

超塑变形对 TC4 室温力学性能的影响

张学学 童国权 崔元杰 杜鹏

(南京航空航天大学机电学院,南京 210016)

文 摘 在 $T = 880^{\circ}\text{C}$ 和 $\dot{\varepsilon} = 9.8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 下,进行了 TC4 圆筒件超塑成形试验,研究了超塑变形量对 TC4 室温强度、疲劳性能和金相组织的影响。结果表明:随着变形量的增加,晶粒尺寸增大。当超塑胀形延伸率 e 为 55% 时,晶粒尺寸由供应态的约 $8 \mu\text{m}$ 增加为约 $20 \mu\text{m}$ 。随着 e 增加,TC4 室温下的屈服强度、抗拉强度和条件疲劳强度降低。当 e 为 55% 时,材料的屈服强度、抗拉强度下降约 7%;循环周期为 10^6 下的疲劳强度下降约 10%。

关键词 TC4 合金,超塑成形,胀形延伸率,力学性能

Influence of Superplastic Forming on the Room Temperature Mechanical Properties of TC4 Alloy

Zhang Xuexue Tong Guoquan Cui Yuanjie Du Peng

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

Abstract Superplastic forming (SPF) of a TC4 alloy cylinder at 880°C and strain rate $\dot{\varepsilon} = 9.8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ were conducted. The influences of superplastic deformation on room temperature strength, fatigue strength and metallurgical structure of TC4 alloy were investigated. Results show that grain size grows with SPF elongation increasing. Grain size increases to about $20 \mu\text{m}$ from the initial dimension about $8 \mu\text{m}$ as SPF elongation equals to 55%. At room temperature, yield strength, tensile strength and fatigue strength of TC4 alloy decrease with the increasing of SPF elongation. After TC4 alloy sheet subjected to a SPF elongation of 55%, the yield strength and tensile strength reduce 7%; the fatigue strength reduces 10% at the fatigue life cycle of 10^6 .

Key words TC4 alloy, Superplastic forming, SPF elongation, Mechanical property

0 引言

超塑成形是利用某些材料在特定条件下具有极好变形能力而发展起来的一种成形工艺。采用超塑成形工艺不仅可以制造室温下难以成形的复杂零件,而且成形后的零件没有回弹、精度高,因此特别适合于常温下难变形材料的成形,如钛合金等^[1-2]。TC4 是一种典型的超塑性材料,其超塑成形(SPF)和超塑成形/扩散连接(SPF/DB)技术被广泛应用于航空航天制造领域^[3-4]。作为要求严格的航空航天制造业的零部件,超塑成形后零件的强度以及组织性能等能否达到设计要求和产品用户非常关心的问题。林兆荣等对 TC4 超塑单向拉伸后的机械性能进行了初步研究^[5],赵文娟等对 Ti-6Al-4V 合金超塑单向拉伸变形中的组织演变和变形机制进行了研

究^[6]。有关多向应力状态下 TC4 超塑变形对其组织和性能的影响研究报道很少,而工程实际中零件超塑成形时均处于多向应力状态。

板材超塑成形是通过气体压力作用使板材发生超塑变形的生产工艺,板材在超塑成形过程中多处于多向应力状态,因此单向应力状态下测定的材料超塑成形后的性能指标不能直接应用于多向应力变形条件下的超塑成形。在 $T = 880^{\circ}\text{C}$ 和 $\dot{\varepsilon} = 9.8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 下,本文进行了 TC4 圆筒件超塑成形试验,获得了不同变形量的圆筒件,分析研究了变形量对 TC4 强度、疲劳强度、塑性和晶粒尺寸的影响。

1 实验

1.1 材料

试验材料为宝鸡钛业有限公司提供的 2 mm 厚

TC4 板材,其化学成分如表 1 所示,板材初始晶粒直径约 $8\ \mu\text{m}$ 。

表 1 材料化学成分

Tab.1 Proportion of chemical composition							wt%
Al	V	Fe	C	N	O	H	其余
6.19	4.2	0.06	0.01	0.008	0.12	0.003	<0.4

1.2 实验过程

试验过程如图 1 所示,首先利用有限元分析软件计算气压-时间加载曲线,然后进行超塑成形实验。试验原理与模具如图 2 所示,在模具内安放适当尺寸的垫块可获得两种型腔深度,其值分别为 71 和 103 mm。超塑成形后,从圆筒件底部截取试样分别进行金相组织观察、抗拉试验以及拉伸疲劳试验。

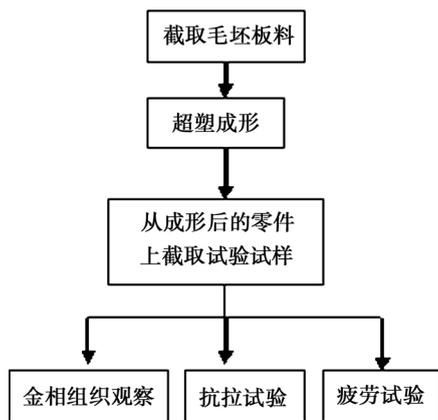


图 1 试验流程

Fig. 1 Experimental flow chart

试验在南京航空航天大学自制的 NUAA-150T 热成形/超塑成形机床上进行,模具加热到 880°C ,保温 15 min,利用超塑气压自动加载系统对板料施加高纯氦气,使板料在目标应变速率 $9.8 \times 10^{-4}\ \text{s}^{-1}$ 附近依次完成自由胀形、逐渐贴模、充填圆角三个超塑成形阶段。成形结束后,待模具冷却至 600°C 以下时脱模取件,用硅酸铝纤维棉迅速包裹圆筒件,并吹低压高纯氦气保护 TC4 圆筒件。

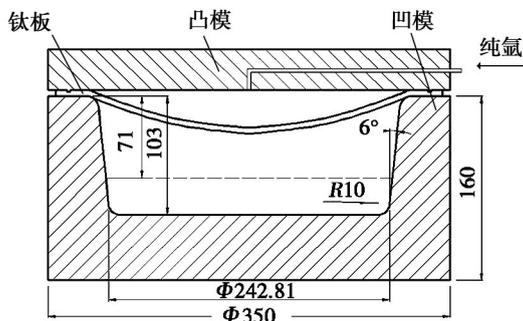


图 2 超塑成形试验模具

Fig. 2 Schematic diagram of SPF die used in experiments

超塑成形结束后,测量筒形件底部中心厚度,计算胀形延伸率(e), $e = (t_0/t - 1) \times 100\%$, t_0 为板料原始厚度, t 为成形后板料厚度。图 3 为超塑成形获得的圆筒件照片,其筒底中心 e 为 55%。胀形高度为 71 和 103 mm 零件的底部厚向应变分别为 55% 和 95%。由于板料在筒底贴模顺序有先后,筒底中心略厚于筒底边缘。在筒形件底部延伸率为 $e \sim (e+10)$ 区域,切取测试试样,如图 4 所示。

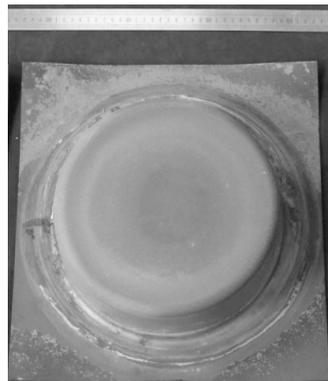


图 3 $e=55\%$ 的圆筒件照片

Fig. 3 Photo of a formed part after SPF elongation of 55%

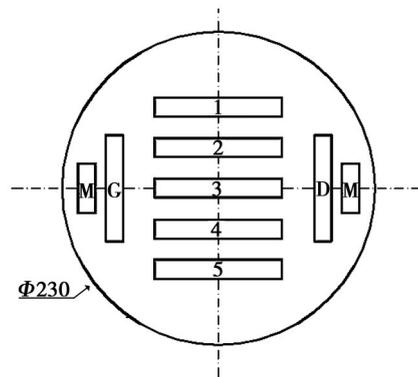


图 4 测试试样切取区域的定义

Fig. 4 Cutting area of testing specimen

1,2,3,4,5: 疲劳测试试样; G, D: 静力抗拉测试试样; M: 显微组织观测试样。

2 结果与分析

2.1 变形量对强度极限和屈服强度的影响

图 5 所示为圆筒件底部变形量对 TC4 强度极限和屈服强度的影响。由图可见,随着胀形延伸率的增加,TC4 的强度有明显的下降。强度极限 σ_b 分别由供应态的 1 030 MPa 下降至 956 MPa ($e=55\%$) 和 862 MPa ($e=95\%$), 同时屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 分别由供应态的 930 MPa 下降至 865 MPa ($e=55\%$) 和 798 MPa ($e=95\%$)。当 e 为 55% 时,材料抗拉强度和屈服强度分别下降约 7%。

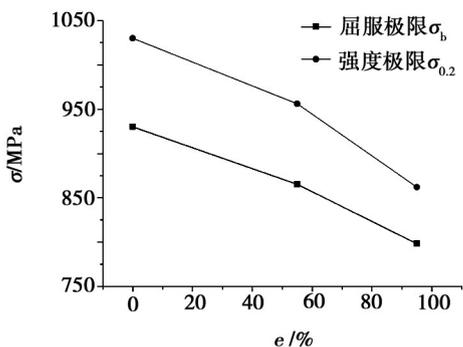


图5 e 对 TC4 室温强度的影响

Fig. 5 Effect of SPF elongation on room temperature uniaxial tensile strength of TC4

2.2 变形量对断裂延伸率的影响

图6所示为圆筒件底部变形量对TC4断裂延伸率的影响。由图可见,成形后TC4的塑性和强度的表现有所不同。当 e 小于55%时,TC4的断裂延伸率几乎保持不变,材料断裂延伸率由供应态的15.8%微降至14.9%。但是,当 $e=95%$ 时,材料断裂延伸率剧烈下降至5.7%。

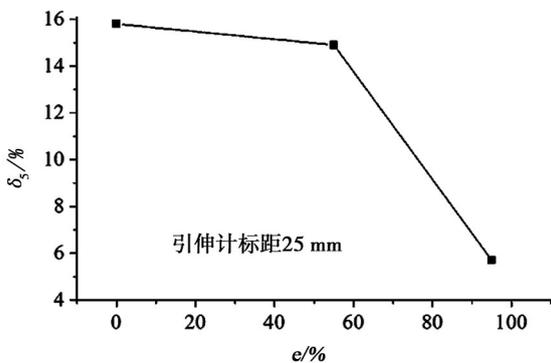
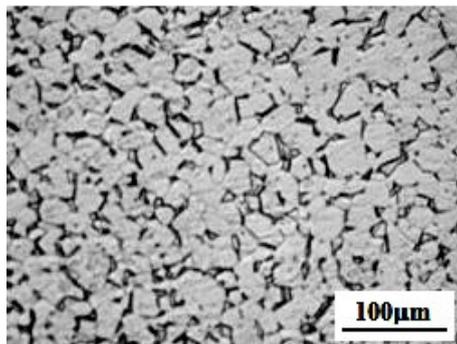


图6 e 对 TC4 断裂延伸率的影响

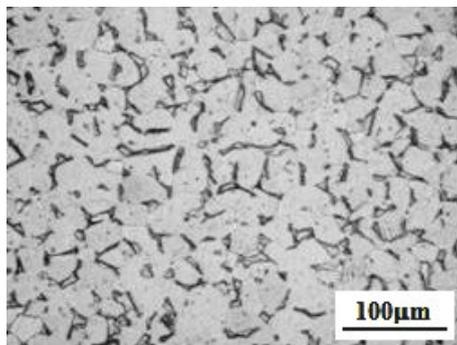
Fig. 6 Effect of SPF elongation on room temperature tensile elongation of TC4

2.3 变形量对晶粒尺寸的影响

图7为 e 对TC4晶粒尺寸的影响,由图可见: $e=55%$ 时,晶粒尺寸由供应态的 $8\mu\text{m}$ 增加至约 $20\mu\text{m}$,晶粒尺寸变化不大;当 $e=95%$ 时,晶粒尺寸增加至约 $34\mu\text{m}$,晶界/相界出现次生 α 、 β 晶粒,由此可以解释图5超塑 e 对TC4室温强度的影响。由于晶界/相界附近杂质元素偏聚、晶体缺陷聚集(空位浓度高、位错密度大、几何学相位差也大)。室温下,晶界/相界的强度高于晶粒内部,晶粒越细小,晶界/相界的体积分数越大。表现为随着超塑 e 增大,室温下TC4的强度降低。



(a) $e=55%$



(b) $e=95%$

图7 e 对 TC4 晶粒尺寸的影响

Fig. 7 Effect of SPF elongation on TC4 grain size

2.4 变形量对拉伸疲劳极限的影响

在超塑成形圆筒件底部用AGIE慢丝线切割机加工小型疲劳试样,试样尺寸见图8。试样切割表面粗糙度 $Ra \leq 0.4\mu\text{m}$ 。疲劳实验前,用1200#金相砂纸仔细打磨试样各棱边,去除线切割加工产生的细小毛刺和微小裂纹。

在MTS动静态材料试验机上进行疲劳实验。试验设计为拉伸循环,应力比 $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0.1$ [7]。

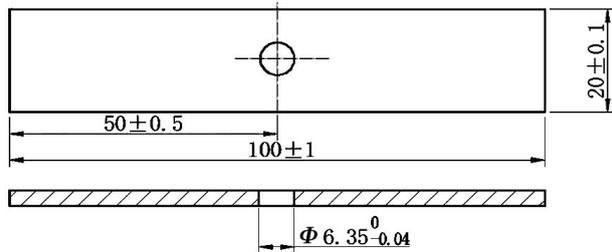


图8 疲劳试样尺寸(应力集中系数 $K_t=2.3$)

Fig. 8 Dimension of specimen for fatigue test

图9给出了 e 分别为0(原材料)、55%和95%的 $S-N$ 曲线。疲劳曲线中,斜线部分的断裂点是利用成组法在2组应力水平下测得,水平部分的疲劳强度是采用升降法测得。图9表明,随着 e 增加,TC4合金的条件疲劳极限降低。循环周期为 10^6 ,分别由供应态的148 MPa下降至133 MPa($e=55%$)和127 MPa($e=95%$)。当 e 为55%时,TC4疲劳强度下降

了约 10%。其原因主要如下:超塑成形过程中,其主要变形机理为晶界滑移,不可避免地在三角晶界处产生应力集中,导致三角晶界处出现孔隙(长大后成为空洞),疲劳裂纹源将首先在这些孔隙/空洞附近萌生。观察图 10 所示疲劳断口 SEM 照片,发现超塑成形后 TC4 内部有很多微小孔隙。

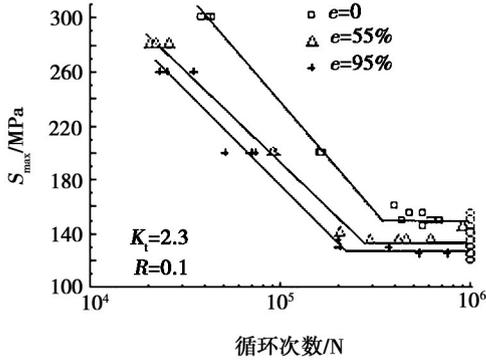
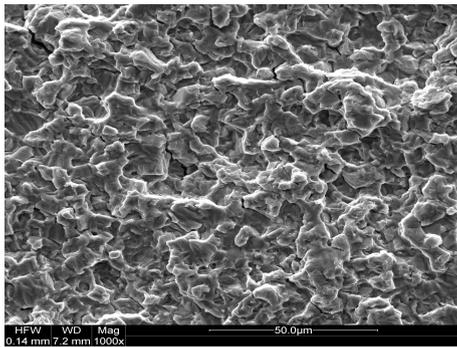
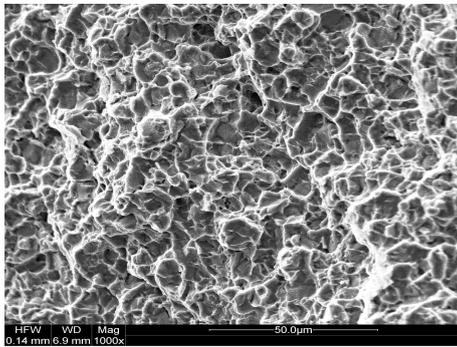


图 9 拉伸疲劳 S—N 曲线

Fig. 9 Effect of SPF elongation on S—N curves of TC4 alloy



(a) 裂纹扩展区



(b) 韧性快断区

图 10 TC4 拉伸疲劳断口形貌

Fig. 10 Tensile fatigue fracture morphology of TC4

室温下,由于晶界强度高于晶粒内部,晶内位错在疲劳裂纹源尖端的三向拉应力作用下运动,晶内位错或在晶界湮灭、或攀移越过晶界并在相邻晶粒内部的晶体学有利位相继续运动直至到达另一个裂纹源附近。晶粒越细小,上述过程将越曲折,需要消耗较大

的能量,表现为裂纹扩展速率较低。当材料内部有很多这样的裂纹时,材料将很快失去承载能力发生断裂。

超塑成形过程中,晶粒发生了静态(退火)长大和变形促进的动态长大,同时还产生晶界宽化现象。超塑变形量越大,晶粒越大,三角晶界处的应力集中程度越严重,内部空隙越多、空隙尺寸也较大。在疲劳试验时,裂纹源附近的位错越过晶界运动到相邻晶内的概率较低,表现为裂纹扩展较快。

图 10 为 $e=95\%$ 的 TC4 试件在 $\sigma_{\max}=260$ MPa 下循环约 25 000 次拉伸疲劳断口形貌。图 10(a) 显示了该区裂纹沿晶界生长和穿晶解理台阶占主导地位,同时该区也出现少量韧性撕裂棱。图 10(b) 显示了韧性撕裂是主要的断裂方式。

3 结论

(1) 随着 e 增加,TC4 晶粒尺寸增加,而屈服强度和抗拉强度降低。当 e 为 55% 时,晶粒尺寸约为 20 μm , σ_b 和 $\sigma_{0.2}$ 降低约 7%,而塑性几乎没有明显的下降;当 e 为 95% 时,晶粒尺寸约为 34 μm , σ_b 和 $\sigma_{0.2}$ 降低了约 15%,但塑性急剧降低。

(2) 随着超塑 e 的增加,TC4 钛合金的条件疲劳极限降低。

因此在利用超塑成形工艺制造 TC4 零件时应该注意,变形量不可过大,以免材料力学性能严重降低。

参考文献

- [1] 李志强,郭和平. 超塑成形/扩散连接技术的应用进展和发展趋势[J]. 航空制造技术,2010(8):32-35
- [2] Enikeev F U, Kruglov A. An analysis of the superplastic forming of a thin circular diaphragm [J]. Int. J. Mech. Sci., 1995, 37(5): 473-483
- [3] 王琦. TC4 钛合金的低温拉伸性能[J]. 材料工程, 2009(3):54-55
- [4] Chen Y, Kibble K, Hall R, et al. Numerical analysis of superplastic blow forming of Ti-6Al-4V alloys [J]. Materials and Design, 2001(22): 679-685
- [5] 林兆荣,章伟承,韩秉强. TC4 钛板超塑成形后机械性能初步研究[J]. 稀有金属, 1993, 17(1):37-40
- [6] 赵文娟,丁桦,曹富荣,等. Ti-6Al-4V 合金超塑变形中的组织演变和变形机制[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(12): 1973-1980
- [7] 高镇同,蒋新桐,熊峻江,等. 疲劳性能试验设计和数据处理:直升机金属材料疲劳性能可靠性手册[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 1999: 21-23

(编辑 任涛)