

TC4钛合金元件疲劳特性

刘俊洲

摘要

本文采用一般常用的结构连接方式——单耳片、双耳片元件,在空气介质中测试了TC4钛合金从室温到200°C、载荷比 $R=0.1$ 、指定寿命为 10^6 的轴向拉伸疲劳特性。

重点讨论了试件表面完整性、不同孔径、不同孔高、不同耳片形式在室温与200°C下对疲劳性能的影响。

一、前言

近几十年来,钛合金的应用问题,引起了国内外的广泛注意。国外对于高强度Ti-6Al-4V合金,在常规性能、断裂、电化学腐蚀机理,金属显微组织等方面都作过较多的研究。但对元件的疲劳试验数据报道较少。而大量的航空零件失效分析表明,属于疲劳失效的零件约占80%。影响材料疲劳性能的因素很多,其中材料表面完整性是重要因素之一。表面完整性系指材料表面机械加工应变层内的残余应力状态、光洁度以及加工纹路走向等。关于表面完整性与材料疲劳性能的关系,近年来国外有过不少报道,国内也开始了这方面的研究。

本文对不同耳片形式、孔径、孔高,不同温度及元件表面完整性对疲劳性能的影响进行研究,为钛合金零件设计、选材积累了试验数据。

二、材料及试验方法

1. 试验用料

试验用料采用 $\phi 70$ 和 $\phi 100$ mm棒材,经过960°C改锻成25×45和45×45mm的条带,然后经过800°C加热1小时、空冷退火处理。两种规格用料的化学成分见表1,退火后材料的机械性能见表2。

表1 化学成分, wt%

规格, mm	C	Mn	Si	V	Al	Fe	O	N	H
25×45	<0.1	<0.15	<0.15	4.10	5.84	0.100~0.095	0.1	0.31	0.005
45×45	<0.1	—	<0.15	4.17~4.20	6.00	0.11~0.09	<0.15	0.024	0.0015

表2 机械性能

规格, mm	σ_b , MPa	$\sigma_{0.2}$, MPa	δ_5 , %	ψ , %
25×45*	875.8	873.8	16.0	43.0
	968.0	935.9	17.8	49.8
45×45**	971.9	896.4	15.6	48.6
	979.7	924.8	17.7	50.7

*八个试样测试值,从单耳片取样;

**四个试样测试值,从双耳片取样。

2. 试样

试件形状及尺寸见图1、表3。

各试验组别的试件表面加工工艺为:

第1、4~9组 铣削+铰孔 $\nabla 4$;

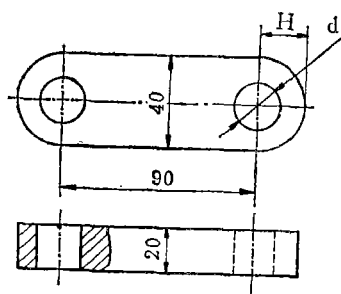
第2组 精铣+铰孔 $\nabla 6$;

第3、10组 铣削+铰孔 $\nabla 4$ +消除应力回火。

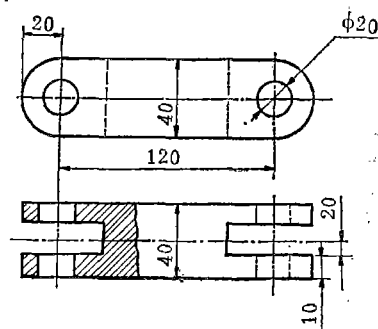
消除应力回火的试件系在600°C加热1小时,转到真空冷却室冷至100~150°C后出炉。

3. 试验条件

室温、200°C下的单耳片及双耳片疲劳试验均在Anslar-50T疲劳试验机上进行。试验频率为500次/分,应力比 R 为0.1,试验波形为正弦波。



(a) 单耳片



(b) 双耳片

图 1 试件形状及尺寸

表 3 单耳片的不同孔径、孔高

试验组别	孔径d mm	孔高H mm
1	20	20
2		
3		
4	20	24
5	16	20
6	24	20
7	20	20
8	24	

表 4

试验组别	耳片形式	试验温度	应力集中系数, K_t [3]	置信度 %	10^6 疲劳强度 MPa
1	单耳	室温	2.17	95	143.3
2					152.0
3					98.8
4		室温	2.17	95	160.4
5			2.27	95	114.9
6			2.00	90	175.2
7	双耳	200°C	2.17	90	108.5
8					148.5
9		室温	2.17	95	161.8
10				< 90	76.0

三、试验结果与分析讨论

按疲劳数据统计^[1]要求,高应力点用成组法, $N=10^6$ 疲劳极限用升降法。成组试验的数据,按 Chauven^[2] 数据取舍准则进行处理。试验结果见表 4。所有的单耳片、双耳片 S—N 曲线汇总于图 2。

由表 4 及图 2 中第 1、2 二组曲线可看出,随相同孔径耳片平直表面光洁度提高,疲劳极限也相应提高。孔径光洁度均为 $\nabla 6$,但由于孔径与耳片平直表面相接,而相接的平直表面的光洁度不同,分别为 $\nabla 4$ 和 $\nabla 6$ 。从图 3 宏观疲劳断口照片不难看出多数的疲劳源均发生在棱角处,这表明耳片平直表面的光洁度对抗疲劳能力有显著影响。

由表 4 及图 2 中第 1、5、6 三组曲线可看出,在相同的外形尺寸条件下,孔径 d 在 16、20、24 mm 范围内,理论应力集中系数 K_t 相应为 2.27, 2.17, 2.00, 疲劳强度极限随着孔径尺寸变大相应提高 (114.9 → 160.4 → 175.2 MPa), 最低与最高相差 ~34%。这可能是由于应力集中和尺寸效应的影响。

由表 4 及图 2 中第 1、4 二组曲线可看出,在相同孔径、孔高分别为 20、24 mm 范围内,疲劳极限随着 H 的加长约有 10% 的提高 (143.3 → 160.4 MPa)。这是由于 H 加长,改善了孔边应力分布状态即孔边的应力梯度。

由表 4 及图 2 中第 1 和 7, 第 6 和 8 四组曲线中

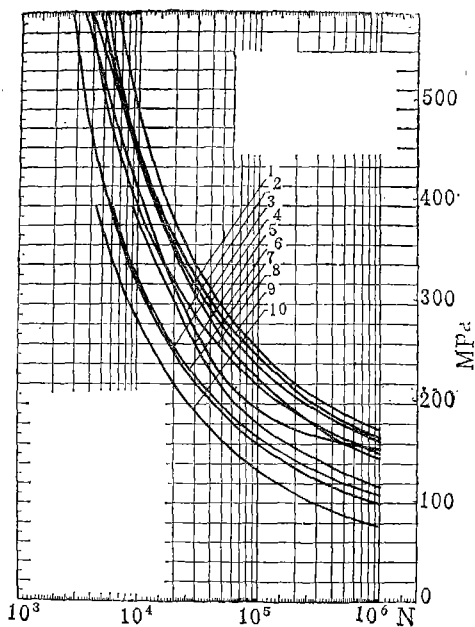


图 2 TC4钛合金各种情况下测试的S—N曲线

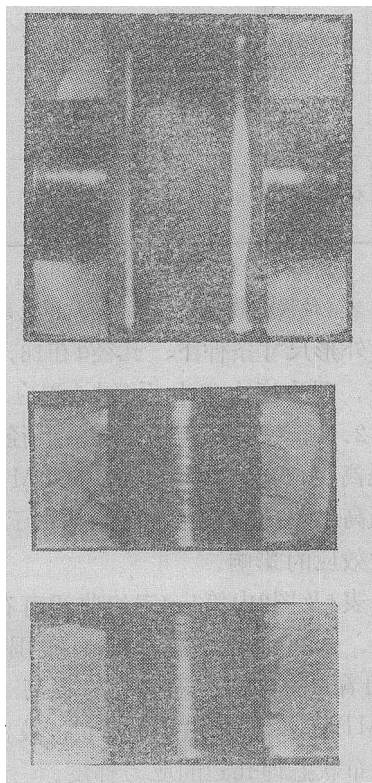


图 3 宏观疲劳断口

可看出, 在单耳片孔径为20mm, 试验温度为室温、200℃范围内, 从室温升至200℃, 静强度由966.0降至783.6MPa, 降低18.9%, 疲劳强度极限由143.3降至108.5MPa, 降低24.3%。孔径为24mm, 静强度由966.0降至783.6MPa, 降低18.9%, 疲劳强度极限由175.2降至148.5MPa, 降低15.2%。试验结果表明, 提高温度对此合金从室温至200℃的疲劳强度极限有一定影响, 降低20%左右。

由表4及图2中第1、9二组曲线中可看出, 在相同的静强度下采用不同的耳片形式, 双耳片的疲劳强度极限比单耳片提高约13% (疲劳强度极限由193.3降至161.8MPa)。由于单、双耳片的危险截面均相等, 单耳片由两部分截面组成, 双耳片由四部分截面组成, 这样在单位截面上的残余应变层所占的比例就增大了, 因此双耳片的疲劳强度极限比单耳片的高。

由表4及图2中第3和10二组的疲劳强度数据和S—N曲线中可看出, 在相同耳片形式及相同加工条件下, 如分别与第1、9二组相比, 采取消除应力回火的试件, 其疲劳强度有显著降低 (由143降至98MPa; 161降至76MPa)。

经测定, TC4合金耳片加工后试件表面应变层为0.05~0.08mm, 其残余压应力 σ_r 为407MPa, 因此在轴向拉伸受力条件下($R=0.1$), 如果保留由机加工产生的残余压应力将有利于提高疲劳强度。

四、结 语

1. 在相同的外形尺寸条件下, 孔径分别为16, 20, 24mm范围内, 疲劳强度极限随着孔径变大而相应提高, 最低与最高值相差~34%。

2. 在相同孔径, 孔高分别为20, 24mm范围内, 孔高24mm比孔高20mm的疲劳强度极限提高~10%。

3. 在几何形状相同条件下, 表面完整性诸因素 (残余应力、光洁度、纹路走向等) 对疲劳寿命具有明显的影响。随着表面光洁度的提
(下转第23页)

实验方法进行比色, 结果见表2和表3。实验表明: ①阳离子除钒大于6%对测定有干扰外, 其他共存离子无干扰; ②轻稀土离子对测定有干扰, 而1μg以下的 钇对测定无干扰; ③阴离子中酸硝、氢氟酸和柠檬酸有严重干扰。对大于6% 钒可在曲线中加入相应量钒消除干扰(钛合金中钒含量一般低于5%); 对有干扰的阴离子, 在实验中应避免引入。

(7) 铈的回收率

取TC9钛合金样品, 分别加入12.5、15.0、25.0、30.0μg铈, 按分析方法进行测定, 在标准曲线上查得结果见表4。

表4 铈回收率

样品	铈加入量 μg	铈回收量 μg	回收率 %	注
TC9	12.5	12.0	96	相当于0.012%
	15.0	15.5	103	相当于0.015%
	25.0	25.3	102	相当于0.025%
	30.0	30.0	100	相当于0.03%

结果表明, 在实验条件下, 钛和共存元素不影响铈的测定, 故工作曲线可直接配制, 铈回收率在96~103%之间。

4. 分析步骤

称取试样0.1000g, 置于150ml烧杯中, 加入10ml 1:3硫酸微加热溶解, 滴加过氧化氢氧化至溶液的紫红色消失, 蒸发至冒浓硫酸烟, 冷却, 用水吹洗表皿, 再冒烟至溶液无色, 冷却, 加水20ml, 加热溶解盐类, 冷却, 移入100ml容量瓶中, 用水稀释至刻度, 摇匀。

分取上述溶液5ml, 置于25ml容量瓶中, 加入2M盐酸2ml、10%草酸2ml、40%抗坏血酸溶液2.5ml、30%过氧化氢2.5ml, 放置5分钟, 加入偶氮胂DBS2ml, 用水稀释至刻度, 摇匀, 放置10分钟, 用试剂空白为参比, 用3cm比色皿在640nm处测量吸光度。

标准曲线的绘制:

于25ml容量瓶中分别加入铈标准溶液

0.5、1.0、2.0、2.5 l, 用水吹洗瓶壁, 加4M盐酸2ml, 以下按分析方法测定吸光度, 并绘制标准曲线。

5. 分析结果的对照

取ZT3钛合金试样, 将本方法测得的结果与ICP光谱分析法进行对照。两种分析方法所得结果基本一致, 见表5。

表5 分析结果的对照

样品	本方法分析 结果, %	ICP光谱分析 结果, %	偏差 %
A3	0.023	0.025	-0.002
B8	0.022	0.022	0
C1	0.024	0.0224	+0.0016
D2	0.023	0.0236	-0.0006
1064	0.024	0.0232	+0.0008

(参考文献略)

... * * * * ...

(上接第26页)

高, 疲劳强度极限也随之提高。由机械加工产生的残余压应力有利于提高疲劳强度, 但由于机加工的不均匀性, 这方面还须要进一步研究。

4. 疲劳强度极限随着试验温度升高(室温~200℃)而降低。

本工作得到 谢济洲高级工程师、刘绍伦、郭洪全等工程师的支持和帮助, 谨此表示衷心感谢。

参考文献

[1] 高镇同主编, 疲劳性能试验, 国防工业出版社, 1980。
[2] Chauvent, Spherial and Practical Astronomy, Vol.II P.588, Lip-pin-coff, Philadelphia, 1980。
[3] Peterson, R.E., Stress Concentration Factors, 1974。