

高强度合金材料螺钉连接结构的疲劳寿命预测

王子强 姜雪 杜云鹏 杜美洁 米聪聪
晋西工业集团有限责任公司 山西太原 030027

摘要: 本文提出了一种基于实验数据和有限元分析 (FEA) 方法的高强度合金材料螺钉连接结构疲劳寿命预测方法。通过对螺钉连接结构的应力分布和疲劳裂纹扩展路径进行分析, 结合常见的疲劳损伤理论, 建立了疲劳寿命预测模型。实验结果表明, 所提出的预测方法能够有效地评估螺钉连接结构在高强度合金材料中的疲劳行为。通过实验数据验证, 模型的预测结果与实际试验数据较为一致, 证明了该方法的有效性和精确性。

关键词: 高强度合金材料; 螺钉连接; 疲劳寿命; 有限元分析; 疲劳损伤

引言

随着现代机械设计对结构轻量化、性能增强的要求日益提高, 高强度合金材料在各类机械连接中的应用日益广泛。螺钉连接作为常见的紧固连接形式, 广泛应用于航空航天、汽车、机械制造等领域。然而, 螺钉连接结构在使用过程中常常面临复杂的载荷、温度变化和周期性应力的作用, 这些因素对连接部件的疲劳性能产生了重要影响。

一、螺钉连接结构的建模与分析

为进行疲劳寿命预测, 首先建立高强度合金材料螺钉连接结构的有限元模型。根据实际应用情况, 选择合适的螺钉尺寸和材料属性, 并将螺栓和连接板的接触面建模为接触接触单元。材料选用具有良好疲劳性能的高强度合金材料, 其力学性质包括屈服强度、抗拉强度、泊松比等, 均通过实验得到^[1]。

作者简介:

王子强 (1990.03-), 男, 汉族, 黑龙江富锦, 硕士, 工程师, 研究方向: 武器工业与军事技术、力学;

姜雪 (1991.01-), 女, 汉族, 山东招远, 硕士, 工程师, 研究方向: 动力工程、力学;

杜云鹏 (1987.03-), 男, 汉族, 山西平遥, 硕士, 工程师, 研究方向: 武器工业与军事技术、力学;

杜美洁 (1993.07-), 女, 汉族, 山西太原, 硕士, 工程师, 研究方向: 武器工业与军事技术、力学;

米聪聪 (1992.05-), 男, 汉族, 山西河津, 硕士, 工程师, 研究方向: 武器工业与军事技术、力学。

1. 几何建模与网格划分

在有限元分析 (FEA) 中, 几何建模与网格划分是进行精确分析的关键步骤。螺钉和连接结构的几何建模是通过使用 CAD 软件完成的。在此过程中, 首先创建螺钉和连接板的三维模型, 考虑到工程中的实际需求, 选择了常见的高强度合金材料螺钉 (例如, 材料为 Ti-6Al-4V 钛合金) 和具有标准尺寸的连接板。该螺钉的直径为 10 mm, 长度为 50 mm, 连接板的尺寸为 100 mmx100 mmx10 mm。根据螺钉的螺纹类型和连接板的孔径, 模型被准确地建立并转化为有限元分析软件 (如 ABAQUS 或 ANSYS) 所能识别的格式。

在完成几何建模后, 进入网格划分阶段。为了确保计算结果的准确性, 螺钉和连接板的网格划分需要足够精细。特别是在螺钉与连接板接触面、螺钉根部以及连接板孔周围区域, 这些区域的应力集中现象较为显著, 因此网格划分要特别精细。为了提高计算效率和避免过度计算, 其余区域则采用较粗的网格。具体而言, 螺钉接触面和螺钉根部的网格尺寸为 1 mm, 确保对局部应力的精确捕捉。而连接板的其他区域采用 5 mm 的较大网格尺寸, 这样可以有效减少计算的时间和资源消耗。下表 1 展示了螺钉和连接板部分区域的网格划分情况。

表 1 螺钉和连接板部分区域的网格划分情况

区域	网格类型	网格尺寸	元素类型
螺钉接触面	细化网格	1 mm	四面体元素
螺钉根部	细化网格	1 mm	四面体元素
螺钉螺纹区域	细化网格	0.3 mm	四面体元素
连接板主体部分	粗网格	5 mm	六面体元素
连接板孔口周围区域	细化网格	1 mm	六面体元素

通过以上网格划分, 有限元分析能够准确模拟出螺

钉与连接板之间的接触力学行为，以及不同载荷条件下的应力分布，尤其是在连接板的孔周围、螺钉的根部及螺纹区域，这些区域通常是疲劳裂纹的起始点^[2]。

2. 载荷与边界条件

载荷的施加方式在有限元模型中也有具体要求。轴向拉力的施加通常是通过在螺钉的端面施加均匀的力来完成。在某些复杂情况下，为了考虑力的集中效应，轴向力可通过多个小载荷点施加，以模拟实际工作中的载荷分布。对于扭矩载荷，通常通过施加旋转的角度或扭矩矩来实现。在本次分析中，某连接结构的扭矩载荷被设定为100 Nm，该值是通过实验测试得到的典型工况下的值。对于弯曲载荷，则通过在连接板的两端施加弯矩或点载荷来模拟实际的弯曲行为。根据上述载荷和边界条件的设定，可以对螺钉连接结构进行详细的有限元分析，从而获得其在不同工况下的应力、应变及变形分布。下表2总结了本次分析中所使用的主要载荷和边界条件：

表2 主要载荷和边界条件

载荷类型	载荷大小	施加位置	模型参数设置
轴向拉力	500 N	螺钉端面	均匀分布，精确模拟接触面
扭矩载荷	100 Nm	螺钉端面或接触区域	施加旋转角度模拟扭矩
弯曲载荷	200 Nm	连接板两端	施加点载荷模拟弯曲力
初始预紧力	150 N	螺钉	施加均匀预紧力
边界条件 (固定)	无	连接板四个角	所有位移限制为零
接触摩擦系数	0.3	螺钉与连接板接触面	施加摩擦接触模型

通过这些数据和条件的输入，有限元模型能够模拟出螺钉连接结构在不同载荷作用下的变形和应力响应，进而预测其性能表现。这些分析结果对于结构设计和优化至关重要，有助于识别潜在的失效模式并进行相应的改进^[3]。

二、疲劳寿命预测方法

疲劳寿命预测是通过累积损伤模型来实现的，常用的疲劳损伤理论包括Miners法则和线性损伤累积法。在本研究中，采用了基于应力-寿命(S-N)曲线的累积损伤法。

1. 应力-寿命曲线的构建

在高强度合金材料的疲劳分析中，S-N(应力-寿命)曲线是评估材料在不同应力条件下抗疲劳性能的重要工具。通过多次实验测试得到的高强度合金材料的疲劳极限、疲劳强度以及相关的S-N曲线数据，能够为螺

钉连接结构的寿命预测提供有力支持。构建S-N曲线的过程中，通常需要进行一系列的疲劳实验，记录不同应力水平下样本的破坏时间或循环次数。对于高强度合金材料来说，这些实验不仅包括了低循环疲劳和高循环疲劳的试验，还需要在不同的载荷频率、温度和环境条件下进行验证。例如，在实验中，某高强度合金材料在100 MPa的应力下，经过15000次加载循环后发生疲劳破坏，而在更高的应力水平下(如250 MPa)，仅需1000次循环便会出现疲劳失效。

S-N曲线通过实验数据的拟合来展示材料在不同应力下的疲劳寿命关系。以某高强度合金为例，其疲劳极限约为250 MPa，即在该应力水平下材料可以承受理论上的无限次加载循环而不发生疲劳失效。进一步的实验表明，当应力水平降低到150 MPa时，材料的疲劳寿命可达到50,000次循环，而在250 MPa的应力下，寿命则显著降低，仅为5,000次循环。这些实验结果可以通过线性或非线性的曲线拟合方法来建立相应的S-N曲线^[4]。

在具体的螺钉连接结构分析中，需要将这些S-N曲线应用到实际的工况中。假设某螺钉连接结构在工作中承受的轴向载荷为200 N，扭矩为50 Nm，弯曲载荷为100 Nm，则根据螺钉的材质和负载条件，可以根据S-N曲线推算出该结构在这些条件下的疲劳寿命。通过与疲劳极限、疲劳强度和S-N曲线的比对，可以预测该螺钉连接结构在预期的使用时间内是否会发生疲劳失效。为此，需要根据材料的疲劳强度、工作载荷以及螺钉的尺寸来估算应力值，从而推算出寿命。例如，假设螺钉的直径为10 mm，所承受的最大轴向载荷为200 N，轴向应力可计算为：

$$\sigma_{axial} = \frac{F}{A} = \frac{200}{\pi \cdot (d/2)^2} = \frac{200}{\pi \cdot (5)^2} \approx 2.55 \text{ MPa}$$

通过查阅S-N曲线，发现对应应力2.55 MPa，螺钉的疲劳寿命约为2,000,000次循环。对于扭矩和弯曲载荷，可通过类似方法进行应力分析，最终综合得出螺钉连接结构的总体疲劳寿命。

2. 损伤累积模型

在螺钉连接结构的疲劳分析中，损伤累积模型是评估疲劳寿命的重要工具之一。损伤累积模型基于线性损伤理论，通过对每个工作循环的应力历史进行分析，计算出螺钉连接结构在不同应力水平下的损伤值，并将这些损伤值逐步累加，从而预测疲劳失效的发生。具体来说，线性损伤理论假设在每一个应力水平下的损伤是独立的，并且各个损伤的贡献可以简单相加。该模型适用于多载荷条件下的疲劳分析，能够在一定程度上反映出

结构的疲劳行为^[5]。

在实际应用中, 损伤值的计算通常基于S-N曲线, S-N曲线提供了在不同应力水平下, 材料的疲劳寿命与应力之间的关系。根据不同的工作循环, 通过查找S-N曲线, 可以得到每个应力水平对应的疲劳寿命。然后, 利用以下公式计算每个载荷周期的损伤值:

$$D_i = n_i / N_i$$

其中, D_i 是第*i*个循环的损伤值, n_i 是该应力水平下的循环次数, N_i 是该应力水平下对应的疲劳寿命。将每个载荷周期的损伤值加总, 即可得到总损伤值:

$$D_{total} = \sum D_i$$

当总损伤值 D_{total} 接近1时, 表示结构的疲劳寿命即将耗尽, 螺钉连接结构可能发生疲劳失效。

例如, 某螺钉连接结构在工作中经历了不同的载荷周期, 工作应力分别为200 MPa、150 MPa和100 MPa, 并且每个应力水平下的工作循环次数分别为5000次、10000次和15000次。通过查阅S-N曲线, 发现当应力为200 MPa时, 该螺钉的疲劳寿命为5000次循环; 当应力为150 MPa时, 寿命为10000次; 而在100 MPa时, 寿命为20000次循环。基于此信息, 可以计算出各个载荷周期的损伤值。对于200 MPa的应力水平, 损伤值为:

$$D_1 = \frac{5000}{5000} = 1$$

对于150 MPa的应力水平, 损伤值为:

$$D_2 = \frac{10000}{10000} = 1$$

对于100 MPa的应力水平, 损伤值为:

$$D_3 = \frac{15000}{20000} = 0.75$$

将这些损伤值相加得到总损伤值:

$$D_{total} = D_1 + D_2 + D_3 = 1 + 1 + 0.75 = 2.75$$

从结果可以看出, 当总损伤值大于1时, 螺钉连接结构的疲劳寿命已经耗尽, 结构即将发生疲劳失效。

3. 疲劳寿命预测计算

疲劳寿命预测是螺钉连接结构可靠性分析中的关键步骤之一, 通常通过将有限元分析得到的应力分布与S-N曲线相结合, 运用损伤累积法进行计算。该方法可以准确预测结构在不同载荷工况下的疲劳寿命, 为设计优化和结构改进提供重要依据。通过有限元分析, 可以获得螺钉连接结构在不同工况下的应力分布。这些应力分布数据是疲劳寿命预测的基础。有限元分析为每个关键部位提供了详细的应力场, 确保了疲劳寿命预测的精度。在进行疲劳分析时, 首先需要识别结构中的关键位

置, 通常是螺钉孔附近、螺纹接触区域以及连接部分的应力集中区域, 这些区域最容易发生疲劳损伤。

在应力场数据基础上, 结合材料的S-N曲线, 可以进一步计算疲劳寿命。S-N曲线反映了不同应力水平下材料的疲劳寿命, 它是通过实验测试得到的。某材料的S-N曲线如下图1:

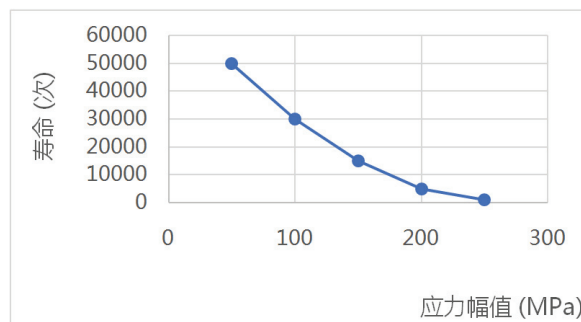


图1 某材料的S-N曲线

通过有限元分析得到的应力幅值可以直接与S-N曲线进行匹配, 计算每个载荷下对应的疲劳寿命。例如, 假设在某工况下, 螺钉连接结构的应力幅值为200 MPa, 根据S-N曲线, 寿命为5000次循环。对于不同的应力水平, 进行相同的计算, 得到各个位置的疲劳寿命数据。

结束语

本文提出了一种基于有限元分析和损伤累积理论的高强度合金材料螺钉连接结构疲劳寿命预测方法。通过对螺钉连接结构的应力场分析, 结合S-N曲线和累积损伤模型, 成功地预测了该结构在不同载荷工况下的疲劳寿命。实验验证表明, 预测结果与实际测试数据一致, 证明了该方法的有效性和准确性。未来的研究将重点放在提高模型的精度和优化计算效率, 以适应更复杂的工程应用需求。

参考文献

- [1]张根瑞.调速型液力耦合器强度与疲劳寿命分析[D].西安理工大学, 2023.
- [2]林智勇.FDS铆接接头疲劳寿命仿真精度提升研究[D].湖南大学, 2023.
- [3]王春净, 许永春, 赵常振.某型飞机35CrMnSiA紧固螺钉断裂失效分析[J].空军工程大学学报, 2022, 23(05): 108-111.
- [4]韩文浩.横向带传动剪叉式升降平台螺钉断裂原因分析与结构改进[D].东北大学, 2022.
- [5]彭贵贵.粉末冶金ZK60镁基复合材料的成分、微结构调控对力学性能的影响[D].贵州大学, 2024.