

纤维缠绕复合材料管道双轴疲劳寿命预测研究

戚东涛,程光旭,魏生桂

(西安交通大学 环境与化工学院,陕西 西安 710049)

摘要:对纤维缠绕复合材料管道的双轴疲劳行为进行了实验与理论研究。根据多轴疲劳试验的要求,设计了一种新的纤维缠绕成型复合材料薄壁管型试样,通过对不同缠绕角度试样在不同双轴载荷比条件下的双轴疲劳实验,得出了玻璃纤维/环氧树脂薄壁管的应力/寿命曲线。参考金属材料的多轴疲劳失效准则,结合复合材料各向异性的特点,提出了复合材料多轴疲劳失效准则,对不同缠绕角复合材料管道在不同载荷条件下的疲劳寿命进行统一。结果表明:本文提出的失效准则可以把不同缠绕角复合材料在多种载荷条件下的多轴疲劳寿命统一起来,从而根据一个给定缠绕角度试样在某种试验条件下疲劳寿命来预测其它缠绕角度条件下的疲劳寿命,具有重要的理论研究价值和工程应用前景。

关键词:寿命预测;复合材料管道;双轴疲劳

中图分类号: O211.67 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4837(2005)10-0014-04

Life Prediction of a Filament Wound Composite Pipe under Biaxial Fatigue Loading

QI Dong - tao, CHENG Guang - xu, WEI Sheng - gui

(Department of Chemical Engineering and Machinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The biaxial fatigue performance of a filament wound composite pipe has been investigated. Stress/life experimental data are obtained for different winding angles under different biaxial loading ratios. A multi-axial fatigue criteria for composite is proposed and has been verified by applying it to different sets of experimental data. The predicted fatigue lives are in good agreement with experimental results for both different winding angles biaxial stress ratios.

Key words: life prediction; composite pipes; biaxial fatigue

1 引言

纤维增强复合材料(FRP)由于具有轻质高强、耐腐蚀等特点,目前已在多个领域替代了传统金属材料,得到了广泛的应用,如化工和航空航天行业中的高压容器、油气和原子能工业中的传输管道以及汽车中采用的导流构件等。由于多数情况下材料构件失效是由于多轴疲劳破坏造成的,因此为了解决长期运行的安全可靠性问题,必须对多轴载荷循环

作用下的疲劳特性、疲劳机理进行深入的研究^[1,2]。

复合材料本身结构特性和多轴载荷的复杂性,使它的多轴疲劳研究非常复杂。首先,复合材料为非均质各向异性材料,疲劳过程中的损伤机理包括基体开裂、脱层和纤维断裂等多种损伤形式的组合,这种破坏机制增加了研究复杂性。其次,多轴疲劳比单轴疲劳的研究要困难的多。单轴疲劳可以采用很多传统的疲劳分析方法(如 S-N 经验法等)进行

描述,但是多轴应力存在多种组合形式,无法直接采用传统方法建立疲劳损伤模型。此外,由于多轴疲劳试验对实验机和试样的要求都比较高,因此目前能够获得的复合材料多轴疲劳试验的数据还十分有限,这也给损伤机理研究和模型验证带了的很大的困难。

由于复合材料结构的多样性,对各种结构进行多轴疲劳研究是不经济的,也是不现实的。因此,必须建立多轴疲劳寿命预测模型,从而实现对不同结构复合材料材料疲劳寿命的预测。

2 复合材料多轴疲劳寿命预测模型的建立

在进行复合材料多轴疲劳研究时,通常采用疲劳强度取代静载强度的方法将多项式型静载失效准则扩展为多轴疲劳失效准则^[3]。这种方法的优点是考虑了材料的各向异性特性,预测结果比较令人满意。但它存在所需实验数据量较大的缺点,通常需要三条以上的主轴剩余强度曲线(或 $S-N$ 曲线)及其一些静载强度;另外,这种模型准确性还受剩余强度模型合理性和多项式失效准则形式的影响。

Shen 等人^[4]通过将断裂面上的局部应变与疲劳寿命相联系,将金属多轴疲劳的临界平面的概念引入到了复合材料的寿命预测过程中。临界平面是指损伤首先产生并最终发生失效的平面,复合材料疲劳中临界平面通常是平行于纤维方向的纤维与基体的界面。这种方法优点是考虑了裂纹扩展的平面,所需试验数据比较少。近来, Petermann、Plumtree 等人^[5,6]将临界平面法与能量准则相结合,提出了基于临界平面的能量形式的损伤参量,并在单轴载荷作用下的复合材料单向板中得到了应用,并指出参量有望应用于多轴疲劳。但是,这些参量均以复合材料有限元细观力学数值计算为基础,限制了它在实际工程中的应用。而且他们都将复合材料中基体材料作为研究对象,没有考虑复合材料基体和界面复合后的综合性能。

根据多轴疲劳加载条件下的临界平面上的应力条件,参考 Petermann、Plumtree 等人提出的参量形式,本文定义临界平面上的损伤参量为临界平面上的法向应变能变化与剪切应变能变化的线性组合。

$$\Delta W = \sigma_{22}^{\max} \Delta \epsilon_{22} + \frac{W_n^u}{W_s^u} \sigma_{12}^{\max} \Delta \gamma_{12} \quad (1)$$

式中 $\Delta \sigma_{22}$ 和 $\Delta \sigma_{12}$ 分别为临界平面上的正应力范围和剪应力范围; $\Delta \epsilon_{22}$ 和 $\Delta \gamma_{12}$ 分别为临界平面上

的正应变范围和剪应变范围; σ_{22}^{\max} 为临界平面上的最大正应力; σ_{12}^{\max} 为临界平面上的最大剪应力; W_n^u 和 W_s^u 分别为主轴横向剪切断裂应变能与横向拉伸断裂应变能。

以往的细观损伤参量通常采用经验常数平衡拉扭应变能之间的关系,没有明确的物理意义。式(1)中仅采用材料性能常数描述损伤参量,比 Plumtree、Cheng 等人提出的参量更具合理性。而且此参量中应力、应变、剪切强度和拉伸强度为复合材料的宏观性能,比细观参量计算过程简单的多,更加有利于工程应用。

本文假设纤维缠绕复合材料为斜交对称层合板结构,多轴疲劳过程中处于二维薄膜应力状态,在弹性范围内可以通过经典层板理论计算组分单向板临界平面上的应力应变。根据试验可以确定的符合幂指数法则型的 $\Delta W - N$ 曲线方程

$$\Delta W = \alpha N^\beta \quad (2)$$

式中 α 和 β 为试验确定的拟合系数。式(2)通常采用其对数形式。

结合式(1)、(2),即可以预测不同条件下 $S-N$ 曲线。

3 试验研究

为了便于在 INSTRON 1343 拉扭疲劳试验机上夹持,试样两端采用了玻璃布进行补强,补强部分的外径为 57.5 mm,与 INSTRON 1343 试验机要求的夹持尺寸一致,中间标长段外径为 25.4 mm,与 INSTRON 双轴引伸计要求的一致。试样的具体几何尺寸可参考文献[7]。实验采用的缠绕成型复合材料管件试样规格为 $\pm 35^\circ$ 、 $\pm 55^\circ$ 和 $\pm 71^\circ$ 三种,其纤维体积百分含量约为 50%。

实验在室温条件下进行,采用载荷控制的方式,载荷波型为正弦波,拉扭载荷为同相比比例加载。根据文献[8]中建议,为了减少复合材料在疲劳过程中的蠕变现象,本实验中所有多轴疲劳试验的频率均为 2 Hz。实验多轴疲劳的拉扭应力比例 λ 分别为 2、1 和 0.5 三种,应力比 R 分别为 0 和 -1 两种情况。由于本实验过程采用的是载荷控制,因此本实验将试样在疲劳过程中发生断裂或分层现象时的疲劳周次作为试样的疲劳寿命。

4 实验结果与分析

4.1 实验结果

首先将 $\pm 35^\circ$ 、 $\pm 55^\circ$ 和 $\pm 71^\circ$ 三种不同缠绕角试样在拉扭应力比例 $\lambda = 0.5$ 、应力比例 $R = 0$ 条件下的多轴疲劳寿命采用传统的 $S-N$ 曲线进行描述, 其 $\sigma_{yy}^{\max} - 2N_f$ 关系如图 1 所示。从图中可以看出, 相同缠绕角的试样数据点能拟合合成一条直线, 这表明采用传统的 $S-N$ 曲线能对相同缠绕角的试样在特定实验条件下的多轴疲劳寿命进行预测。但是从图中也可以看出, 不同缠绕角的试样在相同的多轴疲劳实验条件下, $\sigma_{yy}^{\max} - 2N_f$ 曲线差别很大。在相同的加载条件下, 随着缠绕角的增加, 复合材料的多轴疲劳寿命呈下降的趋势。

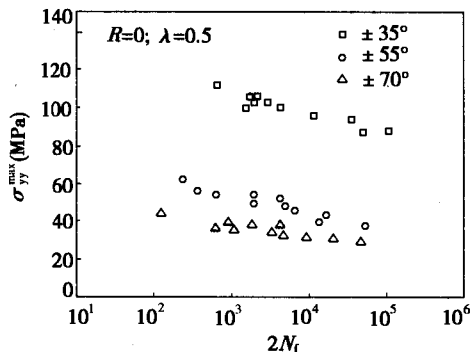


图 1 不同缠绕角试样的最大轴向应力与失效反转周次关系图

将 $\pm 55^\circ$ 缠绕角试样在拉扭应力比例 $\lambda = 0.5$ 时, 应力比例 $R = 0$ 和 $R = -1$ 条件下的多轴疲劳寿命分别采用传统的 $S-N$ 曲线进行描述, 其 $\sigma_{yy}^{\max} - 2N_f$ 关系如图 2 所示。从图中可以看出, 相同缠绕角的试样在不同 R 值实验条件下, $\sigma_{yy}^{\max} - 2N_f$ 曲线差别很大。当最大应力相同的情况下, $R = -1$ 时的寿命明显低于 $R = 0$ 。

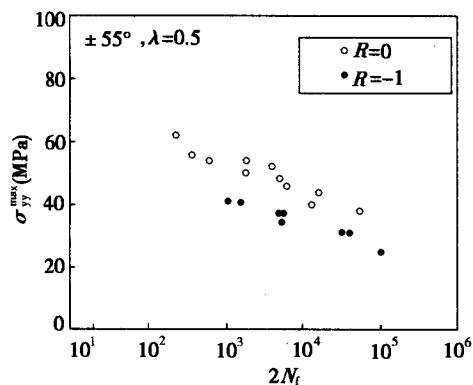


图 2 不同 R 值 $\pm 55^\circ$ 试样最大轴向应力与失效反转周次关系图

将 $\pm 55^\circ$ 缠绕角试样在拉扭应力比例 $R = 0$ 时, 应力比例 $\lambda = 0.5$ 、 $\lambda = 1$ 和 $\lambda = 2$ 条件下的多轴疲劳

寿命分别采用传统的 $S-N$ 曲线进行描述, 其 $\sigma_{yy}^{\max} - 2N_f$ 关系如图 3 所示。从图中可以看出, 在拉扭应力比例 $R = 0$ 的加载条件下, 当最大轴向应力相同时, 随剪切应力的增加, 疲劳寿命逐渐下降。

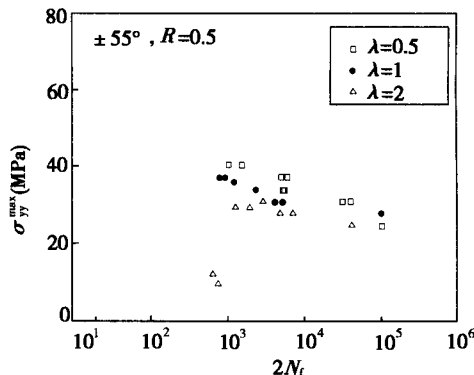


图 3 不同 λ 值 $\pm 55^\circ$ 试样最大轴向应力与失效反转周次关系图

从以上试验结果可以看出, 采用一种缠绕角试样的多轴疲劳数据, 根据应力寿命曲线不能预测其它缠绕角试样的多轴疲劳寿命; 即使缠绕角相同, 加载条件不同时其应力应变曲线也不相同。

4.2 多轴疲劳损伤参量对疲劳寿命的描述

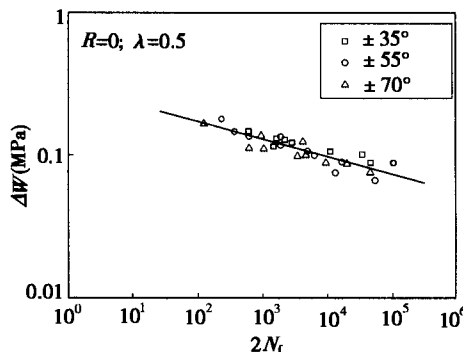


图 4 不同缠绕角试样统一损伤参量与失效反转周次关系图

通过文中定义的多轴疲劳损伤参数 ΔW 将三种不同缠绕角试样的疲劳反转周次 ($2N_f$) 结合在一起, 在一定的误差范围内, 所有的数据可以拟合为一条直线。也就是说, 本文提出的疲劳损伤参量可以把不同缠绕角的实验结果统一起来, 只需对一种缠绕角进行试验, 就可以预测其它缠绕角材料在相同加载条件下的疲劳寿命, 从而大大地节省试验费用。

4.3 多轴疲劳寿命的预测

采用 $\pm 55^\circ$ 试样在 $R = -1, \lambda = 1$ 条件下的多轴疲劳实验数据得出的 $\lg \Delta W - \lg 2N_f$ 曲线方程预测 $\pm 70^\circ$ 试样在 $R = -1, \lambda = 1$ 条件下的疲劳寿命如图 5,

从图中可以看出,预测的多轴疲劳寿命与实验结果吻合较好。

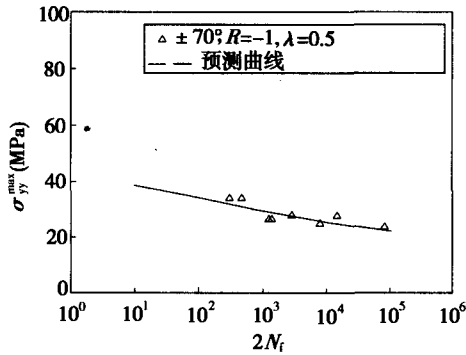


图5 对不同缠绕角在不同加载条件下疲劳寿命的预测

5 结论

(1)根据纤维缠绕复合材料的多轴疲劳损伤特点,基于临界平面方法提出了新的多轴疲劳损伤参量。此参量不含经验常数,且反映了基体和纤维材料复合后的综合性能,更加有利于工程应用。

(2)根据文中提出的基于临界平面的多轴疲劳损伤参量,可以对不同缠绕角复合材料在不同载荷条件下的多轴疲劳寿命的进行了描述。而且,根据一种缠绕角度试样在某种试验条件下疲劳寿命对其它缠绕角度和实验条件的寿命进行了预测,预测结果与实验吻合较好。

参考文献:

(上接第13页)在高温环境下的破坏寿命主要受应力、温度和缺口形状的影响,在最大应力和应力幅度一致的情况下,试样寿命随温度和应力集中系数的上升而降低。

参考文献:

- [1] Merah, T. Bui - Quoc and Bernard M. A Kt - Based Method for Calculating LCF Life of Notched Specimen[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, Trans. of the ASME. 1994(116): 403 - 408.
- [2] Shatil G, Ellison G E, Smith D. Elastic - plastic Behaviour and Uniaxial Low Cycle Fatigue Life of Notched Specimens [J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. 1995, 18(2): 235 - 245.
- [3] 赵少汴. 抗疲劳设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [4] 日本材料学会. 金属材料强度试验便览[M]. 东京: 养

- [1] Chen A S, Matthews F L. A Review of Multiaxial/Biaxial Loading Tests for Composite Materials [J]. Composites, 1993, 24 (5): 395 - 406.
- [2] Found M S. A Review of the Multiaxial Fatigue Testing of Fiber Reinforced Plastics [A]. Miller K. J, Brown M W. Multiaxial Fatigue, ASTM STP 853 [C]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1985. 381 - 395.
- [3] Shokrieh M M, Lessard L B. Fatigue under Multiaxial Stress System [A]. Harris B. Fatigue in Composites [M]. Woodhead Publication Ltd and CRC Press, 2003. 63 - 113.
- [4] Shen G, Glinka G, Plumtree A. Fatigue Life Prediction of Notched Composite Components [J]. J Fatigue Fract Engng Mater Struct, 1994, 17 (1): 77 - 91.
- [5] Plumtree A, Cheng G X. A Fatigue Damage Parameter for Off - Axis Unidirectional Fibre - reinforced Composites [J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21(8): 849 - 856.
- [6] Petermann J, Plumtree A. A Unified Fatigue Failure Criterion for Unidirectional Laminates [J], Composites: Part A 2001; 32(1): 107 - 118.
- [7] 戚东涛, 程光旭, 段权, 等. 基于临界平面法纤维增强复合材料多轴疲劳损伤参量的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(11): 1182 - 1185.
- [8] Perreux D, Joseph E. The Effect of Frequency on the Fatigue Performance of Filament - wound Pipes under Biaxial Loading: Experimental Results and Damage Model [J]. Composites Science and Technology, 1997, 57(3): 353 - 364.

收稿日期: 2005 - 09 - 10

贤堂发行, 1977.

- [5] 西田正孝著, 李安定等译. 应力集中[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [6] 陈国良, 束国刚. 12Cr1MoV 钢主蒸汽管道疲劳蠕变交互作用[J]. 中国电机工程学报. 1990, 10(1): 1 - 10.
- [7] 陈国良, 何庆复, 等. 熔铸盘疲劳蠕变交互作用第一类断裂特征图[J]. 北京钢铁学院学报, 1986, 2: 41 - 51.
- [8] 陈国良, 杨王玥. 12Cr1MoV 钢主蒸汽管道疲劳蠕变交互作用及断裂模式[J]. 金属学报. 1991, 27(2): 137 - 143.
- [9] 陈国良, 杨王玥. 12Cr1MoV 钢在保载条件下的疲劳蠕变交互作用断裂特征图[J]. 钢铁, 1992, 27(5): 42 - 45.

收稿日期: 2005 - 07 - 25

作者简介: 陈凌(1979 -), 男, 博士, 通讯地址: 杭州市浙江大学玉泉化机研究所。