

团 体 标 准

T/CMES XXXX—20XX

薄壁整体加筋结构等效疲劳损伤缩比试样 设计技术规范

Technical Design Specifications for Reduced-Scale
Specimens of Equivalent Fatigue Damage for Thin-Walled
Integral Stiffened Structures

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国机械工程学会 发布

T/CMES XXX—202X

中国机械工程学会（英文简称 CMES）是具备开展国内、国际标准化活动资质的全国性社会团体。制定中国机械工程学会团体标准，以满足企业需要和市场需求，推动机械工业创新发展，是中国机械工程学会团体标准的工作内容之一。中国境内的团体和个人，均可提出制、修订中国机械工程学会团体标准的建议并参与有关工作。

中国机械工程学会团体标准按《中国机械工程学会标准化管理办法》进行制定和管理。

中国机械工程学会团体标准草案经向社会公开征求意见，并得到参加审定会议的 3/4 以上的专家、成员的投票赞同，方可作为中国机械工程学会团体标准予以发布。

在本标准实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料寄给中国机械工程学会，以便修订时参考。

本标准版权为中国机械工程学会所有。除了用于国家法律或事先得到中国机械工程学会正式许可外，不许以任何形式复制、传播该标准或用于其他商业目的。

中国机械工程学会地址：北京市海淀区首体南路 9 号主语国际 4 座 11 层

邮政编码：100048 电话：010-68799027 传真：010-68799050

网址：www.cmes.org 联系人：袁俊瑞 电子信箱：yuanjr@cmes.org

目 次

目 次.....	II
前 言.....	III
引 言.....	IV
薄壁整体加筋结构等效疲劳损伤缩比试样设计技术规范	1
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
3.1 薄壁整体加筋结构.....	1
3.2 等效疲劳损伤.....	1
3.3 缩比结构试样.....	2
3.4 应力集中.....	2
3.5 三维应力分布.....	2
3.6 控制参量.....	2
3.7 等效疲劳载荷.....	2
3.8 有限元建模	2
4 设计准则.....	2
4.1 材料一致性准则.....	2
4.2 典型结构特征一致性准则.....	3
4.3 疲劳损伤等效准则.....	3
4.4 控制参量的三维应力分布一致准则.....	4
5 设计流程.....	4
6 试验方法.....	5
7 检验方法.....	5
8 设计报告.....	6

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国机械工程学会提出并归口。

本文件起草单位：中国人民解放军陆军装甲兵学院、辽宁工业大学、北京空间飞行器总体设计部、贵阳学院、江苏科技大学、北京交通大学。

本文件起草人：董丽虹，王海斗，高冲，周新远，石文静，柴洪友，谢向宇，刘彬，邢志国，马国政，底月兰，于文波，张宇鹏。

引 言

薄壁整体加筋结构是航天器的核心承力结构，其疲劳损伤累积问题一直受到热切关注而进行薄壁整体加筋结构的疲劳性能研究，不仅面对大型结构成本高昂消耗不起的困难，而且常规疲劳试验设备亦无法满足要求。开展可替代薄壁整体加筋结构疲劳损伤性能研究的缩比样件设计是突破上述局限的必经途径，对大型复杂航天装备承载构件的疲劳损伤研究具有重要意义。为规范薄壁整体加筋结构等效疲劳损伤缩比试样设计的技术要求，促进本行业的有序发展，特制定本技术标准。

中国机械工程学

薄壁整体加筋结构等效疲劳损伤缩比试样设计技术规范

1 范围

本文件规定了薄壁整体加筋结构等效疲劳损伤缩比结构试样的设计准则、设计流程、试验方法、检验方法和设计报告的要求。

本文件适用于薄壁（涵盖平板及具有曲率特征的圆筒、锥壳等）整体加筋结构，加筋形式包含周期性对称的正十字网格、斜十字网格、三角网格、单加筋等的一体成型加筋结构，进行其等效疲劳缩比试样的设计、试验及检验。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，对于注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有修改版）适用于本文件。

GB/T 3075-2021 金属材料疲劳试验轴向力控制方法疲劳试验方法

GB/T 4732.1-2024 压力容器分析设计第1部分：通用要求

GB/T 4732.3-2024 压力容器分析设计第3部分：公式法

GB/T 26076-2010 金属薄板（带）轴向力控制疲劳试验方法

GB/T 33582-2017 机械产品结构有限元力学分析通用规则

GB/T 40541-2021 航天金属压力容器结构设计要求

3 术语和定义

下列术语和定义适应于本文件。

3.1

薄壁整体加筋结构 Thin-Walled Integral Stiffened Structures

薄壁的厚度 t 与薄壁整体加筋结构部件在薄壁厚度方向的尺寸 L 的比值 $(t/L)_{\max} \leq 1/10$ 。薄壁整体加筋结构由滚压/旋压—铣削一体成型，不包含焊接和铆接加筋结构。

3.2

等效疲劳损伤 Equivalent fatigue damage

在缩比试样与原结构之间，通过几何相似、载荷谱等效及材料一致性控制，使两者的裂纹萌生位置概率分布规律、裂纹扩展速率和裂纹扩展形貌规律保持统计一致，从而确保缩比试样的疲劳损伤演化过程（萌生→扩展）能够映射原结构。

3.3

缩比结构试样 Scaled structure sample

在等效原结构疲劳损伤规律的前提下，保留原结构的典型结构特征，并且尺寸比例缩小为可开展疲劳试验的小型结构试样。

3.4

应力集中 Stress concentration

结构局部过渡区刚度急剧变化引起的应力数值明显增高现象。

3.5

三维应力分布 Three-dimensional stress distribution

三维应力分布是通过数值仿真方法获得的结构三个方向的应力分布特征，包括加强筋上、沿筋、与筋垂直三个方向上节点及应力集中的数值分布。

3.6

控制参量 Control parameter

控制参量是指具有典型结构特征且应力集中位置的应力分布参量。作为缩比试样进行尺寸缩减的控制基准，控制参量有助于保证缩比试样设计的有效性，并减少尺寸缩减对等效疲劳损伤性能的影响。

3.7

等效疲劳载荷 Equivalent fatigue load

薄壁整体加筋结构在服役过程中需承受动态压差载荷和极限冲击载荷等复杂且随机的载荷谱。为开展等效疲劳试验，需要筛选忽略次要因素，以核心疲劳载荷作为等效疲劳载荷进行载荷设计。

3.8

有限元建模 Finite element modeling

构建有限元模型的过程,包括几何模型构建及处理、材料属性定义、网格划分、边界条件施加等步骤，引用 GB/T 33582-2017。

4 设计准则

4.1 材料一致性准则

缩比结构试样与薄壁整体加筋结构的材料遵循一致性原则，具体包括：

材料来源一致：缩比结构试样的材料的化学成分、微观结构和力学性能与薄壁整体加筋结构的

保持一致。

成型工艺一致：缩比结构试样的材料成型工艺应与薄壁整体加筋结构的成型工艺一致，包括热处理工艺、加工工艺和表面处理工艺等，以保证材料的加工硬化程度和残余应力状态相同。

取样方向一致：缩比结构试样的取样方向应与薄壁整体加筋结构的取样方向保持一致，确保材料的各向异性特性在试验中得到准确反映。

环境条件一致：缩比结构试样与薄壁整体加筋结构在制造和存储过程中应处于相同的环境条件（如温度、湿度等），以避免因环境差异导致材料性能的变化。

材料状态一致：缩比结构试样与薄壁整体加筋结构在试验前应处于相同的状态，包括材料的初始缺陷、表面质量等，以确保试验结果的可比性。

4.2 典型结构特征一致性准则

缩比结构试样需保留薄壁整体加筋结构的典型结构特征，包括薄壁厚度、加筋形式（正交网格、斜交网格、单加筋、三角网格等）、加强筋形状（L型、T型、复杂特殊形状及其相应的尺寸）、筋-筋与筋-板的交汇圆角等。这些结构复杂性可能导致局部应力集中和疲劳裂纹萌生，缩比试样需准确体现结构的几何细节和连接方式以保证结构局部应力分布的准确性，确保其在试验中表现出与实际工况相同的力学响应。

4.3 疲劳损伤等效准则

为确保薄壁整体加筋结构疲劳损伤与缩比结构试样的疲劳损伤试验结果具有一致性和可比性，二者必须遵循等效疲劳损伤准则，具体要求如下：

（1）应力集中位置一致：

缩比结构试样应精确再现实际薄壁整体加筋结构中的应力集中位置，包括加强筋与薄壁的交汇位置、加强筋与加强筋的交汇位置以及其他几何突变部位。

通过几何相似性和缩比尺寸控制，确保缩比结构试样中的应力集中区域与薄壁整体加筋结构中的对应应力集中位置一致。

（2）应力值一致：

缩比结构试样在关键部位的应力值应与实际薄壁整体加筋结构在相同工况下的应力值保持一致。这需要通过精确的材料性能匹配、几何尺寸设计、缩比结构试样单元节点控制和加载条件控制来实现。

（3）三维应力分布一致：

薄壁整体加筋结构萌生的裂纹在筋上、沿筋和与筋垂直的三个相互垂直方向的应力分布均对裂纹的扩展路径起到决定性作用，且裂纹在三个方向可同时扩展，因此薄壁整体加筋结构疲劳损伤行为不仅与最大应力有关，同时与三个维度的应力分布有关，基于此建立“三维应力分布一致”的疲劳损伤等效准则：

$$N_t = f \begin{pmatrix} \sigma_{x,y,z} & \sigma_{x-1,y,z} & \dots \\ \sigma_{x,y-1,z} & \sigma_{x,y,z-1} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \quad (1)$$

x、y、z 分别对应加强筋上、沿筋与筋垂直的三个相互垂直的方向。 $\sigma_{x,y,z}$ 为集中应力， $\sigma_{x-1,y,z}$ 、 $\sigma_{x,y-1,z}$ 、 $\sigma_{x,y,z-1}$ 分别对应加强筋上、沿筋与筋垂直方向上与应力集中位置相邻节点的应力值，依次类推。具体而言，“三维应力分布一致”的疲劳损伤等效准则，需要保证缩比试样及薄壁整体加筋结构的应力集中位置一致、应力数值一致、以应力集中位置为中心的三维临界距离内应力分布一致。

4.4 控制参量的三维应力分布一致准则

在缩比结构试样设计过程中，薄壁整体加筋结构尺寸将显著缩小，需要选取一个具有典型结构特征且应力集中的位置，作为试样尺寸缩减的控制参量，来开展缩比结构试样的设计，减少尺寸缩减对等效疲劳损伤性能的影响。若控制参量的三维应力分布与薄壁整体加筋结构的应力分布一致，则视为缩比模拟试样设计成功。可通过识别第二大应力集中的位置，作为校准控制参量。通过保证缩比结构试样和薄壁整体加筋结构在该位置的应力分布，设计出缩比结构试样的最优解。

5 设计流程

通过有限元软件构建薄壁整体加筋结构有限元模型，保留典型结构特征，通过 ODE 和 ISIGHT 等优化结构参数模型进行分析和筛选。设计步骤如下：

步骤 1：开展薄壁整体加筋结构（回转体薄壁整体加筋结构）应力分析，根据局部应力应变法锁定应力集中位置为损伤危险位置。基于回转体薄壁整体加筋结构的对称性特征，提取包含正交加筋、单加筋、蒙皮及圆角等的典型结构及应力集中位置的特征结构最小单元。获得危险位置节点的应力集中和临界距离内三维应力分布信息。

步骤 2：通过子模型技术提取特征结构最小单元的三维应力分布规律。子模型中面与特征结构最小单元保持一致，通过边界条件的设置将载荷从整体模型传递到子模型中，解决从“壳-实体”应力信息的转化。应力分布考核路径与步骤 1 一致，子模型与特征结构最小单元在应力分布考核路径上的结构尺寸一致，以尺寸为衡量标准，对比整体模型与子模型应力分布信息。

步骤 3，对应力集中的典型结构位置进行筛选，将第二大应力集中节点位置作为校准控制参量，提取该位置三维应力信息。

步骤 4，以子模型为基本构型，提取初始几何模型。通过试验设计（DOE），以子模型节点应力信息为输入参考值，对初始几何模型结构参数进行灵敏度分析，确定几何参数对损伤参量影响敏感性，结合 ISIGHT 模块，通过保证节点应力的方法，调整初始几何模型结构尺寸，使其三维应力分布规律与子模型保持一致性。基于试验条件限制，获得几何参数最优的最小结构单元。

步骤 5，将得到的最小结构单元作为缩比结构试样疲劳试验的工作端部分（平行段），根据标准疲劳试样设计方法，整合夹持段宽度和平行段长度尺寸，及过度圆弧尺寸，设计出等效疲劳损伤的薄壁整体加筋结构缩比试样。提取应力集中位置的三维应力分布（考核路径及网格划分方法与步骤 2 保持一致），检验所设计的等效疲劳缩比试样与子模型的应力集中位置及控制参量应力分布规律的一致性。

6 试验方法

缩比试样设计的有效性通过疲劳试验进行验证，疲劳试验机应能平稳启动，且加力系统应具有良好的同轴度，使试样受力对称分布。按照 ISO23788 进行定期校验，加载同轴度应不大于 5%。试验过程中的加载力范围要求保持在预期力范围的±2%以内。

(1) 缩比结构试样加工与处理

加工要求：缩比结构试样的考核位置必须与薄壁整体加筋结构相应位置的材料方向对应一致，以确保材料的各向异性特性在试验中得到准确反映。缩比结构试样采用整体铣削加工工艺，以保证试样的尺寸精度和形状一致性。加工完成后，对缩比结构试样表面进行抛光处理，去除加工痕迹，降低表面粗糙度对疲劳性能的影响。

合格标准：缩比结构试样与薄壁整体加筋结构成型工艺（轧制、辊压、旋压等）方向一致，偏差不得超过±1°。表面粗糙度应达到设计要求。

(2) 重复实验验证

实验设计：在同一载荷条件下，进行重复实验，验证实验量不低于 5 个缩比结构件，以减少试验误差，提高结果的可靠性。每个缩比结构样件的加工工艺、尺寸和表面处理应保持一致。

实验过程：对每个缩比结构样件施加相同的等效疲劳载荷，记录裂纹萌生位置、扩展周次及对应裂纹长度，相同裂纹间隔长度拍摄形貌。在测试报告中详细记录载荷大小、裂纹萌生位置、裂纹扩展方向和长度、裂纹数量等信息。

合格标准：5 个缩比结构样件的裂纹萌生位置应集中在应力集中区域，且与设计预期的应力集中位置一致。裂纹扩展形貌应具有相似性，表明缩比结构试样设计能够稳定地反映裂纹受结构影响的扩展特征。裂纹数量应符合设计预期，例如在特定载荷下，裂纹数量应在一定范围内波动，且无异常裂纹出现。

7 检验方法

(1) 应力集中位置一致性检验

方法：使用有限元分析软件对薄壁整体加筋结构进行建模和应力分析，确定应力集中位置。对缩比结构试样进行有限元分析，对比其应力集中位置与薄壁整体加筋结构的应力集中位置是否一致。

合格标准：缩比结构试样的应力集中位置必须与薄壁整体加筋结构中的应力集中的位置一致，如果存在偏差，则视为不符合要求。

(2) 等效疲劳损伤缩比结构试样三维应力分布检验

方法：有限元分析薄壁整体加筋结构三维应力分布，提取三维应力分布数据。相同方法获得相同节点数量的三维应力分布数据。将两者的数据进行对比分析，计算相对误差。相对误差可通过以下公式计算：

$$\text{相对误差} = \frac{|\text{缩比试样应力值} - \text{薄壁整体加筋结构应力值}|}{\text{薄壁整体加筋结构应力}} \times 100\% \quad (2)$$

合格标准：等效疲劳损伤缩比结构试样的三维应力分布与薄壁整体加筋结构一致，相对误差控制在 15%以内。如果相对误差超过 15%，则视为不符合要求。

8 设计报告

若相关方无其他约定，检测报告应包含以下内容：

- (1) 本标准编号；
- (2) 复杂结构尺寸及受载情况；
- (3) 保留的典型结构特征筛选；
- (4) 等效的典型载荷；
- (5) 薄壁整体加筋结构的三维应力分布；
- (6) 与试样有关的详细资料，包括最小结构单元等过程中的应力分布信息等；
- (7) 设计结果，如任一节点的相对误差超过 15%则需要重新调整试样参数；
- (8) 验证试验的开展相关内容，包括试验设备、试验条件、载荷信息，如果试验温度不在 10℃-35℃之间，应注明试验温度；
- (9) 是否满足验收要求（按照第 7 章的规定，可记录不达标、达到一般性验收要求或高标准验收要求）。
- (10) 不在本部分规定之内的操作或可选操作；
- (11) 可能影响试验结果的各种细节；
- (12) 试验日期；
- (13) 操作者的身份（例如：代码，身份证件，姓名）和签名。

参考文献

- [1] GB/T 26076-2010 金属薄板（带）轴向力控制疲劳试验方法
- [2] GB/T 3075-2021 金属材料疲劳试验轴向力控制方法疲劳试验方法
- [3] GB/T 33582-2017 机械产品结构有限元力学分析通用规则
- [4] GB/T 40541-2021 航天金属压力容器结构设计要求

ICS 号：77.040.10

中国标准文献分类号：H 22

关键词：薄壁整体加筋结构、等效疲劳损伤缩比试样设计、技术要求
