

GLALL 层板疲劳裂纹扩展特性分析

北京航空航天大学 张学仁** 聂景旭

【摘要】 对玻璃纤维/铝合金混杂复合层板 GLALL 的疲劳裂纹扩展特性进行了有限元分析, 应用能量法得到了 GLALL 板铝合金层裂纹尖端的应力强度因子随裂纹长度的变化规律。由于高强度玻璃纤维对铝合金层裂纹的桥接作用, 降低了裂纹尖端的应力强度因子, 因而使得裂纹的疲劳扩展速率也大为降低, 且随裂纹长度的增加基本不变化。计算结果与实验符合很好。

主题词: 层板 疲劳裂纹 扩散 特性

分类号: V231.95

1 前言

芳纶纤维/Al 合金混杂复合层板是近年来迅速发展的一种新型材料, 它具有比铝合金更优异的疲劳性能, 在航空上已经得到成功的应用。根据同一思想研制出的玻璃纤维/Al 合金混杂复合层板克服了 ARALL 剥离强度低等缺陷, 其力学性能、成型性能及切削性能均优于 ARALL, 因而具有广阔的应用前景^[1,2]。目前, 国内外已开始对 GLALL 层板的疲劳断裂机理进行研究^[2,3]。文献[2]研究了 GLALL 板在不同外载荷作用下的疲劳裂纹扩展行为以及疲劳裂纹区脱层破坏规律。试验发现, 由于未断高强度纤维对裂纹的桥接作用而降低了裂纹尖端的有效应力强度因子。该文并定性分析了纤维的桥接作用。文献[3]应用云纹干涉法研究了 AR-ALL 和 GLALL 层板的表面铝合金 I 型裂纹的疲劳扩展, 得到了与文献[2]基本一致的结论。并根据实验数据由 $\Delta K_{eff} = \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$ 得到了有效应力强度因子与疲劳循环周次的关系。上述两篇文献所用 GLALL 板除纤维层厚度不同外, 结构基本一致, 如图 1 所示^[3]。它由两层 0.5 mm 厚的铝合金平板 (LY12CZ) 经铬酸阳极化处理并涂底胶后与 0.5 mm 厚的 R 玻璃纤维/环氧树脂预浸料 (纤维体积分数 $n_f = 0.8$) 交替铺设热压而成, 在外层铝合金薄板上, 与纤维轴垂直方向预先切割开设 $2a_0 = 12.0$ mm 的对称中心穿透裂纹。

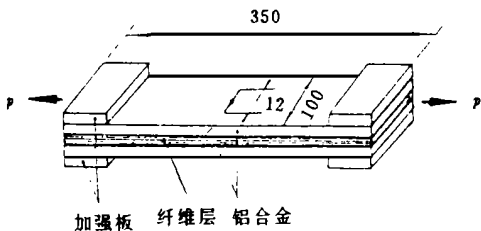


图 1 GLALL 层板结构示意图

本文根据文[3]的实验条件, 用有限元法分析了 GLALL 板的应力、位移场, 并应用能量法定量求解了其裂纹尖端应力强度因子 K_I 。

2 计算模型及方法

计算采用文献[3]中的 GLALL 层板结构 (即图 1)。因其对称性, 取 1/8 板进行计算, 网格

划分如图 2 所示。加载频率为 $f = 20 \text{ Hz}$, 交变载荷为 $P_{\min} = 1.0 \text{ kN}$, $P_{\max} = 10.0 \text{ kN}$ 。

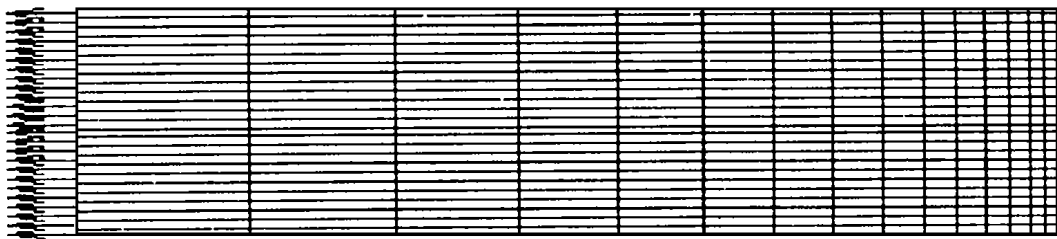


图 2 网格划分示意图

位移场和应力场的计算采用一个具有前后处理功能的微机有限元程序。所用单元为三维 8 节点实体单元, 因 AL 板和纤维板材料常数不同, 所以对 AL 板和纤维板分别进行网格划分和单元形成, 然后合并在一起进行有限元分析。

考虑到用位移法求裂纹尖端应力强度因子 K_I 时, 尖端处需采用极细的网格才能得到较为满意的结果。因此本文在得到位移场 $\{\delta\}$ 后, 采用能量法来求 K_I 。其过程如下: 对 Al 合金层, 按平面应力处理, 则 $K_I = \sqrt{EG}$ 。其中 E 为 Al 合金弹性模量, 应变能释放率 $G = \Delta U / \Delta A$, U 为弹性应变能, A 为裂纹面积, $\Delta U = U_{a+\Delta a} - U_a$, $\Delta A = B\Delta a$, B 为 Al 层厚度, Δa 为裂纹扩展长度, 应变能

$$U = \sum_{e=1}^n U_e = \frac{1}{2} \sum_{e=1}^n \{\delta\}_e^T [K]_e \{\delta\}_e$$

n 为单元总数, 因本文网格只取了半裂纹的上半部, 因此所求的应变能应乘 2 倍才是相应于半裂纹的应变能。本文据此编制了有关的有限元接口程序, 求得了裂纹尖端应力强度因子 K_I 。

3 计算结果及分析

计算了 $\Delta\sigma = 60 \text{ MPa}$, 裂纹长度 a 从 6 mm 扩至 24 mm 的应力、位移场和裂纹尖端参量。

$a = 10 \text{ mm}$, $\sigma = 60 \text{ MPa}$ 时的应力场(裂纹处基本上沿 Y 轴方向的标号为 1~6 的线条为纤维层应力等值线, 裂纹处基本上沿 Z 轴方向的标号为 5~7 的线条为 Al 层应力等值线)和位移场(网格变形)如图 3 所示。图中可以看出裂纹处产生了脱层现象, 还可看出虽然 Al 层裂尖处存在应力集中现象, 但其应力水平却低于纤维层对应处的应力水平。

图 4 为计算得到的 $\Delta K \sim a$ 曲线, 可见 GLALL 的裂纹尖端应力强度因子大大低于同样裂纹长度的 Al 板的裂纹尖端应力强度因子, 且 ΔK 仅在较短的裂纹长度时随裂纹长度的增加而稍微有所增大, 随后 ΔK 值基本不变, 即对裂纹长度的增加不敏感。

图 5 为文献[3]的裂纹扩展速率 $\lg(da/dn) \sim a$ 实验结果曲线, 图中两条曲线的趋势与图 4 基本一致。这是因为对于一定的材料, ΔK 与 da/dn 是一致的, 即 ΔK 决定了裂纹扩展速率

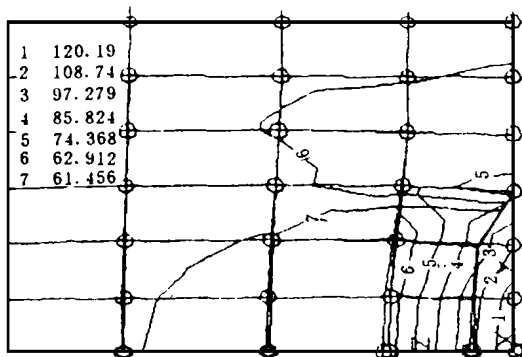


图 3 GLALL 板裂尖处的应力、位移场

da/dn 的值。由此可见,图 4 计算结果与实验符合很好。

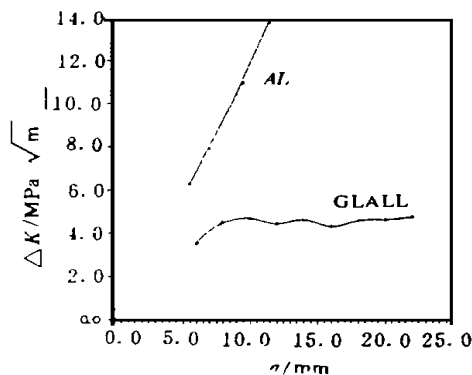


图 4 $\Delta K \sim a$ 计算结果曲线

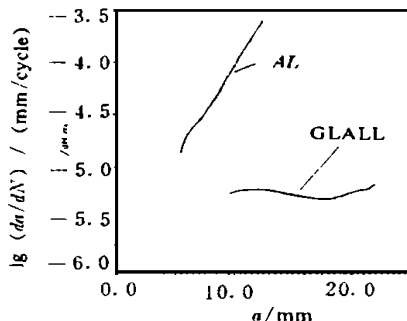


图 5 $\lg(da/dN) \sim a$ 曲线

图 6 为 $da/dN \sim \Delta K$ 的双对数曲线, 计算结果基本上处在 Al 合金曲线的延长线下方处, 这与实际情况是相符的。另外, 考虑到应变能释放率中还包含 Al 层与纤维层间脱层部分的影响, 本文还计算了当 $a = 16$ mm, 裂纹尖端处往前产生一个单元的脱层与不脱层时的裂纹尖端应力强度因子, 未脱层时 $\Delta U = 0.306$ N·mm, $K_I = 4.628$ MPa· $\sqrt{m}$, 产生一个单元的脱层时 $\Delta U = 0.318$ N·mm, $K_I = 4.717$ MPa· $\sqrt{m}$, 二者相差不超过 2%。可见, 由此所得的应力强度因子满足精度要求。

4 结 论

(1) 用有限元法计算所得 GLALL 板 Al 层裂纹尖端应力强度因子与实验符合很好。(2) 由于玻璃纤维层对裂纹的桥接作用使得 Al 合金层的裂纹尖端应力强度因子大大减小, 从而使 GLALL 板的疲劳裂纹扩展速率远低于单一 Al 合金。(3) GLALL 的裂纹尖端应力强度因子基本上不随裂纹的扩展而变化, 从而 GLALL 板的疲劳裂纹扩展速率对裂纹长度的增加不敏感。这是 GLALL 与金属材料的一个显著差别。(4) GLALL 具有优异的抗疲劳性能, 在航空上具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 郑瑞琪. 90 年代复合材料发展展望研讨会论文集. 北京: 中国复合材料学会, 1990
- 2 刘丹梅等. 玻璃纤维-Al 混杂复合层板的疲劳裂缝扩展行为. 材料科学进展, 1992, 6(5)
- 3 郭柱. 复合材料力学性能实验及云纹干涉法现场测试技术研究: [学位论文]. 清华大学博士学位论文, 1993

(责任编辑 王震华)

A MULTISTAGE FINITE ELEMENT METHOD FOR TRANSONIC FLOW CALCULATION IN TURBOMACHINERY

Zhu Gang, Shen Mengyu, Liu Qiusheng, Wang Baoguo

(Dept. of Engineering Mechanics, Tsing Hua University, Beijing, 100084)

ABSTRACT In the light of the idea of Multistage Finite Element Method, The anisotropic tensor force finite element and the Taylor- Galerkin finite element method have been combined properly into a new method which called anisotropic multistage finite element method. This method is superior in convergence speed and stability and suitable to transonic flow calculations. We applied this method to analyzing the transonic flow in a two-dimensional cascade and compared with its experimental data. It is shown that this method is a powerful tool for the transonic flow calculation.

Key words Transonic flow Turbomachines Finite element method

ANALYSIS OF FATIGUE CRACK GROWTH IN GLALL

Zhang Xueren and Nie Jingxu

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT A finite element analysis is applied to the fatigue crack growth properties in glass aluminum hybrid laminates (GLALL). The stress and strain fields of GLALL with different crack length are obtained from the computation, in which the cracks are assumed to expand only in Al layers. The relationship of the effective stress intensity factors on the crack tips to the crack length is derived by the energy method. It is found that the bridging effect of the glass fibers with high strength on the cracks in Al layers decreases obviously the effective stress intensity factors thus the growth rate of the fatigue cracks is cut down to a great extent. The computation results agree well with the experimental data.

Key words Laminates Fatigue crack Diffusion Characteristics

STRUCTURAL RELIABILITY ANALYSIS OF AN AEROENGINE WITH COMPLEX UNCERTAINTY

Wang Zhenying and Lu Wenlin

(Dept. of Aeroengine, Northwestern Polytechnical University 710072)

ABSTRACT Random material properties, geometrical shapes, forces and displacement boundary condition of an aeroengine are directly introduced into functional variational formulations and a unified random variational principle and the probabilistic finite element method with the small parameter perturbation method are provided. Based on second-order perturbation technique, the formulations for the random stresses and the reliability of the aeroengine's structures are derived. According to analysis the characteristics of these random parameters, the simple methods for analyzing the aeroengine structural reliability are obtained. At last, the reliability of a rotating disk of the aeroengine is analyzed with a simple numerical example.

Key words Aircraft engines Structural reliability Probability Finite elements