

http://pmse.scu.edu.cn

## 阻尼硅橡胶及其在航空减振领域中的应用进展

李远<sup>1</sup>, 曹政<sup>1</sup>, 黄精金<sup>2</sup>, 邹华维<sup>3</sup>, 夏彰阳<sup>1</sup>, 杨克斌<sup>2</sup>, 赵银巧<sup>2</sup>, 夏爽<sup>3</sup>  
黄自华<sup>1</sup>, 谷元<sup>1</sup>, 张志广<sup>1</sup>, 杨军<sup>1</sup>

(1. 株洲时代新材料科技股份有限公司, 湖南 株洲 412007; 2. 四川中物材料股份有限公司, 四川 绵阳 621000;  
3. 四川大学 高分子研究所, 四川 成都 610065)

**摘要:** 阻尼硅橡胶是一种由硅橡胶生胶、补强填料、阻尼剂、硫化剂及其他助剂混合而成的具有一定阻尼性能的有机硅高分子复合材料。硅橡胶因其突出的耐高、低温性能及宽温域阻尼可调性, 广泛应用于航空减振领域。文中综述了航空减振领域用阻尼硅橡胶的结构特点及阻尼机理, 从生胶改性、填料、有机硅阻尼剂等方面详细介绍了阻尼硅橡胶制备方法及国内外发展现状, 同时对阻尼硅橡胶在航空主/辅发动机动力装置、机载设备、仪器仪表、舱内壁板及飞机旋翼减振领域中的产品应用概况进行了介绍。最后, 对阻尼硅橡胶制备及应用进行了展望, 以期为后续航空硅胶减振制品的阻尼材料开发及产品选用提供参考。

**关键词:** 阻尼硅橡胶; 航空减振; 生胶改性; 填料; 有机硅阻尼剂; 减振器

**中图分类号:** TQ333.93

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7555(2026)01-0181-10

硅橡胶是由主链 Si—O 交替、侧基为有机基团构成的线型半无机高分子材料, 其主链 Si—O 键能较通用橡胶 C—C 键高约 26.9%, 键长较 C—C 键长 6.5%, 且分子主链呈螺旋形构型, 赋予其极其优异的耐高低温性能及柔顺性。硅橡胶通过阻尼改性可实现其损耗因子 ( $\tan \delta$ ) 从 0.1 至 0.6 的宽温域阻尼可调, 广泛用作飞机、火箭、导弹、卫星、舰船和车辆上的发动机、仪器仪表、导航设备和电子系统等的减振材料。由于硅橡胶材料物理力学性能欠佳及减振设备接口使用需求等, 常与金属材料一体硫化或压装制成具有一定刚度的橡胶-金属复合材料减振器, 以实现柔性连接及减振功能, 采用这种柔性连接减振是未来航空装置及系统设计发展的必然趋势。

在航空减振领域, 除了耐油、高刚度承载以及长期 250 °C 以上高温使用环境以外, 几乎所有减振器均采用阻尼硅橡胶材料, 阻尼硅橡胶在航空减振器领域由此获得了广泛的研究和应用。本文根据航空

领域减振器对阻尼硅橡胶的使用要求, 分析了航空减振领域对阻尼硅橡胶的选择原则及方法, 详细介绍了国内外阻尼硅橡胶设计方法及研究现状, 最后介绍了各类阻尼硅橡胶航空减振器在航空主/辅发动机、机载设备、仪器仪表、舱室壁板及飞机旋翼减振领域等的应用情况, 对阻尼硅橡胶材料的开发及其硅胶减振制品的选用具有一定的指导意义。

### 1 航空减振用阻尼硅橡胶

GJB1172.2 及 GJB150.4A 表明, 中国境内地面低温记录极值为 -52.3 °C, 国外低温极值为 -61 °C。同时, RTCA/DO-160G 规定了飞机装备最低工作环境温度均为 -55 °C。飞机飞行高度超过 12000 米高度时, 空气环境温度将低于 -50 °C。综上, 目前军及民用航空装备规定了各种减振部件最低使用温度要求一般为  $\leq -55$  °C。通常情况下, 航空装备因暴露于周期空气而诱发最高温度为 71 °C, 发动机辅助动

力装置(APU)最高使用环境温度约为 150 ℃,主发动机减振装置最高使用环境温度达到约 220 ℃。通用橡胶玻璃化转变温度( $T_g$ )一般高于-55 ℃,最高使用温度为 70~150 ℃。然而,硅橡胶由于其柔顺的分子主链以及高的主链键能,通常能够在-100~225 ℃环境中长期使用,且弹性模量随温度变化小,在整个温域范围内减振性能稳定。另外,GJB150.16A 中规定的各种飞机的振动试验环境谱均为 15~2000 Hz,航空减振器的固有频率通常为 10~200 Hz,跨越了飞机的振动试验谱,使得各种减振器均有共振放大倍数的技术指标要求,共振放大倍数与硅胶减振器阻尼性能强相关且呈反比。因此,耐高低温性能突出、宽温域阻尼可调的硅橡胶材料成为航空减振领域最佳胶种选择。

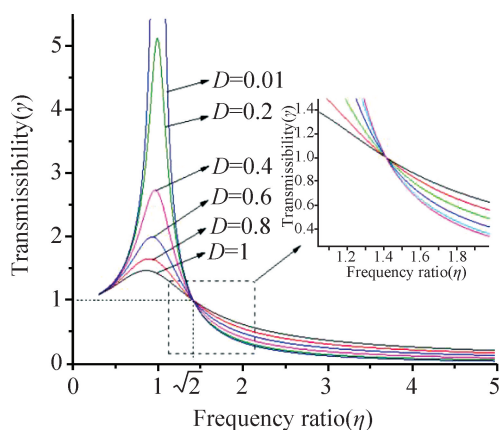


Fig. 1 Transmissibility ( $\gamma$ ) with frequency ratio ( $\eta$ ) and loss factor ( $D$ )

## 2 航空减振用阻尼硅橡胶关键性能参数

对于各类航空减振器,通常会提出其固有频率处最大共振放大倍数的技术指标要求,一般要求  $>300\% \sim 650\%$ 。Fig.1 和式(1)分别列出了减振器传递率( $\gamma$ )与频率比( $\eta$ )、阻尼因数( $D$ )的关系<sup>[1]</sup>。根据 Fig.1 可知, $\eta < \sqrt{2}$ 时,传递率与阻尼因数呈反比; $\eta > \sqrt{2}$ 时,传递率与阻尼因数呈正比,在 15~2000 Hz 频段范围内,减振效率( $1-\gamma$ )与阻尼因数呈反比。当  $\eta=1$  时,根据式(1)计算出了固有频率处的  $\gamma$ (也称共振放大倍数),列于式(2)。从式(2)可知,共振放大倍数仅与产品阻尼因数相关,各种减振器阻尼因数与产品结构阻尼和材料损耗因子同时相关,目

前各类硅胶减振器振动试验结果统计显示,通常情况下, $D=(1.4\sim 2)\tan\delta$ 。当产品结构一定时,产品的共振放大倍数只与橡胶材料  $\tan\delta$  相关。虽然提高橡胶材料  $\tan\delta$ ,可以降低减振器固有频率下的共振放大倍数,但在 15~2000 Hz 工作频段范围内的综合减振效率反而越差,且橡胶材料蠕变、耐热空老化及高低温性能也越差。因此,为满足减振器固有频率处共振放大倍数,必须采用阻尼型硅橡胶,同时应适当降低橡胶材料损耗因子,有利于硅胶减振器产品综合使用性能。

$$\gamma = \sqrt{\frac{1+(\eta D)^2}{(1-\eta^2)^2+(D\eta)^2}} \quad (1)$$

式中: $\gamma$ ——输入振动频率  $f$  的传递率,( $1-\gamma$ )即为减振效率; $\eta$ ——频率比,输入振动频率( $f$ )与自振频率( $f_n$ )之比; $D$ ——无因次损失因数,或称为阻尼因数, $D=2\zeta$ , $\zeta$  为减振器等效阻尼比。

当  $\eta=1$  时,固有频率下的传递率( $\gamma$ )为

$$\gamma = \sqrt{\frac{1+D^2}{D^2}} \quad (2)$$

## 3 高阻尼硅橡胶的设计制备

甲基硅橡胶(MQ)或甲基乙烯基硅橡胶(MVQ)侧基基团体积小, $\tan\delta$ 值通常在 0.1 以下;低苯基或中苯基硅橡胶(MVPQ)  $\tan\delta$  通常在 0.12 以下。虽然超高苯基硅橡胶  $\tan\delta$  可以达到 0.2 以上,但其玻璃化转变温度仅为-60~-30 ℃<sup>[2~5]</sup>,且高温压缩永久变形较大,不能满足航空减振制品高低温及低蠕变的使用需求。因此,通常采用中、低苯基硅橡胶作为生胶,通过生胶改性、添加阻尼填料或阻尼剂等方法制备高阻尼硅橡胶材料,以满足不同阻尼要求的硅胶减振产品使用要求。

### 3.1 生胶改性

阻尼硅橡胶的生胶改性主要包括生胶并用、分子主链共聚、侧链改性等方法。王志勇<sup>[6]</sup>采用 30% 苯基含量的单苯基硅橡胶与双苯基硅橡胶共混时,2 种硅橡胶发生了相分离。二者质量比为 60/40 时,有效阻尼温域( $\tan\delta \geq 0.3$ )<sup>[7]</sup>最宽,较单苯基硅橡胶增加了 15 ℃,同时表现出了优异的力学性能。卢珣等<sup>[8,9]</sup>采用 MVQ/乙烯丙烯酸酯橡胶(AEM)共混,随着 AEM 比例增加拉伸强度逐渐增大,共混胶  $\tan\delta$

呈现先提高后降低的趋势,质量比 60/40 时,有效阻尼温域为  $-7 \sim 185 \text{ }^\circ\text{C}$ 。刘宇等<sup>[10,11]</sup>采用 30% 质量分数的 10% MVPQ 与聚氨酯橡胶(PU)共混,拉伸强度提高了 35%,随着 PU 混炼胶质量分数增加,共混交联物理力学性能逐渐增加,  $\tan \delta$  在  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  以上整体提升,峰值达到了 0.6 以上。Wang 等<sup>[12]</sup>采用 MVQ/丁基橡胶共混-硫化法制备阻尼材料,采用酚醛树脂作为硫化剂,复合材料的有效阻尼温域从  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  扩宽到近  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\tan \delta$  峰值从 0.12 提高到 0.69。Cui 等<sup>[13,14]</sup>采用硼酸(BA)对端羟基聚二甲基硅氧烷(PDMS-OH)进行改性,制备了端硼型聚硅氧烷凝胶(PBS),通过硅橡胶端部硼氧键缔合、解离过重中能量耗散作用,PBS 的  $\tan \delta$  峰值在  $50 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$  之间,与 MVQ 并用比超过 40 phr 以上时,  $\tan \delta_{50 \sim 250 \text{ }^\circ\text{C}} > 0.3$ ,制得了高温型阻尼硅橡胶。Sheth 等<sup>[15,16]</sup>采用聚二甲基硅氧烷齐聚物、4,4-二异氰酸酯二环己基甲烷和聚苯醚齐聚物制得了三元嵌段共聚物,材料  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  以上  $\tan \delta \geq 0.2$ ,材料拉伸强度达到 21.6 MPa。米治安等<sup>[17]</sup>采用正丁基二甲氢硅烷接枝到 15% 乙烯基含量 MVPQ,通过提高分子链段的运动壁垒,将苯基生胶  $\tan \delta$  阻尼峰值由 0.12 提升至 0.17;随后进一步加入 2 phr 苯基含氢硅油,通过其苯基空间位阻、苯基  $\pi$ - $\pi$  作用及分子链末端缠绕效应等,进一步提升硅橡胶损耗因子至 0.27。李志鹏等<sup>[18]</sup>采用 PDMS-OH 与交联剂的缩聚反应,制得了含有悬挂链的无规网络硅橡胶阻尼材料,利用悬挂链多样化的松弛模式制得了在  $-60 \sim 190 \text{ }^\circ\text{C}$  的温度范围阻尼因子大于 0.3 的宽温域高阻尼有机硅弹性体材料。Huang 等<sup>[19]</sup>采用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)与端乙烯基聚二甲基硅氧烷(vi-PDMS)在甲苯溶剂中原位聚合制得共混物,添加 50% 共混物阻尼性能最好,  $\tan \delta_{-50 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}} > 0.15$ ,添加 20% 共混物拉伸强度最高,从 6 MPa 提升到 8.1 MPa。

### 3.2 填料改性

阻尼硅橡胶填料改性通常包括以下几种方法。(1)添加片状、棒状等无机填料,通过胶材料形变过程中取向,填料与填料以及填料与分子主链内摩擦吸收能量;(2)添加  $T_g$  或结晶熔融峰在  $-20 \sim 120 \text{ }^\circ\text{C}$  之间的树脂填料,通过树脂熔融后降低橡胶材料储能模量( $E'$ ),结晶熔融后氢键耦合及分子末端缠绕

效应等提升室温以上或拓宽硅橡胶阻尼温域;(3)添加阻尼类型的白炭黑,通过阻尼剂与白炭黑之间氢键耦合作用,硅橡胶分子链与改性填料空间位阻及苯基  $\pi$ - $\pi$  作用,提升硅橡胶损耗因子;(4)添加压电陶瓷粉和导电填料,形成导电网络,橡胶形变后产生电能,电能可在导电网络中以热能形式进行耗散<sup>[20,21]</sup>。

孙攀等<sup>[22]</sup>研究了白炭黑/片状硅土对硅橡胶阻尼性能的影响,硅土用量为 20 phr 时,阻尼硅橡胶的  $\tan \delta_{-40 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}}$  稳定在 0.3 附近,但用量超过 10 phr 后拉伸强度开始明显下降。穆洪帅等<sup>[23]</sup>研究了白炭黑、滑石粉、硅灰石和云母粉填料对硅橡胶阻尼性能的影响,其  $\tan \delta_{-30 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}}$  分别为 0.27, 0.23, 0.255 和 0.245,细粒径的气相法白炭黑能够形成更多触变性较大的凝胶网络而具有更好的阻尼性能。涂春潮等<sup>[24]</sup>在 SE2155 阻尼硅橡胶材料中加入石墨,用量为 10 phr 时综合物理力学性能较优,但未能改变阻尼硅模量及阻尼特性随温度、频率及应变变化的趋势。Ren 等<sup>[25]</sup>采用乙烯基类硅烷偶联剂 V171 表面改性六方氮化硼(hBN),利用 hBN 层间内摩擦大副提升了 MVQ 硅橡胶高温时的阻尼性能,硅橡胶  $\tan \delta_{40 \sim 180 \text{ }^\circ\text{C}} > 0.5$ ,添加 55 phr 以内拉伸强度逐渐提高。段宇星等<sup>[26]</sup>采用  $\gamma$ -(甲基丙烯酰氧)丙基三甲氧基硅烷(KH570)对芳纶纤维表面进行改性,相对于 15% 苯基含量 MVPQ 基胶  $\tan \delta_{-50 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}}$  具有大幅提升,特别是  $\tan \delta_{50 \text{ }^\circ\text{C}}$  提升了 1 倍以上,且拉伸性能具有一定提升。程卫平等<sup>[27]</sup>将 5 phr 碳纳米管(CNTs)加入到阻尼硅橡胶中,胶料  $\tan \delta_{-70 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}}$  提升了 20%,物理力学性能仅小幅下降。

穆洪帅等<sup>[28]</sup>采用软化点为  $55 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$  的 SILRES ©604 固体苯基硅树脂制备了高阻尼硅橡胶,通过与超支化硅氧烷阻尼剂并用,制得到了  $\tan \delta_{-40 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}} > 0.5$  的超高阻尼硅橡胶,物理力学性能良好,且材料  $\tan \delta_{-40 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}}$  呈上升趋势,常用的硅树脂牌号有信越公司的 KR-220L/220LP/480 等,瓦克公司的 SILRES ©MK/H44/601/603/604/605/610 等。Han 等<sup>[29]</sup>将 30 phr 苯基 MQ 硅树脂加入到 MVPQ 中,苯基硅树脂形成了“海岛”结构,  $\tan \delta_{150 \text{ }^\circ\text{C}}$  由 0.1 提升至 0.18,有效阻尼温域增加了 115.2%,拉伸强度保持在 6.3 MPa。黄自华等<sup>[30]</sup>采用软化点为  $50 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 、羟值大于 50 mg KOH/g 醛酮树脂或醛树脂,提升了硅橡胶

室温以上的阻尼性能,且  $\tan \delta_{-50 \sim 80^\circ\text{C}}$  呈上升趋势,物理力学性能较好,常见的醛酮树脂牌号有 A-81, KR-80/120 和 CT-80/120 等。陶刚<sup>[31]</sup>采用 MVQ 为基体,白炭黑填充量为 50 phr,萘烯树脂为 50 phr 时,得到  $\tan \delta_{-80 \sim 200^\circ\text{C}} > 0.25$  的宽温域高阻尼硅橡胶复合材料,但其物理力学性能较差。王秋龙等<sup>[32]</sup>采用 MVQ 与醋酸乙烯酯(EVA)共混制备阻尼硅橡胶。当 EVA 用量为 10 phr 时物理力学性能最好,用量为 30 phr 时材料损耗角达到最大值(16.4°),呈现互相缠绕贯穿的双连续相结构。米志安等<sup>[33]</sup>研究了聚苯乙烯树脂(PS)对硅橡胶 SE2055 阻尼性能的影响,添加 10 phr PS 树脂后,  $\tan \delta$  峰位移向高温移动了 33 °C,峰值由 0.25 提升至 0.39,制备的板式阻尼器常温损耗角下降 2.68°,但 60 °C 和 80 °C 损耗角分别提高了 3.72 °C 和 4.96 °C。

张志杰等<sup>[34~36]</sup>采用两段法制备了阻尼白炭黑,首先采用硅氧烷或硅氮烷滴加到白炭黑中,进行搅拌、烘干得到预处理白炭黑,随后采用 9,10-二氢-9-氧杂-10-磷杂菲-10-氧化物衍生物(DOPO-PMVS)、催化剂和溶剂混合后滴加至预处理白炭黑中,再次搅拌、烘干,利用 DOPO-PMVS 与炭黑发生化学键接、物理吸附和氢键耦合相互作用,大幅提升了硅橡胶-50~150 °C 阻尼性能( $\tan \delta_{\text{max}} \geq 0.3$ ),阻尼峰  $T_{\text{peak}}$  为 50 °C 左右。段宇星等<sup>[37]</sup>将 DOPO 接入多乙烯基硅油(PMVS)制得含 DOPO-PMVS 硅油,进行白炭黑改性。在苯基硅橡胶中添加 50 phr 改性白炭黑后,在常用的温度及频率范围内(240~400 K, 1~100 Hz),材料损耗因子在 0.15~0.3 之间。

在硅橡胶中添加压电陶瓷粉,并添加碳纳米管、石墨烯或导电炭黑等导电填料可形成导电交联网络<sup>[38]</sup>,外界振动使得硅橡胶产品形变,导电陶瓷粉因压电效应产品电荷,电荷通过导电交联网络的电阻作用产生热量耗散,提升了硅橡胶阻尼性能。舒峻等<sup>[39]</sup>通过原位聚合制得聚苯胺(PA)包覆锆钛酸铅(PZT)(PA-PZT),然后将 30 phr 导电炭黑(CB)与 80 phr PA-PZT 填充于 MVPQ 中,苯基硅橡胶的  $\tan \delta$  呈现先增大后减小的趋势,其  $\tan \delta_{-50 \sim 100^\circ\text{C}} \geq 0.3$ ,较纯 MVPQ 硫化胶阻尼范围在高度与宽度上同时得到提高,但拉伸强度下降了 60% 以上。Wang 等<sup>[40]</sup>通过反应溶液混合、球磨和三辊研磨等工艺制备了纳

米石墨(NG)/PTZ/室温固化硅橡胶,制备了阻尼吸振和能量耗散功能的阻尼硅橡胶复合材料,含有 3% NG 和 40% PTZ 复合材料的整体性能优于 RTV 基体,其  $\tan \delta_{5 \sim 60^\circ\text{C}} \geq 0.25$ 。

### 3.3 硅氧烷齐聚物改性

为了提高硅橡胶损耗因子,通常会在硅橡胶中添加一些分子主链为硅氧烷、侧基带有大的刚性基团或极性基团的硅氧烷齐聚物类阻尼剂,利用苯基空间位阻、苯基  $\pi$ - $\pi$  共轭、极性耦合效应等来提升硅橡胶阻尼性能。通常阻尼剂分子侧链还含乙烯基或主链含氢,能够参与硅橡胶交联,有利于降低阻尼硅橡胶蠕变性能和减缓物理力学性能下降幅值;测基体积越大、数量越多,阻尼峰位温度及峰值越高,特别是在 0 °C 以上形成十分明显阻尼峰,极大提升了硅橡胶的阻尼性能,但硅氧烷齐聚物侧基较大时,会导致硅橡胶交联程度略有下降。

Zhu 等<sup>[41]</sup>采用 Diels-Alder 化学法合成了侧链含四苯基的甲基乙烯基苯基硅氧烷(TPP-VPMS)阻尼剂。添加 15 phr 阻尼剂的苯基硅橡胶复合材料  $\tan \delta_{20 \sim 110^\circ\text{C}} > 0.24$ ,  $\tan \delta_{150^\circ\text{C}}$  值从 0.09 提高到 0.21,拉伸强度维持在 7.7 MPa 左右。赵艳芬等<sup>[42]</sup>在低苯基硅橡胶中添加 15 phr 三苯甲氧基硅氧烷显著提高了硅橡胶  $\tan \delta_{-50 \sim 150^\circ\text{C}}$  值,阻尼峰 13.2 °C 时  $\tan \delta$  值由 0.12 提升至 0.2,拉伸强度达 8.35 MPa。陈欣<sup>[43]</sup>采用四苯基环戊二烯酮与乙烯基硅油合成了四苯基苯基甲基乙烯基硅油(TPP-VMPS)阻尼剂,在 30% 苯基含量硅胶中加入 15 phr TPP-VMPS,  $\tan \delta_{-40 \sim 150^\circ\text{C}}$  提升幅度达到 0.20 以上,且具有 7.69 MPa 的拉伸强度。张颖<sup>[4]</sup>采用邻苯二甲酸酐与氨丙基苯基乙烯基硅油反应制备了邻苯二甲酸亚胺阻尼剂,加入到 30% 苯基含量硅橡胶中,相对分子质量为 5 万、份数为 20 phr、乙烯基含量为 1%、氨丙基链节为 20% 的邻苯二甲酸亚胺阻尼剂综合性能最好,  $\tan \delta_{\text{max}}$  为 0.32,  $\tan \delta_{\text{max}}$  峰对应温度为 3.2 °C,拉伸强度为 7.58 MPa。

## 4 阻尼硅橡胶在航空减振中的应用

阻尼硅橡胶广泛应用于各种喷气式飞机、螺旋桨式飞机、直升机、无人机及电动垂直起降飞行器(eVTOL)等航空减振领域,具体应用于发动机动力

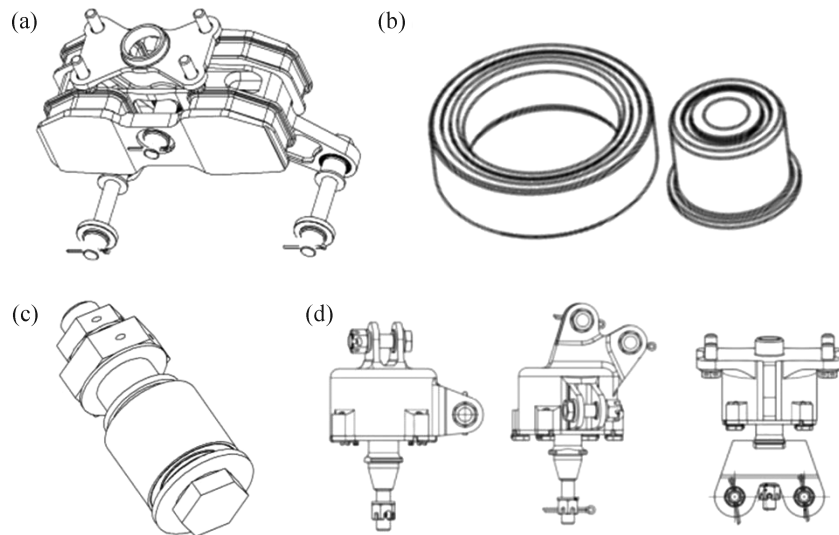


Fig. 2 Dampers in main aircraft engine and auxiliary power unit: (a) damper in main aircraft engine; (b) damper in aircraft engine gearbox; (c) bearing damper in auxiliary power unit; (d) box damper in auxiliary power unit

装置、机载设备、仪器仪表、机舱舱内壁板及直升机旋翼等区域,以降低发动机噪声、装备自振动、螺旋桨运动、气流湍流以及机动飞行、着陆和滑行等引起的基体结构运动对航空部件振动损伤影响。

#### 4.1 发动机减振

硅胶减振器广泛应用于航空主发动机、APU 减振系统,每个减振系统采用 3~5 件减振器进行悬置与减振,它是飞机安装架、安装座或齿轮箱与发动机之间的柔性连接装置,利用硅橡胶低模量、高阻尼特性,有效降低主/辅发动机与上级系统之间的振动能量传递,常见的几种主、辅发动机硅橡胶减振器产品如 Fig.2 所示。航空主发动机减振器工作使用环境通常为 $-55\sim 220\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,减振器系统的共振放大倍数通常 $\geq 3.5$ ,常选用损耗因子约为 0.15~0.20 的硅橡胶,常采用承载较大的橡胶-金属层式结构;APU 质量相对较轻,减振器使用环境为 $-55\sim 121\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,共振放大倍

数通常 $\geq 5$ ,常选用损耗因子约为 0.15~0.20 的硅胶,根据结构可将 APU 减振器分为盒式、杆端式、杆身集成式或球铰式,盒式最为传统成熟,杆端式轻便,杆身集成式零件数量少,球铰式安装空间小,各飞机根据 APU 质量、安装空间及功率等,选择特定结构的减振器系统。

#### 4.2 机载设备减振

飞机机舱中在循环风扇、空调、压缩机、燃油泵、电子马达、压力传感器、雷达等机载设备底部通常采用支座型硅胶减振器,减振器包含壳体、底部密封板、橡胶体和轴金属接头。减振器壳体与底部密封板通过铆钉铆接,壳体或底部密封板上的通孔与飞机安装座采用螺栓进行连接;橡胶体与轴金属接头采用热硫化一体成型后通过专用压装工装过盈压入壳体,轴金属接头带有内螺纹孔与机载设备通过连接螺钉连接,这种压入式壳体结构通常具有较大的



Fig. 3 Dampers in airborne equipment: (a) HT2/UT2 series; (b) HT0 series; (c) HT1/UT1 series

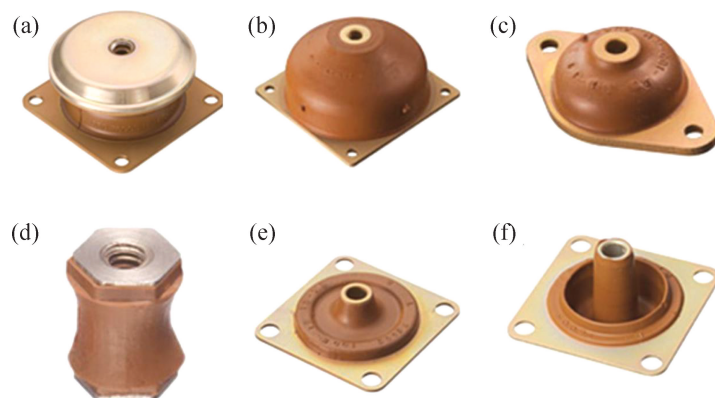


Fig. 4 Dampers in instruments and apparatus: (a) PS series; (b) HDM series; (c) AM series; (d) MX003 series; (e) 100APL series; (f) 106APL series

轴向和径向刚度,通过硅橡胶的高弹性与阻尼性有效降低飞机机体与机载设备之间的能量传递,提升机载设备使用寿命以及降低舱内振动噪声环境, Fig.3 列出了美国 LORD 公司几种典型结构机载设备减振器。通常情况下,该类型硅胶减振器使用温度为 $-55 \sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,共振放大倍数 $\geq 3.5$ ,减振器固有频率需要避开机械运动型装备以及飞机整机的固有频率,最大变形量不能超过与上级系统的安装干涉间距,并满足整个系统的疲劳寿命使用要求,常选用损耗因子  $\tan \delta$  为  $0.12 \sim 0.20$  的阻尼硅橡胶。

#### 4.3 仪器仪表减振

导航仪、仪表盘、测量仪器和飞机操作盘等通常需要采用法兰和轴结构型硅橡胶减振器,以降低飞机振动环境对各种仪器仪表的振动损伤影响。Fig.4 列出了美国 LORD 公司几种常见结构的仪器仪表减振器,其结构包含法兰、橡胶体和连接轴。减振器法兰带有通孔,通过螺栓紧固件与飞机安装座连接,连

接轴带有内螺纹孔,通过连接螺钉与仪器仪表接口相连,通过一体硫化的阻尼硅橡胶进行减振。该类仪器仪表类减振器可使用温度为 $-55 \sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,共振放大倍数通常 $\geq 4$ ,轴向固有频率  $10 \sim 30\text{ Hz}$ ,径向固有频率  $10 \sim 35\text{ Hz}$ ,采用的阻尼硅橡胶  $\tan \delta$  约为  $0.15 \sim 0.20$ 。

#### 4.4 舱内壁板减振

壁板减振器主要用于飞机上厨房悬置、侧壁板悬置、地面悬置、内顶隔振件、储藏柜、舱壁悬置、隔断等悬置与减振,用于衰减飞机内部振动,降低异响噪音,为乘客提供舒适的乘坐环境, Fig.5 列出了几种常见的飞机舱内壁板减振器。减振器产品通常由外套、阻尼硅橡胶、衬套及卡箍等构成,需满足高温、减振效率及防火等使用要求,产品体积和刚度较小,轴向固有频率约为  $5 \sim 15\text{ Hz}$ ,径向固有频率约为  $2 \sim 10\text{ Hz}$ ,在飞机振动环境中的减振效率 $\geq 95\%$ ,采用的阻尼硅橡胶材料损耗因子约为  $0.10 \sim 0.15$ 。

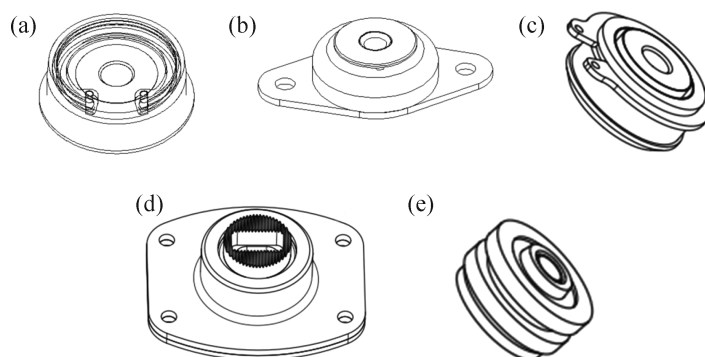


Fig. 5 Panel dampers in the passenger cabin: (a) in the boot and back of service area; (b) in front of service area; (c) in the boot; (d) in base of the boot; (e) in the cockpit

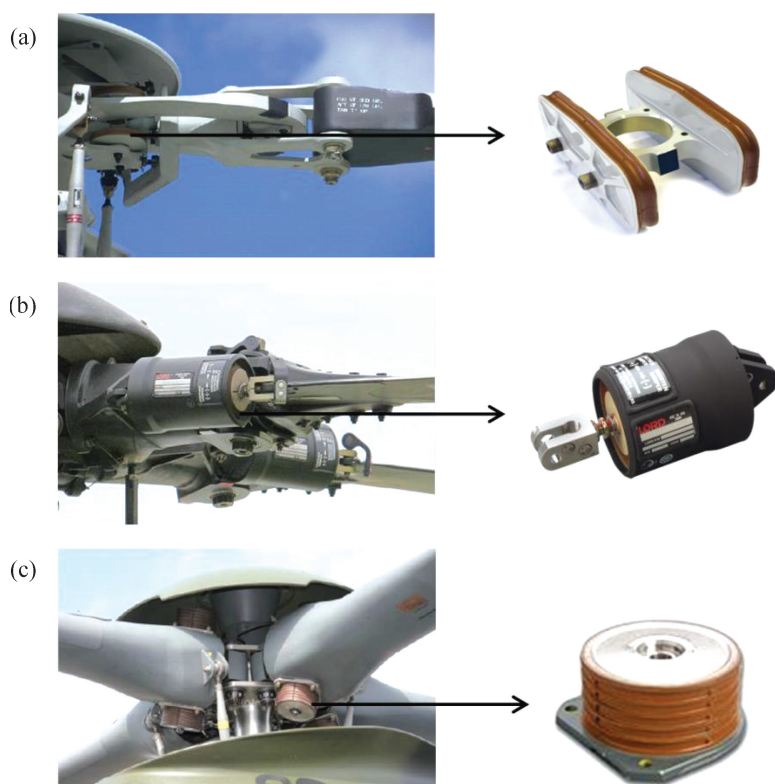


Fig. 6 Silicone rubber viscoelastic damper in rotorcraft: (a) plate-type viscoelastic damper; (b) tubular-type viscoelastic damper; (c) layer-type viscoelastic damper<sup>[45]</sup>

#### 4.5 直升机旋翼减振

黏弹阻尼器在 20 世纪后期开始应用于中型、轻型直升机及无人机,这种减摆器通过阻尼材料在变形过程中的内阻尼来实现桨叶的摆振阻尼需求,同时能调节桨叶摆振固有频率,从而有效地避开可能的地面共振频率。根据结构可分为平板式、筒式、多层叠加式、液弹和液弹磁流变阻尼器 5 种类型,其中前 3 种为硅胶材质黏弹阻尼器<sup>[44]</sup>,产品使用位置及外观如 Fig.6 所示。由于直升机主旋翼的转动频率不得高于 6.67 Hz,工作频率 $< \sqrt{2}f_n$ ,所以一般用于直升机或无人机旋翼的各类黏弹阻尼器的硅胶损耗因子较高,通常损耗角( $\alpha$ )要求为  $16^\circ \sim 28^\circ$ ,使用环境温度为一  $55 \sim 70^\circ\text{C}$  之间,最高采用  $\tan \delta \geq 0.5$  以上的超高阻尼硅橡胶以满足黏弹阻尼器较高损耗角使用要求。

## 5 展望

阻尼硅橡胶广泛应用于航空减振领域,各类硅胶减振器选用的阻尼硅橡胶损耗因子值取决于减振

系统共振放大倍数,在满足共振放大倍数的同时,应尽量降低其损耗因子。采用单一阻尼改性方法很难实现硅橡胶宽温域的阻尼性能,需从生胶改性、填料、硅氧烷阻尼剂等多方面着手,利用不同改性方式的协同作用实现硅橡胶宽温域阻尼调控。硅橡胶阻尼改性需要考虑相容性、物理力学性能、蠕变性能、高低温性能等,同时需要兼顾减振器产品的橡胶与金属粘接、耐高低温、低蠕变及高疲劳寿命使用要求。生胶合成过程中的阻尼改性、有机硅阻尼剂合成及白炭黑改性是有效提升硅橡胶阻尼性能的手段,具有一定的协同作用,且物理力学性能下降幅值小,是未来的主要发展方向。此外,苯基硅橡胶生胶及其改性阻尼硅橡胶,在室温以上随着温度上升时,损耗因子多呈下降趋势,其高温阻尼特性调控也是需要解决的关键问题。

#### 参考文献:

- [1] 龚积球, 龚震震, 赵熙雍. 橡胶件的工程设计及应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003: 173-175.
- [2] Zhu L, Zhao S G, Zhang C, *et al.* Effects of chain structure on

- damping property and local dynamics of phenyl silicone rubber: insights from experiment and molecular simulation[J]. *Polymer Testing*, 2021, 93: 106885-106894.
- [3] Yu F M, Lu A, Lu J L, *et al.* effect of phenyl content, sample thickness and compression on damping performances of silicone rubber: a study by dynamic mechanical analysis and impact damping test[J]. *Polymer Testing*, 2019, 80: 106101-106108.
- [4] 张颖. 高阻尼硅橡胶的制备与性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2015: 24-31.
- Zhang Y. Synthesis and research on properties of high damping silicone rubber[D]. Jinan: Shandong University, 2015: 24-31.
- [5] Brewer J R, Tsuchihara K, Mortita R, *et al.* Poly ( diethylsiloxane-co-ethylphenylsiloxane ) and poly ( diethylsiloxane-co-methylphenylsiloxane ): synthesis and characterization[J]. *Polymer*, 1994, 35: 5118-5123.
- [6] 王志勇. 单/双苯基并用及嵌段硅橡胶的阻尼性能研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020: 14-29.
- Wang Z Y. Study on the damping properties of single diphenyl and block silicone rubber[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020: 14-29.
- [7] Cong L, Xu S A, Xiao F Y, *et al.* Dynamic mechanical properties of chlorinated butyl rubber blends[J]. *European Polymer Journal*, 2006, 42: 2507-2514.
- [8] 卢珣, 李涛, 陶刚, 等. 改性硅橡胶宽温域阻尼材料研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2016, 37(1): 92-97.
- Lu X, Li T, Tao G, *et al.* Study of modified silicone rubber damping materials with a wide temperature range[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2016, 37(1): 92-97.
- [9] Wang Y B, Huang Z X, Zhang L M. Damping properties of silicone rubber/polyacrylate sequential interpenetrating network[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2007, 16: 517-520.
- [10] 刘宇, 唐小斗, 周远建, 等. 苯基硅橡胶-聚氨酯共混体系阻尼性能的研究[J]. *有机硅材料*, 2009, 23(3): 135-139.
- Liu Y, Tang X D, Zhou Y J, *et al.* Study on the damping properties of polyurethane elastomer/phenyl silicone rubber blends[J]. *Silicone Material*, 2009, 23(3): 135-139.
- [11] Wei J, Ma Y C, Yang H, *et al.* Enhanced mechanical strength and water resistance in waterborne polyurethanes through hydroxyl-functionalized MQ silicone resin modification[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2024, 194: 108555-10866.
- [12] Wang Y B, Huang Z X, Zhang L M. Study on damping properties and thermal stability of polymethylvinylsiloxane/butyl composites[J]. *Materials Reports*, 2007, 21: 148-150.
- [13] Cui H, Jing Q, Li D, *et al.* Study on the high-temperature damping properties of silicone rubber modified by boron-terminated polysiloxane[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2023, 140: 53262-53272.
- [14] Zhao J, Jing N, Zhang D S, *et al.* Study on optimization of damping performance and damping temperature range of silicone rubber by polyborosiloxane gel[J]. *Polymer*, 2020, 12: 1196-1208.
- [15] Zhang Y L, Zang C G, Shi L P, *et al.* Preparation of boron-containing hybridized silicon rubber by in-situ polymerization of vinylphenyl-functionalized polyborosiloxane and liquid silicone rubber[J]. *Polymer*, 2021, 219: 123541-123551.
- [16] Sheth J P, Yilgor E, Erenturk B, *et al.* Structure-property behavior of poly ( dimethylsiloxane ) based segmented polyurea copolymers modified with poly ( propylene oxide ) [J]. *Polymer*, 2005, 46: 8185-8193.
- [17] 米治安, 李学宽, 肇研. 多尺度改性航空硅橡胶宽温域阻尼材料[J]. *材料工程*, 2021, 49(12): 123-129.
- Mi Z A, Li X K, Zhao Y. Multi-scale modification of aerospace silicone rubber damping material with wide temperature range[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2021, 49 ( 12 ): 123-129.
- [18] 李志鹏, 卢珣, 陶刚, 等. 含悬挂链无规网络硅橡胶的制备及阻尼性能[J]. *高分子材料科学与工程*, 2015, 31(8): 38-49.
- Li Z G, Lu X, Tao G, *et al.* Preparation and properties of cationic silicone rubber-modified silica sol emulsion[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2015, 31(8): 38-49.
- [19] Huang B, Dai L, Chen Z Q, *et al.* Role of in-situ polymethylmethacrylate in addition type silicone rubber with specific reference to adhesion and damping properties[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, 138: 50252-50264.
- [20] Ma M, Wang X D. Preparation microstructure and properties of epoxy-based composites containing carbon nanotubes and PMN-PZT piezoceramics as rigid piezo-damping materials[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2009, 116: 191-197.
- [21] Sharma S K, Gaur H, Kulkarni M, *et al.* PZT-PDMS composite for active damping of vibrations[J]. *Composites Science and Technology*, 2013, 77: 42-51.
- [22] 孙攀, 解希铭, 刘莘, 等. 白炭黑/硅土并用比对阻尼硅橡胶性能的影响[J]. *有机硅材料*, 2022, 36(6): 19-24.
- Sun P, Xie X M, Liu P, *et al.* Effect of blend ratio of silica/mineral silica on properties of damping silicone rubber[J]. *Silicone Material*, 2022, 36(6): 19-24.
- [23] 穆洪帅, 肖同亮, 翟继芹, 等. 宽温域高阻尼硅橡胶材料研究及应用[J]. *特种橡胶制品*, 2020, 41(5): 21-25.
- Mu H S, Xiao T L, Zhai J Q, *et al.* The study and application of silicone rubber with high damping property in wide temperature range[J]. *Special Purpose Rubber Products*, 2020, 41 ( 5 ): 21-25.
- [24] 涂春潮, 郭瑞毅, 余贝贝, 等. 石墨弹出阻尼硅橡胶材料的动

- 态力学性能研究[J]. 橡胶工业, 2022, 69(8): 572-576.
- Tu C C, Guo R Y, Yu B B, *et al.* Study on dynamic mechanical properties of damping silicone rubber material filled with graphite[J]. China Rubber Industry, 2022, 69 (8): 572-576.
- [25] Ren F M, Yang Z Z, Ma H H, *et al.* Enhanced damping and thermal conductivity of hbn/silicone rubber composites via strong interfacial action[J]. Materials Research Express, 2022, 9: 46303-46313.
- [26] 段宇星, 赵苗苗, 苏渤. 芳纶短纤维增强硅橡胶阻尼材料的制备及性能研究[J]. 有机硅材料, 2020, 34(2): 22-27.
- Duan Y X, Zhao M M, Su B. Preparation and properties of aramid short fiber reinforced silicone rubber damping materials[J]. Silicone Material, 2020, 34(2): 22-27.
- [27] 程卫平, 周传忠, 史朝龙, 等. 碳纳米管/硅橡胶复合材料的阻尼性能研究[J]. 化工机械, 2021, 41(5): 21-25.
- Cheng W P, Zhou C Z, Shi C L, *et al.* Study on damping properties of carbon nanotubes/silicone rubber composites[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2021, 41(5): 21-25.
- [28] 穆洪帅, 宋大龙, 李远, 等. 一种橡胶复合材料及其制备方法: 中国, 113698766[P]. 2023-03-24.
- [29] Han X Y, Zheng W, Hao J H, *et al.* Enhancing the damping and mechanical properties of phenyl silicone rubber by introducing phenyl mq silicone resins as molecular fillers[J]. Composites Communications, 2024, 51: 102082-102088.
- [30] 黄自华, 李远, 穆洪帅, 等. 一种用于硅橡胶的阻尼剂、硅橡胶材料及制备方法: 中国, 112280309[P]. 2022-12-13.
- [31] 陶刚. 硅橡胶阻尼材料的制备及研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014: 51-57.
- Tao G. Preparation and study of damping material based on silicone rubber[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014: 51-57.
- [32] 王秋龙, 王锐, 韩云龙, 等. EVA/硅橡胶共混材料的阻尼性能研究[J]. 有机硅材料, 2022, 36(1): 42-46.
- Wang Q L, Wang R, Han Y L, *et al.* Research on damping performance of eva/silicone rubber blends[J]. Silicone Material, 2022, 36(1): 42-46.
- [33] 米志安, 涂春潮, 裴高林. PS树脂对硅橡胶板式阻尼器阻尼性能的影响[J]. 特种橡胶制品, 2009, 36(6): 45-46.
- Mi Z A, Tu C C, Pei G L. Effect of PS resin on damping properties of silicone rubber plate damper[J]. Special Purpose Rubber Products, 2009, 36(6): 45-46.
- [34] 张志杰, 刘伯峥, 张学忠, 等. 一种改性白炭黑及其制备方法、硅橡胶: 中国, 108559274[P]. 2021-05-04.
- [35] Liu B Z, Gao X Y, Zhao Y F, *et al.* Prospect of 9, 10-dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene 10-oxide-based oligosiloxane in the preparation of high damping methyl phenyl vinyl silicone rubbers with broad temperature range[J]. Journal of Materials Science, 2017, 52: 13307-13317.
- [36] Liu B Z, Gao X Y, Zhao Y F, *et al.* 9, 10-dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene 10-oxide based oligosiloxane as a promising damping additive for methyl vinyl silicone rubber (VMQ)[J]. Journal of Materials Science, 2017, 52: 8603-8617.
- [37] 段宇星, 赵云峰, 赵苗苗, 等. DOPO超分子作用阻尼硅材料的动态力学性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(5): 136-146.
- Duan Y X, Zhao Y F, Zhao M M, *et al.* dynamic mechanical properties of damping silastic in DOPO supermolecule interaction[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36(5): 136-146.
- [38] Kashif M, Asma S, Hammad S, *et al.* Modification of silicone rubber by nanocomposites for enhancing physicochemical properties: a review[J]. Materials Science and Engineering B, 2024, 310: 117664-117682.
- [39] 舒峻, 黄光速, 张光亚, 等. 锆钛酸铅对苯基硅橡胶阻尼性能的影响[J]. 合成橡胶工业, 2012, 36(6): 458-462.
- Shu J, Huang G S, Zhang G Y, *et al.* Influence of lead zirconate titanate on damping property of phenyl silicone rubber[J]. China Synthetic Rubber Industry, 2012, 36 (6): 458-462.
- [40] Wang J J, Deng Q J, He Y Y, *et al.* Phase structures, loss storage, damping, noise absorption, and mechanical properties of nano-graphite/lead zirconium titanate/room-temperature vulcanized silicone rubber composites[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023, 32: 2280-2287.
- [41] Zhu L, Chen X, Shi R R, *et al.* Tetraphenylphenyl-modified damping additives for silicone rubber: experimental and molecular simulation investigation[J]. Polymer Testing, 2021, 93: 106885-106894.
- [42] 赵艳芬, 孙全吉, 黄艳华, 等. 多苯基聚硅氧烷对硅橡胶阻尼性能的影响[J]. 有机硅材料, 2012, 26(6): 387-391.
- Zhao Y F, Sun Q J, Huang Y H, *et al.* Effect of modified polysiloxane on damping properties of silicone rubber[J]. Silicone Material, 2012, 26(6): 387-391.
- [43] 陈欣. 阻尼硅橡胶的制备及性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2017: 49-53.
- Chen X. Preparation and research on properties of damping silicone rubber[D]. Jinan: Shandong University, 2017: 49-53.
- [44] 李锐锐. 直升机旋翼阻尼器非线性动力学特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015: 5-12.
- Li R R. Research on helicopter rotor lead-lag damper nonlinear dynamics characteristics[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015: 5-12.
- [45] 吴晓莉. 粘弹减摆器参数影响分析与试验研究[D]. 南京: 南

京航空航天大学, 2009: 17-19.

Wu X L. Parameter analysis and trial of the elastomeric lag

damper[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009: 17-19.

## Damping Silicone Rubber and Its Application Progress in the Field of Aviation Vibration Reduction

Yuan Li<sup>1</sup>, Zheng Cao<sup>1</sup>, Jingjin Huang<sup>2</sup>, Huawei Zou<sup>3</sup>, Zhangyang Xia<sup>1</sup>, Kebin Yang<sup>2</sup>, Yinqiao Zhao<sup>2</sup>  
Shuang Xia<sup>3</sup>, Zihua Huang<sup>1</sup>, Yuan Gu<sup>1</sup>, Zhiguang Zhang<sup>1</sup>, Jun Yang<sup>1</sup>

(1. Zhuzhou Times New Material Technology Co. Ltd., Zhuzhou 412007, China; 2. Sichuan Coremer Materials Co. Ltd., Mianyang 621000, China; 3. Polymer Research Institute of Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**ABSTRACT:** Damping silicone rubber is a kind of organosilicon polymer composite material with certain damping property, which is composed of silicone raw rubber, reinforcing filler, damping agent, vulcanizing agent and other additives. It was used in the field of aviation vibration reduction widely, because of its excellent high and low temperature resistance and damping adjustability with wide temperature range. This paper reviewed design features and damping mechanism of damping silicone rubber in the field of aviation vibration reduction. The preparation method of damping silicone rubber and its development status at home and abroad were introduced in detail from modified raw rubber, filler and silicone damping agent and so on, and the applications of damped silicone rubber in main aircraft engine and auxiliary power unit, airborne equipment, instruments and apparatus, passenger cabin and rotorcraft were introduced briefly. Finally, the preparation and application of damping silicone rubber were prospected, in order to provide reference for the development of damping materials and damping products selection.

**Keywords:** damping silicone rubber; vibration reduction in aviation; modified raw rubber; filler; silicone damping agent; damper