

逆向工程弹性体的力学性能

章羽 编译

(全国橡塑机械信息中心, 北京 100143)

德马蒂亚疲劳试验方法是用于确定材料疲劳性能的关键技术之一, 特别适用于橡胶材料。DMYO-V (动态机械耶尔泽利振荡仪-V) 是一种台式设备 (图1), 专门用于在动态条件下测定橡胶和弹性体的力学性能, 且始终在系统自然频率下进行测试。动态压缩或剪切试验通常在5秒内完成, 测试结果可即时获取。此外, 该设备还支持静态滞后试验和蠕变试验, 符合ASTMD945-22标准。

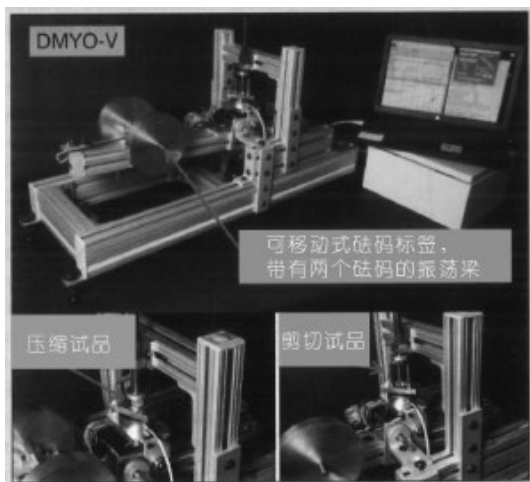


图1 DMYO-V的整体视图, 包括两个特写视图

对现有部件进行逆向工程将从化学分析开始, 以确定可能的配方以及潜在的硫化条件。同样重要的是该组件的力学性能。本文作者将重点探讨力学性能的确定方法。

1 一种可能的情景

假设有人被要求复制一个橡胶部件的特性, 该如何着手?

(1) 首先进行化学分析, 试图确定其配方成分。

(2) 对硫化条件进行有根据的推测。

(3) 如果提供了所需机械性能的规格, 可以制作测试试样并进行静态和动态测试以获得其机械特性。

(4) 如果没有所需的规格, 就必须通过某种方式进行估算; 或者尝试从提供的部件中提取测试样本。DMYO-V可用于测试非圆形试样以及不规则形状的试样, 只要测试结果被用作比较数据即可。DMYO-V还提供视觉比较工具。图形通常更具信息量, 因为它们包含一系列响应特征而非仅几个数值, 如图2所示。

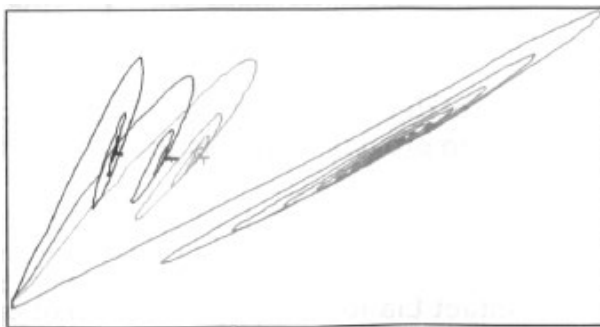


图2 四种材料的应力-应变曲线; 红色材料的硬度为40A, 观察到其行为几乎像弹簧; 其变形量超过绿色材料的两倍, 而绿色材料的硬度为50A; 蓝色材料的硬度为60A; 黑色材料的硬度为70A; 在四种不同材料中, 蓝色材料吸收的能量最多, 释放的能量最少

图3展示了在第一个循环中吸收和释放的能量的确定。吸收的能量是橡胶被压缩时负载位移曲线下的面积。同样, 释放的能量是回弹曲线下的面积。差异越大, 吸收的振动能量越多, 运动越平滑。

2 材料对比测试

在类似条件下进行了动态压缩测试。所有试样均施加了相同的载荷。如图2所示, 这导致较软的材料

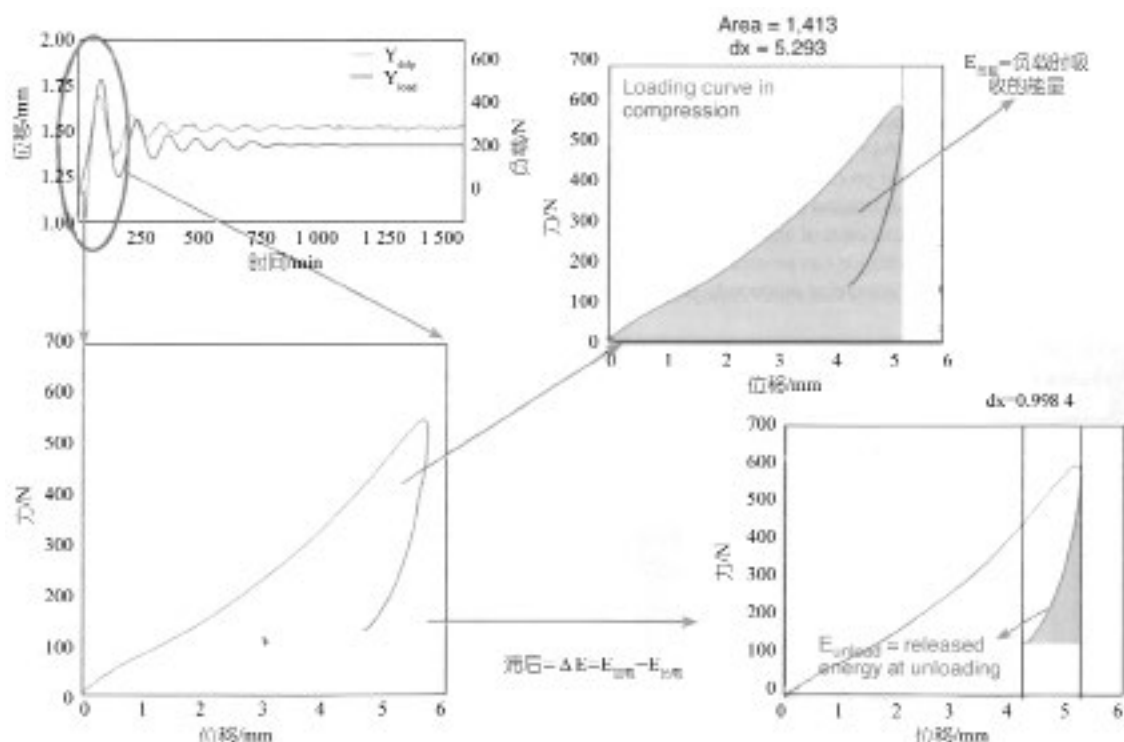


图3 载荷作用与卸载过程中吸收与释放能量的测定及滞回现象

发生更大的变形。如预期所示，在四个试样中，最硬的材料变形最小。这并不意味着最硬的材料是最佳选择。如果不断选择更硬的材料，最终可能会得到类似于钢的材料。众所周知，钢并非适用于振动隔离的良好材料。因此，存在一种“最佳”材料，其具有最高的滞后、最高的阻尼比等特性，在本例中即为蓝色材料（第三种材料）。表1列出了DMYO-V在每次动态压缩或动态剪切试验结束时计算的一些更相关的参数。

另一种常见的比较测试方法是试图在不同材料试样中保持应变（位移）恒定。

表1 DMYO-V计算的选定参数

硬度计硬度	硬度计40A	硬度计50A	硬度计60A	Durometer70A
颜色分布图	红色	绿色	蓝色	黑色
耶尔泽利回弹率(%)	75.10	49.40	34.40	38.50
滞后率(%)	24.90	50.60	65.60	61.05
点模量(MPa)	2.80	5.20	6.20	9.40
动态模量(MPa)	3.50	7.40	11.10	18.30
自然频率(Hz)	4.10	6.00	7.30	9.30
损耗角δ(度)	6.70	15.20	20.00	18.00
阻尼比	0.059	0.135	0.179	0.160

2.1 重新设计的振动隔离系统的应用

利用先进工具如动态机械耶尔泽利振荡仪

(DMYO-V)对振动隔离组件进行重新设计，其应用范围广泛，涵盖多个行业：

(1) 航空航天：飞机和航天器对振动极为敏感，振动隔离系统的优化设计对航空电子设备、仪器及乘员安全至关重要。

(2) 汽车：车辆悬架系统和车舱振动隔离依赖于精密调校的组件，以确保乘客舒适度和敏感电子元件的耐用性。

(3) 制造与机器人技术：高精度机械和机器人技术需要有效的振动隔离，以保持操作精度并延长设备使用寿命。

(4) 医疗设备：如MRI机器、手术机器人和诊断设备等仪器必须隔离振动，以保持其精度和性能。

(5) 长期储存容器的密封垫：例如核废料储存密封垫，需要能够适应所承受的振动，并在恶劣条件下继续保持密封性能。

2.2 压缩和剪切试验

压缩和剪切试验包括以下内容：

(1) 储能模量（弹性模量）：这代表材料在受到变形时弹性储存能量的能力。DMYO-V可在压缩和剪切试验中测量该模量，帮助工程师了解弹性体在正

常运行应力下的性能表现。

(2) 损耗模量（能量耗散）：这代表在循环加载过程中以热能形式损失的能量。DMYO-V同样测量该模量，这对评估弹性体组件的阻尼效果至关重要。损耗模量较高的材料更擅长耗散振动并提供阻尼作用。

通过进行这些测试，DMYO-Vallows工程师能够量化弹性体的性能，从而开发出更有效的隔振解决方案，用于振动隔离。这些解决方案在汽车、航空航天和建筑等行业中至关重要。

2.3 工程师设计支持

工程师设计支持包括以下内容：材料选择，通过评估储能模量和损耗模量，工程师可以选择满足特定应用阻尼要求的理想弹性体材料。DMYO-V能够帮助识别可提供最佳振动隔离效果的材料。

2.4 销售团队的逆向工程

销售团队的逆向工程包括以下内容：

(1) 产品分析：销售团队可利用DMYO-V对客户可能提出的产品需求进行逆向工程分析，从而深入了解现有隔振组件的材料特性及性能指标。这些信息可用于提出替代解决方案或对产品进行定制化设计，以更好地满足客户需求。DMYO-V作为工程师和销售团队强大工具，通过准确测量压缩和剪切条件下的储能模量和损耗模量，能够开发出更优的阻尼组件，并实现产品的有效逆向工程。这最终支持更高效的设计流程，并确保客户获得精准定制的振动隔离解决方案。

(2) 基准测试与比较：销售团队可利用测试结果对市场上不同弹性体材料及产品进行对比分析。此类分析在客户对特定性能参数（如更高阻尼效率或耐用性）有明确需求时尤为实用。

2.5 阻尼解决方案的定制化

阻尼解决方案的定制化包括以下内容：

定制化组件：依据DMYO-V的测试结果，工程师与销售团队能够协作设计出精准契合客户需求的组件。例如，当客户需求在不同负载条件下具备特定阻尼特性的材料时，DMYO-V所提供的数据可用于打造定制化解决方案，具体如图4所示。

利用动态机械耶尔泽利振荡仪V型（DMYO-V）对弹性体减振元件进行逆向工程，需要通过多个结构化步骤来理解并复现弹性体的动态特性。以下是该过程的详细概述：

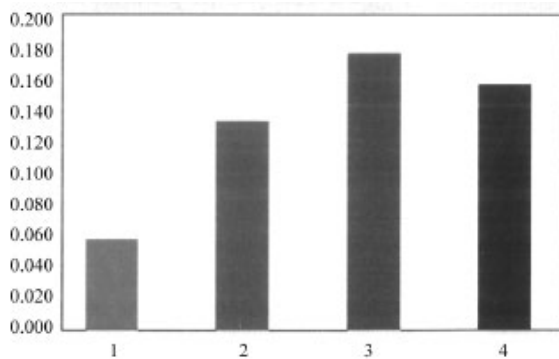


图4 四种材料的阻尼比对比

2.6 弹性体组件的理解

对弹性体组件的理解包括：

(1) 材料识别：识别所使用的弹性体类型，如天然橡胶、聚氯丁橡胶、硅橡胶或其他类型。这涉及评估化学成分和物理性能，以理解材料如何与动态载荷相互作用。

(2) 几何分析：检查弹性体元件的形状、尺寸和特征。这包括分析安装孔、整体几何形状以及它与振动隔离系统中其他组件的集成方式。

2.7 测试环境的搭建

测试环境的搭建包括：

(1) DMYO-V的准备：搭建并校准动态机械耶尔泽利振荡仪（DMYO-V）用于动态测试，确保其能够在不同频率、温度和应变范围内对弹性体进行测试。

(2) 安装隔振元件：将弹性体隔振元件牢固地安装在测试装置上。确保该组件牢固固定，以避免因松动或额外振动影响测试结果的准确性。

2.8 数据采集与分析

数据采集与分析包括以下内容：

(1) 记录动态特性：采集储能模量（E'）、损耗模量（E''）和损耗因子（ $\tan\delta$ ）等关键参数的数据。这些指标可揭示材料的弹性特性及其吸收和耗散能量的能力。

(2) 数据解读：使用专业软件分析测试数据，识别动态载荷下的模式和行为。这些数据是逆向工程和材料表征的基础。

2.9 验证与迭代

验证与迭代包括以下步骤：

(1) 原型测试：使用相同的DMYO-V设置对原型进行测试，以比较其性能与原始组件的差异。这确

保了新设计能够复制原始弹性元件的动态特性和性能。

(2) 迭代优化：根据测试结果对原型进行优化。这可能涉及调整材料配方、几何特征或其他因素，以提升性能或满足预期规格。

通过遵循这些步骤，可以有效地对弹性体减振元件进行逆向工程，从而深入了解其动态特性，并实现此类组件的设计。在弹性体逆向工程中，特别是设计能够模拟未知弹性体特性的隔振器时，储能模量 (E') 和损耗模量 (E'') 是至关重要的机械参数，它们能揭示材料在动态载荷条件下的行为特征。以下是这些模量如何发挥作用：

2.10 材料行为的表征

材料行为的表征包括以下内容：

(1) 储能模量 (E')：这代表材料在变形时储存弹性能的能力。它与材料的刚度相关，对于确定弹性体在预期恢复到原始形状的情况下（例如振动或机械应力）如何响应变形至关重要。较高的储能模量通常表明材料更硬且阻尼较小。

(2) 损耗模量 (E'')：这表明材料吸收能量（通常以热能形式）的能力。它与材料的阻尼特性相关。损耗模量有助于理解材料在变形过程中吸收的能量多少，这对振动隔离至关重要。较高的损耗模量值通常意味着更好的振动阻尼能力。

2.11 性能特性匹配

在对弹性体隔振器进行逆向工程时，不仅要匹配材料的外观，还要匹配其机械性能（即振动阻尼和能量吸收）。储能模量和损耗模量直接反映了这些性能：

(1) 储能模量可帮助逆向工程师选择具有相似刚度的基材，以确保隔振器具备相同的机械强度和变形特性。

(2) 损耗模量将引导工程师选择具有相似能量耗散特性的材料。

这对于确保新隔振器以相同方式吸收和耗散能量、提供与对照试品相当的振动隔离效果至关重要。

2.12 温度和频率依赖性

温度和频率依赖性如下所述：

(1) 储能模量和损耗模量随温度和频率变化，因此这些值可揭示弹性体的粘弹性行为。振动隔振器通常在不同频率下承受变化的载荷，因此拥有这些动

态信息，尤其是预期自然频率（图5），有助于确保设计的隔振器在预期运行条件范围内表现良好。

(2) 通过研究储能模量和损耗模量的温度与频率依赖性，逆向工程师可在广泛的运行场景中匹配目标弹性体的动态刚度（储能模量）和阻尼性能（损耗模量）。

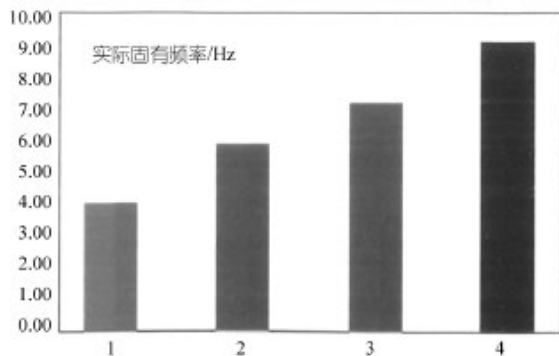


图5 四种材料的实际固有频率

2.13 材料选择与定制

一旦逆向工程师确定了弹性体的理想储能模量和损耗模量值，他们可以选择具有类似性能的材料。如有必要，他们还可以通过修改或混合材料来微调模量：

(1) 混合不同类型的弹性体或添加特定添加剂（如增塑剂或填充剂）有助于实现所需的储能模量和损耗模量。

(2) 例如，增加填料含量可能提高储能模量，但会降低损耗模量，从而改变材料的刚度和阻尼特性。

2.14 耐久性和长期性的理解

耐久性和长期性包括以下内容：

(1) 储存模量也可揭示材料在长期机械应力下的性能表现，这对振动隔振器的耐久性至关重要。储存模量较低的材料在重复应力下可能退化得更快。

(2) 损耗模量可揭示弹性体的能量耗散能力及其在持续变形过程中的长期性能表现。过软的弹性体可能具有较高的损耗模量，但磨损速度更快，而模量更均衡的材料则能提供更好的长期耐久性。

(3) 在逆向工程弹性体隔振器时，储能模量有助于选择具有相似刚度的材料，而损耗模量则有助于匹配能量耗散特性。两者结合，可设计出与未知弹性体行为完全一致的隔振器，无论是振动隔离性能还是

长期性能均如此。通过仔细分析和匹配这些模量，逆向工程师可以复制原始材料的性能特征，确保新产品具有相同的功能用途。

在弹性体隔振器的逆向工程中，了解各种材料特性和行为对于优化其性能、耐用性和可靠性的设计至关重要。以下是所提到的每个因素，Yerzley弹性、动态滞后、静态滞后、Mullins效应和弹性区域模量，对弹性体隔振器的设计和性能的影响：

2.15 耶尔泽利弹性

耶尔泽利弹性可描述如下：

(1) 定义：耶尔泽利弹性指弹性体在周期性载荷作用下变形后恢复的能力，即能量回弹能力。图6展示了示例材料中观察到的弹性差异。

(2) 设计影响：在振动隔振器中，高耶尔泽利弹性意味着材料能够吸收并返回大量能量而不会产生永久变形。这对于确保隔振器在多次加载和卸载循环中保持其有效性至关重要，这对长期耐用性至关重要。

(3) 设计应用：在逆向工程中，确定Yerzley韧性有助于评估隔振器在动态载荷条件下的性能表现，指导选择在能量耗散与恢复之间实现良好平衡的弹性体材料。

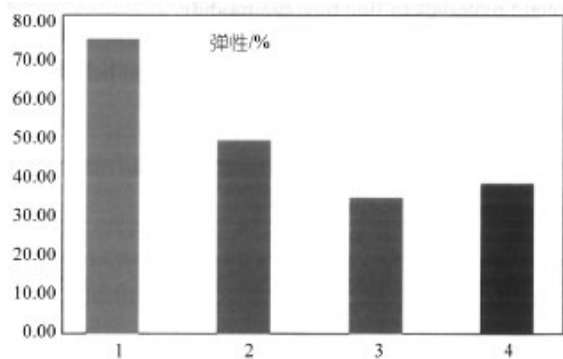


图6 四种材料的弹性变化

2.16 动态滞后

动态滞后可描述如下：

(1) 定义：动态滞后描述了弹性体在经历循环变形时所产生的能量损失，其在应力-应变图中表现为加载曲线与卸载曲线之间的面积。

(2) 设计影响：高动态滞后表明能量耗散更大，这在隔振器中常被视为减少不需要的振动的有利特性。

然而，过大的滞后会导致长期过热和磨损，从而

对性能产生负面影响。如图7所示，材料3表现出最高的滞后现象；或许它是最佳选择？

(3) 设计应用：在逆向工程中，理解动态滞后现象有助于优化材料性能以实现振动隔离，平衡能量耗散与隔振材料过热或退化的潜在风险。

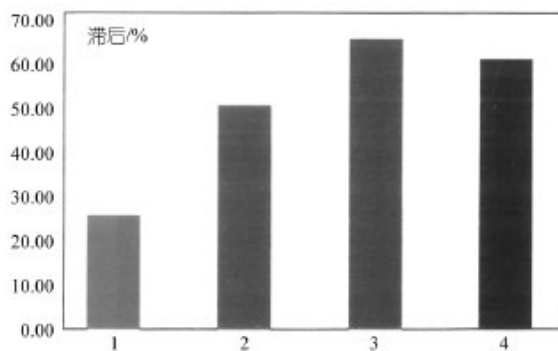


图7 四种示例材料的预期滞后特性

2.17 静态滞后

静态滞后可描述如下：

(1) 定义：静态滞后指弹性体在承受缓慢、非周期性载荷时发生的能量损失。它反映了材料在低变形速率下加载和卸载过程中的内部摩擦。

(2) 设计影响：静态滞后对隔振器抑制低频振动和冲击的能力有贡献。当隔振器承受静态或准静态载荷时，这一点尤为重要，例如在存在大范围缓慢运动的应用中。

(3) 设计应用：理解静态滞后可帮助逆向工程师预测隔振器在持续载荷和低频振动下的性能表现，从而选择具有最佳阻尼特性的材料以满足特定应用需求。

2.19 马林斯效应

马林斯效应可描述如下：

(1) 定义：马林斯效应是指材料在反复加载和卸载后变软，导致循环变形过程中应力和刚度降低的现象。

(2) 设计影响：虽然马林斯效应（图8）可以通过降低峰值应力来改善阻尼特性，但如果不加以控制，也可能导致弹性材料的永久变形或性能退化。材料可能无法完全恢复其原始刚度，导致隔振器行为随时间变化。这一特性对核废料容器中使用的O型圈至关重要，因为它们需要从突然变形中恢复，以恢复到原始形状并实现完美密封，从而防止核废料泄漏。测试此属性的唯一方法是将试品在自身自然频率下进行

测试。

(3) 设计应用：在逆向工程中，理解马林斯效应对于确保隔振器在其整个寿命周期内性能保持一致至关重要。这一知识使工程师能够选择能够抵抗过度降解并保持有效振动隔离性能的材料，即使在长期使用后也是如此。

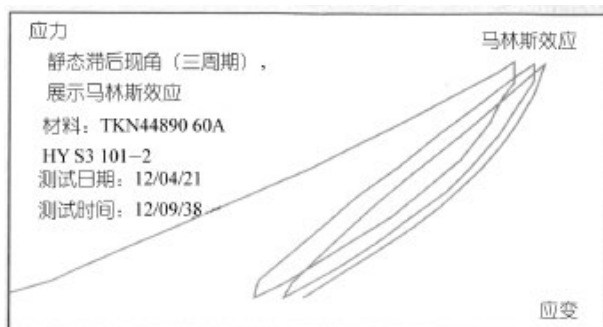


图8 DMYO-V数据图显示马林斯效应；缓慢重复的加载/卸载循环导致应变增加

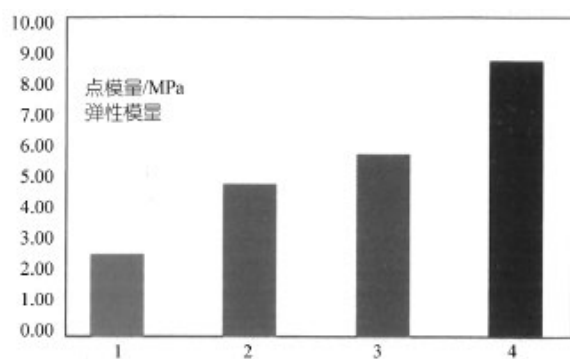


图9 弹性模量或静态条件下的模量

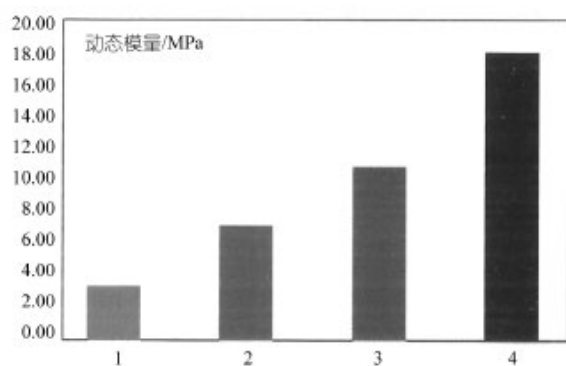


图10 动态模量或动态条件下的模量

2.20 弹性区域模量与动态模量

弹性区域模量与动态模量定义如下：

(1) 定义：弹性模量（也称为刚度）描述了弹性体在弹性区域内材料在应力作用下抵抗变形的能力，具体而言，当材料表现出弹性行为（图9）时，即

在进入塑性或永久变形之前。需注意，一般而言，动态模量（图10）高于弹性模量。对于较软的材料，动态模量可能比弹性模量高25%。对于较硬的材料，动态模量可能是弹性模量的两倍。因此，如预期所示，硬质材料对动态变形的抵抗力更强。

(2) 设计影响：弹性模量决定了隔振器在低应变下的刚度。较高的模量意味着更刚性的隔振器，这对于隔离高频振动可能有用，而较低的模量意味着更柔软的隔振器，这对于隔离低频振动更好。

(3) 设计应用：在逆向工程中，确定模量有助于确保隔振器在需要隔离的频率范围内得到适当调谐。它还有助于平衡隔振器的刚度与其吸收振动的能力，避免隔振器变得过于刚硬或过于柔软。

2.21 设计影响的总结

设计影响可概括如下：

(1) Yerzley韧性有助于预测长期性能，确保弹性体在不产生永久变形的情况下释放能量。

(2) 动态和静态滞后效应揭示了能量耗散和阻尼特性，这对动态和静态条件下的振动隔离至关重要。

(3) 马林斯效应揭示了材料在反复使用过程中的软化现象，为耐久性材料选择提供指导。

(4) 弹性区域模量有助于精确调整隔振器的刚度，以适应特定的振动频率和载荷条件。

在对弹性体隔振器进行逆向工程时，这些特性有助于工程师选择和优化材料，以在隔振效果、刚度和使用寿命之间实现最佳平衡，从而满足特定应用的需求。

3 结论

通过使用自由振荡动态耶尔泽利振动记录仪对振动隔离组件进行重新设计，可以显著提升振动敏感系统的性能和可靠性。该振动记录仪通过提供振动隔离组件动态行为的详细洞察，使工程师能够优化材料选择、组件设计以及整体系统性能。随着各行业不断突破精度与敏感度的界限，Yerzley振荡仪将在推动振动隔离技术应用于广泛领域中发挥关键作用。最终，准确测量并理解振动隔离系统复杂动态的能力，使工程师能够设计出更高效、耐用且性能优化的方案，确保关键系统在各行业中的长期稳定运行与功能性。

译者：章羽

原文：RUBBER WORLD No.1/2025, by Nuri Akgerman and Lsmail Saltuk, Tavdi