

T/CWDPA

团 体 标 准

T/CWDPA 000—2026

航天器结构用金属橡胶减振器技术规范

Technical specification for metal rubber shock absorbers for spacecraft structures

2026 - 00 - 00 发布

2026 - 00 - 00 实施

中国西部开发促进会 发 布

目 次

前言 II

1 范围 3

2 规范性引用文件 3

3 术语和定义 3

4 分类 4

5 技术要求 4

 5.1 材料 4

 5.2 结构 4

 5.3 性能指标 4

 5.4 性能可调性 5

 5.5 环境适应性 5

 5.6 安全性与可靠性 5

6 试验方法 5

 6.1 刚度与阻尼测试 5

 6.2 疲劳寿命试验 5

 6.3 冲击试验 5

 6.4 真空出气试验 6

 6.5 热循环试验 6

 6.6 显微结构检查 6

 6.7 性能可调性验证试验 6

7 检验规则 6

 7.1 检验分类 6

 7.2 出厂检验 6

 7.3 型式检验 6

 7.4 判定规则 6

8 标志、包装、运输和贮存 6

 8.1 标志 6

 8.2 包装 7

 8.3 运输 7

 8.4 贮存 7

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。

本文件由福州大学提出。

本文件由中国西部开发促进会归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件首次发布。

航天器结构用金属橡胶减振器技术规范

1 范围

本文件规定了航天器结构用金属橡胶减振器的术语和定义、分类、技术要求、试验方法、检验规则，以及标志、包装、运输和贮存。

本文件适用于火箭分离、有效载荷安装、发动机悬置、精密仪器隔离振动、缓冲冲击的金属橡胶减振器的设计及使用规范。

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，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（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1220 不锈钢棒

GB/T 2423.10 环境试验 第2部分：试验方法试验 Fc：振动（正弦）

GB/T 2423.56 环境试验 第2部分：试验方法试验 Fh：宽带随机振动和导则

GB/T 2828.1 计数抽样检验程序 第1部分：按接收质量限（AQL）检索的逐批检验抽样计划

GB/T 3075 金属材料疲劳试验轴向力控制方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

金属橡胶减振器 metal-rubber vibration isolator

以金属丝为基本单元，通过缠绕、编织、铺设等工艺与模压成型、热处理定型形成三维网状弹性结构，利用金属丝间摩擦、滑移与弹性变形耗散振动能量的无高分子橡胶、无粘接剂减振装置。金属丝材可根据工况选用不锈钢丝、镍钛合金丝、高阻尼合金丝等不同材料。

3.2

初始刚度 initial stiffness

减振器在单位变形下所产生的恢复力，单位为N/mm或kN/mm。

3.3

非线性刚度特性 stiffness nonlinearity

金属橡胶结构在大变形下表现出的刚度随载荷变化的特性，应分别以静刚度（静态加载下测得）与动刚度（动态激励下测得）予以明确表征。

3.4

滞回阻尼 damping hysteresis

金属橡胶结构在随载荷变化的能量耗散的特性。

3.5

预压量 pre-compression

为保证减振器在工作状态下保持稳定接触与性能一致，安装时施加的初始压缩量。

3.6

真空出气率 outgassing rate in vacuum

在模拟空间真空环境下，材料释放挥发性物质的速率，以总质量损失（TML）和可凝挥发物（CVCN）表征。

3.7

抗辐射性能 radiation resistance

在空间电离辐射环境下保持结构完整性与力学性能的能力。

3.8

配合过盈量 interference fit

金属橡胶外径与壳体内径（或金属橡胶内径与输出轴外径）之间的尺寸差值，用于表征装配后的预压紧程度。

3.9

名义等值尺寸基准 nominal equivalent size reference

金属橡胶外径与壳体内径（或金属橡胶内径与输出轴外径）在无过盈配合状态下的理论等值尺寸，作为性能调节的起始基准点。

3.10

性能解耦调节 performance decoupling adjustment

通过独立改变同一金属橡胶的不同几何特征参数（如外径与内径、预压量），分别实现对减振器轴向阻尼特性与径向刚度特性进行定量调控的方法。

4 分类

4.1 依据结构形式可分为圆柱型、空心圆柱型、长条型、异形定制型。

4.2 依据应用部位可分为星箭分离用、有效载荷安装用、发动机悬置用、精密仪器隔振用。

5 技术要求

5.1 材料

材料应符合下列要求：

- a) 金属丝材料宜采用 304 L、316 L 不锈钢或 Inconel 718 等耐蚀、耐高温合金，也可采用经论证满足使用要求的其他丝材（如镍钛合金丝、高阻尼合金丝），符合 GB/T 1220 要求；
- b) 金属丝直径宜为 0.05 mm~0.30 mm，缠绕密度应保证结构均匀性；
- c) 不得使用有机粘接剂、涂层或填充材料；
- d) 真空出气率应满足：TML≤1.0%，CVCm≤0.10%（按 ASTM E595 测试，适用于空间应用）。

5.2 结构

结构应符合下列要求：

- a) 金属橡胶应均匀交织，无局部疏松、断裂或扭曲；
- b) 成型后应进行去应力热处理，宜采取措施降低残余应力；
- c) 产品应具有明确的安装方向；预压标识宜在产品上标明，产品本身不便标识的，应在包装或产品技术文件中注明；
- d) 金属橡胶元件应整体进行钝化或喷砂处理，防止微动磨损；不宜对局部接触区域单独处理。

5.3 性能指标

性能指标应满足表1要求：

表1 性能指标

项目	技术要求
初始刚度	±20%设计值（预载 10%额定载荷下）
刚度非线性度	在 0.5~1.5 倍额定载荷范围内，刚度变化≤30%
等效阻尼比	0.03~0.10（5 Hz~50 Hz 正弦激励）

疲劳寿命	$\geq 1 \times 10^7$ 次循环（模拟发射振动谱，RMS 加速度 5 g）
抗冲击能力	可承受半正弦冲击脉冲：峰值加速度 30 g，持续时间 11 ms，冲击 3 次；冲击后结构无损伤，初始刚度变化率不超过 $\pm 15\%$ ，且无共振频率漂移
工作温度范围	$-180^{\circ}\text{C} \sim +200^{\circ}\text{C}$
真空稳定性	在 1×10^{-3} Pa 真空环境下保持 72 h，无结构变形、出气超标
抗辐射能力	在总剂量 10^5 rad(Si) 伽马射线照射后，刚度变化 $\leq 15\%$
安装预压量	自由高度的 10%~15%，确保工作稳定性

5.4 性能可调性

金属橡胶减振器应具备通过更换金属橡胶实现性能档位调节的能力，具体应符合下列要求：

- a) 金属橡胶的预压量，应作为轴向阻尼的主要调节变量；金属橡胶外径与内径的配合过盈量，应作为径向刚度的主要调节变量；
- b) 性能调节应以名义等值尺寸基准为设计零点，以 0.3 mm~0.5 mm 为量化步进，按预设尺寸系列进行系统性调整；
- c) 通过更换不同尺寸代码的金属橡胶，应能实现轴向阻尼与径向刚度的独立调控，即性能解耦调节，无需改动壳体及其他结构件；
- d) 产品技术文件中应提供性能调节对照表，明确各尺寸代码对应的配合过盈量、轴向阻尼比与径向刚度值。

5.5 环境适应性

环境应符合下列要求：

- a) 振动试验：通过宽带随机振动试验（GB/T 2423.56），模拟发射段环境；
- b) 冲击试验：满足 GB/T 2423.10 正弦振动与半正弦冲击要求；
- c) 热循环试验：在 $-180^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$ 循环 5 次，试验后初始刚度变化率不应超过 $\pm 15\%$ ，且外观无开裂、松散；
- d) 微重力适应性：按模拟微重力地面试验（如吊挂式或气浮式微重力模拟）施加振动激励，试验后经检查确认无结构松动，且振动响应中无自激振动特征。

5.6 安全性与可靠性

安全性与可靠性应符合下列要求：

- a) 在额定载荷下，最大变形不超过自由高度的 25%；
- b) 不应出现金属丝断裂、结构塌陷或功能失效；
- c) 设计寿命应不低于 15 年或完成 3 次以上发射任务。

6 试验方法

6.1 刚度与阻尼测试

可采用下列方法之一：a) 动刚度测试：在电液伺服振动台上施加正弦定频激励，记录力-位移响应，计算初始刚度与滞回阻尼比；b) 静刚度测试：在静态万能拉压试验机上施加准静态循环加载，记录滞回曲线，由滞回曲线计算静刚度与阻尼耗能特性。

6.2 疲劳寿命试验

按模拟发射振动谱进行随机振动疲劳试验，累计损伤因子 ≥ 1 时判定为寿命终点。

6.3 冲击试验

采用冲击台施加半正弦脉冲，采样频率 $\geq 10\text{ kHz}$ ，记录加速度响应。

6.4 真空出气试验

在真空烘箱中（ $125^{\circ}\text{C} \times 24\text{ h}$ ，压力 $\leq 1 \times 10^{-3}\text{ Pa}$ ），测量 TML 与 CVCM。

6.5 热循环试验

在温度试验箱中进行 $-55^{\circ}\text{C} \sim +200^{\circ}\text{C}$ 热循环试验，初始先低温后高温，降温速率： $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，升温速率： $15^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，到达温度点后，每个温度点各保温 1 h 为一个循环，共进行 5 个循环。

6.6 显微结构检查

采用显微镜或工业CT检查金属丝网结构均匀性与缺陷。均匀性判定：金属丝分布应均匀，任意剖面区域内金属丝所占面积比与设计值的偏差不应超过 $\pm 10\%$ ；不得出现断丝聚集、孔洞、局部疏松等缺陷。

6.7 性能可调性验证试验

通过更换不同尺寸的金属橡胶（以几何尺寸为变量，步进 $0.3\text{ mm} \sim 0.5\text{ mm}$ ），分别测试以下内容：

- 非承载方向刚度调控效果：在相同承载方向预压量条件下，改变金属橡胶非承载方向的配合过盈量，测试非承载方向的变化规律；
- 承载方向刚度调控效果：在非承载方向的配合过盈量条件下，改变金属橡胶预压量，测试承载方向刚度的变化规律；
- 性能解耦有效性验证：分别测试非承载方向的配合过盈量对非承载阻尼的交叉影响（应小于 10%）和承载方向预压量对承载方向的交叉影响（应小于 10%），以验证独立调控的有效性。

7 检验规则

7.1 检验分类

分为出厂检验和型式检验。

7.2 出厂检验

每批产品应进行外观、尺寸、初始刚度测试、安装预压量抽检，抽样方案按GB/T 2828.1正常检验一次抽样方案。

7.3 型式检验

在下列情况之一时进行：

- 新产品定型；
- 材料或工艺重大变更；
- 正常生产每两年一次；
- 出厂检验结果与上次型式检验有较大差异。

型式检验项目为第5章全部技术要求。

7.4 判定规则

所有检验项目均符合要求，判为合格；任一项不合格，判为不合格。

8 标志、包装、运输和贮存

8.1 标志

每个减振器或包装上应标明：

- 产品型号；
- 额定载荷；
- 生产日期；
- 制造商名称或商标；

8.2 包装

包装要求应符合以下要求：

- a) 减振器应采用防潮、防尘包装；
- b) 包装箱内应附有合格证、装箱单；
- c) 包装应牢固，能承受运输震动。

8.3 运输

运输过程中应避免雨淋、暴晒、剧烈碰撞。

8.4 贮存

产品应贮存在通风良好、干燥、环境温度 $-10^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度不大于70%的贮存室中。包装箱应垫高，离地面至少20 cm，堆放高度不超过1.5 m。贮存期不宜超过2年，超过者应重新检验。
