

循环温度场作用下空冷态 TC4 合金的拉伸性能和显微组织的变化^①

耿洪滨 何世禹 雷廷权

(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要 对 1020、950 和 900 °C 空冷的 TC4 合金在 -196~350 °C 间进行了热循环试验, 测定了热循环前后的拉伸性能。结果表明: 经 1000 次热循环后强度上升, 塑性下降, 合金中的位错密度增大, 形变孪晶的数量增多, 其中 950 °C 空冷合金的强度上升幅度最大, 剩余塑性也最大。

关键词 钛合金 热循环 拉伸性能 显微组织

TC4 钛合金有较高的比强度和热强性, 广泛应用于航空航天领域^[1]。在服役期间, 许多零件常常要经受较大温差的热循环作用^[2-5]。在循环温度场作用下, 时效硬化型合金的显微组织和亚结构可能发生明显的改变^[6]。材料显微组织的改变必然引起性能的相应变化。Russ 等^[7, 8]在研究常压空气中热循环对 SiC/Ti-24Al-11Nb 和 SiC 增强铝镁基复合材料拉伸性能的影响时, 经过一定次数热循环后, 材料的拉伸强度极限显著下降。而有关钛合金在循环温度场作用下的力学性能和组织变化规律尚很少报导。本文研究了空冷态 TC4 合金经热循环后组织结构和拉伸性能的变化规律, 为航天器结构设计选择材料及工艺提供正确的依据。

1 材料与试验方法

选用直径为 30mm 的 TC4 合金热轧棒材, 用线切割法沿轧向截取板状试样, 其化学成分(%)为: 6.29Al, 4.04V, 0.27Fe, 0.10Si, 0.040N, 0.09C, 0.13O, 0.0110H, 余量 Ti。热处理时加热温度分别为 1020、950、900 °C, 保温 15min, 空冷; 热循环试验用空气炉加热, 液态氮浸冷, 试样的温度与时间关系曲线如图

1 所示。试样经热处理和热循环后磨去约 0.2mm 表面污染层, 拉伸试样标距最终尺寸为: 20mm × 5mm × 2mm。用 Instron 电子拉伸机在室温下测定合金的拉伸性能, 夹头移动速度为 2mm/min。

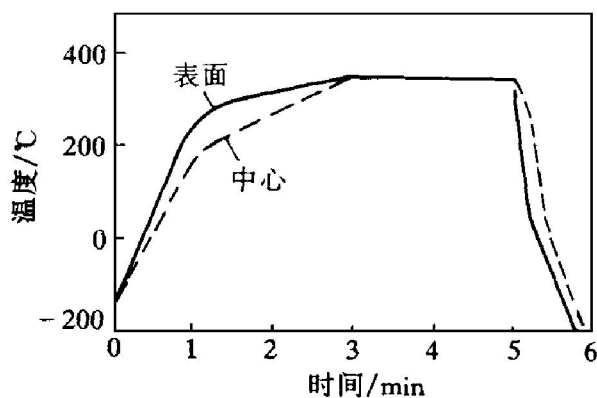


图1 试样的温度-时间曲线

透射电镜薄膜试样用电解双喷法制备, 电解液(体积比)为: 甲醇: 正丁醇: 高氯酸 = 10: 6: 1, 直流电压 20V, 电解液温度不超过 -40 °C。用 Philips EM420 透射电镜分析合金的组织, 加速电压 120kV。

试样相组成分析在 Rigaku D/max-rB X 射线衍射仪上进行。试验条件: CuK α , Ni 滤波片; 管电压 50kV, 管电流 50mA; 狭缝尺寸

① 收稿日期: 1996-05-03; 修回日期: 1996-10-09 耿洪滨, 男, 33岁, 博士

DS= 1°, RS= 0.3, SS= 1°; 扫描速度 0.1 (°)/min。对六方结构的 α 相, 利用(006) 晶面在铜靶中的反射线测 c , 利用(300) 晶面在镍靶中的反射线测 a , 采用点阵常数 $a= 4.0495$ Å 的高纯铝作标准件, 标准件的计算分别按(422) 和(333) 晶面在镍靶和铜靶辐射中的反射线进行。采用 β 相的(200) 晶面在铜靶中的反射线测体心立方结构的 β 相点阵常数。为保证测试精度, 所用试样表面经机械抛光后再进行电解抛光(电解液体积比为: HF: HNO₃= 1: 3), 以克服磨削应力的影响。

2 试验结果

2.1 空冷态合金热循环后的拉伸性能

试验结果见图 2 和图 3。经 1000 次热循环后空冷态合金的抗拉强度上升, 其中经 950 °C 加热空冷的合金升高幅度最大。但经 3 000 次热循环后, 950 °C 加热空冷合金的强度又有所下降。1000 次热循环作用后, 不同温度加热空冷合金的延伸率均显著下降, 其中经 950 °C 加热空冷合金的剩余塑性最大。

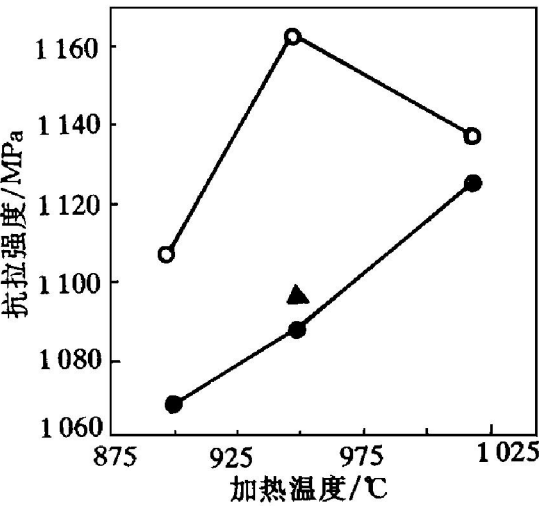


图 2 空冷态 TC4 合金热循环前后的抗拉强度
● —N= 0; ○ —N= 1000; ▲ —N= 3 000

2.2 空冷态合金热循环前后的显微组织

空冷态合金的组织如图 4 所示。经 1020 °C 加热的合金, 由于加热温度处在 β 单相区, 空冷后得到粗大的 β_转, 即 α+ β 魏氏组

织(图 4(a))。而 950 °C 和 900 °C 加热的合金, 空冷后得到初生 α+ β_转, 其中 950 °C 加热的合金其初生 α 相约占 25%, 900 °C 加热的合金其初生 α 相约占 80%(图 4(b)、(c))。

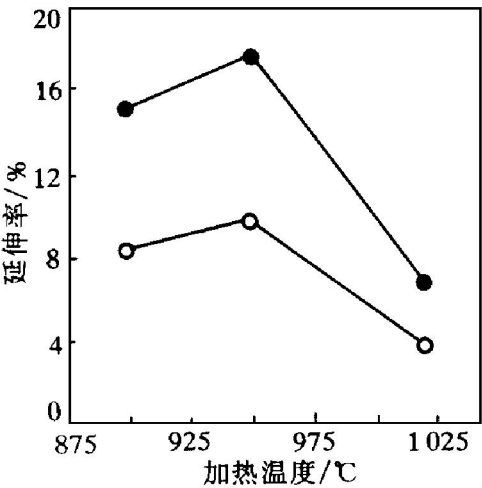


图 3 空冷态 TC4 合金热循环前后的塑性
● —N= 0; ○ —N= 1000; ▲ —N= 3 000

经热循环作用后空冷态合金的低倍组织没有明显变化。但图 5、6 所示的透射电镜组织分析表明, 随着热循环次数的增多, 合金中的位错密度均显著升高, 形变孪晶的数量也增多。根据 $g \cdot R$ 的衬度变化特征和位错的迹线分析原理, 采用 TEM 系统操作分析了 α 相内激活位错列的滑移系统。发现初生 α 相中的绝大部分可见位错以 {0110} < 2110 > 类型为主。图 5(a)、(b)、(c) 分别是 950 °C 加热空冷的合金热循环前和经 1 000、3 000 次热循环后初生 α 相中的位错组态。可见一些位错在初生 α 相与基体的界面处发生塞积, 并形成较稳定的位错网络。图 6(a) 和(b) 分别是 950 °C 加热空冷的合金经 3 000 次热循环后初生 α 相中的孪晶形貌及相应的衍射斑点。

X 射线结构分析也表明, 空冷态合金热循环后仍由 α 和 β 两相组成。表 1 给出了 950 °C 加热空冷合金经 3 000 次热循环前后 α 和 β 相

表 1 950 °C 空冷合金经 3 000 次热循环前后 α 和 β 相的点阵常数

试样状态	α 相点阵常数			β 相点阵常数
	a	c	c/a	a
热循环前	2.932	4.676	1.595	3.232
热循环后	2.933	4.676	1.594	3.232

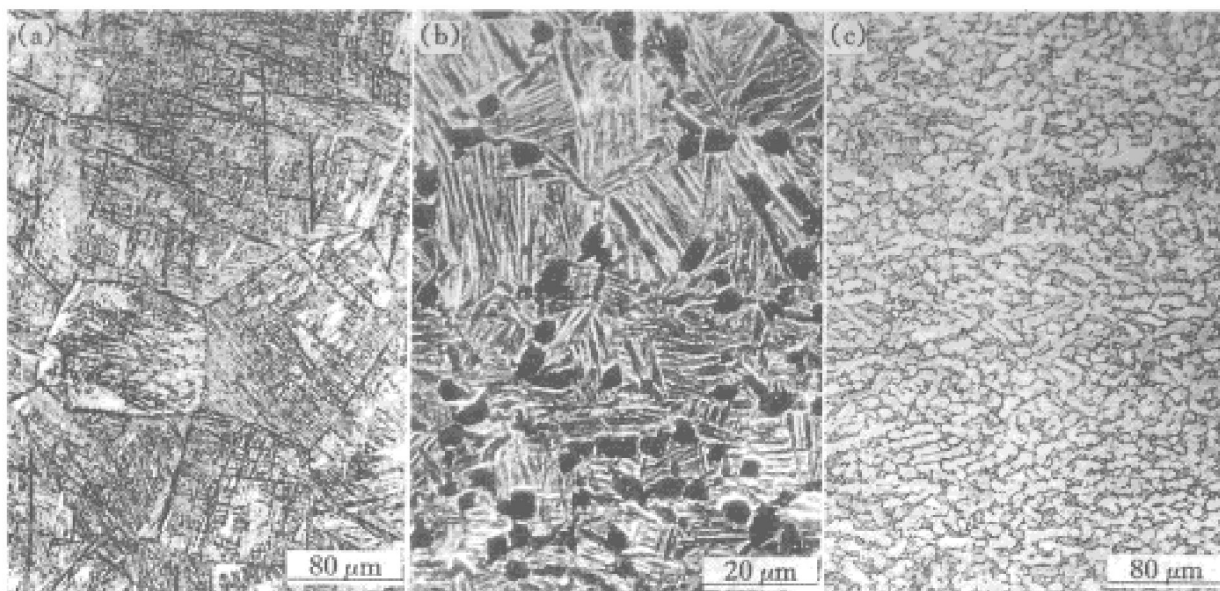


图4 空冷态 TC4 合金的光学显微组织

- (a) $-1020\text{ }^{\circ}\text{C}$, 粗大的板状 α 晶粒与晶间 β 相(黑色); (b) $-950\text{ }^{\circ}\text{C}$, 转变 β 基体与初生 α 晶粒;
(c) $-900\text{ }^{\circ}\text{C}$, 转变 β 晶粒中的 α 初晶

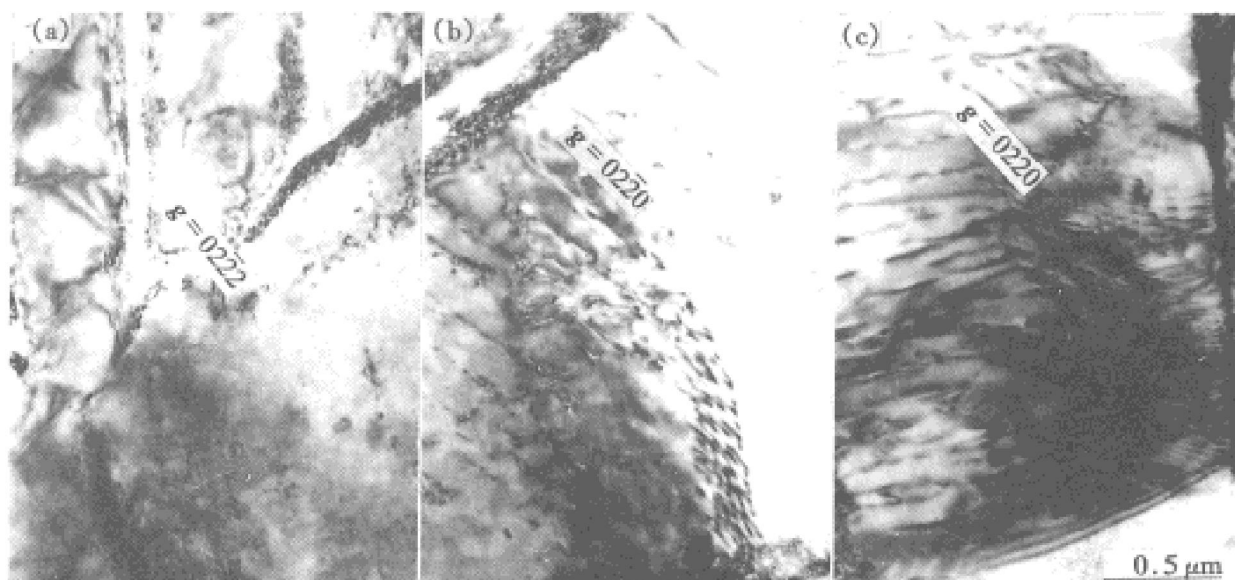


图5 950 $^{\circ}\text{C}$ 空冷合金热循环后初生 α 相中的位错组态(TEM)

- (a) $-N=0$; (b) $-N=1000$; (c) $-N=3000$

的点阵常数。可以看出经 3 000 次热循环作用后该空冷态合金中的 α 和 β 相的点阵常数几乎没变, 说明没有诱发时效析出现象。

3 讨论

合金的各组成相, 甚至同一相的不同晶向

上的热膨胀系数、弹性模量不同, 在循环变温过程中于两相间产生热应力。在周期性热应力作用下, 若某相的晶体取向较为有利, 则该相以滑移的方式变形; 若晶体取向不利, 则该相只能以形成孪晶的方式来调整位向, 以便产生滑移。 α 相具有良好的塑性, 可能是由于其晶格常数 c 与 a 之比小于 1.633(表 1), 基面

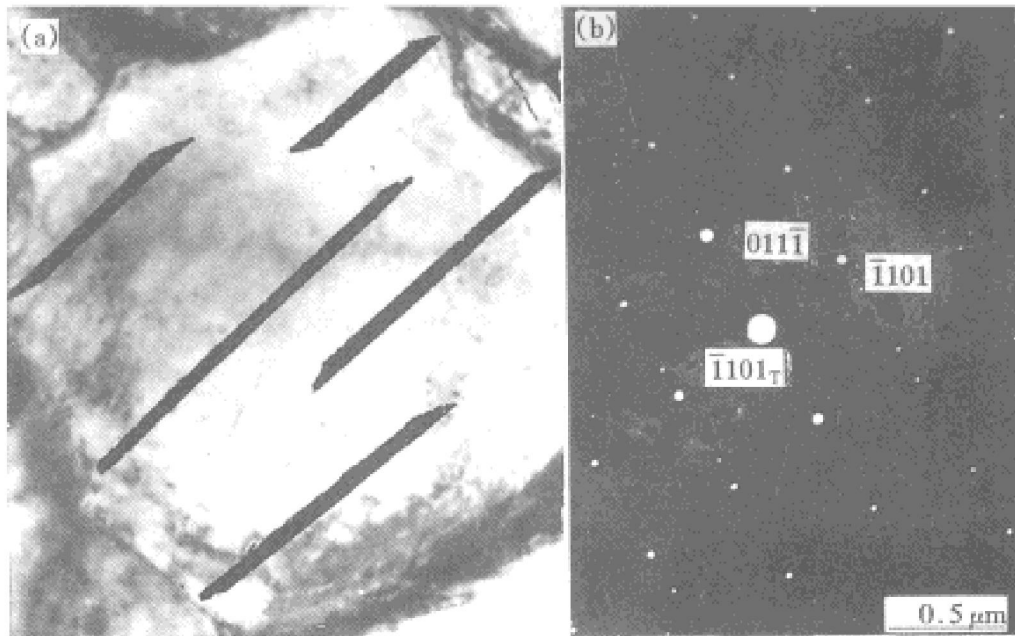


图6 950 °C空冷合金经3000次热循环后初生 α 相中的变形孪晶形貌(TEM)

(a) —变形孪晶; (b) —衍射谱

(0001)不再是唯一的密排面,棱柱面 $\{10\bar{1}0\}$ 和棱锥面 $\{10\bar{1}1\}$ 也具有相近的密排程度,致使 α 钛的滑移还可沿棱柱面 $\{10\bar{1}0\}$ 和棱锥面 $\{10\bar{1}1\}$ 进行。随着热循环次数的增多,合金的塑性变形量也不断增大,表现为合金的位错、形变孪晶等缺陷不断累积,使得合金的强度升高,塑性下降,如经950 °C加热空冷合金的抗拉强度由热循环前的1088 MPa上升到1000次热循环后的1163 MPa,而延伸率则由17.5%下降到9.8%(图2和图3)。当位错、形变孪晶等缺陷累积到一定程度时,热应力难以通过形成的位错等缺陷继续得到释放,使得在相界附近产生很大内应力。当内应力超过相界面的结合强度,便在相界面附近产生微裂纹^[9]。这可能是导致经3000次热循环后合金强度下降的原因。

4 结论

(1) 经1000次热循环后不同温度加热空冷合金的抗拉强度升高,其中经950 °C加热空冷合金的强度升高幅度最大,但经3000次热

循环后,950 °C加热空冷合金的强度又下降。

(2) 经1000次热循环作用后,不同温度加热空冷合金的延伸率均一致下降,其中经950 °C加热空冷合金的剩余塑性最大。

(3) 循环温度场作用下,950 °C空冷合金的综合力学性能最佳。

(4) 热循环未能诱发空冷态TC4合金的时效析出现象,但使合金中的位错密度升高,形变孪晶的数量增多。

参考文献

- 1 Tobler R L. ASTM STP 601, 1976: 346.
- 2 吴运学. 宇航材料及工艺, 1992, 4: 62.
- 3 盛磊. 宇航材料及工艺, 1992, 4: 27.
- 4 金峰. 宇航材料及工艺, 1991, 4: 24.
- 5 邱惠中. 宇航材料及工艺, 1991, 4: 1.
- 6 李承受. 宇航学报, 1992, 1: 1.
- 7 Russ S M. Metall Trans A, 1990, 21(6): 1595.
- 8 Hajime Ikuno, Shiroichi Towata. J Japan Inst Metals, 1989, 53(3): 327.
- 9 He Shiyu. Acta Metallurgica Sinica(English Edition), 1991, 4A: 55.

(To page 103)

SOLIDIFICATION MORPHOLOGY AND STRUCTURE OF $\text{Al}_{70-x}\text{Cu}_8\text{Fe}_{10}\text{Cr}_{12}\text{Ce}_x$ QUASICRYSTALS

Qi Yuhong, Zhang Zhanping, Hei Zukun, Ma Yongqing, Shi Yaqin

Institute of Metal and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026

ABSTRACT The solidification morphology and structure of AlCuFeCr quasicrystals were studied. The results showed that the hardness of AlCuFeCrCe is higher than that of AlCuFeCr , and the suitable content of Ce in the alloy refines the grain size. With increase of Ce content in alloy, the solidification morphology of the alloy occurs the transformation from cellular crystal to dendrite crystal.

Key words quasicrystals rare earth element Ce solidification morphology

(编辑 黄劲松)

(From page 93)

TENSILE PROPERTIES AND CHANGE IN MICROSTRUCTURE OF AIR COOLED TC4 ALLOY SUBJECTED TO CYCLIC TEMPERATURE FIELD

Geng Hongbin, He Shiyu, Lei Tingquan

*School of Materials Science and Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001*

ABSTRACT The thermal cycling tests between -196 and $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ were performed on the TC4 alloy air cooled from $1\ 020$, 950 and $900\text{ }^{\circ}\text{C}$. The tensile properties before and after thermal cycling were evaluated. Experimental results show that after $1\ 000$ thermal cycles, the strength increases, the ductility decreases and the dislocation density or amount of deformation twins increase, among which the specimens air cooled from $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ have the largest increase in strength and have the largest residual ductility.

Key words titanium alloy thermal cycling tensile property microstructure

(编辑 彭超群)