

文章编号: 1004 - 0609(2003) 03 - 0560 - 05

Ti₃Al 基合金的弹性变形能与空蚀^①

龙霓东^{1, 2}, 朱金华¹

(1. 西安交通大学 材料强度国家重点实验室, 西安 710049;

2. 空军工程大学 工程学院, 西安 710038)

摘 要: 利用旋转圆盘装置研究了 Ti₃Al 基合金 Ti-24Al-15Nb-1Mo 的空蚀行为, 并用洛氏硬度仪模拟空蚀过程中微射流所产生的局部载荷对 Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金的作用, 测量了压头加载过程中该合金吸收的总能量和弹性变形能(选择我国水利机械常用 0Cr13Ni5Mo 马氏体不锈钢作对比材料)。结果表明: Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金的抗空蚀性能优于 0Cr13Ni5Mo 不锈钢, 空蚀 40 h 后前者的累积体积损失量仅为 0.551 mm³, 而后的累积体积损失量达到 2.615 mm³; 在局部载荷作用下, Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金不仅有较高的加工硬化能力, 而且有良好的弹性性能; 在压痕试验中其弹性变形能在总变形能量中所占比例达到 1/3。这些性能特点使 Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金在空蚀过程中能吸收和释放较多的冲击能量, 延缓裂纹形成, 减少体积损失, 呈现良好的抗空蚀性能。

关键词: 空蚀; Ti₃Al 基合金; 能量; 加工硬化

中图分类号: TK 730.5; TG 172.9

文献标识码: A

空蚀主要发生在水利机械出现流速增高及因局部绕流造成流体压力波动的过流部件上, 如船用螺旋桨、水轮机叶片等^[1]。一般认为空蚀主要由力学作用引起, 电化学腐蚀和热效应起辅助作用^[2]。虽然空蚀以力学作用为主, 但材料常规力学性能如强度、塑性、硬度等与抗空蚀性能没有一一对应的关系, 因为空蚀破坏是由于空泡溃灭时产生的冲击波或微射流对材料表面局部作用而引起的, 抗空蚀性能不同于材料的整体性能。

研究表明, 形状记忆合金 NiTi 具有优异的抗磨损性能^[3, 4]、抗空蚀性能^[5, 6], 其优异的抗空蚀性能、抗磨损性能通常归因于超弹性^[3~6]。根据空蚀微射流或冲击波对材料表面局部作用的特点, CHENG 等^[7]用压痕试验建立了 NiTi 合金的抗空蚀性能 Re 与 $W/\delta u$ (W 表示压头所做的功, δu 表示不可恢复的塑性变形) 之间的经验公式。LIU^[8]也用压痕技术所测定的 TiNi 合金吸收的弹性变形能来衡量其超弹性, 并证明弹性变形能愈高, 超弹性就愈好, 合金的抗磨损性能也就愈好。实践证明, 压痕试验具有非破坏性, 且简单易行, 可测出材料在局部载荷作用下吸收弹性变形能的能力, 是一种很好的衡量材料弹性和抗空蚀性能的方法, 但迄今未

见对普通弹性材料采用压痕试验的文献报道。通常具有普通弹性性能材料的良好抗空蚀性能归因于其高的加工硬化能力^[9~11]或应变诱发相变^[11], 没有考虑弹性变形能对抗空蚀性能的贡献。因此, 本研究选择普通弹性材料 Ti₃Al 基合金 Ti-24Al-15Nb-1Mo 作为试验材料, 利用压痕试验, 从局部载荷和能量角度出发探讨其空蚀行为。

1 试验材料及方法

试验材料为北京航空材料研究所提供的 Ti₃Al 基合金: Ti-24Al-15Nb-1Mo。该合金经锻造后进行双态热处理, 其光学显微组织如图 1 所示, 由 α_2 -Ti₃Al 和 β 转变组织组成, α_2 -Ti₃Al 呈等轴状和针状。采用我国水利机械常用的 0Cr13Ni5Mo 马氏体不锈钢(正火态)作为对比材料。在旋转圆盘装置上进行空蚀试验, 圆盘转速为 2 960 r/min, 空蚀试样的线速度分别为 45 m/s 和 34 m/s, 液体介质为自来水, 空蚀时间为 40 h。采用精度为 0.1 mg 的电子天平称重, 并绘出合金空蚀累积体积损失量与空蚀时间的关系曲线。利用 MEF3 光学显微镜(OM)、S-2700 型扫描电镜(SEM)分析 Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金试样表面空蚀前后的微观形貌。用 MH-

① 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(59831030); 国家重点基础研究发展规划资助项目(G19990650)

收稿日期: 2002-08-28; 修订日期: 2002-10-15

作者简介: 龙霓东(1963-), 女, 副教授, 博士研究生。

通讯联系人: 龙霓东, 电话: 029-4249800, 4397408

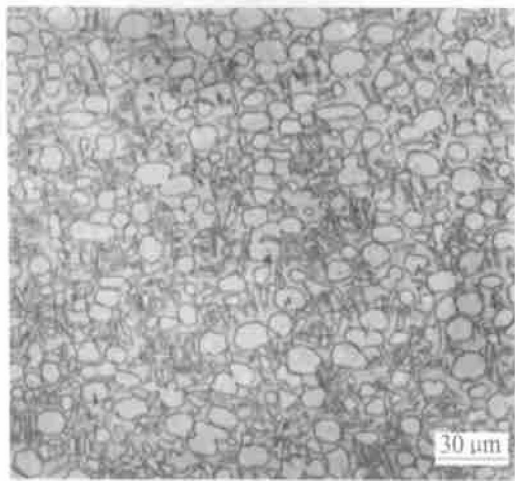


图 1 Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金的显微组织

Fig. 1 Microstructure of Ti-24Al-15Nb-1Mo alloy

5 显微维氏硬度计测量试样距空蚀表面不同深度处的显微维氏硬度值。

由于压痕试验简单且具有与空蚀相同的局部加载的特点, 故采用 HRD-150 型电动洛氏硬度仪模拟空蚀过程中微射流所产生的局部载荷对 Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金和 0Cr13Ni5Mo 不锈钢的作用, 分别测量两种材料在加载过程中所吸收的总能量和弹性变形能。洛氏硬度仪的压头为 120° 金刚石圆锥, 所加最大载荷分别为 588, 980, 1 470 N。

2 结果及讨论

图 2 所示为 Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金及 0Cr13Ni5Mo 马氏体不锈钢分别在 34 和 45 m/s 线速度下的空蚀累积体积损失量与空蚀时间的关系曲线。两种材料在 45 m/s 时的体积损失量均高于在 34 m/s 时的体积损失量。在 45 m/s 时, 0Cr13Ni5Mo 不锈钢空蚀 20 h 后体积损失明显增加, 空蚀 40 h 后达到 2.615 mm^3 , Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金体积损失随时间的延长增加较缓慢, 空蚀 40 h 后仅为 0.551 mm^3 , 约为 0Cr13Ni5Mo 不锈钢的 1/5; 在 34 m/s 时空蚀 40 h 后, 0Cr13Ni5Mo 不锈钢和 Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金的体积损失分别为 0.359 mm^3 和 0.255 mm^3 。可见, Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金的抗空蚀性能优于 0Cr13Ni5Mo 不锈钢, 线速度愈大, 两者的差距愈明显。

图 3 所示为 Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金在 45 m/s 线速度下空蚀 40 h 后的试样表面 SEM 形貌, 可见试样表面有许多小坑, 形状与 $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}$ 颗粒相同 (见图 1), 表明空蚀时 $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}$ 优先剥落。该试验

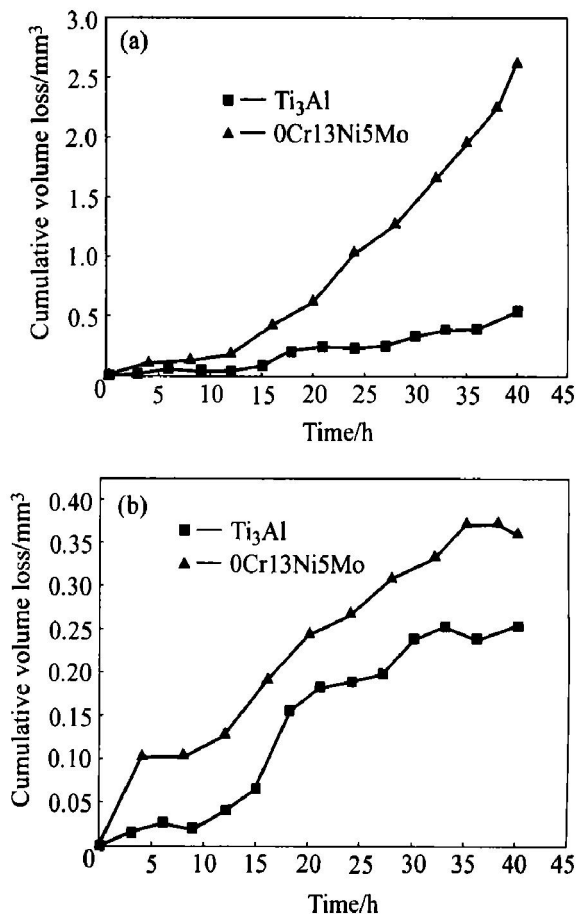


图 2 Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金和 0Cr13Ni5Mo 不锈钢的空蚀累积体积损失量与空蚀时间的关系曲线

Fig. 2 Cumulative volume loss as a function of time for Ti-24Al-15Nb-1Mo alloy and 0Cr13Ni5Mo stainless steel (a) 45 m/s; (b) 34 m/s

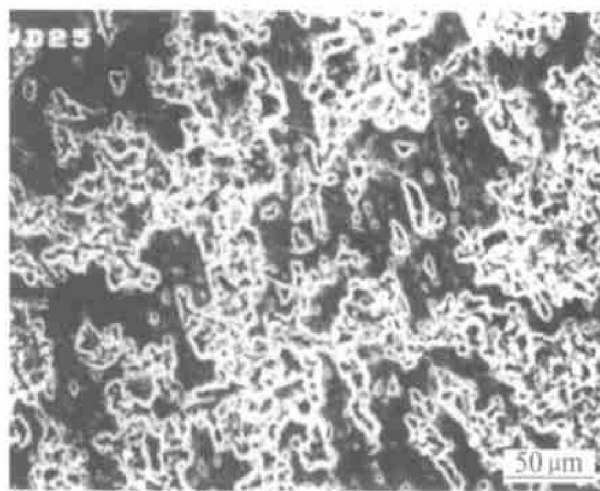


图 3 Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金试样表面空蚀 40 h 后的 SEM 形貌

Fig. 3 SEM image of cavitation eroded surface of Ti-24Al-15Nb-1Mo alloy after 40 h of cavitation erosion

结果与 Howard 和 Ball^[10] 的相同, Ti₃Al 基合金在空蚀微射流或冲击波的作用下发生变形, 变形在 α_2 相与基体的相界面处受阻, 使应变在界面处不断累积, 最后导致塑性较差的 α_2 相的开裂和剥落。

空蚀破坏是因空泡溃灭时所产生的冲击波或微射流对材料表面局部作用而引起的, 材料吸收和释放冲击能量的能力对其空蚀性能有很大影响。为此采用电动洛氏硬度仪模拟空蚀过程中的局部载荷作用, 测量加载过程中材料吸收的总能量和弹性变形能。图 4 所示为最大载荷为 980 N 时 Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金与 0Cr13Ni5Mo 不锈钢的载荷—位移曲线, 同样可以绘出最大载荷为 588 N 和 1 470 N 时的载荷—位移曲线。图中加载曲线与横坐标所包围的面积为材料所吸收的总能量 E , 卸载曲线与横坐标所包围的面积为材料所吸收的弹性变形能 E_e 。用积分的方法求出 E 值和 E_e 值, 所得结果列于表 1, 表中同时给出两种材料吸收的弹性能在总能量中所占的比例 E_e/E 。

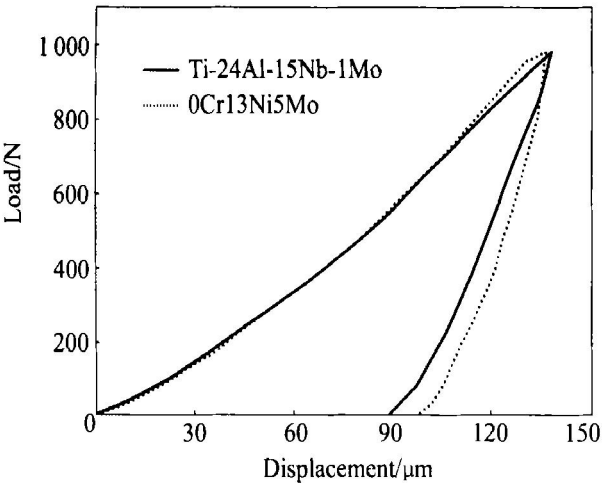


图 4 压痕试验中载荷与位移的关系曲线
Fig. 4 Load—displacement curves in indentation

由表 1 可知, 载荷愈大, 两种材料吸收的总能量和弹性变形能也就愈多。在相同载荷作用下, Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金吸收的弹性变形能

高于 0Cr13Ni5Mo 不锈钢, 且前者吸收的弹性变形能在总能量中所占的比例也高于后者。因此, Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金在局部载荷作用下表现出优于 0Cr13Ni5Mo 不锈钢的弹性性能。

空蚀微射流或冲击波对材料表面的冲击能大部分转化为材料的塑性能和弹性能, 其中弹性能所占比例愈高, 材料就能在不造成自身损伤的情况下吸收和释放愈多的冲击能量, 减少质量损失, 呈现良好的抗空蚀性能。在局部载荷作用下, Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金吸收的弹性能在总能量中所占的比例达到 1/3, 而经过不同热处理的具有不同超弹性的 Ti-Ni 合金在显微压痕试验中弹性变形能所占的比例分别为 36% 和 47%^[8]。比较两者可见, 在局部载荷作用下, Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金表现出较高的吸收弹性变形能的能力, 该性能特点是 Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金抗空蚀性能良好的原因之一。

图 5 所示为 Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金和 0Cr13Ni5Mo 不锈钢在 45 m/s 条件下空蚀 40 h 后

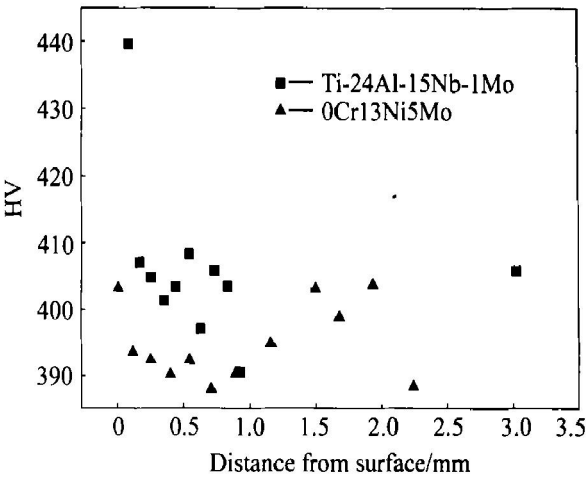


图 5 Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金与 0Cr13Ni5Mo 不锈钢空蚀 40 h 后距空蚀表面不同深度处的显微硬度
Fig. 5 Microhardness versus depth profile on cross section of Ti-24Al-15Nb-1Mo alloy and 0Cr13Ni5Mo stainless steel after exposure to cavitation erosion for 40 h

表 1 Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金和 0Cr13Ni5Mo 不锈钢在压痕试验中所吸收的总能量 E 、弹性变形能 E_e 及 E_e/E

Table 1 Total energy E , elastic deformation energy E_e and ratio of E_e/E in indentation for Ti-24Al-15Nb-1Mo alloy and 0Cr13Ni5Mo stainless steel under different loads

Alloy	588 N			980 N			1 470 N		
	E/J	E_e/J	E_e/E	E/J	E_e/J	E_e/E	E/J	E_e/J	E_e/E
Ti-24Al-15Nb-1Mo	0.0237	0.008 4	35.4%	0.059 7	0.021 2	35.5%	0.125 3	0.045 9	36.6%
0Cr13Ni5Mo	0.025 6	0.006 1	23.8%	0.058 5	0.014 1	24.1%	0.122 7	0.031 0	25.3%

距空蚀表面不同深度处的显微维氏硬度变化图, 0Cr13Ni5Mo 不锈钢空蚀后表面硬度几乎没有变化, 而 Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金在微射流的反复冲击下, 表面维氏硬度明显提高, 达到 HV440。

空蚀可产生高达 1 000 MPa 量级的冲击力^[12, 13], 往往使材料表面变形。Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金表面在微射流或冲击波的反复作用下硬化(图 5), 可以延缓裂纹的形成^[9], 也可保证材料在空蚀过程中吸收较多的冲击能量^[6], 减少材料失重。

综合上述分析, Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金优于 0Cr13Ni5Mo 不锈钢的抗空蚀性能应归因于其在局部载荷作用下所呈现的较好的弹性性能和加工硬化能力, 前者使其在空蚀过程中以弹性变形的方式吸收和释放较多的冲击能量, 后者保证其在空蚀过程中以塑性变形方式吸收冲击能量时, 不至于过早形成裂纹和剥落, 从而减少体积损失量。

3 结论

1) 旋转圆盘空蚀试验表明: 在 45 m/s 的线速度下空蚀 40 h, Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金的体积损失量为 0.551 mm³, 0Cr13Ni5Mo 马氏体不锈钢的体积损失量为 2.615 mm³; 在 34 m/s 的线速度下空蚀 40 h, Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金的体积损失量为 0.255 mm³, 0Cr13Ni5Mo 不锈钢的体积损失量为 0.359 mm³。Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金的抗空蚀能力优于 0Cr13Ni5Mo 不锈钢。

2) 在局部载荷作用下, Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金的弹性性能及加工硬化能力优于 0Cr13Ni5Mo 不锈钢, 这些性能特点能保证 Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金在空蚀过程中微射流或冲击波的作用下吸收和释放更多的冲击能量, 延缓裂纹形成, 减小表面损伤。

致谢

感谢西安交通大学材料科学与工程学院王再有博士的帮助!

REFERENCES

- [1] 李诗卓, 董祥林. 材料的冲蚀磨损与微动磨损[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987. 130 - 132.
- LI S Z, DONG X L. Erosion wear and Fretting of Materials [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1987. 130 - 132.
- [2] 孙寿. 水泵汽蚀及其防治[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989. 5 - 6.
- SUN S. Cavitation Erosion of Water Pump and its Prevention [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1989. 5 - 6.
- [3] LI D Y. A new type of wear-resistant material: pseudo elastic TiNi alloy[J]. Wear, 1998, 221(2): 116 - 123.
- [4] LIANG Y N, LI S Z, JIN Y B, et al. Wear behavior of a Ti-Ni alloy[J]. Wear, 1996, 198(1-2): 236 - 241.
- [5] Richman R H, Rao A S, Kung D. Cavitation erosion of NiTi explosively welded to steel[J]. Wear, 1995, 181 - 183(1): 80 - 85.
- [6] Wu S K, Lin H C, Yeh C H. A comparison of the cavitation erosion resistance of TiNi alloys, SUS304 stainless steel and Ni based self-fluxing alloy[J]. Wear, 2000, 244(1-2): 85 - 93.
- [7] CHENG F T, SHI P, MAN H C. Correlation of cavitation erosion resistance with indentation derived properties for a Ni-Ti alloy[J]. Scripta Materialia, 2001, 45(9): 1083 - 1089.
- [8] LIU R, LI D Y. Indentation behaviour and wear resistance of pseudoelastic Ti-Ni alloy[J]. Materials Science and Technology, 2000, 16(3): 328 - 332.
- [9] Howard R L, Ball A. Mechanisms of cavitation erosion of TiAl based titanium aluminide intermetallic alloys[J]. Acta Mater, 44(8): 3157 - 3168.
- [10] Howard R L, Ball A. The solid particle and cavitation erosion of titanium aluminide intermetallic alloys[J]. Wear, 1995, 186 - 187(1): 123 - 128.
- [11] 柳伟, 郑玉贵, 姚治铭, 等. CrMnN 不锈钢的抗空蚀和磨损性能[J]. 材料研究学报, 2001, 15(5): 505 - 509.
- LIU W, ZHENG Y G, YAO Z M, et al. Resistance of cavitation erosion and cavitation abrasion of CrMnN stainless steel[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2001, 15(5): 505 - 509.
- [12] Vyas B, Preece C M. Stress produced in a solid by cavitation[J]. J Appl Phys, 1976, 47(12): 5133 - 5138.
- [13] Momma T, Lichtarowicz A. A study of pressures and erosion produced by collapsing cavitation[J]. Wear, 1995, 186 - 187(2): 425 - 436.

Elastic deformation energy and cavitation erosion of Ti_3Al based alloy

LONG Ningdong^{1, 2}, ZHU Jinhua¹

(1. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The cavitation erosion of Ti_3Al based alloy Ti-24Al-15Nb-1Mo was investigated by using rotating disc equipment. To simulate the effect of the collapse of vapor cavities or bubbles, Rockwell hardness tester was used to exert a load on the small area of Ti-24Al-15Nb-1Mo alloy, and the total deformation energy and elastic deformation energy of the test material were determined. Martensitic stainless steel $0\text{Cr}13\text{Ni}5\text{Mo}$ was chosen for comparison. The results show that the cavitation erosion resistance of the Ti-24Al-15Nb-1Mo alloy is better than that of the $0\text{Cr}13\text{Ni}5\text{Mo}$ stainless steel. After 40 h of exposure to cavitation erosion, the cumulative volume loss of the former is only 0.551 mm^3 , while that of the latter is 2.615 mm^3 . Ti-24Al-15Nb-1Mo alloy has good work-hardening ability and elasticity. Its elastic deformation energy approaches $1/3$ of the total deformation energy in indentation test. All these characteristics make it absorb and relieve more impact energy in cavitation erosion, thus reducing volume loss, and showing excellent cavitation erosion resistance.

Key words: cavitation erosion; Ti_3Al based alloy; energy; work-hardening ability

(编辑 彭超群)