

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2013.06.018

有拧紧力矩复合材料单钉接头疲劳寿命预测

王丹勇¹, 温卫东², 李恒春¹, 章玉斋¹

(1. 中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031; 2. 南京航空航天大学能源与动力学院, 南京 210016)

摘要: 通过对有拧紧力矩复合材料单钉接头疲劳加载过程应力分析及材料三维疲劳失效准则损伤判定, 并结合建立的疲劳加载材料退化模型、材料性能退化方法及复合材料接头最终失效判据, 建立了基于三维累积损伤分析的层合板接头疲劳载荷作用下寿命预测方法。最后, 对拉—拉疲劳载荷作用下有拧紧力矩层合板接头的疲劳寿命及破坏模式进行了模拟分析, 并与试验结果进行了对比, 结果表明, 建立的寿命预测方法能够很好地预测有拧紧力矩复合材料单钉接头的寿命以及破坏模式。

关键词: 复合材料; 接头; 疲劳; 寿命

中图分类号: TB330.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-3539(2013)06-0080-04

Prediction of Fatigue Life for Single Fastener Joints in Composite Laminates with Tightening Torque

Wang Danyong¹, Wen Weidong², Li Hengchun¹, Zhang Yuzhai¹

(1. CNGC Institute 53, Jinan 250031, China; 2. College of Energy & Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract : A progressive damage method for predicting the fatigue life of mechanically fastened joints in composite laminates with tightening torque was established, which was integrated with analysis of stress and fatigue material property degradation models. The three-dimensional fatigue failure criteria were introduced into the method to detect damage for diverse damage modes. The criteria of the structure catastrophe and the material property degradation rules were also established. Finally, the fatigue life and catastrophic failure of composite bolted joints with tightening torque under tension-tension fatigue loading conditions were predicted by using the progressive damage method for predicting fatigue life established. An excellent agreement was found between data obtained from this study and the experiment. The method for predicting fatigue life established can better predict the fatigue life and catastrophic failure of composite bolts joints with tightening torque.

Keywords : composite ; joint ; fatigue ; life

机械连接接头是复合材料主承力结构件的关键部位, 如何准确地预测连接部位强度、疲劳寿命以及失效模式与失效规律, 对复合材料结构设计是极为重要的。

目前, 对于复合材料接头静强度设计及预测, 已有一些研究^[1-4], 为进一步探讨其疲劳强度提供了基础。由于复合材料机械连接接头疲劳寿命预测方法尚未成熟, 工程上主要使用试验手段确定其疲劳强度^[5-7], 但完全使用试验方法对其设计会导致研制周期长、费用高, 同时达不到新型复合材料结构的开发速度, 而使用理论预测方法可实现先进复合材料按预定性能定制, 缩短研制周期。

D.Schütz 等^[8]用层合板接头应力—寿命曲线分析所得的疲劳强度试验结果, 给出了接头结构疲劳强度—寿命拟合经验公式, 该方法能对指定几何尺寸类型接头疲劳寿命进行简单预测。A.D.Iorio 等^[9]通过层合板接头疲劳试验过程中材料滞后环的变化确定阻尼系数及弹性模量, 并建立相应关系

式, 来实现接头疲劳寿命预测。该研究由于通过试验获取滞后环及相关参数复杂, 推广使用难度较大。

张开达等^[10]基于宏观唯象观点, 提出了一种以挤压破坏为结构最终失效判定依据的复合材料接头寿命预测方法。但该方法基于二维有限元分析技术, 不能有效分析接头分层损伤及法向受力情况。M.M.Shokrich 等^[11-12]基于材料刚强度退化方法, 建立了一种层合板接头疲劳累积损伤分析方法, 文中对其他作者试验用铺层方式为 $[0 / \pm 45 / 90]_s$ 的层合板接头疲劳寿命进行计算时, 其预测值远高出试验值, 应用通用性较差。

目前工程上尚没有可靠的复合材料接头疲劳寿命预测方法可供应用。因此, 笔者针对目前工程上广泛使用的有拧紧力矩复合材料单钉接头, 建立其疲劳寿命预测方法以达到提前设计接头的目的。

联系人: 王丹勇, 博士, 主要研究复合材料结构强度与寿命

收稿日期: 2013-03-12

1 分析方法

复合材料单钉接头几何尺寸简图如图 1 所示。

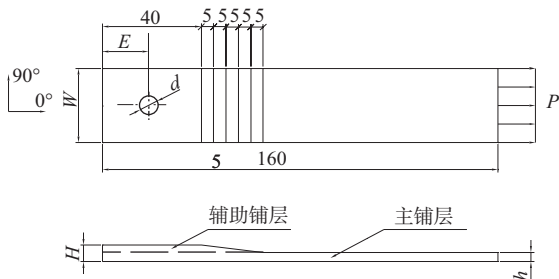


图1 接头层合板简图

由于疲劳加载每一交变循环过程中,载荷都是不断变化的,如果对有拧紧力矩复合材料单钉接头每一次疲劳循环加载过程中任一疲劳载荷加载瞬间及产生的损伤都进行判断分析,将花费大量的计算时间。因此,为了有效、便捷地预测有拧紧力矩复合材料单钉接头疲劳寿命,该方法是建立在如下通常假设基础之上^[11-13]:①每一次疲劳加载循环分析,仅考虑最大及最小疲劳应力对复合材料接头应力分布的影响;②疲劳损伤失效仅发生在最大疲劳应力水平作用时。

1.1 应力分析

有拧紧力矩复合材料单钉接头疲劳循环加载应力分析,与静强度预测过程一样^[1],同样建立在有限元分析基础上。基于时间增量原理,推导的有拧紧力矩复合材料单钉接头疲劳过程累积损伤应力—应变分析的虚功方程具体过程见文献[15]。

1.2 破坏判定准则

在有拧紧力矩复合材料单钉接头疲劳加载过程中,复合材料内部将会出现一定损伤,应用 Hashin 疲劳失效准则^[14]对其进行损伤失效判定。

有拧紧力矩复合材料单钉接头疲劳寿命最终判定方法采用接头静强度预测最终破坏判定方式,具体见文献[1]。

1.3 疲劳过程中材料性能退化

当有拧紧力矩复合材料单钉接头受疲劳交变载荷作用时,随着加载循环次数的增多,将在复合材料中产生疲劳损伤,从而导致复合材料接头疲劳强度以及结构刚度的下降。

笔者对有拧紧力矩复合材料单钉接头的疲劳过程性能退化方法见文献[15]。

2 疲劳累积损伤分析模型与分析流程

对于有拧紧力矩复合材料静强度预测方法及分析流程见文献[1]。

有拧紧力矩复合材料单钉接头疲劳寿命预测流程及建立模型过程参见文献[15]。

建立的有拧紧力矩复合材料单钉接头结构有限元模型示意图如图2所示,复合材料单元数量为12016个。

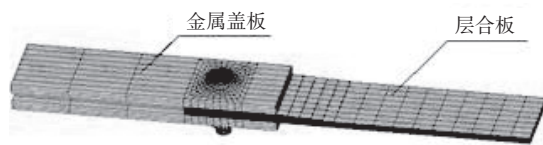


图2 有拧紧力矩复合材料单钉接头有限元模型示意图

在有拧紧力矩复合材料单钉接头有限元建模时,将连接螺栓拧紧力矩边界约束转化为均布载荷,并将其施加在复合材料单钉接头与上下盖板相互接触的面上,均布载荷 q 的计算方法为:

$$q = \frac{M}{0.2 \times d \times A} \quad (1)$$

式中: M ——拧紧力矩;

d ——直径;

A ——层合板接头与单个盖板相互接触的面积。

3 有拧紧力矩复合材料接头疲劳累积损伤寿命预测与验证

针对 T300/BMP-316 材料 $E/D=3$, $W/D=3$ 类型复合材料单钉接头,对其在常幅单级疲劳载荷作用下寿命进行预测。施加拧紧力矩为 $8 \text{ N} \cdot \text{m}$,应力比 $R=0.1$ 。接头层合板主铺层顺序为 $[\pm 45 / 90 / 0 / -45 / 0 / 45 / 0 / 90 / 0]_s$,辅助铺层顺序为 $[0_2 / 0_2 / 90_2 / 90_2 / -45_2 / 45_2]$ 。

取 $\sigma=P/(W \times \text{安装孔处厚度})$ 作为含辅助铺层复合材料单钉接头静强度。

T300/BMP-316 单向复合材料性能参数为: $E_1=128.8 \text{ GPa}$, $E_2=E_3=8.94 \text{ GPa}$, $G_{12}=G_{13}=5.66 \text{ GPa}$, $G_{23}=3.03 \text{ GPa}$, $\nu_{12}=\nu_{13}=0.328$, $\nu_{23}=0.477$, $X_T=1298.2 \text{ MPa}$, $X_C=1040.74 \text{ MPa}$, $Y_T=Z_T=64 \text{ MPa}$, $Y_C=Z_C=185 \text{ MPa}$, $S_{12}=S_{13}=102 \text{ MPa}$, $S_{23}=30 \text{ MPa}$;复合材料单层厚度为 0.125 mm 。金属盖板、螺栓、螺母及垫圈材料常数为:弹性模量为 $2.06 \times 10^{11} \text{ Pa}$,泊松比为 0.3 。

对于疲劳载荷作用下有拧紧力矩复合材料单钉接头,使用静强度预测方法对其进行三维有限元建模,模型中各材料参数均与静强度预测分析中相同。使用静强度预测方法计算得到该类型有拧紧力矩复合材料单钉接头静强度 $\sigma_0=340 \text{ MPa}$,其整个计算过程见文献[15]。

T300/BMP-316 单向板疲劳加载各主方向材料退化计算方法见文献 [15-16]。有拧紧力矩复合材料疲劳寿命计算过程中,每一加载循环都逐单元进行应力计算、材料失效判定、单元刚度退化分析,直到最终接头结构丧失承载为止。

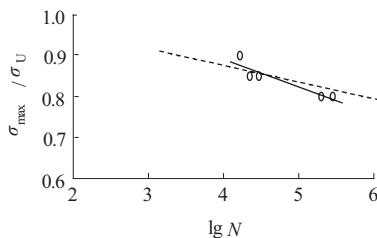
预测的施加拧紧力矩 $8\text{ N}\cdot\text{m}$ 的复合材料单钉接头对疲劳寿命结果与试验结果对比如表 1 所示。其中 N_{50} 为中值疲劳寿命。

表 1 复合材料接头对数疲劳寿命预测结果与试验结果对比

E/D	W/D	应力水平	预测值	试验值	比值
3	3	90%	3.40	4.22	1.24
		85%	4.70	4.41	1.07
		80%	5.85	5.38	1.09

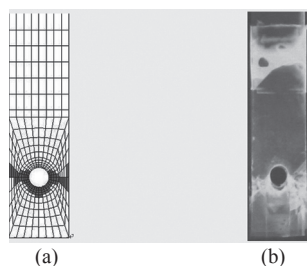
有拧紧力矩复合材料单钉接头的疲劳寿命的预测曲线与试验结果对比情况如图 3 所示。从图 3 可以看出,虽然对该复合材料单钉接头每一应力水平下试验数量仅为 1~2 件,并且仅进行了 3 个不同应力水平载荷点疲劳试验,但疲劳逐渐损伤分析方法预测的疲劳寿命拟合曲线与试验结果对比显示,除 90% 应力水平疲劳寿命外(该疲劳载荷点仅有一个试验数据),预测的结果与试验结果吻合仍较好。

图 4、图 5 分别示出 85% 和 80% 应力水平下施加 $8\text{ N}\cdot\text{m}$ 拧紧力矩的复合材料单钉接头累积损伤预测结果与试验试样破坏 X 光照片对比情况。从图 4 以及图 5 的照片可以看出,根据拧紧力矩的复合材料单钉接头螺栓孔处损伤扩展情况,模拟的其最终破坏损伤与试验结果吻合较好。



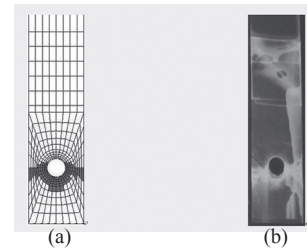
○—试验值; ————试验拟合值; ----—预测值

图 3 有拧紧力矩复合材料单钉接头预测结果与试验结果对比



a—模拟结果; b—试验照片

图 4 85% 应力水平有拧紧力矩复合材料单钉接头累积损伤预测结果与试验试样破坏 X 光照片对比



a—模拟结果; b—试验照片

图 5 80% 应力水平有拧紧力矩复合材料单钉接头累积损伤预测结果与试验试样破坏 X 光照片对比

4 结论

(1) 通过有拧紧力矩复合材料单钉接头疲劳加载过程应力分析及材料三维疲劳失效准则损伤判定,并结合建立的疲劳加载材料退化模型、材料性能退化方法及复合材料接头最终失效判据,建立了一种有拧紧力矩的复合材料单钉接头疲劳载荷作用下寿命预测方法。

(2) 累积损伤分析的疲劳预测方法可较好地预测有拧紧力矩的复合材料单钉接头疲劳寿命及破坏模式。

参考文献

- [1] 王丹勇,温卫东,崔海涛. 复合材料单钉接头三维逐渐损伤破坏分析[J]. 复合材料学报,2005,22(3):168-174.
Wang Danyong, Wen Weidong, Cui Haitao. Three-dimensional progressive damage analysis of single fastener joints in composite laminates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(3):168-174.
- [2] 王丹勇,温卫东,崔海涛. 含材料非线性的复合材料单钉接头累积损伤分析[J]. 固体力学学报,2006,27(2):186-190.
Wang Danyong, Wen Weidong, Cui Haitao. Progressive damage analysis considering the material nonlinearity of composite laminates containing a hole[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2006, 27(2):186-190.
- [3] Camanho P P, Matthews F L. A progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates[J]. Journal of Composite Materials, 1999, 23:2 248-2 249.
- [4] McCarthy C T, McCarthy M A. Progressive damage analysis of multi-bolt composite joints with variable bolt-hole clearances[J]. Composites, Part B, 2005, 36:290-305.
- [5] Counts W A, Johnson W S. Bolt bearing fatigue of polymer matrix composites at elevated temperature[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24:197-204.
- [6] Starikov R, Schön J. Experimental study on fatigue resistance of composite joints with protruding head bolts[J]. Composite Structure, 2002, 55:1-11.
- [7] Chen H S. The static and fatigue strength of bolted joints in composites with hygrothermal cycling[J]. Composites Structures, 2002, 55:1-11.

- 2001, 52:295-306.
- [8] Schütz D, Gerharz J J, Alschweig E. Fatigue properties of unnotched, notched, and jointed specimens of a graphite / epoxy composite[J]. Fatigue of Fibrous Composite Materials, 1981:31-47.
- [9] Iorio A D, Lecce L, Mignosi S. Fatigue damage evaluation in multifastened CFRP joints[J]. Advances in Fracture Research, 1984:3 045-3 051.
- [10] 张开达, 石彩华. 复合材料机械联接接头的寿命估算 [J]. 机械科学与技术, 1996, 15(6):897-902.
- Zhang Kaida, Shi Caihua. Prediction of fatigue life for mechanical joint in laminated composites[J]. Mechanical Science and Technology, 1996, 15(6):897-902.
- [11] Shokrich M M, Lessard L B. Progressive fatigue damage modeling of composite materials, part I: modeling[J]. Journal of Composite Materials, 2000, 34:1 056-1 080.
- [12] Shokrich M M, Lessard L B. Progressive fatigue damage modeling of composite materials, part II: Material characterization and model verification[J]. Journal of Composite Materials, 2000, 34:1 081-1 116.
- [13] Tserpes K I, Papanikos P, Labeas G, et al. Fatigue damage accumulation and residual strength assessment of CFRP laminates[J]. Composite Structure, 2004, 63:219-230.
- [14] Hashin Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites[J]. Journal of Applied Mechanics, 1980, 47:329-335.
- [15] 王丹勇. 层合板接头损伤失效与疲劳寿命研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- Wang Danyong. Research on prediction of damage failure and fatigue life for composite bolted joints[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [16] 王丹勇, 温卫东. 复合材料单向层合板损伤失效试验研究 [J]. 复合材料学报, 2007, 24(5):142-148.
- Wang Danyong, Wen Weidong. Experimental research on damage failure of unidirectional laminas[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(5):142-148.

博禄携领先的 PP 进气歧管及高级食品包装解决方案亮相 2013 国际橡塑展

在近日于广州举行的 2013 国际橡塑展上, 全球领先的创新和增值材料解决方案供应商博禄公司展示了在中国生产的 GB306SAFC 短玻纤增强聚丙烯 (PP) 产品以及消费食品包装技术领域的创新成果和可持续性优势。

GB306SAFC 短玻纤增强 PP 材料由博禄上海改性工厂生产, 已被大众汽车指定为空气进气歧管的聚酰胺 (PA) 替代材料, 用于高尔夫、Polo、捷达和朗逸等多款大众畅销车型的 MPI 1.4L 和 1.6L 汽油发动机。

该材料与 PA 材料相比, 使汽车零部件质量减轻 15%, 系统成本降低 20%。此外, 即使在潮湿环境中, 博禄的高性能 PP 复合材料亦能展现出优异的力学性能。

该公司还展出了屡获殊荣的 Bormod™ HD915CF。该材料是一种基于 Borstar® 专利技术的高结晶 PP 均聚模塑材料, 采用北欧化工成核技术 (BNT) 制成。与滑石粉成核及非成核 PP 相比, BNT 可使 PP 球晶更均匀、更细腻。最终制成的超高晶体结构的挺度可比目前市场在售的任何同质 PP 材料高出 50%。HD915CF 的高结晶结构是真空镀铝流延 PP 薄膜核心层的理想选择。由于薄膜挺度较高, 因而有利于在镀铝过程中实现均匀的铝沉积。因为并未使用迁移性添加剂, 在加工过程中可达到并保持较高的表面电晕水平, 以便进行二次加工。具有全面提升包装可持续性。

此次展出的另一大核心产品为 BorPure™ HJ311MO 高流动性 PP 均聚物, 尤其适用于经济快捷的无异味容器注塑成型工艺。与替代材料相比, 由 BorPure™ HJ311MO 材料制成的容器具有更出色的耐破损性能, 能满足熟食和外卖市场迅速增长的需要。该材料还可加强产品包装的外观吸引力。此材料结合了挺度和高熔态流动性特点, 在保持容器刚性的同时又能实现轻量化优势。该材料具有非翘曲特性尤

其适用于长方形密封盖和容器。与替代树脂材料相比, 该材料可在更低的温度条件下, 以更快的速度实现注塑成型, 成型周期最多可缩短 20%。因而减少了 CO₂ 排放对环境的影响。高挺度和防静电配方有助于实现高效脱模。因此, 生产每件产品所需的成本和能耗大幅降低, 并实现了设备利用率的最大化。

(博禄公司)

博禄将继续加强与我国和亚洲管道系统价值链合作

博禄公司为民用住宅、基础设施、农业和工业等相关领域的耐用和创新管道系统提供领先的塑料解决方案。博禄也参与了我国以及世界各地的多项大型管道应用项目, 这对博禄与整个管道行业价值链的合作起到了推动作用。

(1) 支持重大工业项目建设。

宁波化学工业园区的生产污水经过处理后需要通过管道运输至 1.6 km 外的深海排放点。亚大集团上海有限公司为宁波化学工业园区的排污项目提供了直径为 800 mm 的 PE 管道, 该管道产品采用博禄的 BorSafe HE3490-LS PE100 高分子材料, 其卓越的性能表现使之成为了制造高品质大口径 PE 压力管道的理想原料。

(2) 改善供水状况。

当前, 减少水资源浪费、改善水质是包括我国在内的众多快速发展中的大城市所面临的两大挑战。对于以非开挖技术或在石质土壤环境中安装的管道而言, BorSafe™ HSCR PE100 材料凭借良好的高抗慢速裂纹扩展性能和长期可靠性, 是生产此类管道的理想材料选择, 并能够使管道改造工程在不影响城市正常生活的前提下进行。

我国部分城市已经开始尝试通过水处理和循环利用等方式来增加水资源供给。北京“亮马桥”废水循环利用项目需将 16 万 m³ 废水输送至酒仙桥污水处理厂。亚大集团为该项目提供了大量 1.2 m 口径 PE 管道, 均采用了博禄的 BorSafe™ 材料。

(博禄公司)