

涡轮叶片的循环蠕变分析*

北京航空航天大学 赵爱红** 饶寿期

【摘要】研究了航空发动机一级涡轮叶片的蠕变行为。对叶片的危险区作了静载恒温蠕变计算和变温变载蠕变计算。其结果是静载恒温蠕变和实验结果一致;其循环蠕变变形略小于静蠕变变形。变温变载下叶片的蠕变寿命可用静载恒温蠕变进行预估。

主题词: 航空发动机 涡轮叶片 循环 蠕变 分析

分类号: V 232.4 O 344.6

1 引言

限制涡轮叶片寿命的故障方式是蠕变变形过大或应力断裂。近年来通过研究高强度超级合金并使用冷却式的涡轮叶片和导向叶片,发动机涡轮进口温度已从 50 年代的 888K 一直提高到目前的 1444K,并指出:设计寿命为 1000 小时以内的冷却涡轮叶片,用蠕变作为寿命限制。设计寿命为 1000~3000 小时以内的冷却涡轮叶片,蠕变和氧化或腐蚀同时作为寿命限制。设计寿命为 1000 小时的非冷却涡轮叶片,其寿命用蠕变限制。可见在高温下蠕变破坏将是主要的。故应对叶片进行蠕变研究。在冷却叶片中,由于应力和温度引起蠕变率在相当大的范围内变化,因而蠕变断裂仅在局部开始出现。叶片最大的局部蠕变,它应与叶片的伸长和允许的最大伸长极限值有关,并以应力断裂刚开始时的蠕变为根据。鉴于上述分析,本文对该叶片的局部区域作了静载与变温变载两种蠕变计算与分析,并与试验进行了比较。

2 蠕变基本理论

2.1 热弹性蠕变情况下的应力应变关系

在弹性范围内,当有温度变化和蠕变现象发生时,总的应变率 $\{\dot{\epsilon}\}$,可以看成是弹性应变率 $\{\dot{\epsilon}_e\}$ 、蠕变应变率 $\{\dot{\epsilon}_c\}$ 和因温度变化而引起的应变率 $\{\dot{\epsilon}_T\}$ 之和;并利用增量形式的应力应变关系得 $d\{\sigma\}$

$$d\{\dot{\epsilon}\} = d\{\dot{\epsilon}_e\} + d\{\dot{\epsilon}_c\} + d\{\dot{\epsilon}_T\} \quad (1)$$

$$d\{\sigma\} = [D] d\{\epsilon\}_e = [D] (d\{\epsilon\} - d\{\epsilon\}_c - d\{\epsilon\}_T) \quad (2)$$

式中, $[D]$ 为叶片材料随温度变化的弹性矩阵, $d\{\epsilon\}_T$ 为温度应变增量, $d\{\epsilon\}_c$ 为蠕变应变增量。

利用普朗特—路斯流动法则计算蠕变应变增量时,则 $d\{\epsilon\}_c = d\bar{\epsilon} (d\bar{\sigma}/d\bar{\sigma})$ 。式中, $d\bar{\epsilon}$ 为等效蠕变应变增量,它是等效应力、等效应变、时间和温度的函数。把它代入(2)式,则:

$$d\{\sigma\} = [D] d\{\epsilon\} - [D] (d\bar{\sigma}/d\bar{\sigma}) d\bar{\epsilon} - (EdT/(1-2\mu)) \{\alpha\}$$

把上式线性化,于是可以近似地表示为

$$\Delta\{\sigma\} = [D] \Delta\{\epsilon\} - [D] (\partial\bar{\sigma}/\partial\{\sigma\}) \Delta\bar{\epsilon} - (E\Delta T/(1-2\mu))\{\alpha\} \quad (3)$$

上式最后两项在有限元分析中表示初应变效应, 在计算时用等效节点载荷 $\Delta\{\bar{R}\}$ 来代替

$$\Delta\{\bar{R}\} = \int_B [D]^T [D] \frac{\partial\bar{\sigma}}{\partial\{\sigma\}} \Delta\bar{\epsilon} dV + \int_B [D]^T \left[\frac{E\Delta T}{1-2\mu} \{\alpha\} \right] dV \quad (4)$$

2.2 变动应力和变动温度下的蠕变理论

关于金属材料的高温蠕变断裂机理(理论), 尚不完善, 因此, 目前要系统地描述变动应力或变动温度下的蠕变断裂特性还是非常困难的。这里介绍由实验所证实的理论。

目前普遍采用的有两种理论, 即固态力学方程理论和寿命消耗理论。固态力学方程理论是变形理论中历史最悠久, 应用最广泛的理论。许多理论都是由它派生出来的。该理论假定应力和温度经历基本上没有影响, 即任意时刻 t 的应变速度 $d\epsilon/dt$ 仅由该时刻的载荷应力 α 温度 T 和应变 ϵ 单值地确定。寿命消耗理论(Life-fraction rule)是建立在下列假定上: 如果认为材料在某一蠕变时间内耗去它在载荷应力和温度下蠕变断裂寿命的某一比率, 其寿命消耗仅仅取决于此时的应力和温度, 而与其它状态下的消耗率无关。这种理论便于计算, 所以在变动应力和变动温度下的蠕变断裂寿命计算方面已得到广泛的应用。循环蠕变计算可根据静态蠕变估算变动应力和变动温度下的蠕变。有关理论详述及计算方程可参考文献[2]。

3 叶片静蠕变计算

由于蠕变计算是非线性问题, 这里选用非线性计算功能较强的ADINA 程序。经例题考核, 该程序计算的热弹性蠕变问题的数值解与理论解完全吻合, 故用该程序计算。

根据Norton 蠕变律, $\dot{\epsilon} = A \sigma^n t^m$ 要求有蠕变常数 A 、 n 、 m , 本文的这些常数是取试验结果, 即如表 1 所示。

表 1 K417F 蠕变常数

温度 (°C)	试验应力 (MPa)	蠕变常数		
		A	m	n
800	450 400 350	7.36E-12	0.442	2.9070
850	350 300 250	5.594E-16	0.6428	4.5280
900	270 250 200	3.589E-15	0.7115	4.3511

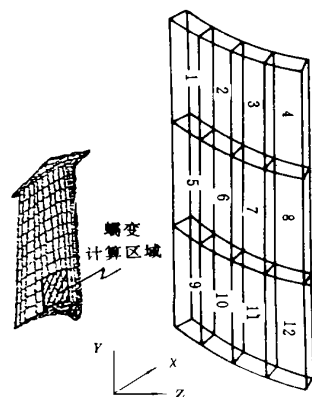


图 1 叶片蠕变计算模型

从叶片热弹性计算中可知, 叶根截面的叶背为高应力区, 又是事故中叶片断裂的区域, 故取此区域为蠕变计算区域。蠕变计算模型, 如图 1, 该模型共 12 个三维单元, 40 个节点。

本文取整体叶片的热弹性计算结果作为初始值进行蠕变计算。首先计算 100 小时蠕变, 利用程序重启动功能, 再计算 1000、2000 小时的蠕变。由于蠕变在第一阶段是不稳定的, 蠕变应变率大, 故取小步长, 这里取基本步长为 0.5, 取BFCS 迭代方法, 取欧拉隐式积分法, 最大细分步取 200, 其非弹性应变容限取 0.1。静蠕变的计算结果见表 2。从表 2 可见, 其计算结果符合一般的蠕变规律。本文还对 300 小时的蠕变计算结果和试验^[2]结果进行了比较(见表 3), 可见略有差异, 其原因是试验是在 800°C 下进行的, 且为平均应变。

表 2 单元高斯点的蠕变应变

蠕变时间(h)	温度(℃)	单元	高斯点	Mises 应力(MPa)	等效总应变(%)	等效蠕变应变(%)
1981	667	6	1	280	0.48	0.38
1981	683	6	4	261	0.4	0.26
1981	662	7	1	269	0.44	0.29
1981	660	10	2	312	0.72	0.51
1981	655	11	2	282	0.5	0.33

表 3 蠕变计算结果与试验结果比较

计 算 结 果						试 验 结 果		
蠕变时间 (h)	温度 (℃)	单 元	高斯 点	Mises 应力 (MPa)	等效总应变 (%)	温度 (℃)	应变 (%)	应力 (MPa)
300	667	6	1	292	0.31	800	0.25	250
300	681	6	4	265	0.265	800	0.25	250
300	662	7	1	276	0.29	800	0.25	250
300	660	10	2	323	0.42	800	0.48	350
300	655	11	2	283	0.31	800	0.48	350

4 叶片循环蠕变的计算

多种材料试验表明,在应力变化状态下的蠕变行为是十分复杂的,对静载和循环加载两种情况比较:不同的材料,蠕变情况不同,如对SAE4130合金钢在430℃条件下,作周期变载试验:先承受1小时高应力后再承受到1小时低应力。试验表明:这种负载变化对高温度的蠕变变形几乎无明显影响。但对铝合金作同类试验时,却发现周期蠕变的蠕变率将为连续试验的3倍左右。在等应力条件下承受温度变化的工作条件也将随材料性质和温度变化的不同而产生不同的效果。有些材料的断裂寿命会缩短,蠕变量增加;有些材料寿命反而会增加。例如,镍铬合金对短时间高温脉冲变化非常敏感,当这种材料在816℃时承受零应力,然后每12小时加热到1093℃保持2分钟,其断裂寿命可增加3倍;即使这种材料承受工作应力而作同类试验,其断裂寿命也将明显增加。对于本叶片的K417材料在静载与循环载荷下的蠕变情况尚无试验对比。故从计算方面探讨循环载荷与静载下的蠕变情况对比;供本叶片蠕变寿命分析参考。

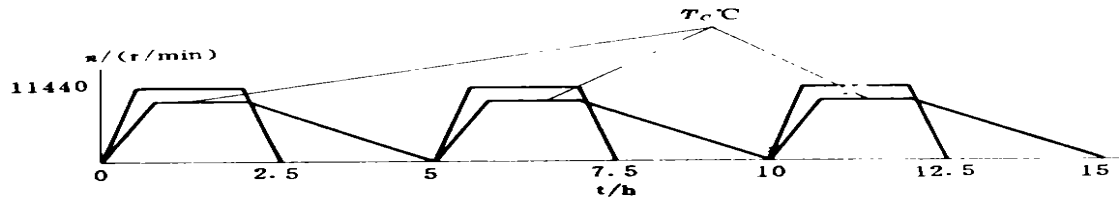


图 2 叶片载荷谱

本文根据国际民航一个起落为10个小时,军用或国内航班为2~3小时,故这里取2.5小时为一个周期进行叶片的蠕变计算,并取3个循环,载荷谱如图2。在一个循环中,当蠕变时间

0~1 小时, 步长 $\Delta t=0.005$ 小时。当蠕变时间 $t \sim 2.4$ 小时, 步长 $\Delta t=0.04$ 小时。当蠕变时间 $2.4 \sim 5.0$ 小时, 步长 $\Delta t=0.005$ 小时。这是由于当载荷变化时, 蠕变变化剧烈, 另外, 这时的弹性应变较小, 应取小步长。

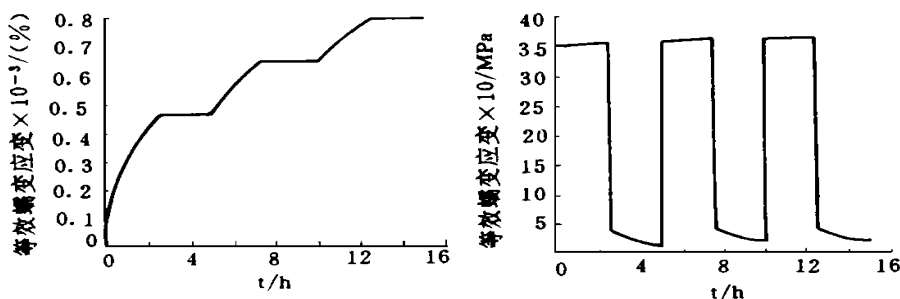


图3 变温变载下第18单元第8积分点等效蠕变应变和应力随时间的变化

计算结果表明, 模型各点的蠕变规律是正确的。蠕变应力越大, 温度越高, 蠕变越厉害, 其中第10单元第8高斯积分点的等效蠕变应变和等效应力随时间变化的曲线见图3, 变温变载与恒温静载下的蠕变计算结果比较见表4。

表4 叶片静蠕变和循环蠕变比较

载 荷	蠕变时间 (h)	温度 (°C)	单 元	高斯 点	Mises 应力 (MPa)	等效总应变 (%)	等效蠕变应变 (%)
静 载 恒 温	7	667	6	1	305	0.203	0.0318
	12	665	10	2	324	0.246	0.053
	17	640	10	8	356	0.4	0.11
变 温 变 载	7	667	6	1	307	0.202	0.028
	12	660	10	2	328	0.252	0.0435
	17	640	10	8	362	0.38	0.0886

从表4可见: 一般地, 在同一蠕变时间下, 变动载荷和变动温度条件下的蠕变比静载恒温下的蠕变稍小一点, 蠕变时间越长, 越明显。对此材料叶片就我们所作的简单的循环蠕变研究时发现与静态蠕变差别不大。

参 考 文 献

- 1 赵爱红 气冷涡轮叶片的热弹性应力分析和蠕变计算与分析: [硕士论文] 北京, 北京航空航天大学, 1993
- 2 [日]平修二编 金属材料的高温强度理论设计. 北京, 科学出版社, 1983: 327- 368
- 3 工程材料实用手册第二册变温高温合金铸造高温合金 北京, 中国标准出版社, 1989: 836- 857
- 4 李辉 航空发动机涡轮叶片蠕变寿命分析: [硕士论文] 沈阳航空发动机研究所, 1993

(责任编辑 王震华)