

文章编号:1000-582X(2007)03-0056-04

Ti-2%Al-2.5%Zr 钛合金的高温持久强度*

李远睿,胡跃均,王书珍

(重庆大学材料科学与工程学院,重庆 400030)

摘要:介绍了Ti-2%Al-2.5%Zr钛合金的成分、组织后,首先测定出了该合金在350℃下的 σ_b 和 $\sigma_{0.2}$ 值.根据试验的特点、试材的组织状况及约比温度等因素确定了试验采用的6个应力水平点.按GB6395-86《金属高温拉伸持久试验方法》标准规定对该合金进行了350℃下的持久强度试验.对获得的数据用最小二乘法进行回归处理后,得到了适用于工作应力在 $\sigma_{0.2}^{350^\circ\text{C}} < \sigma < \sigma_b^{350^\circ\text{C}}$ 范围的方程;而适用于工作应力 $\sigma < \sigma_{0.2}^{350^\circ\text{C}}$ 并可以外推一个数量级的方程最后,观察到试验后该种钛合金的金相组织发生了明显的变化:在集中塑性变形区呈明显的纤维状,而在均匀塑性变形区则由于回复再结晶而变成细小的等轴晶了.

关键词:钛合金;高温;持久强度

中图分类号:TG111.8

文献标识码:A

名义成分为Ti-2%Al-2.5%Zr钛合金是航空航天器和核反应堆等用的结构材料.系具有密排六方晶格(hcp)结构的单相 α -Ti合金^[1].文中在简介了它的化学成分、金相组织和部分力学性能后,参照GB6395-86《金属高温拉伸持久试验方法》进行了该合金的高温持久强度试验.

若用该种钛合金作为核反应堆的结构材料,在工作时将承受一定的温度、应力和辐照作用.为保证核反应堆的绝对安全,应试验并测出它在350℃下的高温持久强度曲线,以提供给设计者参考.

首先,对厚度为2mm的Ti-2%Al-2.5%Zr钛合金板材用金相法判明了轧向,沿轧向将材料按GB6395-86标准规定加工成高温持久强度试样.在带有加热装置和温度控制系统的万能材料试验机上测定了该试验材料在350℃的 $\sigma_{0.2}$ 和 σ_b 值.从而,据试验材料的自身特点,组织状况和约比温度等因素确定了在350℃下作高温持久强度试验时的6个应力水平点.

随后,在4台RD-23型高温拉伸试验机上,于350℃下进行了6个不同应力水平的高温持久强度试验.历时14.5个的试验,取得了13个有效数据.再用最小二乘法直接对实验数据进行回归处理和借助幂函

数回归处理后,得到了该种合金在350℃下分别适合2种应力范围的2个高温持久强度方程.并绘制出了各自的高温持久强度曲线.

最后,观察了2个试样在试验后的集中变形区和均匀变形区的金相组织.

1 试验材料

1.1 化学成分

名义成分为Ti-2%Al-2.5%Zr的钛合金中Al是 α 稳定元素,Zr为中性元素,是单相的 α -Ti合金.试验材料2mm厚的板材,其实际成分见表1所列.

表1 试验用钛合金的化学成分

化学成分	Al	Zr	Fe	Si	C
含量	2.3	2.4	0.05	<0.04	0.01
化学成分	N	H	O	Na	Cu
含量	0.001	0.001	0.07	<0.01	0.01

1.2 金相组织

试验材料的金相组织如图1所示.从此图看到:该试材沿轧向(纵向)晶粒被拉长,这将使沿轧向加工的高温持久强度试样在试验时与应力方向垂直的晶界较平行方向晶界短,会增加持久强度的试验时间^[2].

* 收稿日期:2006-11-12

基金项目:核燃料及材料国家重点实验室基金资助项目(99JS85.6.1.JW.2004)

作者简介:李远睿(1946-),男,重庆大学教授,主要从事金属材料研究,E-mail:65103625@163.com.

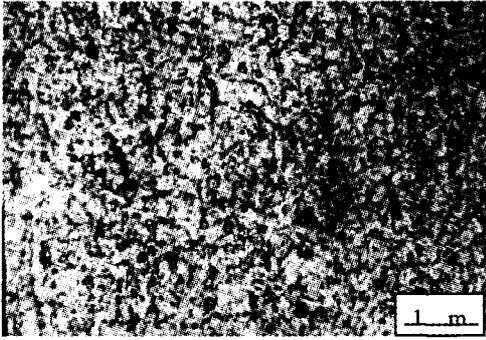


图1 Ti-2%Al-2.5%Zr 钛合金板材
(2 mm 厚的板材)的纵向金相组织。

1.3 力学性能

在带有加热炉及温控仪器的万能材料试验机上用加工好的 Ti-2%Al-2.5%Zr 钛合金高温持久强度试样预先测定出 350 °C 下该材料的 $\sigma_{0.2} = 328$ MPa, 而 $\sigma_b = 408.5$ MPa。

2 试验过程

2.1 试样准备

按 GB6395-86《金属高温拉伸持久试验方法》标准规定,将试材沿轧向加工成 $L_1 = 121$ mm 的矩形截面标准试样 25 件。

2.2 试验设备

RD2-3 型高温材料试验机 4 台。其主要技术参数为:最大载荷 30 kN;工作温度 200 ~ 900 °C。

2.3 载荷选择

由于纯钛的熔点为 $T_m = (1941 \pm 285 \text{ K})^{[3]}$, 近似地将试验用钛合金当作纯钛对待,其约比温度为 $t/t_m = \frac{350+273}{1941} = 0.31 < 0.50$, 故规定的 350 °C 实验温度算不上“高温”,应称为“低温”^[4];试样是沿轧向加工的,其垂直应力方向上的晶界比平行方向的晶界短,这将会显著增长试验时间^[2];钛及其合金在 350 °C 下于空气环境中抗氧化腐蚀性能极佳^[4],难以因氧化烧损而断裂,因而低应力水平下试验、特别是当试验应力 $< \sigma_{0.2}^{350 \text{ °C}}$ 时,试验时间会很长。

基于上述原因,为使试验时间不至过长而难以得到试验结果,参照该钛合金板材 350 °C 下的测得的 $\sigma_b^{350 \text{ °C}} = 408.5$ MPa、 $\sigma_{0.2}^{350 \text{ °C}} = 328$ MPa 两值,确定 6 个试验应力为: $\sigma_1 = 400$ MPa、 $\sigma_2 = 395$ MPa、 $\sigma_3 = 390$ MPa、 $\sigma_4 = 385$ MPa、 $\sigma_5 = 368$ MPa、 $\sigma_6 = 315$ MPa。显然,只有 $\sigma_6 = 315$ MPa 低于其 350 °C 下的 $\sigma_{0.2}^{350 \text{ °C}}$ 。

2.4 试验方法

按 GB6395-86《金属高温拉伸持久试验方法》标准

规定装好试样;升温至 350 °C 后空载保温 1 h 再均匀、缓慢和无振动地加载至规定的应力后开始计时。试验中因故停机应立即卸载并降温。此后,每次重新开始试验前均重复前述准备过程,累计加载时间直到试样断裂为止。

2.5 试验结果

在选用的 6 个应力点上共作出了 13 个有效试样,对试验结果(试验应力与持久时间)取对数后列于表 2。

表 2 Ti-2%Al-2.5%Zr 钛合金板材 350 °C
高温持久强度试验数据

编号	σ /MPa	$\lg\sigma$	时间/h	$\lg t$	δ /%
1	400	2.602 1	401.0	2.603 1	22.3
2	400	2.620 1	477.0	2.678 5	22.3
3	395	2.596 6	712.2	2.852	22.9
4	395	2.596 6	757.6	2.879 4	—
5	395	2.596 6	721.7	2.858 4	—
6	390	2.591 1	941.2	2.973 7	23.2
7	385	2.585 5	1007.4	3.003 2	25.1
8	385	2.585 5	1 028.6	3.012 2	25.1
9	385	2.585 5	1072.8	3.030 5	25.1
10	368	2.565 8	1 518.4	3.181 4	—
11	368	2.565 8	1 518.4	3.181 4	27.6
12	368	2.565 8	1542.9	3.188 3	27.6
13	315	2.498 3	9 964.0	3.998 4	31.4

表 2 的实验数据说明:在 350 °C 恒温条件下,随着试验应力的下降,断裂时间会增加,延伸率也会增大,试样颈缩程度亦加大。

当试验应力 $\sigma = 315$ MPa 时,累计持续时间可长达 9 964 h 才断裂。这表明该种钛合金 350 °C 下的高温持久强度曲线在屈服应力以下断裂时间极长。

3 数据处理

3.1 用最小二乘法直接拟合

据表 2 所列的实验数据,直接用最小二乘法进行数据处理,得到回归后的直线方程为:

$$\sigma = 416.18 - 0.03054 t. \quad (1)$$

得到方程(1)后,便可求得该种钛合金在 $(\sigma_{0.2}^{350 \text{ °C}} < \sigma < \sigma_b^{350 \text{ °C}})$ 应力范围内于 350 °C 下的高温持续时间;或者在实验数据的范围内持续时间所对应的应力。

于是,据方程(1)可以做出如图 2 所示的曲线来。

因 $\sigma = 416.8 - 0.030201t$ 是在试验应力满足 $\sigma_{0.2}^{350 \text{ °C}} < \sigma < \sigma_b^{350 \text{ °C}}$ (328 MPa $< \sigma < 408.5$ MPa) 条件下得到的,且在此应力范围内的计算数据十分准确;若施

加应力 $\sigma < \sigma_{0.2}^{350^\circ\text{C}}$, 则用图2和公式(1)就不能外推, 因而外推至屈服点以下的应力时, 需另作考虑。

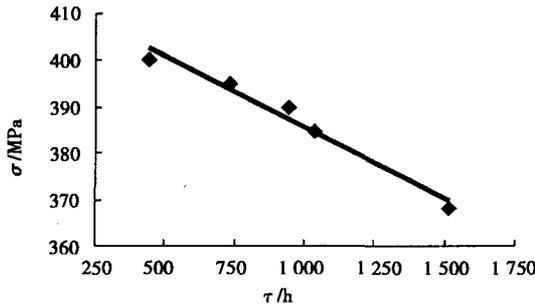


图2 2 mm厚的Ti-2%Al-2.5%Zr钛合金板材350℃持久强度曲线 ($\sigma_{0.2}^{350^\circ\text{C}} < \sigma < \sigma_b^{350^\circ\text{C}}$)

3.2 用关系式 $\sigma = D \cdot t^{-d[5]}$ 拟合

由于350℃的试验温度对钛合金来说较低, 其约比温度不高, 而选用的试验应力较大, 在 $\sigma_{0.2}^{350^\circ\text{C}} = 328$ MPa附近试验的应力点很少, 难以准确外推到屈服点以下的应力. 故用指数关系式进行拟合:

$$\sigma = D \cdot t^{-d}, \quad (2)$$

其中: σ 为试验应力; D 为系数; t 为试验时间; d 为时间指数。

但是大量试验数据证明, 当试验时间范围较大时, 试验曲线与该公式有一定的偏离, 应当用 $\lg t$ 的多项式来修正^[6]:

$$\lg \sigma = a_0 + a_1 \lg t + a_2 \lg^2 t + \dots \quad (3)$$

一般取至 $\lg t$ 的三次项, 也有仅取二次项的. 文中就用最小二乘法进行数据处理, 然后将幂指数关系和直线关系与试验数据进行比较。

将表2中数据按照幂指数关系进行拟合可得到持久时间与应力之间的关系如下:

$$\sigma = 664.01t^{-0.0799} \quad (4)$$

以应力为纵坐标, 时间为横坐标, 把试验数据描在直角坐标系中, 并根据上述幂指数关系拟合出外推曲线, 即应力-时间关系曲线如图3所示。

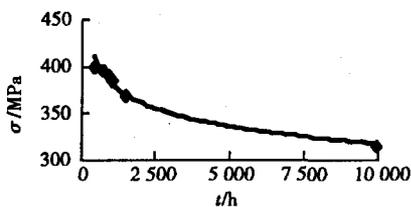


图3 应力-时间关系曲线(幂指数关系)

用公式(1)和(4)进行计算, 将预测数据与试验数据进行比较, 结果见表3。

表3 预测数据与试验数据的比较

试验时间/h	试验应力/MPa	式(1)预测应力/MPa	式(4)预测应力/MPa
439.0 (平均)	400	402.8	408.4
730.5 (平均)	395	393.9	392.1
941.2	390	387.4	384.2
1 036.3 (平均)	385	384.5	381.3
1 513.3 (平均)	368	370.0	369.9
9 964.0	315	111.9	318.2

从表3中数据可以看出, 在试验时间范围内式(1)和式(4)都有较高的准确性, 而公式(1)只有应力范围在 $\sigma_{0.2}^{350^\circ\text{C}} < \sigma < \sigma_b^{350^\circ\text{C}}$ 的条件下才使其准确度最高, 但不能外推; 公式(4)虽然预测精度约低, 但可以向低应力方向外推, 更具工程实用价值。

4 金相分析

对编号为7号(385 MPa)和10号(368 MPa)的2个试样从断口到其均匀塑性变形区的一定长度范围取样. 这样, 取下的样品包括有均匀塑性变形区和集中塑性变形区2个部分. 制样后, 分别拍摄其均匀和集中塑性变形区的金相组织, 得到如图4至图7所示的金相照片。

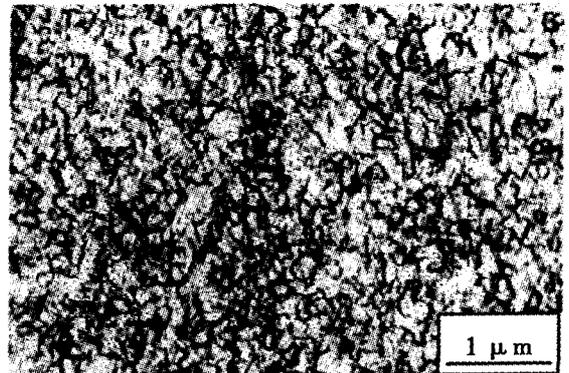


图4 385 MPa样品均匀塑性变形区金相组织: 细小的等轴 α -Ti 晶粒。

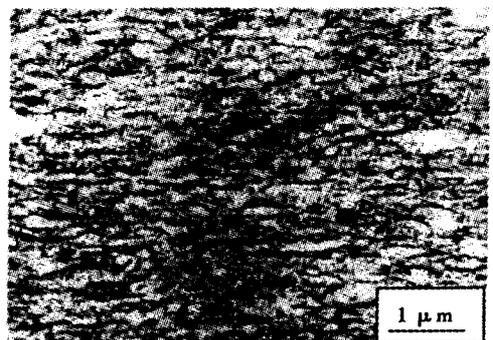


图5 385 MPa样品集中塑性变形区金相组织: 晶粒呈纤维状。

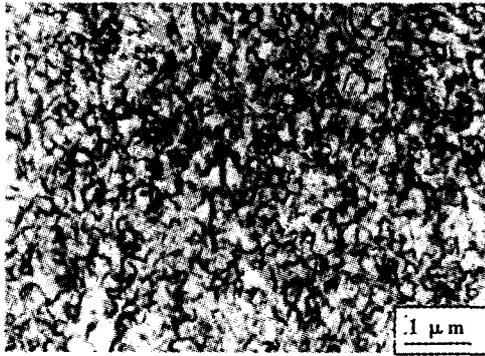


图6 368 MPa 均匀塑性变形区
金相组织:细小的等轴 α -Ti晶粒.

对照图1知:经350℃下的高温持久强度试验后,材料的金相组织发生了显著变化:在集中塑性变形区,晶粒均被进一步拉长而呈明显的纤维状组织;而在均匀塑性变形区,则发生了回复和再结晶^[7],原轧制时的变形晶粒均变成细小的等轴晶粒了.

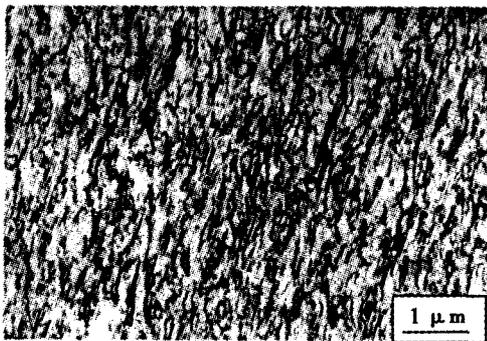


图7 368 MPa 集中塑性变形区金相
组织:晶粒呈纤维状.

5 结 论

1) Ti-2%Al-2.5%Zr 钛合金板材在350℃下和应力条件为 $\sigma_{0.2}^{350\text{℃}} < \sigma < \sigma_b^{350\text{℃}}$ 的高温持久强度的方程为: $\sigma = 416.18 - 0.03054t$.

2) Ti-2%Al-2.5%Zr 钛合金板材在350℃下,当应力低于该温度下其屈服强度时,可外推一个数量级的方程为: $\sigma = 664.01t^{-0.079}$.

3) 试验后,Ti-2%Al-2.5%Zr 钛合金的均匀变形区为细小等轴晶组织,而集中塑性变形区则为纤维状组织.

参考文献:

- [1] 李远睿,盛光敏,黄荣,等. $\Phi 14 \times 2.0$ Ti-Al-Zr 钛合金管材的高温低周疲劳性能研究[J]. 核动力工程, 2003,24(4):307-311.
- [2] 束德林. 金属力学性能[M]. 北京:机械工业出版社, 2004:185-186.
- [3] 马图哈. 非铁合金的结构与性能(第8卷)[M]. 北京:科学出版社,1999,357.
- [4] MCQUILLAN A D, MCQUILLAN M K. Titanium [M]. London: Butterworths Scientific Publication, 1956:414-422.
- [5] 杨宜科,吴天禄. 金属高温强度及实验[M]. 上海:上海科技出版社,1986:114.
- [6] GIORMINI P, NEBOZHYN M V, PONTE CASTANEDA P. Accurate estimates for the creep behavior of hexagonal polycrystals[J]. Acta Materialia, 2001, 49(2):22.
- [7] ARDAKANI M G, HUMPHREYS F J. The annealing behaviour of deformed particle-containing aluminium single crystals [J]. Acta Mater, 1994, 42(3):763-780.

High Temperature Creep Rupture Strength Study of Ti-2%Al-2.5%Zr Titanium Alloy

LI Yuan-ru, HU Yue-jun, WANG Shu-zhen

(College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400030)

Abstract: After introducing the composition and microstructure of Ti-2%Al-2.5%Zr titanium alloy, σ_b and $\sigma_{0.2}$ of this alloy are measured at 350℃. And determine 6 stress level points according as test character, microstructure of test material and temperature. Then, the creep rupture strength experiment at high temperature of 350℃ is carried out according to the GB6395-86 Metallic Materials Stress Rupture Testing at elevated temperature. The data of the test result are processed and the regressive equations are obtained: $\sigma = 416.18 - 0.0304t$, work stress is between $\sigma_{0.2}^{350}$ and σ_b^{350} ; Furthermore, $\sigma < \sigma_{0.2}^{350}$ equations derivated one order of magnitude is $\sigma = 664.01t^{-0.079}$. Finally, microstructure of the titanium alloy are changed markedly after test, it shapes fibrous structure in intensive plastic deformation zone, and forms small equiaxed grain owing to returning recrystallization in homogeneous plastic deformation zone.

Key words: titanium alloy; high temperature; creep rupture strength