

定向结晶气冷涡轮叶片应力分析

北京航空航天大学 饶寿期* 田爱梅 岳彦芳

【摘要】 本文利用大型非线性有限元通用程序对定向凝固结晶的气冷叶片进行了热弹性分析。对 DZ-22 材料性能常数进行了分析和确定。建立了横观各向同性的本构模型。根据叶片模型和最大工作状态选用八节点三维元计算了离心应力、热应力和总的当量应力，作了相应的前后置处理。

关键词： 定向凝固结晶 气冷叶片 三维热弹性分析

1 热弹性分析本构关系

本文对正交异性材料涡轮叶片进行了热弹性的应力分析。众所周知，由于涡轮前温度 T_3^* 的提高，要求涡轮叶片的冷却设计和材料也要作相应的改进。从 80 年代以来，涡轮叶片的设计已大量采用定向结晶材料，并开始研制单晶材料和涂层的应用。例如美国的 PWA 1422 和 PWA 1480 等。这些材料的本构模型属各向异性或横观各向同性。我国自行设计的某航空发动机的气冷叶片材料，采用定向凝固结晶铸造的高温镍基合金 DZ-22。它具有优异的机械性能，改善了中温持久强度和塑性。

根据正交各向异性热弹性的本构模型的要求，本文采用了大型非线性有限元通用程序对气冷叶片的叶身部位进行了三维热弹性有限元分析。并作了前后置处理。

有关 DZ-22 铸造合金的性能，我国于 1987 年和 1990 年先后出版的材料手册中^[1,2]正式发表了。但在某些性能数据中二者差异甚大。因此，本计算材料数据取自手册文献 [2]。计算 G_{TL} 所需的 E_{45} 取自参考文献 [3]。文献 [4] 中泊松比 μ_{xy} 与手册^[2] 中的泊松比数据差别也甚大，值得研究。

用工程常数表示的横观各向同性材料本构关系为：

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [T] & & \\ & G_{12} & \\ & & G_{23} & \\ & & & G_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{bmatrix}$$

为了简化起见，令 $\mu_{12} = \mu_1$ ， $\mu_{31} = \mu_2$ ， $\mu_{ij}/E_i = \mu_{ji}/E_j$ ，则

$$[T] = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \frac{E_3 - E_1\mu_2^2}{E_1E_3^2} & \frac{E_3\mu_1 + E_1\mu_2^2}{E_1E_3^2} & \frac{\mu_2(1 + \mu_1)}{E_1E_3} \\ \text{对} & \frac{E_3 - E_1\mu_2^2}{E_1E_3^2} & \frac{\mu_2(1 + \mu_1)}{E_1E_3} \\ & \text{称} & \frac{1 - \mu_1^2}{E_1^2} \end{bmatrix}$$

式中

$$\Delta = \frac{1 + \mu_1}{E_1E_3} \left[\frac{E_3(1 - \mu_1) - 2E_1\mu_2^2}{E_1E_3} \right]$$

令

$$A = \frac{E_1E_3}{[E_3(1 - \mu_1) - 2E_1\mu_2^2]}$$

得

$$E_{1111} = A \frac{E_3 - \mu_2^2E_1}{E_3(1 + \mu_1)}, \quad E_{1122} = A \frac{E_3\mu_1 + E_1\mu_1^2}{E_3(1 + \mu_1)}, \quad E_{2222} = A \frac{E_3 - \mu_2^2E_1}{E_3(1 + \mu_1)}$$

$$E_{1133} = A\mu_2, \quad E_{2233} = A\mu_2, \quad E_{3333} = A(E_3/E_1)(1 - \mu_1)$$

$$E_{1212} = G_{12}, \quad E_{1313} = G_{13}, \quad E_{2323} = G_{23}$$

$$G_{12} = \frac{E_1}{2(1 + \mu_1)}, \quad G_{13} = G_{23} = 1/(4/E_45 - 1/E_3 - 1/E_1 + 2\mu_{13}/E_3)$$

3 轴表示结晶方向, 1、2 轴为叶片横向截面, 因此, $E_3 = E_L$, $E_1 = E_T$ 。文献 [2] 中材料性能常数如表 1 所示。

表 1 不同温度下 DZ-22 常数

T (°C)	E_L (GPa)	E_T (GPa)	μ_{12}	μ_{13}	G_{13} (GPa)	$\alpha \cdot 10^{-6}$ (°C)	$\alpha_T \cdot 10^{-6}$ (°C)
28 °	132	155	0.476	0.336	166	11.37	11.46
600 °	112	142.6	0.476	0.350	120.5	13.01	13.10
760 °	100.32	127.1	0.476	0.355	124.4	13.90	13.82
860 °	87.12	108.5	0.476	0.357	125.0	14.39	14.43
1000 °	76.56	105.4	0.476	0.358	95.0	15.44	15.48

经过计算可得到上述各温度下的 E_{1111} 至 E_{2323} 9 个弹性常数。

2 叶片的计算模型和计算状态、计算结果及分析

该叶片为复合式的气冷叶片, 叶片内型孔为回流冷却式结构见 (图 1)。将叶片划分为 12 层, 13 个截面。采用八节点三维立体元。整个叶片共划分为 462 个单元, 884 个节点, 2652 个自由度。单元分割网格见图 2。

计算状态为台架试车最大工作状态, 转速为 12980rpm, 在叶根处约束其刚体位移。叶片在此工作状态下的温度场见图 3。叶片的气动载荷由热力计算提供, 将其插值加在单元表面上。

利用非线性有限元通用程序^[5]对定向结晶气冷叶片的离心应力、热应力和总的当量应力分别作了计算。热弹性分析最大当量应力值在叶根处。从数值上看, 在约束点附近有 5 个点超过 400Mpa, 有 10 个点为 300~400MPa 之间, 均在叶盆和叶背的中心位置。该处应力数值虽大, 但都位于约束点附近, 是受约束影响所致。叶身绝大部分应力值在 200MPa 和 200MPa

以内。但在叶片进气前缘处数值偏大, 在三分之一高度上为 $200\sim 240\text{ MPa}$, 尚未计及小孔应力集中的影响。叶盆和叶背内外表面 M_{isCS} 应力等值线见图 4。其热应力等值线见图 5。叶尖截面径向弹性位移量约为 $7.75\times 10^{-4}\text{ m}$ 。

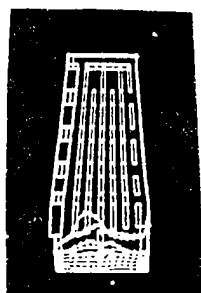


图1 回流内冷结构

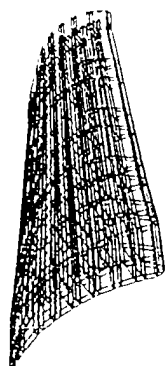


图2 三维单元分割

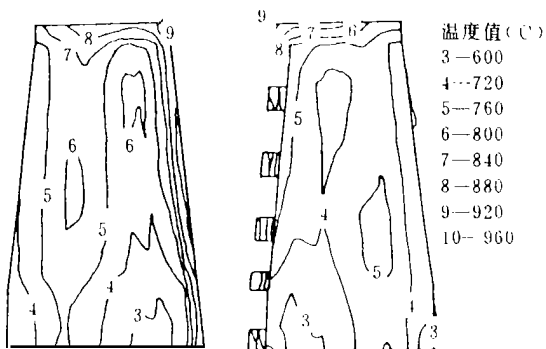


图3 叶背、叶盆外表面温度

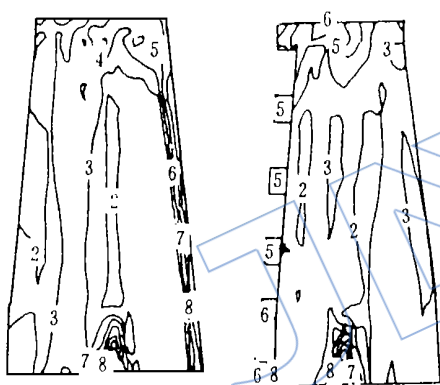


图4 叶背、叶盆外表面热应力

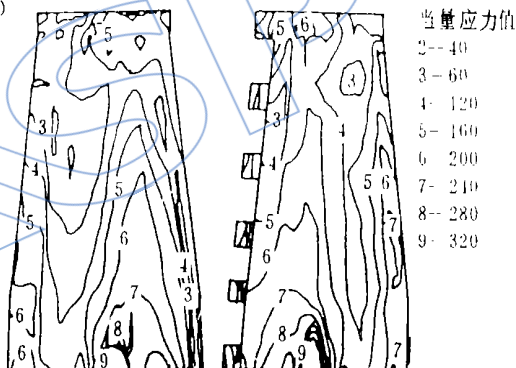


图5 叶背、叶盆外表面当量应力

本计算所采用材料性能数据系文献 [2] 上的。如采用手册^[1]或把横向泊松比 μ_T 用 0.143 代替, 则结果使 M_{isCS} 应力相差约 4%, 且应力分量相差较大。在同一单元同一节点上 σ_r 甚至相差 9%。这对裂纹扩展是有影响的。

参 考 文 献

1. 工程材料实验实用手册. 中国标准出版社, 1989
2. 北京航空材料研究所主编. 航空发动机设计用材料数据手册. 航空工业部第606研究所出版社, 1990
3. Clifford H. Wells. The Elastic Constants of a Directionally-Solidified Nickel-Base Superalloy, Mar M-200. Trans ASM, 1969, 60
4. Spera D A, Mowbrag D F. Thermal Fatigue of Materials and Components. Printed in Baltimore, Md. 1976
5. Brebbia C A. Finite Element Systems a Handbook. 1985