

ZN 系列粘弹性阻尼材料的性能及应用

赵云峰

(航天材料及工艺研究所 北京 100076)

摘 要 全面介绍了航天材料及工艺研究所开发的 ZN 系列阻尼材料的物理机械性能和阻尼性能及其特性,并通过若干应用实例的介绍,说明 ZN 系列阻尼材料的应用现状。

关键词 粘弹性, 阻尼材料, 丁基橡胶, 硅橡胶

Properties and Applications of ZN Series Viscoelastic Damping Materials

Zhao Yunfeng

(Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology Beijing 100076)

Abstract This paper will give a comprehensive introduction of the ZN Series damping materials developed by ARIMT and also a brief description of several application examples in various damping structures.

Key words Viscoelastic ,Damping materials ,Isobutylene-isoprene rubber ,Silicone rubber

1 前言

现代军事工业技术的飞速发展促进了阻尼减振技术的发展和广泛应用。20 世纪 60 年代以来,以粘弹性阻尼材料为基础的阻尼减振技术得到了长足的发展。目前粘弹性阻尼材料及其制品设计技术已广泛应用于各种火箭、导弹、卫星、军用及民用飞机、舰船和车辆上的仪器仪表、导航设备和电子系统等

的振动控制及噪声控制,已成为航空航天工程中必不可少的关键技术之一。航天材料及工艺研究所是国内最早开展粘弹性阻尼减振材料研制及其应用技术研究

的单位之一。经过 20 余年的努力,研制的粘弹性阻尼材料已经系列化,广泛应用于我国运载火箭、战略战术导弹及卫星等航天产品及其他军用和民用工业产品。本文着重介绍 20 余年来研制的 ZN 系列阻尼材料的性能及其应用情况。

2 粘弹性阻尼材料的基本特性

作为目前应用最为广泛的一种阻尼材料,粘弹性阻尼材料可以在相当大的范围内调整其成分及结

构,从而可以在特定的温度和频率下具有所需的弹性模量和损耗因子。粘弹性阻尼材料是一种兼有粘性液体和弹性固体物理特性的材料。纯粘性体在受力状态下具有损耗能量的能力,而不能储存能量,粘弹性材料的特性则介于两者之间。高分子材料是工程上应用最为广泛的粘弹性材料。高聚物处于低温度(或高频率)的玻璃态时,模量高,损耗因子小;处于高温度(或低频率)的橡胶态时,其模量比玻璃态小 3~4 个数量级,损耗也减小;介于这两者之间的是玻璃化转变区,或称粘弹态,此时模量急剧下降,损耗因子出现一个峰,粘弹性阻尼材料就工作在粘弹态这一区间内。

3 ZN 系列粘弹性阻尼材料的种类及其性能

阻尼材料的性能在很大程度上决定了粘弹性阻尼结构的减振效果。20 多年来,为了满足不同航天产品上不同环境条件的需要,航天材料及工艺研究所先后开发了丁基橡胶及硅橡胶系列阻尼材料、压敏型系列阻尼材料、橡胶塑料共混型阻尼材料等,共

收稿日期:2000-06-12

赵云峰,1964 年出生,高级工程师,主要从事高分子材料的研究工作

宇航材料工艺 2001 年 第 2 期

— 19 —

有 40 多个牌号。

3.1 以丁基橡胶和硅橡胶为基础的共混型阻尼材料的性能

丁基橡胶、硅橡胶及某些树脂组成的共混体系混溶性较好,且共混体系 T_g 温度和树脂用量之间有定量关系,所以通过配方调整可以得到一系列的粘弹性阻尼材料,其物理力学性能和阻尼性能如表 1 所示。这些阻尼材料既适用于压制各种阻尼器、阻尼垫等隔振元件,也适用于压制各种不同厚度的阻尼板,其中 ZN-1 等阻尼材料特别适用于用作约束

阻尼处理的阻尼夹芯层,当它用作阻尼夹芯层时,可用模具直接硫化成所需厚度和形状的阻尼板,也可用硫化好的符合厚度要求的阻尼板,经冲切或剪裁拼接成所需的复杂几何形状,供作阻尼夹芯层用。这些阻尼材料本身不具有自粘性,用作阻尼夹芯层时,需用胶粘剂进行粘接^[1]。

ZN 系列阻尼材料具有优良的耐老化性能。ZN-1 阻尼材料在室内自然贮存条件下,经 50 个月测试的性能见表 2。从表中可见其性能无明显变化。

表 1 ZN 系列阻尼材料的主要性能

Tab.1 Properties of ZN series damping materials

| 材料 牌号 | 拉伸强度 ()/MPa | 扯断伸长率 ()/ % | 扯断永久变 形()/ % | 硬度 (Shore A) | 温度宽度 $T_{0.7}$ / | 最大阻尼 系数 \max | \max 对应的 温度 / | \max 对应的剪切 模量 G /MPa | 阻尼系数 () G | 剪切模量 ()/MPa |
|----------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|---------------------|-------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| ZN-1 | 1.5 | 500 | 35 | 30 ±5 | - 16 ~ 50 | 1.4 ~ 1.5 | 15 | 3.2 | 1.1 | 2.0 |
| ZN-1A | 1.5 | 500 | 35 | 30 ±5 | - 15 ~ 40 | 1.2 ~ 1.6 | 0 ~ 10 | 2.5 ±1.5 | 0.7 ±0.2 | 1.5 ±1 |
| ZN-2 | 8.5 | 400 | 35 | 43 ±5 | - 14 ~ 47 | 1.0 ~ 1.1 | 15 | 9.3 | 0.9 | 5.0 |
| ZN-3 | 8.5 | 400 | 35 | 43 ±5 | - 14 ~ 47 | 1.0 ~ 1.1 | 15 | 9.3 | 0.9 | 5.0 |
| ZN-7 | 2.0 | 400 | 10 | 33 ±5 | - 30 ~ 35 | 1.2 ~ 1.5 | 0 | 6.4 | 0.6 | 2.5 |
| ZN-9 | 2.0 | 380 | 5 | 23 ±5 | - 55 ~ 20 | 1.5 | - 30 | 9.3 | 0.4 | 0.44 |
| ZN-11 | 2.0 | 348 | 4 | 35 ~ 42 | | 0.09 ~ 0.1 | - 30 ~ 70 | | 0.09 | 1.9 ~ 2.0 |
| ZN-13 | 5.0 | 650 | 30 | 45 ±5 | | 0.35 | - 40 ~ 50 | | 0.5 | 3.0 |
| ZN-14 | 2.5 | 300 | 10 | 30 ±5 | | 1.4 | - 15 ~ - 5 | 12 ±2 | 0.7 | 1 ±0.5 |
| ZN-15 | 8.0 | 400 | 20 | 42 ±5 | | 0.9 ~ 1.2 | 15 ±3 | 8.0 ~ 11.0 | 0.9 | 4.0 |
| ZN-16 | 7.8 | 400 | 30 | 40 ±5 | | 1.10 | - 10 ~ 0 | 10 ±5 | 0.50 | 5.0 |
| ZN-17 | 5.0 | 600 | 55 | 65 ±5 | | 0.6 | - 5 ~ 5 | 35 ±5 | 0.4 | 20 ±5 |
| ZN-19 | 2.8 | 150 | 10 | 55 ±5 | | | | | 0.15 | 1.0 ~ 7.0 |
| ZN-20 | 2.8 | 150 | 10 | 60 ±5 | | | | | 0.15 | 5.0 ~ 12.0 |
| ZN-21 | 4.0 | 200 | 30 | 70 ±5 | | | | | 0.08 | 8.5 |
| ZN-22 | 3.0 | 400 | 25 | 30 ±5 | | | | | 0.4 | 0.15 ~ 4.95 |
| ZN-23 | 6.0 | 300 | 35 | 45 ~ 60 | | | | | 0.35 | 5.5 ~ 20 |
| ZN-24 | 2.0 | 400 | 15 | 30 ±5 | | | | | 0.5 | 0.7 ~ 1.7 |
| ZN-26 | 4.0 | 100 | 8 | 70 ±5 | | | | | 0.13 | 2.0 ~ 5.5 |
| ZN-27 | 5.5 | 250 | 25 | 65 ±5 | | | | | 0.25 | 2.0 ~ 5.0 |
| ZN-29 | 2.8 | 150 | 14 | 50 ±5 | | | | | 0.15 | 1.0 ~ 7.0 |
| ZN-30 | 4.0 | 250 | 42 | 64 ±5 | | | | | 0.2 | 8.0 |
| ZN-33 | 7.0 | 350 | 30 | 50 ±5 | | | | | 0.3 | 5.0 ~ 6.0 |
| ZN-34 | 8.5 | 400 | 20 | 50 ±5 | | | | | 0.2 | 1.0 ~ 3.0 |

测试条件为 30、125 Hz; 测试条件为 30、62.5 Hz; 测试条件为 30、31.2 Hz; 测试条件为 30、15.6 Hz。

表2 ZN—1 阻尼材料老化性能^[1]

Tab.2 Aging properties of ZN- 1 damping material

| 测试条件 | 剪切模量 G /MPa | 阻尼系数 |
|----------|---------------|------|
| 原始数据 | 1.11 | 1.29 |
| 贮存 50 个月 | 1.18 | 1.30 |

*测试条件为 30 、125 Hz。

3.2 压敏胶型阻尼材料

压敏胶型阻尼材料不仅具有较高的阻尼性能,还具有自粘性,不需要胶粘剂就可以粘附于待处理表面,且在工作期间不脱粘。压敏胶型阻尼材料常用于自由层结构,也可用于约束层复合阻尼结构,

适用于振动和噪声控制的现场处理,操作简单。所研制的压敏胶型阻尼材料的性能列于表 3,其中 ZN—8、YZN—1 为可交联型压敏阻尼胶,由于引入了交联剂,改善了胶料自身的强度,可用于厚制品阻尼减振复合结构^[2]。YZN—4、YZN—5 和 YZN—6 为共聚型,一般可制成 0.05 mm~0.20 mm 的自粘性阻尼层,主要用于仪器安装板,印刷电路板等结构的阻尼减振^[3]。

YZN—7 和 YZN—8 是具有 IPN 结构的压敏阻尼材料,既可做成约束阻尼复合结构或阻尼板,亦可制成阻尼涂料,喷涂或刷涂在振动和噪声源的壳体上^[4]。

表3 压敏型阻尼材料的重要性能

Tab.3 Properties of pressure sensitive damping materials

| 材料 牌号 | 温度宽度 $T_{0.7}$ / [*] | 最大阻尼 系数 \max * | \max 对应的 温度 / [*] | \max 对应的剪切 模量 G /MPa [*] | 阻尼系数 * | 剪切模量 G /MPa [*] | 室温粘接剪切 强度/MPa |
|----------|----------------------------------|---------------------|---------------------------------|--|-----------|-------------------------------|------------------|
| ZN—8 | 5~85 | 1.58 | 23 | 0.87 | | | - |
| YZN—1 | 0~100 | 1.5 | 20 | 0.6 | | | 0.15 |
| YZN—2 | -20~100 | 1.5 | 15 | 0.5 | | | 0.15 |
| YZN—4 | -27~30 | 1.4 | -5 | 2.8 | | | 0.2 |
| YZN—5 | -15~50 | 1.5 | 5 | 3.5 | | | 0.4 |
| YZN—6 | -10~70 | 1.5 | 25 | 4.1 | | | 0.5 |
| YZN—7 | -18~48 | 1.8 | 7 | 1~4 | 1.0 | 0.2~0.5 | - |
| YZN—8 | -10~60 | 1.2 | 12 | 3~7 | 0.9 | 0.1~0.15 | - |

*测试条件为 30 、125 Hz。

3.3 自熄型阻尼材料

曾研制出具有防火性能的自熄型粘弹阻尼材料 ZN—10 和 SZN—11,用于舰船减振降噪(其性能见

表 4)。SZN—11 模量较高,与金属的匹配性较好,多采用厚制品结构,该材料的耐油性、耐海水性能优异。

表4 ZN—10 和 SZN—11 阻尼材料的主要性能^[5]

Tab.4 Properties of ZN—10 and SZN—11 damping materials

| 材料 牌号 | 拉伸强度 /MPa | 扯断伸长率 ()/ % | 扯断永久 变形()/ % | 硬度 (Shore A) | 温度宽度 $T_{0.7}$ / [*] | 最大阻尼 系数 \max * | \max 对应的 温度 / [*] | \max 对应的剪切 模量 G /MPa [*] | 离火自熄 时间()/ s |
|----------|--------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------------------------|---------------------|---------------------------------|--|------------------|
| ZN—10 | 6.3 | 340 | 10 | 50 ±5 | -12~45 | 1.1~1.2 | 11 | 10.0 | 3 |
| SZN—11 | 4.8 | 20 | 15 | 80 ±5 | 0~42 | 1.1 | 20 | 74 | 0.5 |

*测试条件为 30 、125 Hz。

4 ZN 系列粘弹性阻尼材料的应用

20 余年来,ZN 系列阻尼材料及其制品在我国航天产品上获得了广泛应用,取得了良好的减振效果,为我国导弹、火箭及卫星的研制作出了重要贡献。

宇航材料工艺 2001 年 第 2 期

4.1 某运载火箭仪器舱安装板阻尼结构^[1]

火箭仪器舱上安装着重要的电子仪器,对振动环境要求较高。经过对结构进行分析计算后,决定仪器安装板采用三层非对称复合阻尼结构板,阻尼板采用 ZN—1 阻尼材料。整个系统的减振效果十

分明显,20 时三向的共振放大系数由 >20 倍减至 <3.5 倍,满足了设计及使用要求。

4.2 某产品捷联惯导系统的阻尼减振^[6]

惯性测量系统是航天飞行器的眼睛,提供最基本的加速度和速率信息,是控制系统调整飞行姿态的依据。根据总体技术要求,采用了由 ZN—17 阻尼材料制造的复合型阻尼减振结构,通过了一系列的地面试验和实际飞行试验的考核,取得了满意的效果。

4.3 飞行器火工品装置冲击隔离结构^[7]

飞行器采用火工品装置进行级间分离。当火工品引爆时会对结构施加瞬时超高过载的冲击,极有可能造成附近的仪器设备失效。可根据模拟结构分离试验结果,当减重壁板分离时产生的过载最大。其蒙皮上距冲击源 80 mm~90 mm 处的最大过载为 30 000 g,持续时间约 3 ms,冲击谱峰值响应频率在 10 kHz 以上,而仪器设备所能承受的冲击过载不超过 160 g。

通过大量的设计计算及实验工作,确定采用了由 ZN—18 阻尼材料制备的 T 型缓冲垫及限位装置组成的 T 型缓冲器和由 ZN—1 阻尼板及铝合金约束层组成的仪器架和支架。通过大量的试验表明,该结构型式隔冲击性能好,衰减倍数大,安装和更换方便,隔热性能好。仪器架的衰减倍数大于 400 倍,脱拔插头支架的衰减倍数大于 290 倍;在最大过载约 30 000 g,最大响应频率约 22.4 kHz 的冲击环境下,仪器盒的最大过载小于 90 g,最大响应频率 1.1 kHz。

4.4 某产品电子仪通用安装板复合阻尼结构^[3]

为减轻飞行器电子设备的结构质量,缩小设备体积,同时又确保防振、防冲击能力,必须对其进行阻尼减振处理,但不宜采用减振器,而只能采用夹层阻尼结构。通过试验采用 ZN—8 阻尼胶作夹层,用 YZN—4、YZN—5 压敏阻尼胶作为阻尼粘合层,用铝合金板作为约束板,制成多层阻尼板,使整机在振动和冲击条件下,三个方向的放大系数均小于 3,仪器工作正常。

4.5 卫星姿控元件安装板阻尼复合结构^[8]

某卫星姿控元件共振放大倍数高达 30 倍,造成元件损坏,仪器失灵。为此要求采用阻尼技术,使共振放大倍数降至 10 倍。经过一系列试验,确定采用

了二弹性层的约束阻尼处理方式,阻尼层为 YZN—5 压敏阻尼胶,经阻尼处理后姿控系数放大倍数降为 8.9,不及原来的三分之一。同时经试验证明,ZN—3 和 YZN—5 两种阻尼材料具有较强的耐辐射能力,分别在 1×10^4 Gy 和 5×10^4 Gy 剂量的电子辐射后,两种材料的阻尼性能几乎无变化,而力学性能还有所提高,说明这两种材料均可做为空间材料使用。

4.6 支柱形高阻尼减振器^[8]

某火箭平台系统要求研制一种有三种规格三向共振放大倍数不大于 3.5 倍的高阻尼减振器,简称高阻尼器。支柱型高阻尼器采用 ZN—2 阻尼材料为基体,两端埋入带螺纹的金属嵌件为骨架。振动试验结果表明:所研制的高阻尼器的轴向共振频率在 28 Hz~44 Hz 之间,而共振放大倍数则介于 2.4~3.4 倍之间,满足设计及使用要求。

4.7 机械滤波器^[9]

以压电晶体为换能元件的加速度计广泛应用于航天领域的振动测量过程中。由于有两个问题的存在,使得该类加速度计的使用受到一定的限制。一是 10 Hz~2 kHz 的谐波会激起加速度计的共振,引起前置放大器过载,从而使加速度计产生零点漂移,造成测量误差,甚至引起晶片破损;二是在高频高加速度值振动的存在下,所要测量的低频加速度值振动由于受到高频高加速度振动的掩蔽效应,电信号相对微弱,导致传感器变换系统限幅,因此不是测不出所需的信号,就是测出的数据误差太大,所以应在振动测点与传感器之间插入一种既能有效地隔断高频振动的传递,又能减少低频共振幅值的“隔振减振器”或称机械滤波器。

市面上所能见到的机械滤波器,其截止频率都很高,均在 1 kHz 以上,不能满足要求。截止频率是机械滤波器的主要性能之一,它指的是滤波器的一阶共振频率。我所研制的机械滤波器,有一个六角螺母状的金属底座,中间充填 ZN—9 阻尼材料,两端再配金属螺纹盖片,整个滤波器的质量仅为 15 g。经试验测得,该滤波器常温下的截止频率为 300 Hz (第一峰点),幅度增量达到 4 dB,峰后的衰减约为 10 dB/倍频程,其电绝缘性能优良(100 V 时,电阻 $R > 50$ M),这些性能全部达到设计要求。

4.8 某扫雷舰士兵舱的噪声治理^[5]

噪声的治理要比振动控制复杂得多,必须采取
宇航材料工艺 2001 年 第 2 期

综合治理的方式才能获得较为理想的降噪效果。某扫雷舰的后士兵舱由于靠近停泊发动机房,其噪声可达 85 dB ~ 90 dB。长期在这种环境下工作和生活,将影响部队的战斗力,故进行噪声治理是十分必要的。经过小型探索性试验后,确定了总体的设计方案是:(1)在停泊发电机上安装 GX-400 新型减振器;(2)对停泊发电机房的地板,采用 ZN-10 型阻尼材料进行约束阻尼处理;(3)对该房的围壁采用 SZN-1 型阻尼材料进行约束阻尼处理;(4)在围壁及顶棚再覆一层防水型超细玻璃棉套进行吸声处理。经过综合治理之后,后士兵舱的噪声降到 60 dB ~ 64 dB(A),达到了国际标准水平 65 dB(A)的要求。

4.9 高压电器阻尼器^[10]

地震是具有强大破坏力的一种自然灾害,在很短时间内对工业、农业、交通、建筑和水电等都会造成极大的破坏。我国原有的高压电器系统属非抗震型产品,缺乏抗震能力。1978 年唐山地震,使京津唐地区的电力系统特别是高压电器设备遭受严重损坏,因此如何提高高压电器的抗震能力便提到日程上来。对于已经定型的高压电器产品如 FZ-110 型阀式避雷器和 ZS-220/400 型棒式绝缘子,拟采用配装合适的阻尼减振器来提高其抗震能力。对于该类避雷器,采用由 ZN-2 阻尼材料制造的阻尼器,其减振效率在 30% ~ 60% 之间,其中以对地震波的减振效果为佳。对于棒式绝缘子,采用由 ZN-1 阻尼材料制造的阻尼垫,其结果达到了设计要求。

4.10 圆锯环形阻尼片^[11]

当圆锯在运转和切割锯料时,由于锯齿和锯料的碰撞,当锯片与锯料及空气发生摩擦,使锯片发生振动,锯片周围空气发生强烈搅动,这样就产生了噪声,高达 100 dB ~ 115 dB。我们利用 YZN-5 阻尼胶制造阻尼片(厚 0.05 mm),将它贴在圆锯片上,取得了良好的降噪效果。噪声降低水平与圆锯的转速、锯片直径的大小、厚薄、齿数的多少和齿形片及所锯材料种类有关。木工圆锯 300 mm、400 mm、

500 mm 三种锯片,噪声降低到 90 dB 以下,符合有关工业标准。试验表明,圆锯环形阻尼片对木工圆锯降噪效果良好,锯木降噪量为 4 dB ~ 20 dB,空转

降噪量为 0 ~ 13 dB,粘贴牢固,使用寿命较长。

5 结束语

目前,国外的阻尼减制品已进入到自动控制的工业化生产阶段,阻尼材料品种繁多,传统的阻尼材料已实现系列化、商品化和标准化,新型的结构阻尼材料、多功能阻尼材料及自适应智能阻尼结构都已进入实用阶段,阻尼减振技术已成为设计人员需要预先考虑的一项关键技术。20 多年来,航天材料及工艺研究所在阻尼材料的开发研究、阻尼结构设计及减振阻尼性能测试分析等诸方面均取得了不少的成果,满足了航天各产品的需要。目前正在进行高性能宽温宽频新型阻尼材料及新型阻尼结构设计方法等研究,希望能与国内外从事阻尼减振理论研究及应用研究的兄弟单位加强合作,取长补短,共同促进我国阻尼减振技术的研究及应用。

参考文献

- 1 雷治大. 长征-3 仪器安装阻尼板结构和阻尼材料设计. 见: 阻尼材料和技术应用, 北京: 航天材料及工艺研究所, 1991: 64 ~ 67
- 2 刘向群. 压敏阻尼厚制品的研制. 宇航材料工艺, 1990; (3): 63 ~ 69
- 3 刘向群. 粘弹阻尼材料和夹层阻尼结构的研制. 宇航材料工艺, 1993; (6): 41 ~ 44
- 4 刘向群. 压敏阻尼胶 YZN-7 和 YZN-8. 见: 阻尼材料和技术应用, 北京: 航天材料及工艺研究所, 1991: 39 ~ 42
- 5 李正芳, 冯雨生, 李亦东. 船用阻尼材料的研制及应用. 宇航材料工艺, 1985; (6): 29 ~ 34
- 6 李红, 徐忠信. 捷联惯性测量组合阻尼减振的研究. 见: 阻尼材料和技术应用, 北京: 航天材料及工艺研究所, 1991: 68 ~ 75
- 7 潘坚, 王建杰, 张雅琴. 飞行器火工装置的冲击隔离结构方案. 见: 航天材料及工艺论文集, 北京: 航天材料及工艺研究所, 1997: 169 ~ 173
- 8 潘坚, 雷治大. 阻尼减振技术在航天领域中的实践. 宇航材料工艺, 1991; (4): 87 ~ 90
- 9 冯筱蓉, 黄立群. 机械滤波器的研制. 宇航材料工艺, 1983; (6): 65
- 10 赵茹霞, 雷治大. 高压电器阻尼器研制. 噪声与振动控制, 1985; (2): 24 ~ 28
- 11 刘向群. 圆锯噪声控制的研究. 宇航材料工艺, 1986; (6): 21 ~ 27