

# 高锰铝青铜焊缝在 3.5%NaCl 溶液中的空蚀行为

闫永贵, 马力

(海洋腐蚀与防护国防科技重点实验室 洛阳船舶材料研究所青岛分部, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 利用磁致伸缩空蚀实验装置对高锰铝青铜焊缝在质量分数为 3.5% NaCl 水溶液中的空蚀行为进行了研究。结果表明, 焊接金属的抗空蚀性能明显高于母材, 焊缝金属的空蚀累积失重及失重率均约为母材的 1/4。SEM 空蚀形貌分析表明, 母材的空蚀破坏比焊缝金属严重得多, 导致空蚀破坏的裂纹萌生于晶界。

**关键词:** 高锰铝青铜焊缝; 钨极氩弧焊 (TIG); 空蚀

**中图分类号:** TG17      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-3096(2005)07-0059-06

高锰铝青铜具有良好的综合力学性能, 及抵抗高速海水冲刷、腐蚀的性能; 其铸造焊接性能也优于其它铝青铜<sup>[1-2]</sup>。因此, 高锰铝青铜常常用来制造大型舰船的螺旋桨。严重空蚀破坏的螺旋桨需要进行修补, 否则, 螺旋桨的效率会大大降低。开展高锰铝青铜焊缝组织空蚀规律及其破坏行为机制的研究对于预测修复后的螺旋桨的使用寿命具有重要意义。有关高锰铝青铜焊缝组织的空蚀性能及破坏行为尚未见报道。作者对高锰铝青铜焊接组织在质量分数 3.5% NaCl 的空蚀行为进行了研究。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

试验材料是一块长 500mm、宽 200mm、高 20mm 的铸态 ZQAL12-8-3-2 板材, 它的铸造工艺类似螺旋桨的铸造工艺。化学分析的成分(以质量分数计) 为 12.75%Mn, 7.20%Al, 2.95%Fe, 2.18%Ni 和 73.88%Cu。在板的中央加工一条长 500mm、宽 15mm、深 5mm 的槽, 然后用 TIG 焊进行堆焊, 充填材料与母材相同, 焊接的电流为 280A, 电压为 16V, 保护气体为氩气, 堆焊后打磨光。分别在焊缝区、母材和包含焊缝区、热影响区、母材的区域上切取  $\Phi 14\text{mm} \times 20\text{mm}$  的圆柱, 然后加工成直径为 12.7mm 的磁致伸缩试样。用粒度为 1 $\mu\text{m}$  的金刚石抛光膏把试样抛光至镜面。实验前对试样进行清洗、脱脂处理。

### 1.2 空蚀实验

实验装置是一台磁致伸缩振动仪, 试样拧在变幅杆的自由端上(参照 ASTM G32 标准<sup>[3]</sup>), 变幅杆

的频率为 20kHz, 振幅为 60 $\mu\text{m}$  (峰到峰), 实验介质为 3.5%NaCl 水溶液, 温度保持在 25 $^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 。空蚀实验前及实验一段时间后, 试样被清洗、干燥、称质量, 天平的型号为 Sartorius BS210S, 分度值为 0.1mg。

### 1.3 试样观察

在包含焊缝、热影响区和母材的区域截取金相试样, 打磨, 抛光, 然后用 FeCl<sub>3</sub> 水溶液侵蚀。用光学显微镜进行金相观察, 用扫描电镜观察试样的空蚀形貌。

## 2 结果及讨论

### 2.1 焊缝的组织特征

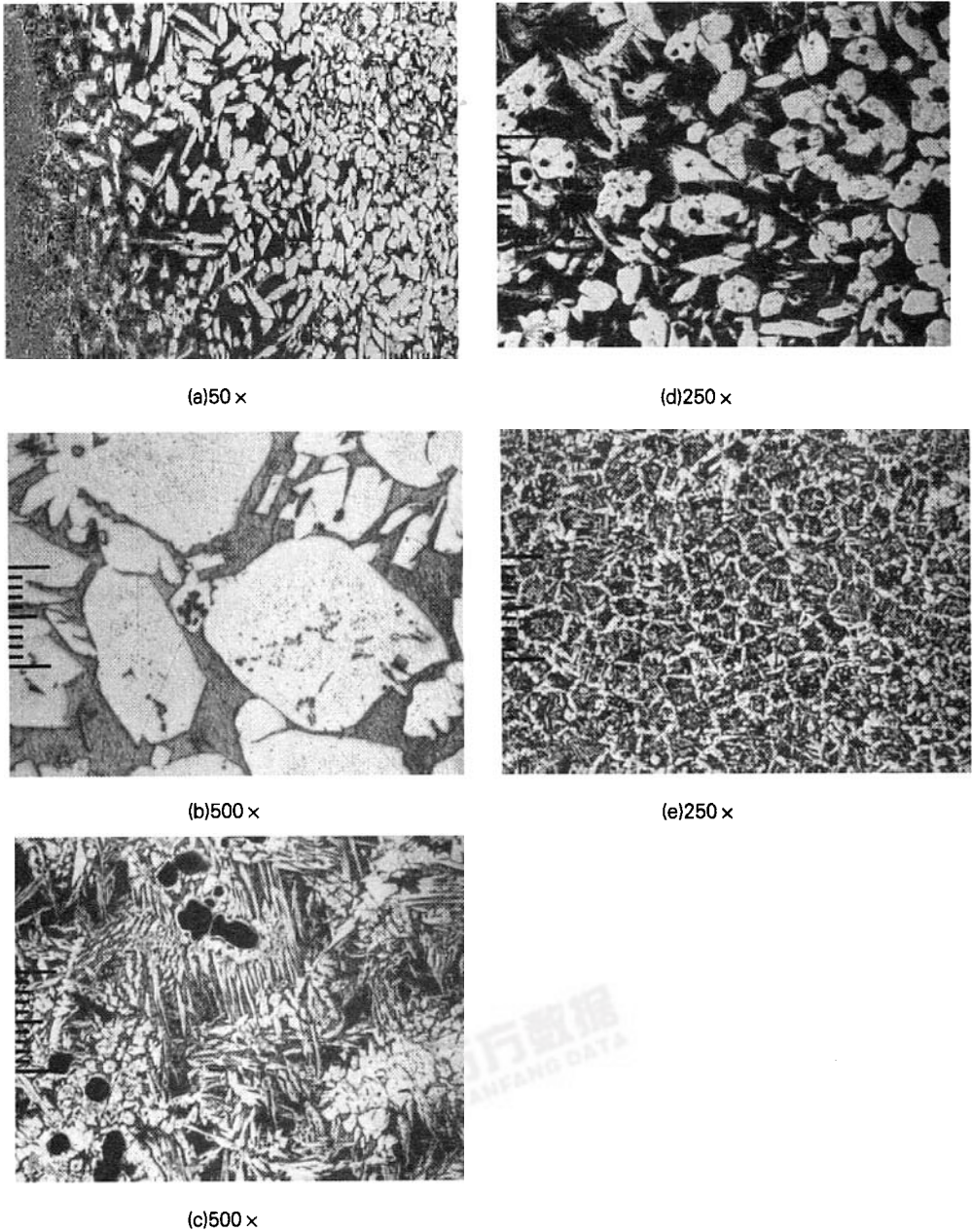
图 1a 显示了高锰铝青铜焊缝的焊缝区、热影响区和母材区。图 1b 显示了母材的微观组织, 它由轻微侵蚀的  $\alpha$  相、侵蚀稍深的  $\beta$  相和各种形态的  $\kappa$  相(金属间化合物)组成; 尺寸为 10 $\mu\text{m}$  左右的枝晶状颗粒是  $\kappa_{\text{II}}$  相, 分布在  $\alpha$  相内尺寸不超过 1 $\mu\text{m}$  颗粒是  $\kappa_{\text{IV}}$  相<sup>[4]</sup>。热影响区的微观组织由  $\alpha$  相、 $\beta$  相和  $\kappa_{\text{II}}$  相组成, 图 1c 和图 1d 所示。由于快速凝固, 焊缝区的微观组织比母材细小得多, 由轻微侵蚀的  $\alpha$  相及  $\beta$  相和少量的  $\kappa_{\text{II}}$  相组成, 参见图 1e。

### 2.2 空蚀失重

收稿日期: 2005-03-21, 修改日期: 2005-04-30

基金项目: 国防基金重点项目

作者简介: 闫永贵(1969-), 男, 山东招远人, 博士, 高级工程师, 研究方向为金属材料的腐蚀与防护, E-mail: yyg98@vip.sina.com



(a)50 ×

(d)250 ×

(b)500 ×

(e)250 ×

(c)500 ×

图 1 高锰铝青铜焊缝及各区的微观组织

Fig. 1 Microstructure of Cu<sub>12</sub>Mn<sub>8</sub>Al<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub>Ni weldment and different zones

(a) 焊缝, (b) 母材区, (c, d) 热影响区, (e) 焊缝区

(a) weldment, (b) base metal, (c,d) HAZ, (e) WZ

图 2a 是高锰铝青铜焊缝组织焊接金属和母材试样空蚀累积失重随时间变化的曲线。可以看到, 空蚀 30min 以后, 母材的累积失重增量大于焊缝区, 这意味着母材失重比焊缝快; 空蚀 3h, 母材试样的累积

失重达到 39.4 mg, 而焊缝金属试样的累积失重只有 10.2 mg, 接近母材试样累积失重的 1/4。图 2 b 是高锰铝青铜焊缝组织焊接金属和母材试样在空蚀失重率随时间变化的曲线。空蚀一开始, 失重率随时

### 2.3 空蚀形貌

图 3 是高锰铝青铜焊缝在质量分数为 3.5% NaCl

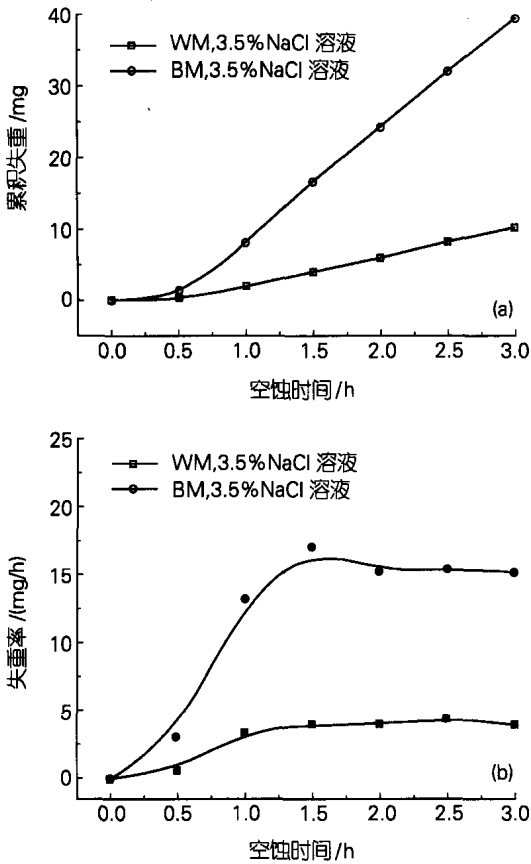
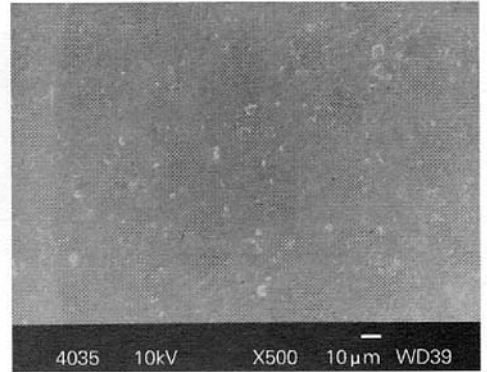


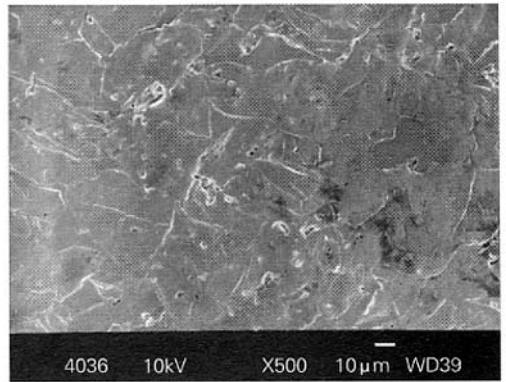
图 2 高锰铝青铜焊缝金属(WM)和母材(BM)试样在 3.5% NaCl 溶液中空蚀累积失重(a)和失重率(b)随时间的变化

Fig. 2 Cumulative mass loss (a) and mass loss rate (b) as a function of cavitation erosion time of weld zone(WZ) and the base metal(BM) of Cu12Mn8Al3Fe2Ni weldment

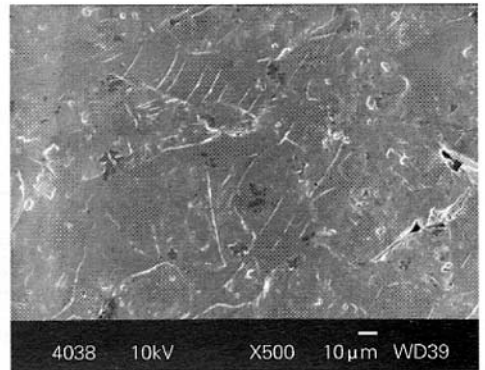
间而增长,空蚀 1.5h 达到最大值,2h 后失重率变化不大,进入平台区;母材的空蚀失重率比焊缝金属的失重大,母材空蚀失重率的最大值为 17 mg/h,而焊缝金属的失重率最大值为 4.4 mg/h,在空蚀失重率的平台区母材的平均失重率为 15.23 mg/h,而焊缝金属的平均失重率只有 4.13 mg/h,接近母材平均失重率的 1/4。这些结果表明,焊缝的抗空蚀性能明显优于母材。焊缝组织金相分析显示焊缝金属的晶粒比母材的晶粒细小得多,金属材料的晶粒越细小,这种材料的力学性能(包括屈服强度、抗拉强度、硬度和断裂韧性)越好,材料的抗空蚀破坏能力与它的力学性能具有正相关性,所以,焊缝金属的抗空蚀破坏能力比母材好。



(a)



(b)



(c)

图 3 高锰铝青铜焊缝在 3.5% NaCl 溶液中空蚀 10min 的表面形貌

Fig 3 SEM micrographs of Cu12Mn8Al3Fe2Ni weldment after cavitation test in 3.5% NaCl aqueous solution for 10 min

(a)焊缝金属, (b) 热影响区, (c) 母材

(a)WZ, (b) HAZ, (c) BM

溶液中空蚀 10min 后的表面形貌扫描电镜照片。可以看到,焊缝金属(图 3a)和热影响区(图 3b)试样

上出现了塑性变形及微孔；母材试样稍大， $\alpha$  相发生挤压变形， $\beta$  相出现了滑移线，试样上还出现了微孔

相界出现了微孔（图 4b）。在热影响区试样上，严重变形的  $\alpha$  相已经空蚀失去金属， $\beta$  相上的滑移线纵横

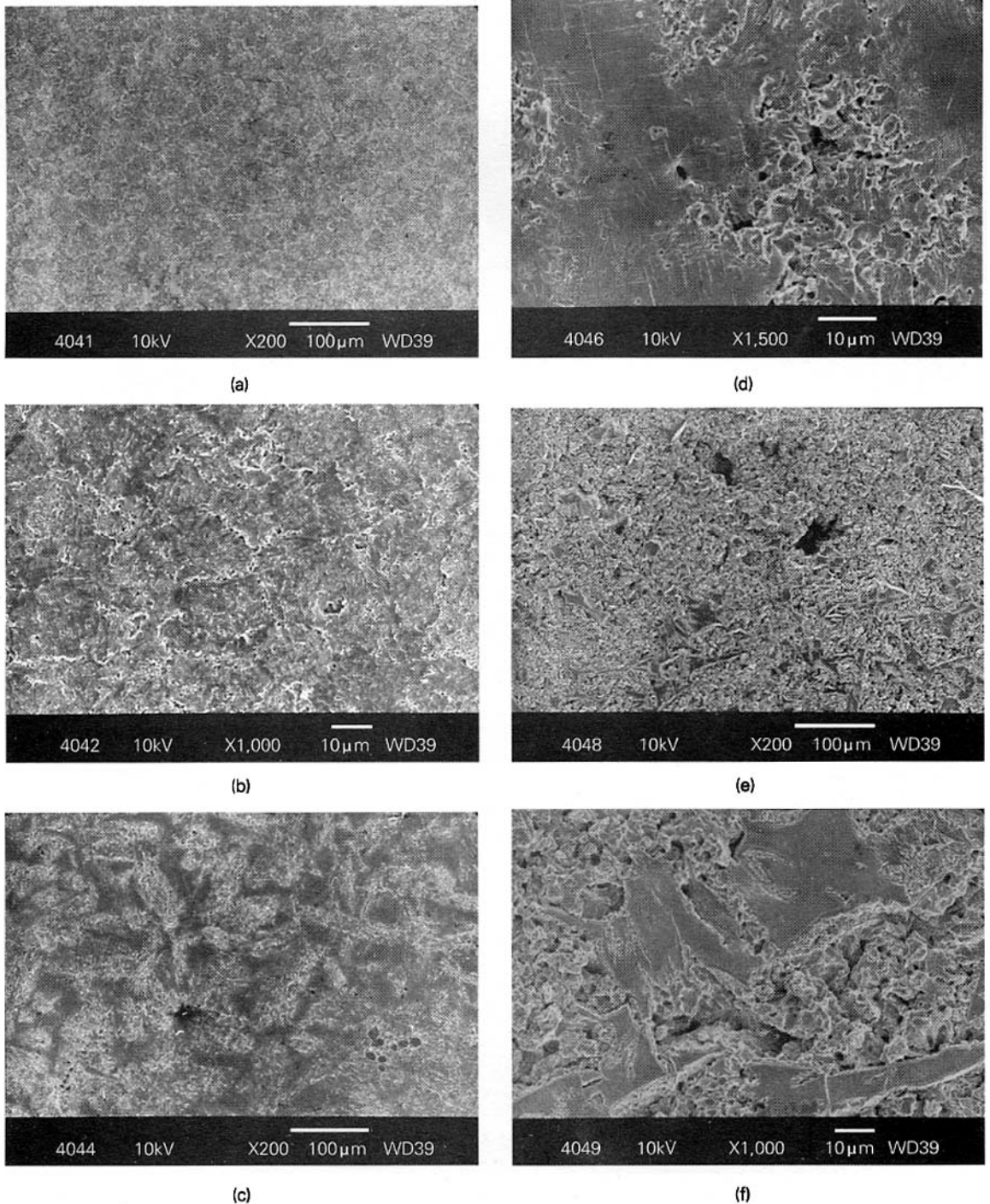
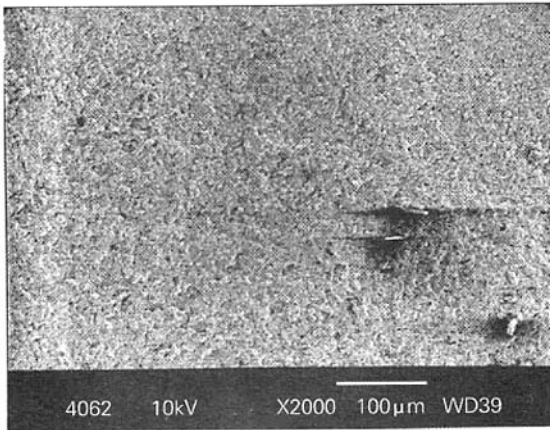
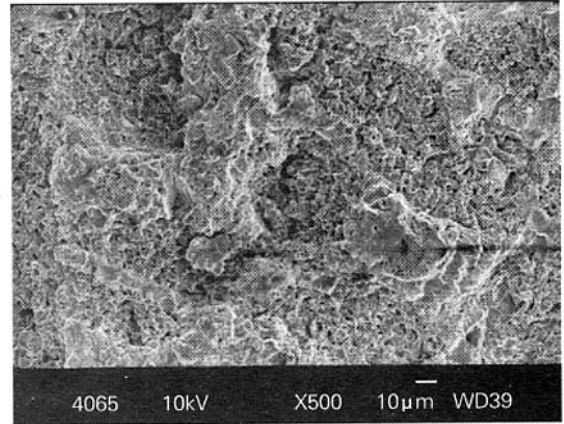


图 4 高锰铝青铜焊缝在 3.5% NaCl 溶液中空蚀 30min 的扫描电镜照片

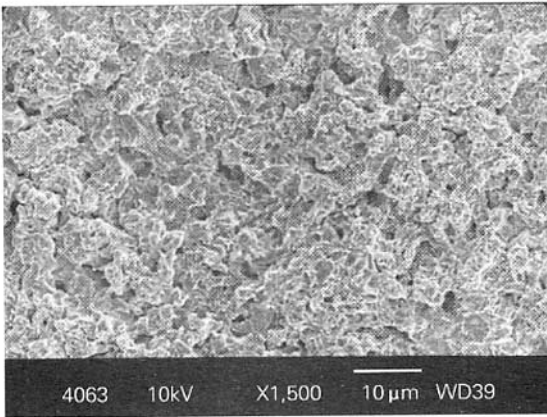
Fig 4 SEM micrographs of Cu12Mn8Al3Fe2Ni weldment after cavitation test in 3.5% NaCl aqueous solution for 30 min, (a, b)焊缝金属, (c, d) 热影响区, (e, f) 母材 (a,b) WZ, (c,d) HAZ, (e,f) BM



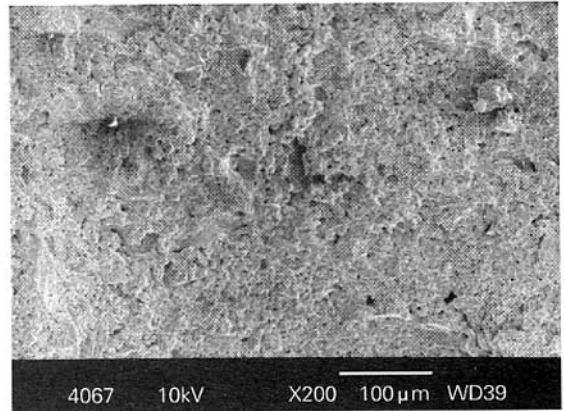
(a)



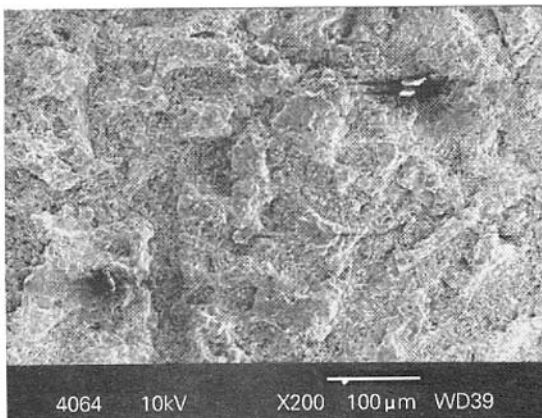
(d)



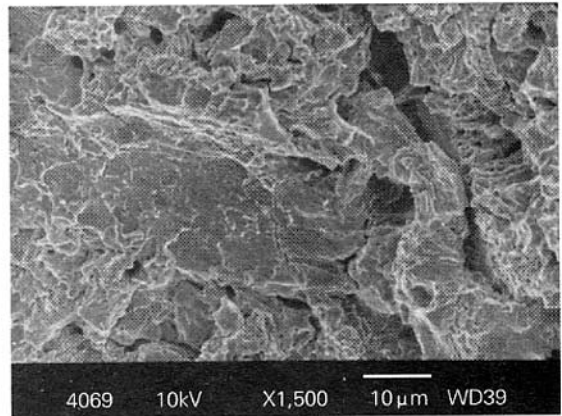
(b)



(e)



(c)



(f)

图 5 高锰铝青铜焊缝在 3.5% NaCl 溶液中空蚀 2.5h 后的扫描电镜照片

Fig 5 SEM micrographs of Cu12Mn8Al3Fe2Ni weldment after cavitation test in 3.5% NaCl aqueous solution for 150 min

(a, b) 焊缝金属, (c, d) 热影响区, (e, f) 母材

(a,b) WZ, (c,d) HAZ, (e,f) BM

交错, 因  $\kappa$  相受空蚀应力腐蚀而出现空蚀坑 (图 4c 和 4d)。母材试样表面变得非常粗糙, 而且局部出现了大的空蚀坑 (图 4e), 但是  $\beta$  相的残片仍然可见 (图 4d)。空蚀 2.5h 后, 热影响区和母材试样表面很粗糙 (图和微裂纹 (图 3c)。空蚀 30min, 焊缝金属试样表面变形剧烈 (图 4a), 在较高的放大倍数下, 可见沿着 5c, 5e), 相比之下焊缝金属试样表面要平滑得多, 除了局部有个别空蚀坑外 (图 5a)。在大的放大倍数下可见, 焊缝金属表面基本上被均匀剥离 (图 5b), 热影响区和母材试样表面却是非均匀剥离 (图 5d 和 5f), 而且在母材试样上出现了解理状的小平面 (图 5f)。从这些扫描电镜照片可以看到, 母材空蚀破坏最严重, 热影响区其次, 焊缝金属再次。

#### 2.4 空蚀机制

从以上试样空蚀表面形貌的描述, 可以推断它们空蚀破坏的过程。空蚀初期, 空蚀应力导致焊缝金属试样表面变形; 随着空蚀的进行变形加剧, 在相界产生微孔 (图 4b); 微孔渐渐地出现、长大、连接, 进而形成微裂纹; 裂纹扩展导致金属失去 (图 5a 和 5b)。在热影响区, 试验初期空蚀应力使  $\alpha$  相挤压变形, 形成裂纹 (图 4c 和 4d); 裂纹向  $\alpha$  相的内部和  $\beta$  相扩展, 最终导致  $\alpha$  相和  $\beta$  相的破坏 (图 5c 和 5d)。对于母材试样, 空蚀初期的应力使  $\alpha$  相发生很大的变形, 然而这种变形却受到  $\beta$  相的阻碍, 滑移线主要在  $\alpha$  相的边缘堆积, 也在  $\beta$  相内出现 (图 3c)。裂纹在  $\alpha$  相边缘产生。随着空蚀的进行, 裂纹向  $\alpha$  相的纵深扩展使之失去金属, 裂纹还向  $\beta$  相扩展, 导致  $\beta$  破坏

(图 4e, 4f, 5e 和 5f)。

扫描电镜照片显示, 在空蚀后的母材试样上出现解理状小平面对 (图 5f), 表明母材的空蚀破坏不仅有韧性破坏模式, 还有脆性破坏模式, 可能是由于变形速率的提高使  $\beta$  相的破坏从韧性模式向脆性模式转变。

### 3 结论

焊缝金属的抗空蚀性能优于母材。空蚀 3h 后, 焊缝金属的累积失重和空蚀率大约为母材的 1/4。扫描电镜分析显示, 焊缝金属的抗空蚀性能最好, 热影响区其次, 母材再次。导致空蚀破坏的裂纹萌生于相界, 向容易破坏的相扩展, 最终导致试样表面的完全破坏。母材试样表面出现解理状小平面对, 说明母材的空蚀不仅发生韧性破坏还发生脆性破坏。

#### 参考文献:

- [1] Karimi A, Martin J L. Cavitation erosion of material[J]. *Int Metals Rev*, 1986, 31(1):1 - 26.
- [2] Budiski K G. *Surface Engineering for Wear Resistance*[M]. New York: Prentice Hall, 1988.24 - 128.
- [3] ASTM Standard G32-92, Standard Test Method for Cavitation Erosion using Vibratory Apparatus[S].
- [4] Brezina P. Heat treatment of complex aluminium bronze [J]. *Inter Met Rev*, 1982, 27(2), 77 - 120

## Cavitation erosion of welding seam of Cu<sub>12</sub>Mn<sub>8</sub>Al<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub> Ni alloy in NaCl solution

YAN Yong-gui, MA Li

(State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Materials Research Institute Qingdao Branch, Qingdao 266071, China)

Received: 21, Mar., 2005

Key words: as-welded Cu<sub>12</sub>Mn<sub>8</sub>Al<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub>Ni alloy; Tungsten inert gas welding (TIG); cavitation erosion

**Abstract:** Cavitation erosion of welding seam Cu<sub>12</sub>Mn<sub>8</sub>Al<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub> Ni alloy in 3.5% NaCl solution was studied by magnet to strictive vibratory device. Results showed that the seam of the alloy was more resistant to the corrosion, and the mass loss was about 1/4 of that in parent metal. SEM observation revealed that the corrosion in parent metal initiated at the phase boundaries between the seam and the base.

(本文编辑: 张培新)