

文章编号: 1004-0609(2003)05-1166-05

γ -TiAl 合金的空蚀行为^①

龙霓东^{1, 2}, 龙亚东³, 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; 3. 西安亨通光华制药有限公司, 西安 710086)

摘 要: 利用超声振动空蚀试验设备研究了具有单相 γ -TiAl 组织的 Ti-50Al 合金的空蚀行为, 借助于 SEM 分析了其空蚀表面, 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-50Al 合金的作用, 测量了其在加载过程中的变形能。结果表明: Ti-50Al 合金具有优异的抗空蚀性能, 空蚀 26 h 后的累积体积损失量仅为 0.926 mm³。该合金优异的抗空蚀性能归因于其在局部载荷作用下有较高的变形能和加工硬化能力。Ti-50Al 合金的空蚀是由于晶界阻碍变形, 造成应力集中, 使裂纹沿晶界形成, 导致材料沿晶剥落。

关键词: 空蚀; γ -TiAl 合金; 能量

中图分类号: TG 172.9; TK 730.5

文献标识码: A

空蚀主要发生在水利机械上, 小部件如阀门、热交换器管路, 大部件如船用螺旋桨、水轮机叶片等。这些受到空蚀破坏的部件都是高速液流经过的部件, 且空蚀破坏部位是出现流速增高及因局部绕流造成流体压力波动的部位^[1]。空蚀主要是由力学作用引起的^[2, 3], 同时电化学腐蚀及热效应也起一定作用^[4]。王等^[5]的研究指出, Cr-Mn-N 奥氏体不锈钢在空蚀过程中出现了高温相 γ -Ni₃Ti, 并推测该不锈钢空蚀试验时可能出现 1 100 K 左右的瞬时高温, 提出发展抗空蚀材料除了应考虑其常温组织和性能外, 还应考虑其高温性能。TiAl 基合金密度低(3.7~3.9 g/cm³), 高温力学性能良好, 并具有较好的抗高温氧化性能^[6-8], 因此, 本文作者选用 TiAl 基合金作为抗空蚀研究对象。由于空蚀是局部载荷作用, 抗空蚀性能不同于材料的整体性能, 可借鉴 Cheng 等^[9]和 Liu 等^[10]采用的研究方法, 利用压痕试验从局部载荷和能量角度, 探讨 TiAl 合金的抗空蚀性能。

1 实验

采用澳大利亚 Uolonggang 大学提供的 Ti-50Al% (摩尔分数) 合金, 其光学显微组织如图 1 所示。由图可见: 该合金由具有 L1₀ 结构的 γ 层片状

晶团组成, 在层片状晶团内部, 层片沿同一方向平行排列。用目前我国水利机械常用材料 0Cr13Ni5Mo 不锈钢作为对比材料, 在超声振动空蚀试验设备上进行了空蚀试验。设备振动频率 20 kHz, 峰峰振幅 60 μ m, 液体介质为自来水, 空蚀时间为 26 h。采用精度为 0.1 mg 的电子天平称量, 并绘出合金累积体积损失量、累积体积损失率与空蚀时间的关系曲线。利用 MEF3 光学显微镜、S-2700 型扫描电镜分析试样表面空蚀后的微观形貌。用 MH-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。

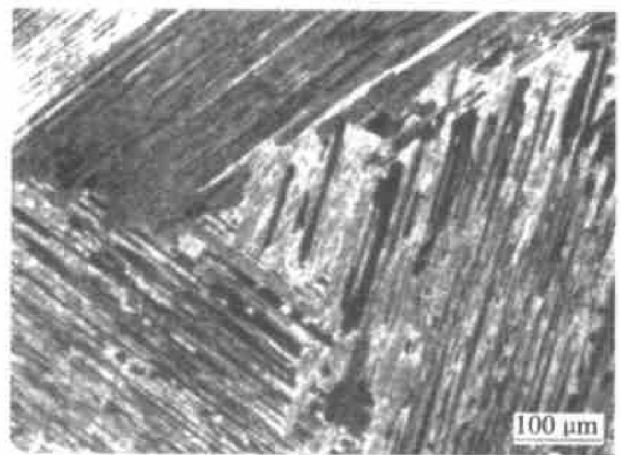


图 1 Ti-50Al 合金的显微组织

Fig. 1 Microstructure of Ti-50Al alloy

① 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(59831030); 国家重点基础研究专项经费资助项目(G19990650)

收稿日期: 2002-10-30; 修订日期: 2003-02-20

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, 空军工程大学工程学院机械教研室, 西安 710038; 电话: 029-3461890, E-mail: L-nidong@sohu.com

压痕试验选用具有非破坏性, 并与空蚀同样具有局部加载特点的方式, 以 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作用, 测量压痕试验中的总变形能、弹性变形能和塑性变形能。洛氏硬度仪的压头为 120° 金刚石圆锥, 所加载荷分别为 588, 980, 1 470 N。

2 结果与分析

2.1 Ti-50Al 合金的抗空蚀性能

图 2, 3 所示为 Ti-50Al 合金及 0Cr13Ni5Mo 不锈钢的累积体积损失量及累积体积损失率与空蚀时间的关系

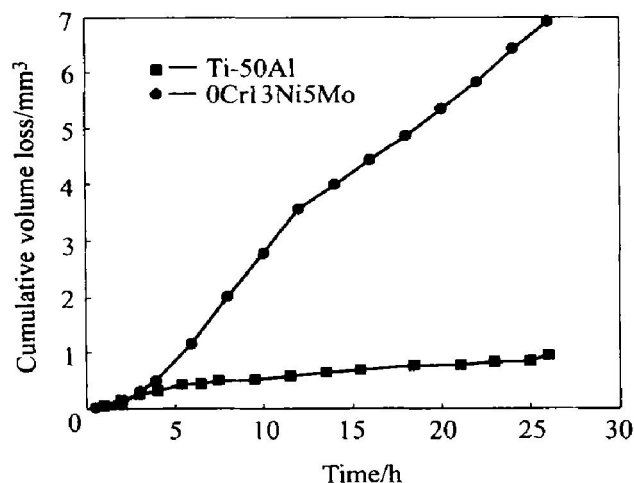


图 2 Ti-50Al 合金和 0Cr13Ni5Mo 不锈钢的累积体积损失量与空蚀时间的关系

Fig. 2 Cumulative volume loss as function of time for Ti-50Al alloy and 0Cr13Ni5Mo stainless steel

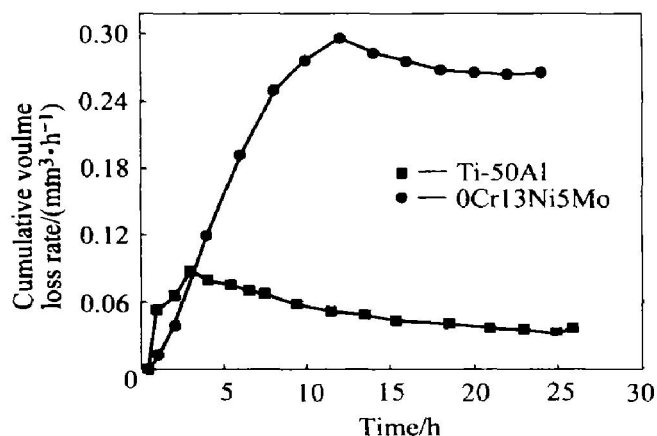


图 3 Ti-50Al 合金和 0Cr13Ni5Mo 不锈钢的累积体积损失率与空蚀时间的关系

Fig. 3 Cumulative volume loss rate as function of time for Ti-50Al alloy and 0Cr13Ni5Mo stainless steel

间的关系曲线。0Cr13Ni5Mo 不锈钢的累积体积损失量随空蚀时间的延长明显增加: 在空蚀 12 h 时累积体积损失率达最高值 $0.297 \text{ mm}^3/\text{h}$, 累积体积损失量为 3.564 mm^3 , 之后进入稳定期, 累积体积损失率基本不变; 在空蚀 26 h 后, 累积体积损失量达 6.9 mm^3 。Ti-50Al 的空蚀累积体积损失量随时间的增加变化缓慢: 空蚀 26 h 后, 累积体积损失量仅为 0.926 mm^3 , 远低于 0Cr13Ni5Mo。试验结果表明: Ti-50Al 合金的抗空蚀性能明显优于 0Cr13Ni5Mo 不锈钢。

图 4 所示为 Ti-50Al 合金和 0Cr13Ni5Mo 不锈钢空蚀 26 h 后距空蚀表面不同距离处的显微维氏硬度变化曲线。0Cr13Ni5Mo 不锈钢空蚀后, 表面硬度几乎没有变化; Ti-50Al 合金虽然初始硬度较低, 只有 HV 225~232, 但在微射流的反复冲击下, 空蚀表面维氏硬度提高到 HV 310。可见材料抗空蚀性能的好坏并不取决于表面硬度的高低, 而与空蚀过程中表面硬度的增量, 即加工硬化能力有关。

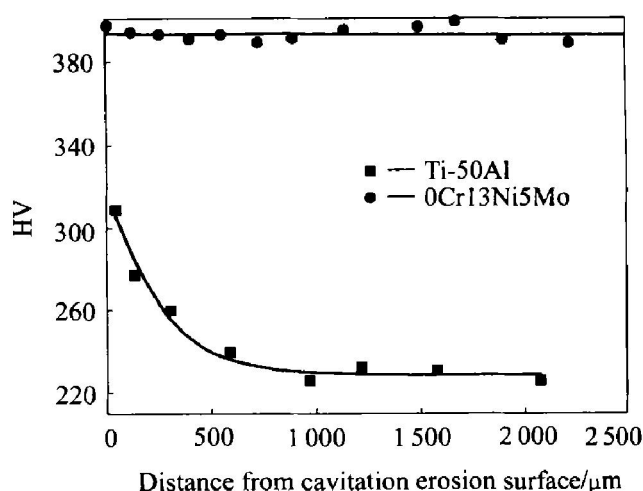


图 4 Ti-50Al 合金与 0Cr13Ni5Mo 不锈钢空蚀 26 h 后距空蚀表面不同深度处的显微硬度

Fig. 4 Relationship between microhardness and depth profile on cross section of Ti-50Al alloy and 0Cr13Ni5Mo stainless steel after cavitation erosion for 26 h

图 5 所示为压痕试验中 Ti-50Al 合金和 0Cr13Ni5Mo 不锈钢两种材料的总变形能、弹性变形能和塑性变形能。在不同载荷作用下, Ti-50Al 的总变形能都大于 0Cr13Ni5Mo, 载荷愈大, 两者的差距愈大。Ti-50Al 的弹性变形能略大于 0Cr13Ni5Mo, 塑性变形能明显高于 0Cr13Ni5Mo。

空蚀过程中微射流或冲击波对材料表面的冲击

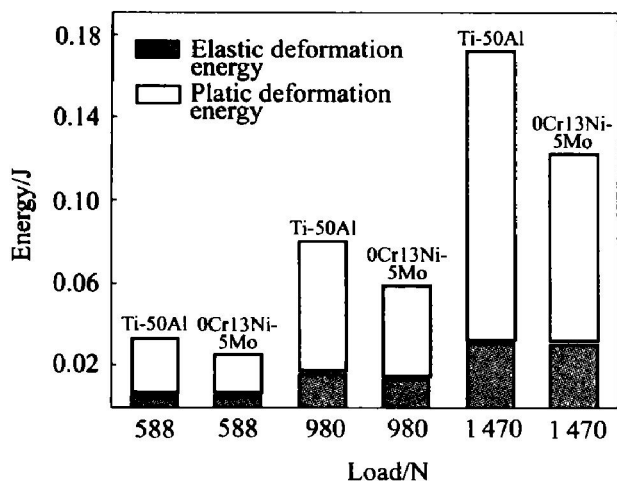


图 5 Ti-50Al 合金和 0Cr13Ni5Mo 在不同局部载荷作用下的弹性变形能、塑性变形能和总变形能

Fig. 5 Elastic deformation energy, plastic deformation energy and total deformation energy in indentation for Ti-50Al alloy and 0Cr13Ni5Mo

能量大部分转化为材料的弹性变形能和塑性变形能。材料吸收和释放能量的能力愈大, 抗空蚀性能就愈好。因此, 材料的弹性和塑性性能在空蚀中起着重要作用。在以前的试验中测得 Ti_3Al 基合金有较高的弹性变形能, 其弹性变形能占到总能量的 $1/3$ ^[11]。与 Ti_3Al 基合金不同, Ti-50Al 合金在压痕试验中的弹性变形能与 0Cr13Ni5Mo 不锈钢接近, 说明弹性变形在空蚀过程中对 Ti-50Al 和 0Cr13Ni5Mo 所起的作用也相近。

Ti-50Al 合金所吸收的塑性变形能明显大于 0Cr13Ni5Mo 不锈钢所吸收的。Ti-50Al 合金是一种有序合金, 有序合金经变形后储能较无序合金大。所储存的能量包括位错密度增加引起的能量和有序度变化引起的能量等, 一般有序度变化引起的能量占总储能的 70% ~ 80%^[12]。虽然塑性变形会造成材料的损伤, 但较高的加工硬化能力, 能延缓裂纹的形成。根据上述分析, 在空蚀过程中, Ti-50Al 合金在微射流作用下变形时能吸收较多的塑性变形能, 而低初始硬度的表面在微射流反复作用下的硬化(见图 4)又保证其在吸收较多冲击能量的同时, 不至于过早形成裂纹, 从而减少材料质量损失。Ti-50Al 合金优异的抗空蚀性能可主要归因于其良好的加工硬化能力和较高的吸收塑性变形能的能力。

2.2 Ti-50Al 合金空蚀表面的 SEM 形貌

Ti-50Al 合金试样经超声振动空蚀试验后, 用

肉眼观察空蚀表面, 可见从边缘到心部空蚀逐渐严重。图 6 所示为 Ti-50Al 合金试样空蚀 5.5 h 后表面边缘区域、过渡区域和中心区域的 SEM 形貌。在边缘区域空蚀轻微(图 6(a)), 仅出现沿一个方向排列的平行短条纹。在过渡区域(图 6(b))出现沿不同方向排列的平行条纹, 条纹连续而清晰, 在条纹

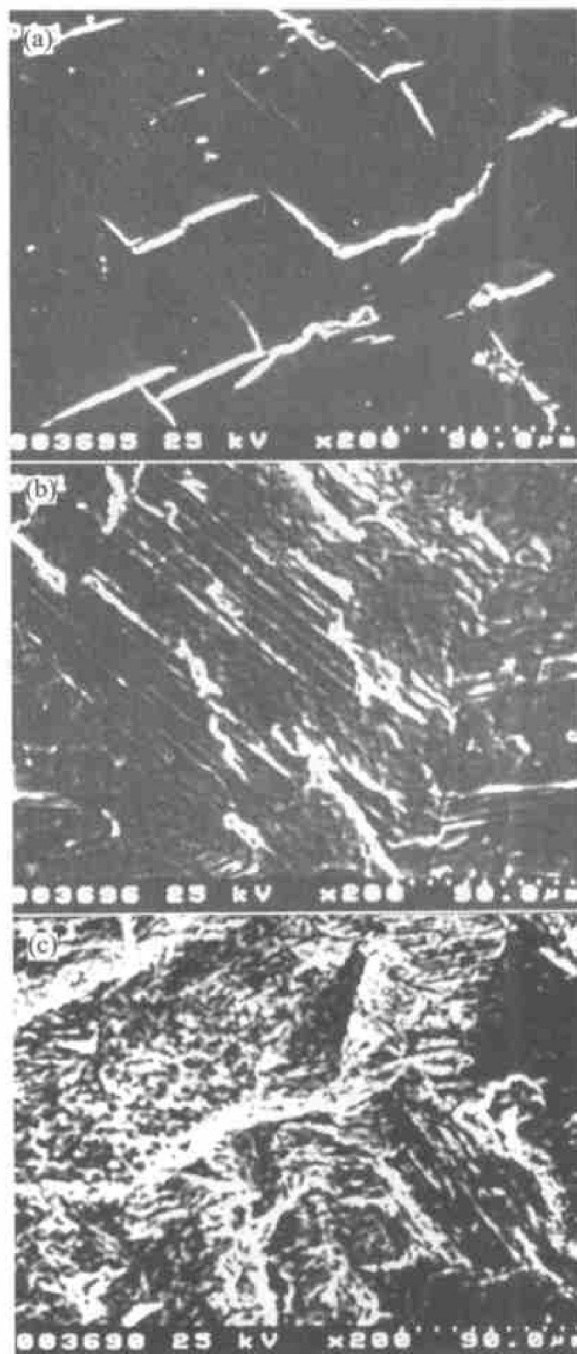


图 6 Ti-50Al 合金表面空蚀 5.5 h 后的 SEM 形貌

Fig. 6 SEM images of cavitation erosion surface of Ti-50Al alloy after cavitation erosion for 5.5 h

(a) —Edge region; (b) —Transition region; (c) —Center region

处有小块材料剥落。在中心区域空蚀较严重(图6(c)), 条纹变得细密, 条纹之间有明显的塑性变形, 沿各个方向的平行条纹因小块材料的剥落而在某些部位变得模糊不清, 在层片晶团的界面上也有剥落现象。当空蚀时间达26 h后, 表面小块脱落十分严重, 此时已分不清晶界(见图7)。

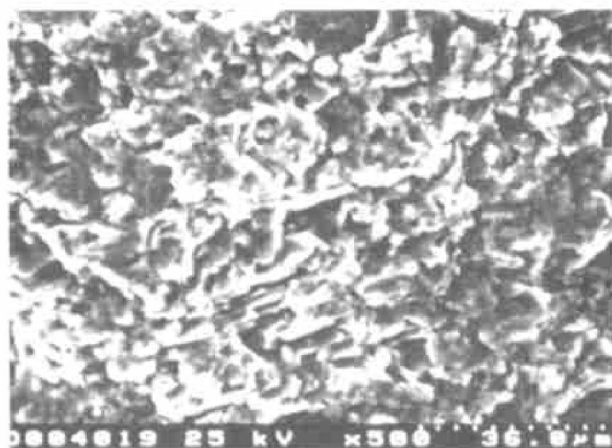


图7 Ti-50Al合金表面空蚀26 h后的SEM形貌

Fig. 7 SEM image of cavitation erosion surface of Ti-50Al alloy after cavitation erosion for 26 h

由于从试样表面边缘区域至中心区域空蚀逐渐严重, 可将从边缘区域到中心区域的不同空蚀形貌作为空蚀发展的不同阶段来进行研究。空蚀时Ti-50Al合金表面在微射流的作用下其层片状组织内部发生塑性变形, 而晶界阻碍变形, 故在空泡溃灭时产生的微射流或冲击波的作用下表面逐渐呈浮凸状显现, 形成沿不同方向排列的平行条纹(见图6)。随着空蚀时间的延长, 在晶界处产生应力集中。当应力集中得不到松弛时便在晶界处产生裂纹, 继而造成表面的小块剥落。

3 结论

1) 超声振动空蚀试验表明: Ti-50Al合金空蚀26 h后的累积体积损失量仅为 0.926 mm^3 ; 而0Cr13Ni5Mo不锈钢的累积体积损失量达到 6.9 mm^3 , 前者的抗空蚀能力明显优于后者。

2) 在局部载荷作用下, Ti-50Al合金的弹性变形能与0Cr13Ni5Mo不锈钢相近, 而塑性变形能明显高于0Cr13Ni5Mo。Ti-50Al合金在空蚀过程能吸收较多的塑性变形能, 并且表面在空蚀微射流反复作用下硬化, 能保证其在吸收较多冲击能量的同时, 裂纹不致过早形成, 从而减少材料质量损失,

使其呈现良好的抗空蚀性能。

3) 显微组织为层片状的Ti-50Al合金空蚀时沿晶界起裂和剥落。

致谢

感谢博士研究生王再友提供0Cr13Ni5Mo空蚀试验数据。

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 Shizhuo, DONG Xianglin. Erosion-wear and Fretting of Materials [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1987. 130-132.
- [2] Hammitt F G. Cavitation and Multiphase Flow Phenomena[M]. New York: McGraw-Hill, 1980. 20-24.
- [3] Tomita Y. Mechanisms of impulsive pressure generation and damage pit formation by bubble collapse[J]. J Fluid Mech, 1986, 169(8): 535-541.
- [4] 孙寿. 水泵汽蚀及其防治[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989. 5-6.
SUN Sou. Cavitation Erosion and its Prevention of Water Pump[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1989. 5-6.
- [5] 王者昌, 张毅, 张晓宏. 空蚀过程中的热效应[J]. 材料研究学报, 2001, 15(3): 287-290.
WANG Zhechang, ZHANG Yi, ZHANG Xiaohong. Thermal effect in cavitation erosion[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2001, 15(3): 287-290.
- [6] 黄伯云. 钛铝基金属间化合物[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1998. 3-12.
HUANG Baiyun. TiAl-based Intermetallic Compound [M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1998. 3-12.
- [7] 周怀营, 湛永钟. TiAl金属间化合物的研究进展[J]. 广西大学学报, 1999, 24(4): 262-264.
ZHOU Huaiying, ZHAN Yongzhong. Development of studies on TiAl intermetallics[J]. Journal of Guangxi University, 1999, 24(4), 262-264.
- [8] 李文, 关振中, 王沛枝. Ti-Al系金属间化合物的价电子结构与其力学性能的关系[J]. 机械工程材料, 1996, 20(2): 9-12.
LI Wen, GUAN Zhengzhong, WANG Peizhi, et al. Relations of valence electron structures and mechanical properties of titanium aluminides[J]. Materials for Mechanical Engineering, 1996, 20(2): 9-12.
- [9] Cheng F T, Shi P, Man H C. Correlation of cavitation

- erosion resistance with indentation-derived properties for a NiTi alloy[J]. Scripta Materialia, 2001, 45(9): 1083 - 1089.
- [10] Liu R, Li D Y. Indentation behavior and wear resistance of pseudoelastic Ti-Ni alloy[J]. Materials Science and Technology, 2000, 16(3): 328 - 332.
- [11] 龙霓东, 朱金华. Ti₃Al 基合金的弹性变形能与空蚀[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(3): 560 - 564.
- LONG Nídong, ZHU Jín-hua. Elastic deformation energy and cavitation erosion of Ti₃Al-based alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(3): 560 - 564.
- [12] 陈国良, 林均品. 有序金属间化合物结构材料物理金属学基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999. 36 - 39.
- CHEN Guó-liang, LIN Jūn-pín. Physical Metallography Basis of Ordered Intermetallic Compound Structure Materials[M]. Beijing: Metallurgic Industry Press, 1999. 36 - 39.

Cavitation erosion of γ -TiAl alloy

LONG Nídong^{1, 2}, LONG Yǎndong³, ZHU Jín-hua¹

(1. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xí'an Jiaotong University, Xí'an 710049, China;

2. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xí'an 710038, China;

3. Hengtong Guanghua Pharmaceutical Co. Ltd, Xí'an 710086, China)

Abstract: The cavitation erosion of Ti-50Al alloy with single phase γ -TiAl was investigated with an ultrasonic vibratory apparatus. The eroded surface was observed by SEM. To simulate the effect of the collapse of vapour cavities or bubbles, Rockwell hardness tester was used to exert a load on the small area of Ti-50Al. The results show that the cumulative volume loss of Ti-50Al alloy is only 0.926 mm³ after cavitation erosion for 26 h. It has excellent cavitation erosion resistance, which is mainly ascribed to its high deformation energy and good work-hardening ability under a localized load. The cavitation erosion of Ti-50Al alloy is due to stress concentration at the grain boundaries, followed by fracture and subsequent material removal.

Key words: cavitation erosion; γ -TiAl alloy; energy

(编辑 陈爱华)