

热暴露和热盐暴露的交互作用对 Ti811 合金热盐应力腐蚀性能的影响^①

赵永庆 朱康英 李佐臣 吴清枝
(西北有色金属研究院, 西安 710016)

全桂彝 王 稿 王玮琪 王小朝
(宝鸡有色金属加工厂, 宝鸡 721014)

摘 要 Ti8Al1Mo1V(Ti811) 合金对热盐应力腐蚀(HSSC) 较敏感, 单个因素对合金 HSSC 行为影响已有研究, 而复合因素的影响研究很少。采用工业生产的 Ti811 合金棒材, 经双重退火后, 研究了热暴露和热盐暴露的交互作用对合金 HSSC 性能的影响。结果表明: 425 °C 实验条件下, 热暴露和热盐暴露交互作用与单热盐应力腐蚀相比使合金的 HSSC 性能明显降低。延伸率由 18% 降至 6%; 合金中存在位错在晶界处塞积诱发的沿晶裂纹, 腐蚀产物易于在裂纹尖端积聚。导致沿晶断裂, 加速腐蚀。此外, 在交互作用过程中, 合金中 α_2 (Ti₃Al) 脆性相的析出以及晶间 β 相发生转变, 使合金的 HSSC 敏感性增大, 并加速热盐应力腐蚀。

关键词 Ti811 合金 热暴露 热盐暴露 热盐应力腐蚀

中图法分类号 TV252.4

Ti811 合金(Ti8Al1Mo1V) 是美国 60 年代研制的一种近 α 型耐热钛合金, 具有密度低、弹性模量高、可焊性好、成型容易等优点, 可在 425 °C 左右长期使用, 是飞机发动机压气机叶片的理想材料。飞机在沿海低空飞行时, 发动机部件上常沉积有 NaCl 等卤盐, 其含量可达 0.008~0.300 mg/cm²。在特定条件下, 钛合金部件与卤盐相互作用, 产生热盐应力腐蚀(HSSC), 导致钛合金的性能降低, 使飞机过早退役。钛合金的热盐应力腐蚀性能的研究中^[1-9], 大多探讨单个因素对钛合金 HSSC 性能的影响, 而复合因素的影响研究很少见诸报道。因此, 本文研究了温度、应力及时间等多个因素对 Ti811 合金 HSSC 性能的影响。

1 实验方法

实验所用 Ti811 合金为宝鸡有色金属加工厂提供的 $\phi 44$ mm 精锻棒, 其化学成分为: Ti

7.8Al1.0Mo1.1V-0.09O-0.006H。合金的原始组织和经 910 °C/1h AC+580 °C/8h AC 双重退火后的组织如图 1 所示, 二者均为等轴 α 相+晶间 β 相。将双重退火后的合金沿轴向取样加工成标准拉伸试样, 再分两种方法进行实验。一种先在试样有效尺寸内采用盐雾法喷盐(NaCl 0.2 mg/cm²)^[4], 进行热盐暴露(425 °C/100h), 再在试样有效尺寸内喷盐(0.2 mg/cm²), 进行热盐应力腐蚀(425 °C/100 h/180 MPa)。另一种先进行热应力暴露(425 °C/100 h/180 MPa), 再进行热盐应力腐蚀(425 °C/100 h/180 MPa), 喷盐密度仍为 0.2 mg/cm²; 最后, 在 1185 型电子拉伸机上测试延伸率 δ 降低幅度^[3]。采用 H-800 透射电镜, PSEM $\times 500$ 扫描电镜观察微观组织、断口形貌。

2 结果及分析

表 1 为热暴露和热盐暴露交互作用的热盐

① 收稿日期: 1996-11-20; 修回日期: 1997-02-24 赵永庆, 男, 高级工程师

应力腐蚀实验结果, 以及相应条件下热暴露和热盐暴露的实验结果。由表 1 可知: 单纯热暴露或单纯热盐暴露(*C*, *D*, *E*, *F*, *G*, *H*) 对合金的性能几乎没有影响, 而热暴露和热盐暴露的交互作用(*A*, *B*) 使合金的 HSSC 性能明显恶化, 其 δ , φ 值比标准值低得多, 且 *B* 合金的强度也降低了许多, 接近标准值的极限。

表 1 热暴露和热盐暴露相互作用
对合金性能的影响

Table 1 Effects of interaction of hot exposure and hot salt exposure on properties of alloy

Condition	No.	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ /%	φ /%
Hot stress corrosion+ hot salt stress corrosion 425 °C/ 100 h/ 180 MPa+ 425 °C/ 100 h/ 180 MPa	A	937	913	6.0	9.7
Hot salt exposure+ hot salt stress corrosion 425 °C/ 100 h+ 425 °C/ 100 h/ 180 MPa	B	897	887	4.0	6.7
Hot stress corrosion 425 °C/ 100 h/ 180 MPa	C	940	908	20	36
Hot salt stress corrosion 425 °C/ 100 h/ 180 MPa	D	934	905	18	38
Hot exposure 425 °C/ 200 h	E	948	907	19	37
Hot salt exposure 425 °C/ 100 h	F	947	908	18	38
Hot exposure 425 °C/ 200 h	G	944	913	19	40
Hot salt exposure 425 °C/ 200 h	H	935	910	18	36
Hot exposure 425 °C/ 100 h	I	≥895	≥825	≥9	≥8

断口观察表明, 经过热盐暴露的 *D*, *F*, *H* 合金的断口无盐蚀区, 为均匀细小的韧窝状断口, *A*、*B* 态的断口有盐蚀区存在(图 2), *B* 态更明显些, 为解理状脆性断裂。图 2 中盐蚀区 X 射线能谱分析表明(图 3)盐蚀区存在 Cl^- 和 Na^+ , 表明 NaCl 已与基体发生反应产生了 H 原子。裂纹尖端在拉应力作用下更易吸附 H^+ , O^{2-} , Cl^- 等离子, 而促进腐蚀。*B* 态的腐蚀条件比 *A* 态更为苛刻, 其 HSSC 性能下降更加显著是合理的。在 *B* 态实验条件下, 经 425 °C/ 100 h 热盐暴露, 试样表面形成氧化层

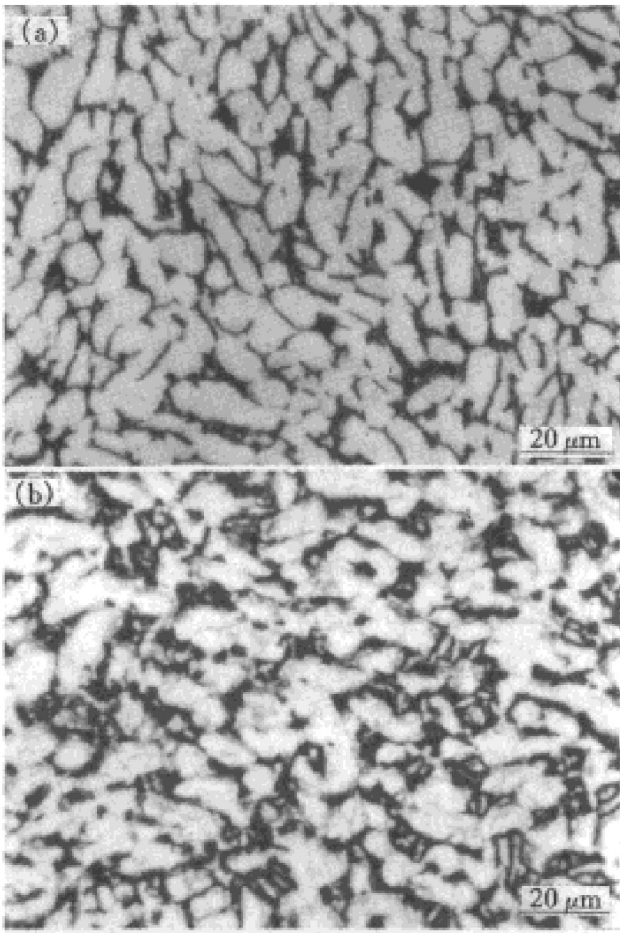


图 1 合金的原始组织及经 910 °C/ 1h A C+
580 °C/ 8 h A C 退火处理后的组织
Fig. 1 Microstructures of Ti811 alloy before
and after annealing
(a) —Original; (b) —Double annealing

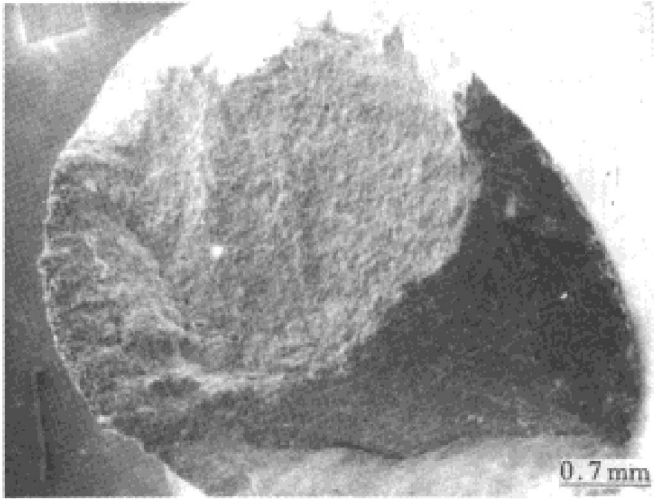


图 2 试样断口连续处的盐蚀区(上部白色区域)
Fig. 2 Salt corrosion zone on
fractographic verge(upper white zone)

和腐蚀产物层,但由于盐对基体的腐蚀轻微,没有形成盐蚀区,因此性能降低不显著。另外,氧化层、腐蚀产物层及基体的弹性模量、热膨胀系数各不相同,内应力很易萌生微裂纹,使氧化层呈疏松状态,盐很易通过氧化层达到基体。进一步的热盐应力腐蚀使盐与基体的反应进一步加剧,且在拉应力作用下,腐蚀产物(如 H^+ , O^{2+} , Cl^- 等)更易于在裂纹尖端聚积,导致腐蚀加速,并形成较大的盐蚀区和较多的裂纹。随着拉伸过程的进行,已存在的裂纹沿晶扩展并导致最终的断裂(图4)。另外H原子的产生及沿晶扩散^[7],使合金脆性增加,并导致脆性断裂。在A态实验条件下,初期仅在试样表面形成氧化层,对合金性能影响不大^[10]。然而在拉应力作用下,表面的完整性受到破坏,为后续的热盐应力腐蚀条件下,盐和基体的反应提供了短程扩散等有利条件,使盐蚀区易于形成。在拉伸变形过程中,已存在的裂纹快速沿晶扩展及H原子的沿晶扩散,导致材料脆断。因此,B态的前后双重盐作用比A态的单个盐作用更具破坏性,相应B态的性能下降较A态更多。

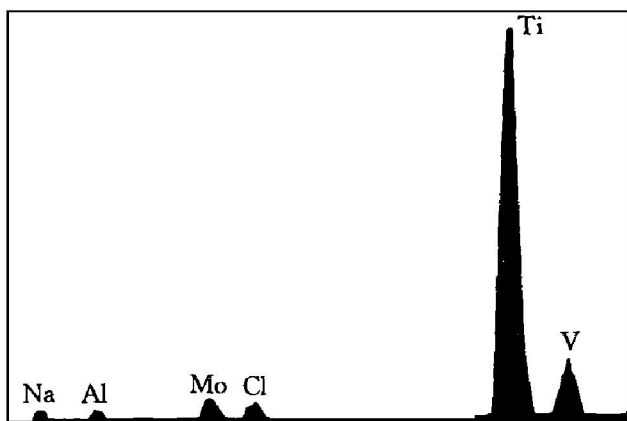


图3 盐蚀区的X射线能谱

Fig. 3 X-ray spectrum of salt corrosion zone

TEM观察表明,已发生HSSC的试样中,位错在 α 晶界处塞积(图4(a)),且晶界 β 发生转变(图5);位错塞积若不能得到松弛,将促使裂纹沿晶产生。同时也观察到成对位错的存在及成对位错的塞积(图4(b))。在拉伸过程中位错塞积高度化及应力集中,将使裂纹沿晶

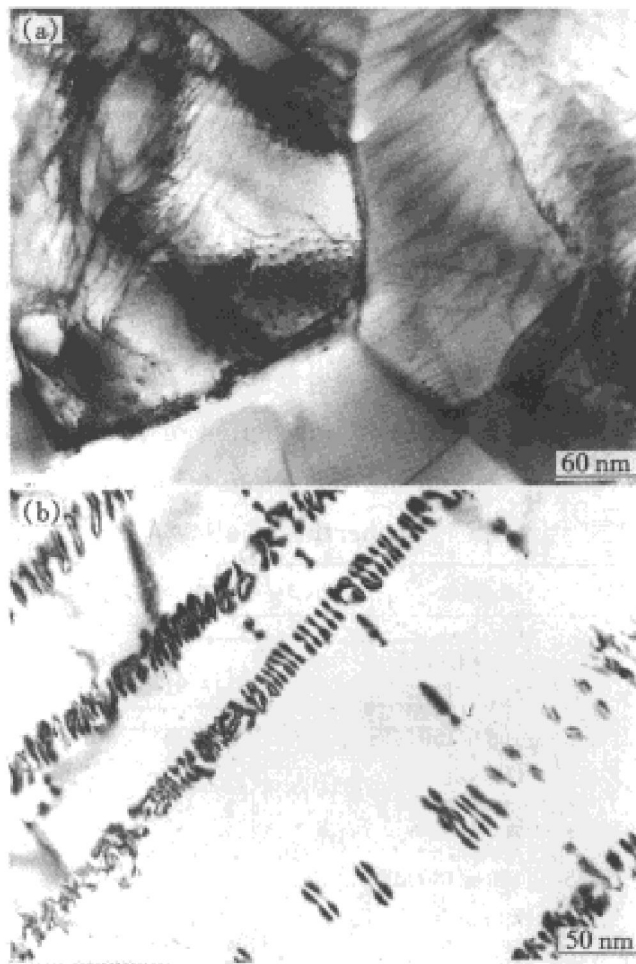


图4 发生HSSC后合金中的位错形貌

Fig. 4 Dislocation configurations after HSSC

- (a) —Dislocations pile up at grainboundary;
(b) —Dislocations in pairs and their pile up

扩展(图5)。由图4可看出, α 相颗粒中有细小均匀的小颗粒析出物,为验证这种小颗粒是否为 $\alpha_2(Ti_3Al)$ 相,进行了选区电子衍射,证实有超点阵衍射斑点存在,从其高倍像可清晰看出是 α_2 析出物($Ti811$ 合金中,只可能是 α_2 相^[11]),从图4(b)成对位错存在情况也说明有 α_2 相析出。 α_2 脆性相析出进一步使合金力学性能降低。当运动位错与 α_2 相相遇时, α_2 被切断而位错通过^[11],遇晶界、亚晶界障碍时产生位错塞积(图4(a))。在应力集中达到一定值后,在界面上发生裂纹生核,产生裂纹源。另外,位错切割 α_2 所需的剪切应力与 α_2 颗粒半径平方根成正比,所以下一个位错运动所需应力变小,比较容易在已活动过的滑移面上运

动, 这样单位体积的滑移面变少, 交叉滑移的可能性减小, 使滑移平面化^[10], 特别在氧含量较高时, 位错在滑移面以外的区域运动更加困难, 使较多的位错集中在较少的滑移面上。由于位错塞积, 在其端部造成高度的应力集中, 形成裂纹源, 并加速 HSSC 进行, 因而使合金 HSSC 性能进一步恶化。



图5 裂纹沿晶扩展及晶间 β 发生转变形貌

Fig. 5 Cracks propagating along grainboundary and transforming of grainboundary β

由图5的裂纹扩展途径可知, 晶间 β 在热盐暴露过程发生转变(次生 α)。次生 α 相对于 β 相有一定的脆性, 使得残余晶界 β 相对裂纹的成核和扩展抗力降低。虽然 Ti811 合金中 β 相含量很少(含量不大于 10%), 但对合金的 HSSC 性能也会产生一定的影响。

3 结论

(1) 425 °C 实验条件下, 热暴露和热盐暴露的交互作用使合金的 HSSC 性能进一步恶化。

(2) 位错在晶界处塞积, 形成沿晶微裂纹, 导致沿晶断裂。

(3) 发生 HSSC 的试样在热盐暴露过程中有 α_2 相析出, 使其 HSSC 性能进一步降低。

REFERENCES

- Peterson V C. J Met, 1971, (4): 40– 47.
- Sinigaglia D. Corrosion Science, 1978, (18): 781– 796.
- Mailiehuofu P K. Stress Corrosion Cracking of Titanium and Aluminum Alloys(钛合金和铝合金的应力腐蚀开裂). Beijing: National Defense Industry Press, 1982: 33– 46.
- Zhao Yongqing, Li Zuochen and Zhu Kangying. In: Proceedings of the Second Pacific International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM – 2), Korean, Korean Institute of Metals and Materials, 1995: 2433– 2440.
- Zhao Yongqing(赵永庆), Zhu Kangying(朱康英) and Li Zuochen(李佐臣). Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程), 1995, 24(2): 27– 33.
- Zhao Yongqing(赵永庆), Zhu Kangying(朱康英) and Li Zuochen(李佐臣). In: Proceedings of 96' China Materials Conference(96' 中国材料研讨会): III 2. Beijing: Chemical Industry Press, 1997: 430– 434.
- Zhao Yongqing(赵永庆), Zhu Kangying(朱康英) and Li Zuochen(李佐臣). Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程), 1996, 25(6): 23– 27.
- Zhu Kangying(朱康英), Zhao Yongqing(赵永庆) and Li Zuochen(李佐臣). Rare Metal(稀有金属), 1997, 21: 267– 272.
- Zhu Kangying(朱康英), Zhao Yongqing(赵永庆) and Li Zuochen(李佐臣). Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程), 1996, 25(5): 34– 39.
- Zhao Yongqing(赵永庆), Li Zuochen(李佐臣) and Zhu Kangying(朱康英). Materials Development and Applications(材料开发与应用), 1995, 10(2): 16– 20.
- Wang Jinyou(王金友), Ge Zhiming(葛志明) and Zhou Yanbang(周彦邦). Titanium Alloys for Aviation(航空用钛合金). Shanghai: Shanghai Technology and Science Press, 1985: 241– 244.

EFFECTS OF INTERACTION BETWEEN HOT EXPOSURE AND HOT SALT EXPOSURE ON HOT SALT STRESS CORROSION BEHAVIOR OF Ti811 ALLOY

Zhao Yongqing, Zhu Kangying, Li Zuochen and Wu Qingzhi

Northwest Institute for Nonferrous Metal Research,

Xi'an 710016, P. R. China

Quan Guiyi, Wang Gao, Wang Weiqi and Wang Xiaochao

Baoji Nonferrous Metal Works, Baoji 721014, P. R. China

ABSTRACT Ti811(Ti-8Al-1Mo-1V) alloy is sensitive to hot salt stress corrosion (HSSC), effects of single factor on the alloy's HSSC behavior were studied, but the effects of compound factors on its HSSC behavior have been seldom reported. Effects of interaction between hot exposure and hot salt exposure on its HSSC behavior were studied, the results indicate that interaction between hot exposure and hot salt exposure leads to an obvious decrease of HSSC properties compared with that of hot salt exposure, for example, its elongation reduces from 18% to 6%; dislocations pile up appear on grain boundary, which induces micro-cracks along grain boundary and leads to intergranular cracking. In addition, α_2 (Ti_3Al) phase precipitates and intergranular β transforms during the interaction process, its HSSC sensitivity increases and HSSC is accelerated.

Key words Ti811 alloy hot exposure hot salt exposure hot salt stress corrosion

(编辑 黄劲松)