion and to Resist Erosion and Abrasion

Wang Biao<sup>1</sup>, Wang Yudong<sup>1</sup>, Zhang Zihua<sup>1</sup>, He Xiaokui<sup>2</sup>, Zhu Xiaoli<sup>1</sup>

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China;

2. Water Conservancy Science Research Institute of the Huanghe River, Zhengzhou 450000, China)

[Abstract] A typical cavitation erosion resisting sample, the weld deposited coating of boronic stainless steel, and a typical erosion and abrasion resisting sample, the weld deposited coating of WC ceramic are micro-analyzed and studied by means of light microscope, scanning electron microscope(SEM), electron probe and X-rays diffraction. The obtained results indicate that the weld deposited coating of boronic stainless steel has better resistance to cavitation eroion, while weld deposited coating of WC ceramics is a better barrier to erosion and abrasion. Forthermore, the material failure from erosion and abrasion is resulted from the combining actions of the minus pressure because of bubble crumbling and the tangential componental force caused by the dashing of silt granular.

[Key words] cavitation erosion; erosion and abrasion; micro-characteristic