2015年12月 December 2015

文章编号: 1004-0609(2015)12-3344-08

Ti6Al4V 合金的高温短时蠕变本构关系与 应力松弛行为



杜舜尧,陈明和,谢兰生,张成祥

(南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016)

摘 要:对 Ti6Al4V 合金在不同温度(650、700 和 750 ℃)、初始应力(100 和 150 MPa)和预应变(3.97%和 15.87%) 条件下进行多组应力松弛试验;研究 Ti6Al4V 合金高温下的应力松弛行为以及影响因素。利用应力松弛的试验数 据推导出高温短时蠕变应变速率与应力的关系,对蠕变应变速率-应力曲线进行拟合,得到 Ti6Al4V 合金的高温 短时蠕变本构方程。将高温短时蠕变本构关系代入有限元软件 ABAQUS 中对 Ti6Al4V 合金的应力松弛行为进行 模拟。结果表明: Ti6Al4V 合金的应力松弛可以分为两个阶段; 第一个阶段应力松弛速率很快, 剩余应力急剧降 低,该过程时间为应力松弛的前 250 s;第二个阶段应力松弛较为缓慢,经过 2000 s 后剩余应力趋向于某一极限 值,即应力松弛极限。温度对 Ti6Al4V 合金应力松弛的影响显著,应力松弛随温度的升高而加快,且温度越高, 应力松弛极限越小。初始应力和预应变越大,应力松弛极限越大,但是两者对应力松弛行为的影响不大。模拟结 果与试验测得的应力松弛曲线具有很高的吻合度,验证了高温短时蠕变本构关系的可靠性。 关键词: Ti6Al4V 合金; 应力松弛行为; 短时蠕变; 本构方程 文献标志码: A

中图分类号: TG146.2

Short-term creep constitutive relation and stress relaxation behavior of Ti6Al4V alloy at high temperature

DU Shun-yao, CHEN Ming-he, XIE Lan-sheng, ZHANG Cheng-xiang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The stress relaxation tests of Ti6Al4V alloy were conducted at different temperatures (650, 700 and 750 °C), initial stresses (100 and 150 MPa), pre-strains (3.97% and 15.87%). The stress relaxation behavior of Ti6Al4V alloy and influence of different factors at high temperature were discussed. Based on the experimental data of stress relaxation, the relationship between short-term creep strain rate and stress was deduced. Then, the short-term creep constitutive equation of Ti6Al4V alloy at high temperature was obtained by fitting the creep strain rate-stress curves. The short-term creep constitutive relation at high temperature was used to simulate the stress relaxation behavior of Ti6Al4V alloy by integrating the relation into finite element software ABAQUS. The results show that the stress relaxation of Ti6Al4V alloy can be divided into two stages: At the first stage, the stress relaxation rate is very fast and the residual stress reduces sharply, which lasts 250 s, While at the second stage, the stress relaxation rate is relatively slow and the residual stress tends to the limit after 2000 s. Temperature has significant influence on the stress relaxation of Ti6Al4V alloy. The rise of temperature can accelerate the stress relaxation rate, and the higher the temperature is, the smaller the stress relaxation limit is. Stress relaxation limit increases with the increase of initial stress and pre-strain which have small effect on the stress relaxation behavior. The simulated results and the experimental stress relaxation curves are with a high degree of similarity, which validates the dependability of the short-term creep constitutive relation at high temperature.

Key words: Ti6Al4V alloy; stress relaxation behavior; short-term creep; constitutive equation

收稿日期: 2015-04-08; 修订日期: 2015-10-08

通信作者: 陈明和, 教授, 博士; 电话: 025-84892508; E-mail: meemhchen@nuaa.edu.cn

Ti6Al4V(即 TC4 合金)属于 $\alpha+\beta$ 型钛合金,具有 密度小、比强度高、耐腐蚀性和耐热性好、热稳定性 高等特点,因此广泛应用于航天、航空、化工、船舶 和医疗等领域^[1-4]。但是 Ti6Al4V 合金在冷成形工艺下 的回弹量较大,零件的成形精度不高,因此,需要采 用热成形并辅助热校形来解决这个问题, 而应力松弛 和蠕变行为则在热成形和热校形过程中起到了举足轻 重的作用^[5-7]。为此,国内外学者对 Ti6Al4V 合金的应 力松弛和蠕变行为进行了大量的研究。HO 等^[8-9]将应 力松弛、蠕变和时效理论相融合,建立了一种适用于 铝合金材料的蠕变时效本构模型。陈缇萦等[10]研究了 TC18 钛合金的蠕变行为,分析了不同条件下 TC18 钛 合金的蠕变激活能、蠕变机制以及蠕变温度与变形应 力指数的关系。虽然当前国内外对 Ti6Al4V 合金的应 力松弛和蠕变行为研究较多,但是实验的温度条件大 多是在 700 ℃以下^[11],对于 700 ℃以上高温条件下 Ti6Al4V 合金应力松弛行为的研究尚少。同时,大部 分的研究是围绕长时间的蠕变行为分析,而对于短时 蠕变行为的研究不多^[12]。此外, SCHUH 等^[13]大多是 从能量、应力指数和显微组织等方面定性分析蠕变性 能与机制,缺乏对应力松弛与蠕变之间定量关系表达 式的研究。因此,研究 Ti6Al4V 合金高温短时蠕变本 构关系与应力松弛行为可以为以后的工程应用提供指 导性的依据。

本文作者对 Ti6Al4V 合金板材在不同的温度、初 始应力和预应变条件下进行了多组应力松弛试验,基 于试验数据,研究了高温下 Ti6Al4V 合金板材的应力 松弛行为以及工艺因素对其的影响,并且构建了不同 条件下的应力松弛方程和高温短时蠕变本构方程。最 后,通过有限元分析验证了高温短时蠕变本构模型的 可靠性。

1 实验

本试验中所用的材料是退火态的 Ti6Al4V 合金板 材,厚度为 1.5 mm,具体化学成分见表 1。试验仪器

表1 Ti6Al4V 合金的化学成分

Table 1Chemical composition of Ti6Al4V alloy (massfraction, %)

Al	V	Fe	Ν	С	0	Н	Ti
6.2	4.16	0.05	0.01	0.03	0.15	0.012	Bal.

为 RG2000-20 型电子万能拉伸试验机和 PID 温控仪。 应力松弛试验开始前,通电加热到预定温度后保温 5 min,之后开始加载,应力松弛时间设定为 2400 s。试 验所用试样的规格如图 1 所示。



图1 试样尺寸(单位: mm)

Fig. 1 Size of specimen (unit: mm)

2 结果与分析

2.1 应力松弛特征

图 2 所示为初始应力相同时 Ti6Al4V 合金板材不同温度下的真实应力松弛曲线。



图 2 不同温度下 Ti6Al4V 合金的真实应力松弛曲线 **Fig. 2** True stress relaxation curves of Ti6Al4V alloy at different temperatures: (a) 650 °C; (b) 700 °C; (c) 750 °C

由图 2 可以看出,在 650~750 ℃的温度范围内, Ti6Al4V 合金板材的应力松弛可以分为两个阶段。第 一个阶段应力松弛速率很快,剩余应力急剧降低,该 过程为应力松弛的前 250 s。第二个阶段应力松弛较为 缓慢,经过 2000 s 后剩余应力趋向于应力松弛极限。 采用式(1)对应力松弛行为进行描述^[14]:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_e + \varepsilon_p \tag{1}$$

式中: ε_0 为初始应变; ε_e 为弹性应变; ε_p 为塑性应 变。其中 ε_0 为一定值, ε_e 和 ε_p 均为变化值。在应力 松弛过程中, ε_p 随着时间的增加而不断增大, ε_e 则不 断地减小,从而使得回弹应力随时间的增加而减小, 这就是应力松弛现象。

2.2 工艺因素对 Ti6Al4V 合金板材应力松弛的影响

由图 2 可以发现,温度对应力松弛的影响十分显著。在第一个阶段,应力松弛速率随着温度的升高而增加,应力松弛极限随着温度的升高而减小。温度对应力松弛的影响可以用下式描述^[15]:

$$d\varepsilon/dt = A\sigma^n \exp[-Q/(RT)]$$
⁽²⁾

式中: ε 为塑性应变; t 为时间; A 为常数; σ 为应力; Q 为热变形激活能; R 为摩尔气体常数; T 为热力学 温度。在确定的变形机制下, Q 是定值,此时,塑性 应变速率随着温度的升高而增加。因此,单位时间内 弹性形变转化为塑性形变的总量在增加,维持总变形 量所需要的外力在减小,应力松弛速率加快,应力松 弛极限降低。

图 3 所示为应力松弛极限与温度的关系。通过拟 合该曲线,即可获得应力松弛极限与温度的经验公式, 即:

$$\sigma_{\infty} = -0.1031T + 80.071 \tag{3}$$

式中: σ_{∞} 为应力松弛极限。



图 3 应力松弛极限与温度的关系

Fig. 3 Relationship between stress relaxation limit and temperature

图4所示为不同温度和初始应力 σ_0 下 Ti6Al4V 合金的应力松弛曲线。由图4可知,温度相同时,初始应力分别为100和150 MPa时,其对应的应力松弛曲线均会趋向于各自的应力松弛极限,且初始应力较大

时,最终的应力松弛极限较大,但是两者之间的差异 并不是很大。温度为650℃时,两者的应力松弛极限 相差6 MPa;700℃时相差5 MPa;750℃时仅相差 1 MPa。



图 4 不同温度和初始应力下 Ti6Al4V 合金的应力松弛曲线 **Fig. 4** Stress relaxation curves of Ti6Al4V alloy at different temperatures and initial stresses: (a) 650 °C; (b) 700 °C; (c) 750 °C

图 5 所示为不同温度和预应变下 Ti6Al4V 合金的 应力松弛曲线。由图 5 可知,温度相同条件下,预应 变较大时,应力松弛极限较大,但是两者的差别不大, 这说明预应变对应力松弛极限的影响较小。



图 5 不同温度和预应变下 Ti6Al4V 合金的应力松弛曲线 Fig. 5 Stress relaxation curves of Ti6Al4V alloy at different temperatures and pre-strains: (a) 650 ℃; (b) 700 ℃; (c) 750 ℃

2.3 应力松弛曲线拟合

学者们在大量的试验基础上,提出了多种可用于 描述金属材料应力松弛行为的经验公式,在此,将采 用二次延迟函数来对 Ti6Al4V 合金的应力松弛曲线进 行拟合^[16]:

$$\sigma = \sigma_{\infty} + B \mathrm{e}^{-t/\tau_1} + C \mathrm{e}^{-t/\tau_2} \tag{4}$$

式中: σ 为瞬时应力; σ_{∞} 为应力松弛极限; B、C、 τ_1 、 τ_2 均为常数。通过拟合试验数据,可得应力松弛方程。

表 2 所列为不同条件下 Ti6Al4V 合金板材应力松弛方 程的参数。

图 6 所示为 700 ℃时两种预应变条件下拟合得到 的曲线与试验数据的对比。图 7 所示为 750 ℃时两种 初始应力条件下拟合得到的曲线与试验数据的对比。 由图 6 和 7 可以看出,二次延迟函数可以很好的拟合 应力松弛曲线。

2.4 高温短时蠕变本构关系

在应力松弛过程中,蠕变应变速率与应力之间的 关系对整个过程的研究有着至关重要的作用。

首先,对式(1)两边同时求导可得:

$$0 = \frac{\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{e}}}{\mathrm{d}t}$$
(5)

即可进一步得到:

$$\dot{\varepsilon}_{\text{creep}} = \frac{d\varepsilon_{\text{p}}}{dt} = -\frac{d\varepsilon_{\text{e}}}{dt} = -\frac{d\sigma}{Edt}$$
(6)

式中: $\dot{\varepsilon}_{creep}$ 为塑性应变速率,即蠕变应变速率;E为 弹性模量; $d\sigma/dt$ 为应力松弛速率。



图 6 700 ℃不同预应变下试验曲线与拟合曲线的对比 Fig. 6 Comparison of experimental curves and fitting curves at different pre-strains and 700 ℃: (a) 3.97%; (b) 15.87%

表 2	Ti6Al4V	合金板材在不同条件下的应力松弛方程参数	攵

 Table 2
 Stress relaxation equation parameters of Ti6Al4V alloy sheet under different conditions

Temperature/°C	Initial state	$\sigma_{\infty}/\mathrm{MPa}$	<i>B</i> /MPa	C/MPa	τ_1/MPa	τ_2/MPa
	ε₀=3.97%	6.64	10.02	84.91	760.69	63.04
(50)	ε₀=15.87%	5.12	12.53	173.23	1410.93	61.39
650	σ ₀ =100 MPa	7.60	6.37	83.16	1180.82	78.35
	σ ₀ =150 MPa	13.23	7.47	123.98	1181.61	61.69
	ε₀=3.97%	3.04	17.92	111.46	199.96	30.31
700	ε₀=15.87%	3.80	17.85	203.25	228.03	20.73
/00	σ ₀ =100 MPa	2.16	8.98	86.53	882.85	35.39
	σ ₀ =150 MPa	7.88	35.73	106.38	117.53	18.70
	ε₀=3.97%	2.48	10.29	294.47	210.26	12.64
750	ε₀=15.87%	2.20	14.20	129.28	244.76	34.23
/50	σ ₀ =100 MPa	2.29	22.56	75.16	64.62	9.07
	σ ₀ =150 MPa	3.34	16.89	129.81	94.70	8.27



图 7 750 ℃不同初始应力下试验曲线与拟合曲线的对比

Fig. 7 Comparison of experimental curves and fitting curves at different initial stresses and 750 °C: (a) σ_0 =100 MPa; (b) σ_0 =150 MPa

通过式(6),结合试验数据即可得到高温短时蠕变 应变速率-应力曲线,结果如图 8 所示。

从图 8 可以看出,3 种温度下的短时蠕变应变速 率-应力曲线均可以分为两个区域,即低应力区域和 高应力区域。由于幂指函数形式的蠕变本构模型适用 于低应力条件下的蠕变行为,因此在低应力区域可以 选择式(7)来描述 Ti6Al4V 合金高温短时蠕变过程^[17]:

$$\dot{\varepsilon}_{\text{creep}} = A\sigma^n \tag{7}$$

式中: *ἐ*_{creep} 为蠕变应变速率; *σ* 为应力; *A* 为材料常数; *n* 为应力指数。通过观察发现,在高应力区域, 蠕变应变速率与应力呈线性关系。综上所述,可以建 立如下的高温短时蠕变本构方程:

$$\dot{\varepsilon}_{\text{creep}} = A\sigma^n$$
 (8)

当 $\sigma \ge \sigma_{\text{critical}}$ 时,

当 $\sigma \leq \sigma_{\text{critical}}$ 时,

$$\dot{\varepsilon}_{\text{creep}} = D_1 \sigma + D_2 \tag{9}$$

式中:A、 D_1 、 D_2 和n均为材料常数; σ_{critical} 为低应力区域与高应力区域的临界应力。

通过 OriginPro8.0 对短时蠕变应变速率-应力曲 线进行拟合,即可获得高温短时蠕变本构方程中各材 料常数,如表 3 所列。



图 8 不同温度下 Ti6Al4V 合金短时蠕变应变速率−应力 曲线

Fig. 8 Short-term creep strain rate-stress curves of Ti6Al4V alloy at different temperatures: (a) 650 $^{\circ}$ C; (b) 700 $^{\circ}$ C; (c) 750 $^{\circ}$ C

表3 高温短时蠕变本构方程材料常数

Table 3Material constants of short-term creep constitutiveequations at high temperature

Temperature/ ℃	$(\mathrm{MPa}^{-1} \cdot \mathrm{s}^{-1})$	n	$D_1/(MPa^{-1} \cdot s^{-1})$	$D_2/{ m s}^{-1}$	$\sigma_{ m critical}/MPa$
650	1.18×10^{-5}	3.36	0.55	-22.94	60
700	4.31×10^{-4}	2.64	0.60	-18.25	60
750	5.38×10^{-4}	2.47	0.72	-31.88	60

2.5 高温短时蠕变本构关系的验证

通过 ABAQUS 有限元软件建立了 Ti6Al4V 合金 试样应力松弛的有限元模型,图9所示为设置有限元 模型的载荷作用。



图 9 Ti6Al4V 合金有限元模型的载荷作用 Fig. 9 Load of finite element model for Ti6Al4V alloy

图 10 所示为初始应力为 150 MPa,在 650、700 和 750 ℃温度条件下通过有限元模拟得到的曲线与试 验曲线的对比。通过对比应力松弛过程的第一阶段和 第二阶段可知,第二阶段的模拟结果较第一阶段而言 与试验数据具有更高的吻合度,就总体而言,高温短 时蠕变本构关系具有较高的可靠性。



图 10 不同温度下模拟应力松弛曲线与试验结果的对比 **Fig.10** Comparison of simulated stress relaxation curves and experimental results at different temperatures: (a) 650 ℃; (b) 700 ℃; (c) 750 ℃

3 结论

的应力松弛分为两个阶段:第一个阶段为整个应力松 弛过程的前 250 s,应力急剧降低,但松弛速率随着时 间的增加而逐渐减小;第二个阶段剩余应力的降低极 为缓慢,经过 2000 s 后应力值基本不会再发生太大的 变化,趋向于应力松弛极限。

2) 温度对 Ti6Al4V 合金板材的应力松弛行为影响显著,应力松弛极限随着温度的升高而减小,松弛 速率随着温度的升高而增加。初始应力和预应变越大, 应力松弛极限越大,但是两者对应力松弛行为的影响 不大。

3) Ti6Al4V 合金板材在 650~750 ℃温度范围内的 应力松弛行为符合方程: $\sigma = \sigma_{\infty} + Be^{-t/\tau_1} + Ce^{-t/\tau_2}$ 。

4) 通过试验数据绘制出应力松弛曲线,并推导出 Ti6Al4V 合金板材在 650~750 ℃温度范围内发生应力 松弛时,短时蠕变应变速率与应力之间的关系。

5) 通过拟合短时蠕变应变速率-应力曲线,得到 用于反映 Ti6Al4V 合金板材高温下应力松弛行为的短 时蠕变本构关系,并得到本构方程中对应不同温度下 的材料参数。

6) 将高温短时蠕变本构关系带入 ABAQUS 有限 元软件中对 Ti6Al4V 合金的应力松弛行为进行模拟, 模拟结果与试验所得到的应力松弛曲线具有很高的吻 合度,证明了高温短时蠕变本构关系的可靠性。

REFERENCES

- GOMAA E, MOHSEN M, TAHA A S. A study of annealing stage in Al-Mn (3004) alloy after cold rolling using positron annihilation lifetime technique and Vickers microhardness measurements[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 362(S1/2): 274–279.
- [2] 李桂荣,李月明,王芳芳,王宏明.脉冲强磁场处理对TC4钛 合金显微组织及力学性能的影响[J].中国有色金属学报, 2015,25(2):330-337.

LI Gui-rong, LI Yue-ming, WANG Fang-fang, WANG Hong-ming. Effect of high pulsed magnetic field on microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(2): 330–337.

- [3] 冯颖芳.世界钛及钛合金的应用研究进展[J].世界有色金属, 2012(4): 54-57.
 FENG Ying-fang. Application research progress of Ti and Ti alloys in the world[J]. World Nonferrous Metal, 2012(4): 54-57.
- [4] 陈国清,田唐永,张新华,李志强,周文龙. Ti-6Al-4V 钛合金 陶瓷湿喷丸表面强化微观组织与疲劳性能[J].中国有色金属

学报, 2013, 23(1): 122-127.

CHEN Guo-qing, TIAN Tang-yong, ZHANG Xin-hua, LI Zhi-qiang, ZHOU Wen-long. Microstructure and fatigue properties of Ti-6Al-4V titanium alloy treated by wet shot peening of ceramic beeds[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(1): 122–127.

- [5] WANG M W, ZHANG L W, PEI J B, LI C H, ZHANG F Y. Effect of temperature on vacuum hot bulge forming of BT20 titanium alloy cylindrical workpiece[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(5): 957–962.
- [6] IDEM K, PEDDIESON J. Simulation of the age forming process[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2005, 127(2): 165–172.
- [7] 刘 坡,宗影影,郭 斌,单德彬. 钛合金高温短时蠕变与应 力松弛的关系研究[J]. 材料研究学报, 2014, 28(5): 339-345.
 LIU Po, ZONG Ying-ying, GUO Bin, SHAN De-bin. Relation between short-term creep and stress relaxation of titanium alloy at high temperature[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2014, 28(5): 339-345.
- [8] HO K C, LIN J, DEAN T A. Modeling of springback in creep forming thick aluminum sheets[J]. International Journal of Plasticity, 2004, 20(4/5): 733–751.
- [9] HO K C, LIN J, DEAN T A. Constitutive modelling of primary creep for age forming an aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 153(32): 122–127.
- [10] 陈缇萦. TC18 钛合金的高温变形与蠕变行为研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012: 1-76.
 CHEN Ti-ying. Research on high temperature deformation and creep behavior of TC18[D]. Changsha: Central South University, 2012: 1-76.
- [11] 申发兰,陈明和,冯建超. TA15 合金高温应力松弛和流变应 力行为[J]. 宇航材料工艺, 2013, 43(3): 114-119.
 SHEN Fa-lan, CHEN Ming-he, FENG Jian-chao. Stress relaxation and flow stress of TA15 alloy at elevated temperature[J]. Aerospace Materials & Technology, 2013, 43(3): 114-119.
- [12] 李建伟. 细晶 TC21 钛合金短时高温蠕变与应力松弛行为及 机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 1-61.
 LI Jian-wei. Research on the behavior and mechanism of short-time high temperature creep and stress relaxation of fine grain TC21 titanium alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 1-61.
- [13] SCHUH C, DUNAND D C. An overview of power-law creep in polycrystalline β-titanium[J]. Scripta Materialia, 2001, 45(12): 1415–1421.
- [14] 朱 智,张立文,顾森东. Hastelloy C-276 合金应力松弛试验 及蠕变本构方程[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(4): 1063-1067.

ZHU Zhi, ZHANG Li-wen, GU Sen-dong. Stress relaxation test of Hastelloy C-276 alloy and its creep constitutive equation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(4): 1063–1067.

[15] 刘 勇, 尹钟大, 朱景川. 温度、应力及晶粒度对 TC4 合金应 力松驰性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(8): 643-646.

LIU Yong, YIN Zhong-da, ZHU Jing-chuan. Effect of temperature, stress and grain size on stress relaxation in the alloy TC4[J]. Rare Metal Material and Engineering, 2003, 32(8):

643-646.

- [16] CHEN Chun-kui, Huang Yong-jian, WANG Yi-fan, WANG Kai-ning. Hot sizing of titanium workpieces and titanium alloy workpieces[J]. Materials Science and Technology, 1985, 4(2): 89–100.
- [17] 汪 军. 钛合金的蠕变行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008: 1-55.

WANG Jun. A study on creep behavior of titanium alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008: 1–55.

(编辑 龙怀中)