

粘弹性阻尼材料在噪声 与振动控制中的应用

倪乃琛 尹坚平

(同济大学声学研究所)

前言

粘弹阻尼材料是一种兼有某些粘性液体和弹性固体特性的材料。粘弹阻尼减振降噪技术是控制结构振动和噪声的方法之一。任何材料在它的弹性变形范围内于加载中产生变形,变形的能量储存在材料中,当卸除外力后,在弹性恢复力的作用下变形复原,若材料是完全弹性的则只贮存而不耗散能量。但实际情况并非完全如此,任何材料都不是绝对弹性的,材料分子链之间的晶格滑移,错位和变形使材料产生了永久性形变,这就是粘弹性的粘性。变形能量中一部分转化为材料内部的损耗能量,这一特性用内耗阻尼或迟滞阻尼来表示,其量值称为损耗因子 β 。金属的损耗因子 β 在 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 之间,混凝土的 β 为 10^{-2} 量级,一些所谓的“哑金属”其 β 量级为 10^{-2} 。粘弹性材料与上述材料不同,它们绝大多数是高分子材料,如沥青、橡胶和塑料等。通常性质的阻尼材料往往指此粘弹性材料。它们所具有的损耗特性对于噪声和振动控制关系十分密切。

为了控制由设备振动所产生的噪声,提高设备运行的可靠性,增加疲劳寿命,许多不同专业的技术人员把注意力愈来愈多地集中到寻找正确的方法,来降低振动和由它所激发的噪声,应用粘弹阻尼材料便成了人们研究的课题之一。在飞机、舰船和车辆中几乎也脱离不了阻尼材料:高速运行,安全可靠,但对环境的干扰则力求在严格的条件

下,被控制在最低的限度。在实际的技术发展领域中,凡存在着金属薄壁受激振动或辐射噪声的场合,都可以找出许多同阻尼有密切联系的例子。

一、噪声的辐射和减降

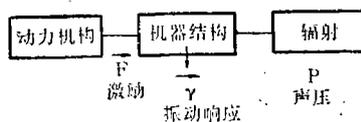


图1 噪声辐射图

噪声的辐射可用图1来阐明一个动力源的发生机构。例如由于受旋转机器的不平衡所激励,产生力场,受到激励的结构便产生振动。例如用加速度响应表示,机器周围分子受到该加速度作用后产生声压并向四周辐射,当然我们希望机器在一定距离处所辐射的噪声愈小愈好。

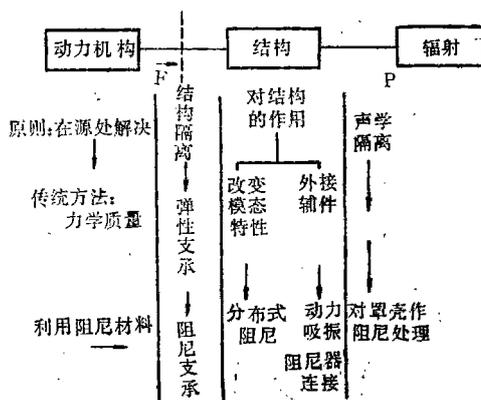


图2 降低噪声和振动的原则

为此见图2的解释

(1)原则上应在源处降低振动和噪声，它通常涉及到力学设计，但现在不属文中讨论范围

(2)在机器和底座间插入弹性支承，隔绝振动在固体中传递，这种力学“过滤”中可采用阻尼技术。

(3)对结构本身采取措施，改变结构模态特性，采用阻尼处理等。

(4)在声音的传播途径上设置屏障或罩子，用隔声的方法。

二、粘弹性阻尼材料的特性和阻尼结构

标志粘弹性阻尼材料物理性能主要有二个量：一个量是材料的弹性模量 E' ，另一个量是材料的损耗因子 β ，这二个量可以通过复弹性模量 E^* 来表示， $E^* = E'(1 + j\beta)$ 。它们随环境条件有很大变化。其中主要的影响因素是温度，频率。

1) 温度的影响

只有在材料从玻璃态过渡到橡胶态的这个过渡区域内，粘弹材料的阻尼特性才能得到反映，图3可以看出粘弹阻尼材料的温度特性。对粘弹阻尼材料能起作用的 β 值为0.7，目前国内制造的阻尼橡胶， β_{max} 为1.5~2(国外达5)， $\Delta T_{0.7}$ 为 $40^\circ \sim 50^\circ C$ 。

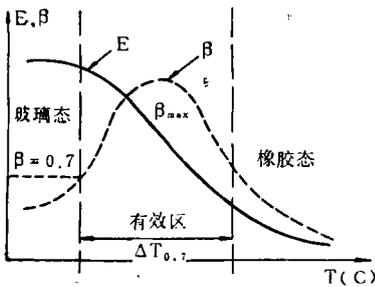


图3 材料的弹性模量和损耗因子同温度的关系

2) 频率的影响

频率对粘弹材料性能的影响也很重要。

在一定温度下 E' 随频率的增加而增加，而 β 在某一频率下有最大值，如图4所示。

若能找到既有高度的损耗因子，同时又具备高度的弹性模量的材料来做力学结构是理想的答案。但由于材料的高损耗性和高弹性模量本能就是一对矛盾，迄今还找不到这样的答案。其中一条途径是针对高阻尼合金或哑金属， β 约为0.1，但目前只能将此材料做为复面材料。

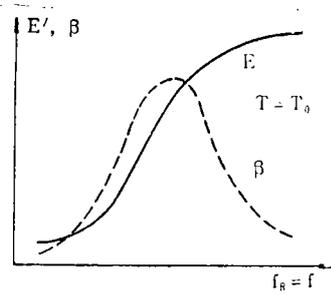


图4 用 f_r 表示 E' ， β 同温度和频率的关系

另一途径是研制适应各种应用场合的阻尼材料，各种不同形态的阻尼附加结构。主要的阻尼附加结构有两大类：

1) 自由阻尼层

在金属结构的表面上涂或敷贴一层高阻

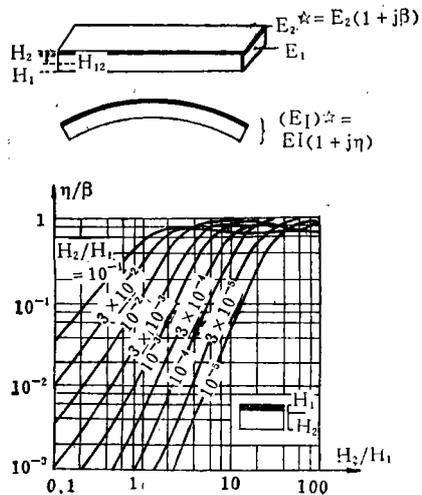


图5 自由阻尼层

尼的材料,使阻尼材料在结构承受循环性弯曲时产生拉-压变形,从而发生能量耗散。(见图5)图中还示出结构总损耗因子 η 对不同 E_2/E_1 和 H_2/H_1 的变化关系。

$$\eta = \underbrace{\beta \frac{E_2}{E_1}}_{\text{材料参数}} \cdot \underbrace{\left[\frac{H_2}{H_1} \cdot (H_2^2 + 12H_1^2) \right]}_{\text{形状参数}}$$

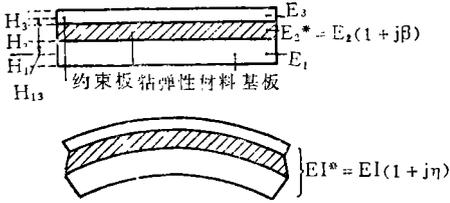


图6 粘弹性约束面层

下标1表示金属结构,下标2表示阻尼材料。

由式中可以看出加大 β , E_2/E_1 , 加厚 H_2 或加高 H_{12} 都是增加自由层阻尼结构损耗因子 η 的办法。一般 $H_2/H_1 = 1 \sim 3$ 。

2) 约束阻尼层

在原来结构上贴一层较软的粘弹性材料,叫阻尼层。其外再加一层刚度大的弹性面层,叫约束层。见图6,当结构发生弯曲振动时,约束层对粘弹材料起约束作用使之产生剪切变形。剪切变形是耗散能量的机理。约束阻尼梁的损耗因子为

$$\eta = \frac{\beta X Y}{1 + (2 + Y)X + (1 + Y)(1 + \beta^2)X^2}$$

其中 Y 为刚度参数,与 E_1, H_1, E_3, H_3 和 H_{13} 有关,计算表明 Y 愈大, η 愈大。

X 为剪切参数,与 $(E_1, H_1, E_3, H_3), (G_2, H_2)$ 和振型波长 λ 有关。

设计约束阻尼结构时,应注意以下几点:

- 1) 尽可能加大 Y , 如用厚阻尼层或加大 H_{13} 。
- 2) 根据最佳剪切参数 X 、使用温度、合理选择粘弹性材料。

图7表示用两种不同阻尼技术所获得的结果对比,约束阻尼处理一般比无约束阻尼处理较为有效。

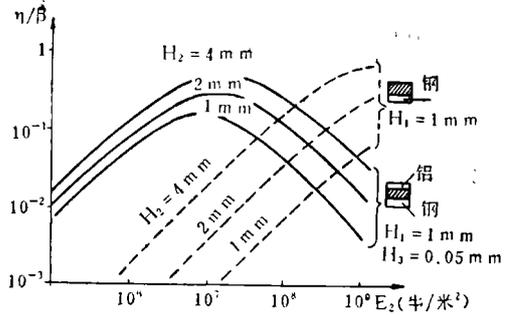


图7 两种阻尼技术的比较

三、粘弹阻尼材料的应用

效果和应用实例

粘弹阻尼材料可以在不改变原设计的情况下取得减振降噪效果,主要有下述几个方面:

1) 抑制共振峰

单自由度正弦激励下共振时的振幅可表为 $|X_0| = \frac{F_0}{K} \cdot \frac{1}{\eta}$, 增加阻尼 η 可直接

影响振动强度。

2) 提高隔振系统的高频隔振效果,降低固体声传递,主要措施为粘弹性阻尼材料代替普通橡胶。

3) 降低轻型结构表面振动及二次激发噪声。

4) 改善障板和罩子的降声性能,采用粘弹性阻尼材料的复合钢板制成的屏障或机罩,可使声级得到明显衰减。

下面是一些应用实例:

1) 自由阻尼层: 主要对象汽车车箱、电机、风机及风管、机罩等。如用在上海牌轿车上车速为30, 60, 80公里/小时分别改善4, 5, 6dB(A), 国外在薄板、管道(包扎)上应用较普遍。

2) 约束阻尼层: 国内尚处于开始阶段,例如国产的约束阻尼材料用于飞机蒙皮内壁,以改善座舱隔声,初见成效。航天,军事工业上应用也很普遍。如飞机油箱蒙皮和腹板采用阻尼处理后承受的重力应力降低40dB。

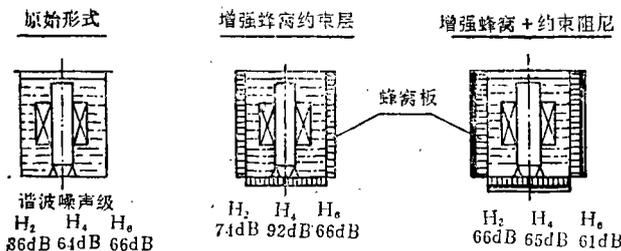


图8 100KVA变压器噪声的减降(法国专利)

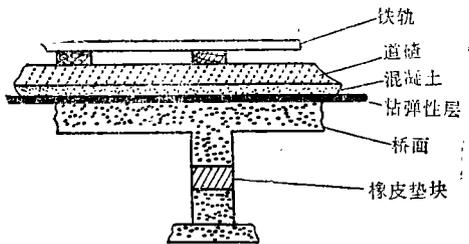


图10 伦敦某大桥的桥面阻尼处理

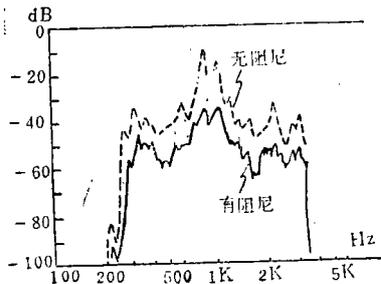


图12 柴油机缸盖罩的阻尼处理

图8, 9, 10, 11, 12分别表明用阻尼技术降噪或减振的实例。

四、阻尼技术的现状及发展

阻尼技术的开发工作虽然已有三、四十年的历史, 但到最近十年, 理论上才形成新的学科, 实践上才形成新的技术并得以迅速发展和广泛应用。我国在减振降噪应用技术方面同世界先进国家差距很大, 但是近几年来已引起许多研究单位和工业部门的广泛注意, 取得显著进步。目前已有好几个研究单位和减振器厂生产了若干品种的粘弹阻尼材

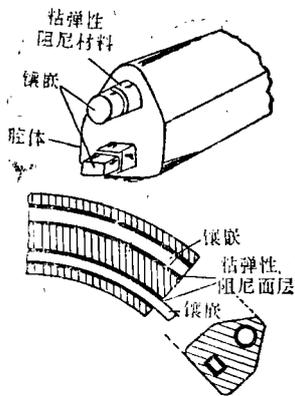


图9 电流母线被镀入阻尼材料

—●— 无阻尼
 - - - LD400(H₂ = 1.6mm)
 - - - - VP71(H₂ = 0.5mm + 1mm铝板)

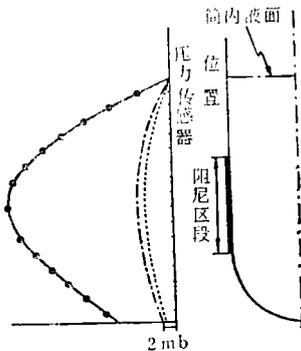


图11 “钻石BP-4”火箭燃料筒阻尼处理

料。

推动阻尼技术在近年来飞跃发展的主要原因是:

- 1) 生产发展和技术进步的实际需要是促进阻尼技术发展的动力。
- 2) 化学工业特别是材料工业的发展为阻尼技术提供了适用于各种场合的阻尼材料。
- 3) 理论研究和实际应用相辅相成互相促进。

阻尼技术由于它的复杂性, 使潜力尚未得到充分发挥, 也正因为如此, 它将具有良好的发展前景。