

# 高性能黏弹性阻尼材料及其应用

赵云峰

(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

**文 摘** 全面介绍了航天材料及工艺研究所 30 多年来研制的黏弹性阻尼材料的性能及其特性, 并着重介绍了近 10 年来在阻尼减振结构设计、黏弹性阻尼材料研制及其工程应用研究等方面的主要进展。

**关键词** 黏弹性, 阻尼材料, 橡胶, 阻尼, 隔振器

## Properties and Application of Advanced Viscoelastic Damping Materials

Zhao Yunfeng

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** This paper gives a comprehensive review of the viscoelastic damping materials developed by Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology (ARIMT) and also a brief description of several application examples in various damping structures, putting emphasis on the progress made in the damping structure design, new damping materials development and their engineering applications in recent 10 years.

**Key words** Viscoelastic, Damping materials, Rubber, Damping, Isolator

### 1 前言

目前黏弹性阻尼材料及其制品已广泛应用于火箭、导弹、卫星、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及噪声控制, 发挥着愈来愈重要的作用。航天材料及工艺研究所是国内最早开展黏弹性阻尼减振材料研制及其应用技术研究的单位之一, 研制的黏弹性阻尼材料已基本实现系列化, 广泛应用于我国运载火箭、战略战术导弹、卫星及飞船等航天产品及其他军用和民用工业产品。文献 [1] 介绍了航天材料及工艺研究所在 1970 ~ 1990 年所研制的黏弹性阻尼材料的性能及其典型应用实例。进入本世纪以来, 我国的航天科技工业发展迅速, 航天材料及工艺研究所在阻尼减振结构设计、阻尼材料及其应用研究等方面也取得了很大进展, 解决了大量工程应用问题。本文着重介绍航天材料及工艺研究所主要的黏弹性阻尼材料的性能以及近 10 年来在阻尼减振结构设计、黏弹性阻尼材料研制及其应用研究等方面的主要进展。

### 2 黏弹性阻尼材料的主要类型及其性能

为了满足不同产品及不同环境的需要, 航天材料及工艺研究所先后研制了丁基橡胶、硅橡胶、聚丙烯酸酯<sup>[1]</sup>、聚氨酯、丁腈橡胶、天然橡胶及导热橡胶阻尼材料和结构/阻尼一体化复合材料等, 共有近百个牌号。

#### 2.1 丁基橡胶阻尼材料

丁基橡胶分子结构中缺少双键, 侧链甲基分布密度较大, 在玻璃化转变区呈现特殊的蠕虫状分子运动形式, 因此具有优异的阻尼性能。航天材料及工艺研究所对丁基橡胶类阻尼材料进行了系统深入的研究<sup>[2]</sup>, 1990 年编制了国家军用标准 GJB979《ZN - 1 阻尼胶料》, 使其得到了广泛应用。研制的丁基橡胶阻尼材料的主要牌号及性能见表 1。这类材料特别适用于用作约束阻尼处理的阻尼夹芯层。试验表明, ZN - 1 阻尼材料与铝合金接触时不产生腐蚀<sup>[3]</sup>; ZN - 1 阻尼材料耐老化性能优异, 但长时间的 100℃ 热空气老化会破坏其结构中各相的界面结合状况, 从而在一定程度上恶化其力学及阻尼性能<sup>[4]</sup>; 对 ZN - 3 材料进行模拟空间宇宙射线环境的电子辐照实验后, 其阻尼性能几乎没有变化, 力学性能还略有提高<sup>[5]</sup>;

收稿日期: 2009 - 07 - 21

作者简介: 赵云峰, 1964 年出生, 研究员, 主要从事高分子材料及其应用研究工作。E-mail: zhaoyf@yahoo.cn

基于对温度、频率和动态位移的扫描实验,研究了 ZN-17 阻尼材料损耗因子和复模量随温度、频率和动

态位移变化的规律,并拟合了材料损耗因子和储能模量的数学表达式<sup>[6]</sup>。

表 1 丁基橡胶类阻尼材料的主要性能  
Tab.1 Properties of isobutylene-isoprene damping rubbers

阻尼材料牌号	拉伸强度 /MPa	扯断伸长率/%	扯断永久变形/%	硬度 (Shore A)	125Hz					
					$\Delta T_{0.7}/^{\circ}\text{C}$	$\beta_{\max}$	$T_{\beta_{\max}}/^{\circ}\text{C}$	$G'_{\beta_{\max}}/\text{MPa}$	$\beta(30^{\circ}\text{C})$	$G'(30^{\circ}\text{C})/\text{MPa}$
ZN-1	$\geq 1.5$	$\geq 500$	$\leq 35$	$30 \pm 5$	-16 ~ 50	1.4 ~ 1.5	15	3.2	$\geq 1.1$	$\leq 2.0$
ZN-1A	$\geq 1.5$	$\geq 500$	$\leq 35$	$30 \pm 5$	-15 ~ 40 (31.2Hz)	1.2 ~ 1.6 (31.2Hz)	0 ~ 10 (31.2Hz)	$2.5 \pm 1.5$	$0.7 \pm 0.2$ (31.2Hz)	$1.5 \pm 1$ (31.2Hz)
ZN-2	$\geq 8.5$	$\geq 400$	$\leq 35$	$43 \pm 5$	-14 ~ 47	1.0 ~ 1.1	15	9.3	$\geq 0.9$	$\leq 5.0$
ZN-3	$\geq 8.5$	$\geq 400$	$\leq 35$	$43 \pm 5$	-14 ~ 47	1.0 ~ 1.1	15	9.3	$\geq 0.9$	$\leq 5.0$
ZN-7	$\geq 2.0$	$\geq 400$	$\leq 10$	$33 \pm 5$	-30 ~ 35	1.2 ~ 1.5	0	6.4	$\geq 0.6$	$\leq 2.5$
ZN-9	$\geq 2.0$	$\geq 380$	$\leq 5$	$23 \pm 5$	-55 ~ 20	1.5	~30	9.3	$\geq 0.4$	$\leq 0.44$
ZN-10	$\geq 2.0$	$\geq 340$	$\leq 10$	$50 \pm 5$	-12 ~ 45	1.1 ~ 1.2	11	10.0		
ZN-13	$\geq 5.0$	$\geq 650$	$\leq 30$	$45 \pm 5$		0.35 (31.2Hz)	-40 ~ 50 (31.2Hz)		$\geq 0.5$ (31.2Hz)	$\leq 3.0$ (31.2Hz)
ZN-13A	$\geq 3.8$	$\geq 400$	$\leq 30$	$35 \pm 5$					$\geq 0.5$ (31.2Hz)	1 ~ 3 (31.2Hz)
ZN-14	$\geq 2.5$	$\geq 300$	$\leq 10$	$30 \pm 5$		1.4	-15 ~ 5	$12 \pm 2$	$\geq 0.7$	$1 \pm 0.5$
ZN-15	$\geq 8.0$	$\geq 400$	$\leq 20$	$42 \pm 5$		0.9 ~ 1.2 (31.2Hz)	15 $\pm$ 3 (31.2Hz)	8.0 ~ 11.0	$\geq 0.9$ (31.2Hz)	$\leq 4.0$ (31.2Hz)
ZN-16	$\geq 7.8$	$\geq 400$	$\leq 30$	$40 \pm 5$		1.10	-10 ~ 0	$10 \pm 5$	$\geq 0.50$	$\leq 5.0$
ZN-17	$\geq 5.0$	$\geq 600$	$\leq 55$	$65 \pm 5$		0.6	-5 ~ 5	$35 \pm 5$	$\geq 0.4$	$20 \pm 5$
ZN-17A	$\geq 4.0$	$\geq 400$	$\leq 100$	$80 \pm 5$					$\geq 0.4$	$20 \pm 5$
ZN-22	$\geq 3.0$	$\geq 400$	$\leq 25$	$30 \pm 5$					$\geq 0.4$ (31.2Hz)	0.15 ~ 4.95 (31.2Hz)
ZN-23	$\geq 6.0$	$\geq 300$	$\leq 35$	45 ~ 60					$\geq 0.35$ (31.2Hz)	5.5 ~ 20 (31.2Hz)
ZN-24	$\geq 2.0$	$\geq 400$	$\leq 15$	$30 \pm 5$					$\geq 0.5$	0.7 ~ 1.7

## 2.2 硅橡胶阻尼材料

硅橡胶分子中的硅氧键结构使其在比较宽的温度范围内具有稳定的力学和阻尼性能,弹性模量及硬度的变化很小,耐高低温性能优异,耐老化性能突出,特别适合航天产品的工作环境。硅橡胶的主要不足是其阻尼损耗较小,随着新型高阻尼硅橡胶材料的出现和新型共混技术的应用,硅橡胶正在逐步取代传统的丁基橡胶成为航空航天阻尼减振结构中的首选,应用日益广泛。

近 10 年来航天材料及工艺研究所在硅橡胶阻尼材料的研制及应用方面取得了显著进展,其主要牌号及性能见表 2,研制的宽温、宽频、高阻尼材料在 -50 ~ 150 $^{\circ}\text{C}$  内,其阻尼系数  $\beta \geq 0.3$ 。

文献[7]对 ZN-33 阻尼材料进行了温度、频率和动态位移的扫描实验和不同温度、载荷下蠕变实验,研究了材料在宽温、宽频、宽动态位移下的动态阻尼特性,得到了 ZN-33 复模量和损耗因子随温度、频率和动态位移变化的规律,同时对该材料的蠕变特性进行了研究,揭示其蠕变行为的非线性特性,并进行了蠕变柔量的时间—应力等效性描述。

文献[8]采用经典的 Burgers 模型和 RT 模型对 ZN-33 频率响应曲线的预言能力进行评估,提出的改进 M-RT 模型,同时考虑了温度、频率和动态位移对材料动态力学性能的影响,可以很好地描述该材料在宽温、宽频和宽动态位移下的动态本构行为。

表2 硅橡胶阻尼材料的主要性能

Tab.2 Properties of silicone damping rubbers of ARIMT

阻尼材料 牌号	拉伸强度 /MPa	扯断伸 长率/%	扯断永久 变形/%	硬度 (Shore A)	抗撕强度 /kN·m <sup>-1</sup>	125 Hz, 30℃	
						$\beta$	$G'$ /MPa
ZN-11	≥2.0	≥348	≤4	35~42		≥0.09	1.9~2.0
ZN-18	≥2.0	≥100	≤10	55±5		≥0.08	≤13
ZN-18A	≥4.0	≥300	≤7	57±4	≥14	≥0.18	≤5
ZN-19	≥2.8	≥150	≤10	55±5		≥0.15(62.5Hz)	1.0~7.0(62.5Hz)
ZN-20	≥2.8	≥150	≤10	60±5		≥0.15(62.5Hz)	5.0~12.0(62.5Hz)
ZN-21	≥4.0	≥200	≤30	70±5		≥0.08	≤8.5
ZN-26	≥4.0	≥100	≤8	70±5		≥0.13(15.6Hz)	2.0~5.0(15.6Hz)
ZN-27	≥5.5	≥250	≤25	65±5		≥0.25(15.6Hz)	2.0~5.5(15.6Hz)
ZN-29	≥2.8	≥150	≤14	50±5		≥0.15(62.5Hz)	1.0~7.0(62.5Hz)
ZN-30	≥4.0	≥250	≤42	64±5		≥0.2	≤8.0
ZN-32	≥4.0	≥400	≤25	40±5		≥0.2	1~5
ZN-33	≥7.0	≥350	≤30	50±5		≥0.3	5~6
ZN-33B	≥6.5	≥350	≤30	50±5	≥23	≥0.2	5~8
ZN-34	≥8.5	≥400	≤20	50±5		≥0.2	1~3
ZN-35	≥8.5	≥400	≤20	50±5	≥25	≥0.2	1~3
ZN-35A	≥4.2	≥150	≤35	85±5		≥0.15	12±5
ZN-37	≥2.5	≥400	≤20	25±5		≥0.15	≤1.0
ZN-38	≥8.5	≥400	≤20	50±5	≥20	≥0.15(31.2Hz)	1~5(31.2Hz)
ZN-39	≥8.0	≥400	≤20	65±5		≥0.15	2~10
ZN-40	≥5	≥300	≤10	35±5		≥0.08	0.8~2
ZN-41	≥6.2	≥520	≤25	40±5		≥0.3(31.2Hz)	2.3±0.5(31.2Hz)
ZN-42	≥7.0	≥300	≤35	81±5		≥0.1	30~40
ZN-42A	≥7.0	≥300	≤65	81±5		≥0.1	20~30
ZN-44	≥6.0	≥300	≤50	75±5		≥0.14	9~14

### 2.3 丁腈橡胶阻尼材料

丁腈橡胶分子结构中有极性侧基团,其位阻效应带来分子运动阻力,加大了分子之间的内摩擦,从而有较好的阻尼性能,且与许多材料的粘接性能优异。但是丁腈橡胶的阻尼峰值较窄,在工业上应用的丁腈橡胶类黏弹性阻尼材料常需要采用酚醛树脂等进行改性。一方面,由于酚醛树脂和丁腈橡胶相容性较好,可以扩展阻尼峰宽度;另一方面,由于酚醛树脂的内聚强度较高,可以进一步提高阻尼材料的强度和粘接性能。用有机小分子与聚合物形成杂化体系可以获得高阻尼

材料<sup>[9]</sup>。近年来对丁腈橡胶/酚醛树脂/受阻酚及丁腈橡胶/聚氯乙烯/酚醛树脂/受阻酚共混体系的结构与性能进行了系统深入的研究。结果表明,受阻酚与丁腈橡胶和酚醛树脂有较好的相容性,添加了受阻酚的共混橡胶具有更大的阻尼耗散能量和更宽的温域,是一种具有良好应用前景的高阻尼材料<sup>[10~12]</sup>。丁腈类阻尼材料的拉伸强度达到 20 MPa,最大阻尼值达到 1.5,阻尼系数大于 0.5 的峰宽超过了 80℃,剪切模量 2~4 MPa。该类材料目前已经应用于多种阻尼减振结构,其主要牌号及性能见表 3。

表3 丁腈橡胶阻尼材料的主要性能

Tab.3 Properties of nitrile-butadiene damping rubbers

材料 牌号	拉伸强度 /MPa	扯断伸 长率/%	硬度 (Shore A)	$G'$ (62.5Hz) /MPa	$\beta$ (25°C, 62.5Hz)
DZN-1	≥3.0	≥600	45±5	3~6	≥0.3
DZN-2	≥4.0	≥200	55±5	16±4	≥0.9
DZN-3	≥12.0	≥200	60±5	75~90	≥1.0
DZN-4	≥3.0	≥200	55±5	15±5	≥1.0
DZN-5	≥5.0	≥700	50±5	10±5	≥1.0
DZN-6	≥7.0	≥600	50±5	20±5	≥1.1
DZN-7	≥12.0	≥300	65±5	80±10	≥0.6
DZN-8	≥8.0	≥350	55±5	20±5	≥1.0
DZN-9	≥15.0	≥250	70±5	35±5	≥1.0
DZN-10	≥15.0	≥300	65±5	170±20	≥1.1
DZN-11	≥15.0	≥350	70±5	600~750	≥0.5
DZN-12	≥10.0	≥450	65±5	55±10	≥1.2
DZN-13	≥20.0	≥200	≥90	$(1.0±0.5) \times 10^6$	≥0.3
DZN-14	≥5.0	≥600	55±5	190±20	≥1.1
DZN-15	≥3.0	≥850	40±5	20±5	≥1.3

2.4 聚氨酯阻尼材料

聚氨酯的  $T_g$  较低, 和  $T_g$  较高的聚合物混合, 可以获得宽温阻尼材料。聚氨酯阻尼材料可以多种形式应用, 如胶黏剂、涂料、泡沫材料和弹性体等, 应用非常广泛, 国内外都已进行了较为深入的研究, 可以通过设计控制其交联密度、分子结构中软硬段的种类和比例、填料的种类和含量以及采用互穿聚合物网络技术等手段获得符合应用要求的聚氨酯阻尼材料。

表4 导热阻尼材料的性能

Tab.4 Properties of heat-conductive damping rubbers

阻尼材料 牌号	热导率 /W·(m·K) <sup>-1</sup>	拉伸强度 /MPa	扯断伸 长率/%	硬度 (Shore A)	$G'$ (62.5Hz) /MPa	$\beta$ (25°C, 62.5Hz)
DRZN-1	0.65	2.1	112.0	62	2.7	0.24
DRZN-2	0.70	1.4	36.6	65	19.5	0.25
DRZN-3	0.70	1.5	52.7	67	21.0	0.24
DRZN-4	1.85	1.1	148.8	42	1.4	0.30
DRZN-5	1.90	1.5	130.7	60	3.1	0.23

2.7 阻尼/结构一体化材料

在纤维/树脂基复合材料或制品的成型过程中, 将高阻尼材料制作成薄膜添加到复合结构中, 一方面可大幅增加结构的阻尼, 另一方面结构的强度和刚度无显著下降。目前, 航天材料及工艺研究所制备的阻尼/结构一体化复合材料和传统的纤维复合材料相比, 在相同厚度条件下, 材料的阻尼因子增大近一个数量级, 而各向同性层合板弯曲强度、弯曲模量和层剪强度保持率分别为 43.1%、95.4% 和 61%。

不同硬度的多功能双组分无溶剂聚氨酯材料, 特别适用于电缆插头座、电子器件及产品的阻尼减振及抗冲击浇注, 其硬度 Shore A 40~70, 冲击强度 ≥100 kJ/m<sup>2</sup>, 体积电阻率 ≥10<sup>14</sup> Ω·cm, 阻尼系数 β ≥0.2 (125 Hz, -20~60°C)。典型牌号有 Dq552J—91A 等。

不同密度的聚氨酯硬质和软质泡沫材料, 可作为减振降噪和抗冲击材料使用。密度 0.03~0.60 g/cm<sup>3</sup>, 压缩强度 0.05~21 MPa, 拉伸强度 0.1~16 MPa, 弯曲强度 0.1~20 MPa, 冲击韧性 0.1~7.0 kJ/m<sup>2</sup>, 热导率不大于 0.03 W/(m·K)。

2.5 天然橡胶阻尼材料

天然橡胶分子结构中的侧基少而不密, 且为非极性物质, 大分子间相互作用较小, 因此天然橡胶弹性很好, 阻尼损耗较小。但其动态性能、耐疲劳性能、耐低温性能及加工工艺性较好, 在民用工业领域大量使用。研制的十余种天然橡胶阻尼材料, 其拉伸强度为 8~15 MPa, 扯断伸长率 ≥200%, Shore A 硬度 40~80, 阻尼系数 β (30°C, 5Hz) 为 0.05~0.1, 弹性模量  $G'$  (30°C, 5Hz) ≥3 MPa。采用天然橡胶阻尼材料研制了 850 kW~3 MW 多种机型风力发电机组机舱罩、齿轮箱、控制柜、润滑油泵等配套用弹性支撑 20 余种。

2.6 导热阻尼材料

随着航空航天产品中电子设备集成化的日益提高, 功率及发热量越来越大, 需要高效散热。在对结构进行阻尼减振处理时, 既要改善电子设备的振动力学环境, 又要满足其散热要求, 这就需要使用导热阻尼材料。航天材料及工艺研究所研制的几种导热阻尼材料的主要性能见表 4。

3 阻尼减振结构设计研究

黄加才等<sup>[13]</sup> 利用摄动法结合子空间迭代法、逆迭代法, 得到一种求解复合结构动力学方程的方法。该方法考虑了黏弹性材料性能随频率变化的特性, 而且具有计算量小、计算精度较高的优点; 构造了一系列板类约束阻尼结构的有限元模型, 其中 8 节点 40 自由度四边形板单元有限元模型考虑了基层和约束层弯曲位移的差异, 适用于厚阻尼层和局部约束阻尼处理的情况; 4 节点 28 自由度单元有限元模型则是

对 8 节点 40 自由度四边形板单元有限元模型的合理简化,对薄阻尼层比较有效;3 节点 21 自由度三角形板单元有限元模型适用于各种复杂形状的约束阻尼板;利用剪切中性轴的概念,对约束阻尼板结构的几何参数优化进行了初步探究,并得出了一些很有意义的结论:当约束层厚度一定时,阻尼层厚度为基层和约束层厚度和的一半时,结构损耗因子最小;当阻尼层厚度一定时,约束层的厚度有一最优值,此时结构损耗因子最大,结构具有最佳的减振效果;在不改变假设条件的情况下,阻尼层材料的模量越高,材料损耗因子越大,减振效果越好。

林松等<sup>[14]</sup>针对有约束阻尼结构和离散型阻尼器组成的复合阻尼结构,建立了有限元仿真模型,较好地计算了结构在不同方向上的减振特性,并对约束阻尼结构和离散型阻尼器进行了优化分析。

文献[15]提出一种基于 Layerwise 层合理理论的复合阻尼结构梁单元用于计算嵌入多阻尼层的复合阻尼结构梁。通过与 NASTRAN 软件的计算结果进行对比,证明该梁单元满足层间位移、应力连续条件并避免了剪切自锁,具有单元数量和节点数量少、计算精度高的优点。

针对某系统冲击环境恶劣问题,文献[16]提出了采用玻璃微球填充以提高电路板抗冲能力的新方法,该方法的采用使制导系统的冲击响应大大降低,玻璃微球可以衰减电路板冲击中的高频冲击分量,减小低频分量所引起的电路板变形,并且其阻尼作用可迅速使电路板恢复平缓状态,其最大的冲击加速度衰减率可达 70%。

#### 4 黏弹性阻尼材料的典型应用

##### 4.1 某型号电池支架约束阻尼结构<sup>[17]</sup>

某型号动态力学环境恶劣,电池的面试验表明:其垂向功率谱密度共振(65 Hz)时放大 28 倍,严重影响了电池的正常供电,迫切需要对电池进行减振。用有限元法对其进行了约束阻尼设计,计算表明,对于该电池支架,当阻尼层采用厚度为 0.5 mm 的 ZN-1 阻尼胶片,约束层采用厚度为 1 mm 的铝合金板时效果较好,经约束阻尼处理后,电池的功率谱密度放大 14 倍左右,和处理前相比降低了一半,效果显著。

##### 4.2 某型号偏心惯组系统减振结构

某型号的惯组系统比较特殊,因为功能需要,系统不得不设计成偏心结构,在进行振动实验时惯组系统出现了较大的角振动,严重影响了惯组系统的正常工作,为解决这一问题,根据计算设计了两种减振器,分别为 ZN-35 胶料和 ZN-39 胶料制成的 T 型减振器,这两种减振器搭配使用,使其减振中心与质量中心重合。经减振处理后,系统的共振放大 3 倍左右,减振效率达 50%~60%,且在实验频段没有出现角宇航材料工艺 2009 年 第 5 期

振动。

##### 4.3 飞船挂包系统大能耗减振器

在飞船上升段,挂包系统所承受的力学环境十分恶劣,地面实验表明,在不采取减振措施的情况下,挂包系统上某些位置的加速度值达到 100g 以上,挂包系统有可能出现撕裂。经过计算设计了一种大能耗减振器,由 ZN-1 和 ZN-2 与金属嵌件硫化而成,安装在挂包系统的四个安装点处。采取减振措施后,挂包系统各点的加速度响应最大 $\leq 20g$ 。

##### 4.4 某卫星约束阻尼技术

某卫星在总装阶段振动测试时,其红外探测仪的安装支架共振放大 10 倍,导致支架被振断。采用约束阻尼技术进行处理,阻尼层厚度为 3 mm 的 ZN-1 阻尼胶片,约束层为碳纤维复合材料,使其振动共振峰从 10 倍降到 1.5 倍左右。

##### 4.5 某卫星阻尼/结构一体化仪器安装支架

某卫星仪器安装支架原由铝合金加工而成,共振放大 16 倍,仪器设备容易损坏。采用阻尼/结构一体化技术设计了新的碳纤维复合材料阻尼支架,有效改善了仪器的力学环境,其最大共振放大倍数降至 8 倍左右,同时减少了结构质量。

##### 4.6 某型号压强传感器缓冲器

压强传感器主要用来测试爆炸分离时气压的变化情况。在爆炸分离的一瞬间,传感器承受的轴向加速度 $> 1 \times 10^5 g$ 、径向 $> 3 \times 10^4 g$ ,由于传感器的位置离爆炸点很近,很容易被损坏,需要对传感器进行缓冲处理。通过有限元法设计了中空结构的柱形缓冲器结构,由金属嵌件和 ZN-37 阻尼胶料硫化而成。在安装缓冲器后,传感器承受的轴向加速度 $\leq 6 \times 10^3 g$ 、径向 $\leq 8 \times 10^3 g$ ,均在其许用载荷范围之内,满足了设计要求。

##### 4.7 某卫星动力吸振器

某卫星扫描反射镜在进行地面试验时发现其在 180 Hz 左右有一共振峰,共振放大 40 倍,从而造成反射镜面抖动,影响其正常工作。在反射镜背面对称设计了两个由质量块和 ZN-35 阻尼材料减振器组成的动力吸振器,安装动力吸振器后反射镜的最大响应放大 $\leq 15$ 倍,保证了其正常工作。

##### 4.8 某卫星整星隔振器

某卫星原采用刚度较大的适配器与运载火箭联接,环境载荷直接从星箭界面传递到卫星,再作用于卫星各次级子系统和仪器设备,严重影响各次级子系统和仪器设备性能和可靠性。在不影响现有星箭接口的前提下,在适配器与星箭界面之间引入由一组隔振器构成的环形整星隔振系统。使用 ZN-17 阻尼材料,单个隔振器的质量 $\leq 0.45$  kg,阻尼系数 0.15 左右,保证了该卫星的顺利升空。

##### 4.9 水泵管道噪声治理

某高档小区对设备噪声水平要求较高,泵房水泵工作时,受水流的激振作用,管道容易发生颤振现象,通过分析计算,设计了4层约束阻尼结构,即在管道外面加上两层约束层和两层橡胶层,橡胶层材料分别为ZN-1阻尼胶料和天然橡胶。经过测试,管道经噪声治理后噪声水平下降了8 dB左右,达到了设计要求。

#### 4.10 某型号电子箱阻尼缓冲器

某型号电子箱力学环境十分恶劣,三个方向在最大峰值100g,冲击时间为11 ms的半正弦冲击条件下,冲击响应最大峰值 $\leq 120g$ ,最大放大倍数 $\leq 6$ 倍。采用碗型缓冲器和柱型减振器相结合的阻尼缓冲器结构,其中碗型缓冲器采用丁腈类橡胶阻尼材料,柱型减振器采用ZN-44阻尼材料,采用这种结构的阻尼缓冲器后,电子箱三个方向的冲击响应降至60g~80g,三个方向的振动放大倍数 $< 5$ 倍。

#### 4.11 某导航系统平台减振器

某型号飞行过程中,振动环境非常恶劣,设计的三向等刚度减振器使用ZN-41阻尼材料。减振后平台上的均方根加速度值在4.5g以下,三向刚度一致,谐振点放大倍数在4倍以下,寿命 $> 12$  a,满足设计和使用要求。

#### 4.12 某型号雷达闸流管减振器

闸流管位于导弹的雷达上,在飞行过程中闸流管不能连通(短路),否则会使磁控管电流下降,进而使雷达发射的电磁波变弱,其搜索目标的能力便大大下降,这样就导致导弹的打击精度降低。在不加减振器时,通过振动试验发现,极其恶劣的环境条件使闸流管在振动过程中有多次连通现象,设计的减振器由ZN-37阻尼材料制备,安装了减振器的闸流管的谐振频率、减振效率等指标都达到了要求,特别是高低温下的性能稳定。安装在雷达整机上,通过通电试验发现,闸流管无连通现象,雷达整机和发射机无异常现象,取得了满意的效果。

#### 4.13 某机载型号惯导系统减振器

采用ZN-39阻尼材料研制的T型减振器采用悬挂方式连接,三个方向的谐振频率在全温度范围内的波动 $\leq \pm 15$  Hz,谐振时的放大倍数在全工作温度范围内 $< 4.5$ 。减振器贮存寿命 $\geq 12$  a。

#### 4.14 某型号惯导系统减振器

某型号惯导系统对振动环境条件要求极为严格,使用了4个减振器,且由于受空间的影响,减振器的体积必须尽量小,研制了ZN-44阻尼材料,其弹性剪切模量在12 MPa以上,较好地弥补了减振器结构设计的局限性,完全达到设计要求。

### 5 结束语

30多年来,航天材料及工艺研究所在阻尼材料

的研制、阻尼结构设计及阻尼减振性能测试分析等方面均取得了许多成果。目前正在积极进行航天黏弹性阻尼材料系列化、结构/阻尼一体化材料、新型高性能阻尼材料及结构、黏弹性阻尼材料贮存寿命评估方法、新型吸声降噪结构与材料及智能型阻尼减振结构等研究,希望能与国内外从事阻尼减振理论研究的单位合作,共同促进我国阻尼减振技术的研究及应用。

#### 参考文献

- 1 赵云峰. ZN系列黏弹性阻尼材料的性能及应用. 宇航材料工艺,2001;31(2):19~23
- 2 潘坚. 丁基橡胶和酚醛树脂共混体系的动态力学性能分析. 宇航材料工艺,1989;19(3):53~58
- 3 潘坚. ZN-1阻尼材料的特殊性能. 宇航材料工艺,1998;28(5):34~36
- 4 余黎明,李晶晶,马岳. 热老化对ZN-1阻尼材料内耗特性的影响. 金属学报,2003;39(11):205~208
- 5 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;21(4):87~90
- 6 林松,杨显杰,高庆等. ZN-17黏弹材料动态阻尼特性实验研究及其数据拟合分析. 宇航材料工艺,2006;36(增刊1):73~78
- 7 林松,杨显杰,高庆等. 宽温宽频宽动态位移下ZN-33材料的黏弹行为. 宇航材料工艺,2007;37(3):74~80
- 8 林松,高庆,李映辉等. 一种考虑宽温宽频宽动态位移的黏弹性本构模型. 航空动力学报,2007;22(3):431~438
- 9 何利军,赵云峰,詹茂盛等. 有机小分子杂化阻尼材料研究进展. 宇航材料工艺,2007;37(3):9~12
- 10 赵云峰,张继华,游少雄等. 丁腈橡胶/酚醛树脂/受阻酚AO60三元阻尼橡胶的结构与性能. 功能材料,2009;40(6):986~989
- 11 赵云峰,张继华,游少雄等. 丁腈橡胶/酚醛树脂/受阻酚AO80三元阻尼橡胶的结构与性能. 航空材料学报,2009;29(3):71~77
- 12 赵云峰,游少雄,何利军等. 丁腈橡胶/聚氯乙烯/酚醛树脂/受阻酚共混阻尼材料研究. 见:2009年全国高分子学术论文报告会论文集,天津,2009:H-0-21
- 13 黄加才. 板类约束阻尼结构的研究. 航天材料及工艺研究所硕士学位论文,2004
- 14 林松,高庆,李映辉等. 复合阻尼结构减振参量的有限元仿真计算及优化分析. 导弹与航天运载技术,2007;(5):42~45
- 15 张醒,徐超,李莉等. 复合阻尼结构梁动力特性分析. 宇航材料工艺,2007;37(6):11~14
- 16 黄加才,李凡,赵云峰等. 利用空心玻璃微球提高电路板冲击性能. 宇航材料工艺,2007;37(6):91~94
- 17 黄加才,游少雄,赵云峰. 电池支架阻尼减振研究. 见:中国航天结构强度与环境工程专业信息网2006年度技术信息交流会论文集,西宁,2006:199~202

(编辑 李洪泉)