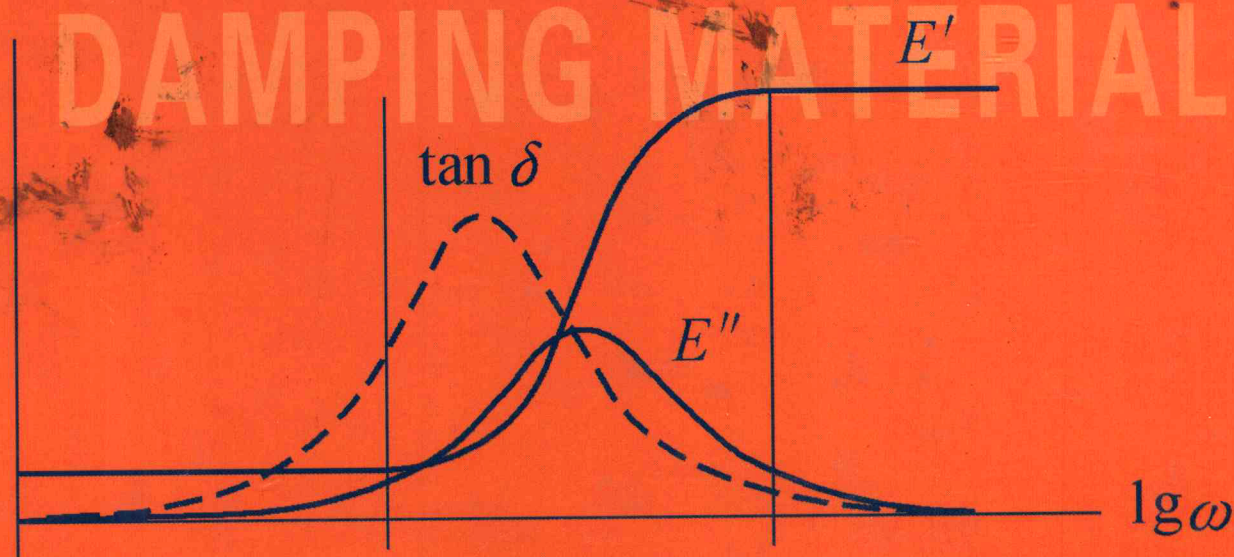


$\lg E$



VISCOELASTIC DAMPING MATERIALS

粘弹性阻尼材料

中国船舶重工集团公司
第七二五研究所

常冠军 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

粘弹性阻尼材料

Viscoelastic Damping Materials

中国船舶重工集团公司
第七二五研究所

常冠军 主编

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书全面系统地论述了粘弹性阻尼材料的阻尼原理、配方设计方法和设计程序、各种类型阻尼材料的制造工艺、阻尼性能的特征和测试方法、常用阻尼结构及其计算方法、阻尼材料的应用技术、施工工艺和工程模拟考核与验证方法以及粘弹性阻尼材料的发展趋势等。本书的附录介绍了评价粘弹性阻尼材料主要性能的试验方法。

本书内容包含粘弹性阻尼材料的基础理论知识和专业技术知识,并与振动控制理论有机融合,具有较强的实用性,可供从事粘弹性阻尼材料研究、生产的技术人员,以及从事减振降噪工程的研究设计人员使用,也可供从事水声材料研究的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

粘弹性阻尼材料/常冠军主编. —北京:国防工业出版社,2012.10
ISBN 978-7-118-08426-9

I. ①粘... II. ①常... III. ①粘性阻尼—工程材料 IV. ①TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 235691 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 21 $\frac{3}{4}$ 字数 512 千字

2012 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 98.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

谨以本书的出版

向中国船舶重工集团公司第七二五研究所建所50周年献礼

Viscoelastic Damping Materials

编委会

主 任 孙建科

副主任 马玉璞 张 霞 常冠军 张用兵

委 员 (按姓氏笔画为序)

马玉璞 王雯霏 孙建科 李宏伟 林新志

张 霞 张用兵 侯永振 郭万涛 常冠军

编写人员 (按姓氏笔画为序)

马玉亮 马玉璞 王 兵 王绪文 王雯霏

韦 璇 孙英富 李宏伟 张用兵 陈 磊

林新志 赵树磊 侯永振 郭万涛 梁 磊

常冠军 程 伟



材料是国民经济、工农业生产和国防工业发展的重要物质基础。材料技术被世界先进国家列为 21 世纪国家重点发展的关键技术之一,它关系到国家经济的发展水平、科学技术进步程度以及国家安全。

中国船舶重工集团公司第七二五研究所(以下简称七二五所),作为一个专业从事海军武器装备材料研制和工程应用研究的军工研究所,长期以来研究及合作研究的舰船材料为海军武器装备的研制提供了强有力的物质和技术支撑,为海军装备现代化和信息化发展做出了应有贡献。经过多年的发展,七二五所贯彻科技为本、军民结合的方针,着力实行技术创新、科技成果转化和高科技产业化发展模式,拓展了专业技术领域,扩大了应用和服务范围。从研究金属、非金属和防腐防污材料发展到研究复合材料、信息材料、功能材料、生物材料、纳米材料等;从单纯研制材料扩大到研制和规模生产材料制品、舰船武器装备和民用工业产品;应用、服务范围从舰船扩大到船舶、航空、兵器、核工业、冶金、化工、电力、交通运输和环保医疗等部门以及国外市场。自 1961 年建所至今,已历 50 个春秋,七二五所已初步建成了国内领先、国际一流的集科研和多个高技术产业公司为一体的高科技产业集团。

当此之际,七二五所组织所内科技人员和专家教授,把建所 50 年来在舰船及其他材料技术和工艺的科研成果和经验,尤其是改革开放以来研究的新材料、新技术、新工艺及其工程应用的成果和经验加以总结,编纂成系列书籍,陆续出版发行,献给与这些工作有关的创业者、未来工作的参与者以及关心此项事业的朋友们,以促进舰船工业和其他工业的发展。七二五所建所 50 周年材料科技工程系列书籍中,已出版和即将出版的有:

《船用铝合金焊接及其船体建造工艺》,国防工业出版社,2004 年

《海水冷却系统的腐蚀及其控制》,化学工业出版社,2006 年

《防腐蚀涂装工程手册》,化学工业出版社,2007 年

《金属腐蚀显微组织图谱》,国防工业出版社,2008 年

《舰船船体结构钢》,国防工业出版社,2011 年

《爆炸焊界面相变与断口组织》,国防工业出版社,2011 年

《粘弹性阻尼材料》,国防工业出版社,2012 年

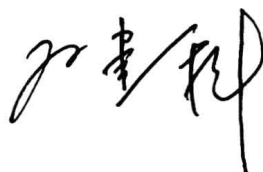
《舰船钛合金》,国防工业出版社,2012 年

这些专业书籍总结了我所科研人员在相关材料与工艺技术及其工程应用方面的重要成果、数据、信息和经验,也汇集了国内外一些先进的材料技术,并提出了我国有关材料未来发展的对策和方向,具有新颖性、先进性和实用性。可供舰船和有关其他材料的科研和管理人员参考使用,也可供舰船设计、建造和使用的工程技术人员及院校师生参考。

在编撰和出版这套系列书籍的过程中,得到有关部门和单位的支持和帮助。我们要感谢国防科技图书出版基金会的大力支持和帮助!感谢冶金、化工和船舶工业的有关研究院所和企事业单位的长期合作和支持!并对本系列书籍所引用文献资料的作者及本系列书籍的编写、编审人员和做过贡献的所有人员表示衷心的感谢!

限于编著人员水平,不足之处在所难免,敬请指正。

中国船舶重工集团公司
第七二五研究所 所长



前 言

粘弹性阻尼材料,它虽没有华丽多彩的外表,也没有灿烂耀眼的光芒,却具有不可小觑的神奇功能,它可使振动和噪声衰减或消失,可使敌艇声纳和水听器的效能降低……,这种其貌不扬的材料就是以高分子材料为基础的一种新型功能材料。大多数粘弹性阻尼材料状如厚橡胶板,也有的品种(如阻尼涂料)竟像是一堆黏糊糊的泥巴,可是每当振动和噪声大到使人无法忍受而造成严重危害的时候,人们便会不由地想到粘弹性阻尼材料。因为它是振动和噪声的克星,利用它可以使令人讨厌的振动和辐射噪声大大降低,改善人们的生活和工作条件,创造出宁静安谧的环境。军品的设计者和使用者更是喜欢它,利用它就能提高武器装备的隐蔽性和战斗性,以静制动,出奇制胜。

如果翻开粘弹性阻尼材料的历史,就会发现它发端于军事需求,又随着军事需求而不断发展、不断提高。粘弹性阻尼材料最早应用于舰艇,随后在航空、航天、兵器等领域广泛使用,迄今已逾半个多世纪。如今,粘弹性阻尼材料的应用虽已扩展到交通运输、机械制造、建筑等民用领域,但仍以军事应用为主,其中更以各类舰艇尤其是潜艇应用居多。众所周知,当代军事信息化的发展日新月异,甚至已超越其他领域的发展。现代武器装备的作战性能已得到空前的提高,但其隐蔽性却是头等大事。在战场上,“只要发现它,就一定能消灭它”已经不是空话,而是当下战争的现实。无论武器装备多么先进,一旦暴露了,“被发现”了,就处于被动挨打的境地,很可能会丧失战斗力,其处境犹如穿越开阔地的战士一样危险。相反,隐蔽性好,“不被发现”,就能使自己处于积极主动的地位,也就掌握了先敌发现和制胜的战机。粘弹性阻尼材料正是帮助舰艇做到“不被发现”的功能材料,好似穿在舰艇上的隐身衣一般,不但不会被敌人发现,还可以靠近敌人,出其不意打它个措手不及。

粘弹性阻尼材料的亮点不仅仅在于它的功能,更在于它的简单易行,价格低廉,是一种名副其实的既经济又行之有效的技术手段。只要在振动的金属结构上粘贴或涂敷一层粘弹性阻尼材料,增加结构的阻尼,就可以抑制共振的峰值,减少振动沿结构的传播,降低结构噪声,达到改善环境或实现武器装备安静化的目的。粘弹性阻尼材料适用于一切减振降噪工程,通过科学合理的配合和调节,可以制作出不同场合、不同温度或不同频率使用的粘弹性阻尼材料。

粘弹性阻尼材料在国外已应用半个多世纪,在我国也有近 40 年的历史,改革开放以来,无论在理论上还是在实践中都取得了长足的进步,但迄今国内尚无粘弹性阻尼材料的专门著述。为了提高我国粘弹性阻尼材料的研究和应用技术水平,我们在阅读大量国内外文献的基础上,总结了粘弹性阻尼材料研究和应用的成果和经验,编写了《粘弹性阻尼材料》一

书,填补了国内空白。本书以粘弹性阻尼材料为中心,兼顾振动控制的相关理论,将阻尼材料和振动控制有机融合在一起,在国内首次全面系统地论述了粘弹性阻尼材料从生产到应用的理论和实践问题,反映了当前的研究和应用水平以及发展动态,有较强的理论性和实用性,可供从事减振降噪治理工程的同行们使用和参考。

本书共分九章和一个附录。第一章至第九章包括如下内容:粘弹性阻尼材料的阻尼原理和制造方法;粘弹性阻尼材料阻尼性能的特征和测试方法;常用阻尼结构和计算方法;粘弹性阻尼材料的模拟试验技术;粘弹性阻尼材料的实际应用技术;粘弹性阻尼材料的发展趋势。附录介绍了粘弹性阻尼材料的主要性能及其试验方法。

在本书编写过程中,中国船舶重工集团公司第七〇一研究所伏同先研究员为第八章第一节和第二节提供了许多宝贵的素材,并对第八章第三节和第九章提出了修改意见;中国科学院声学研究所张同根研究员对第二章、第六章和第七章提出了许多宝贵的修改意见;中国船舶重工集团公司第七二五研究所各级领导对本书的编写和出版给予了极大的关怀和热诚的支持,中国船舶重工集团公司第七二五研究所第三研究室减振降噪部的全体同志参与了本书的编写,侯永振研究员对全书多处提出了修改意见,曹声驹研究员对本书的编辑工作提出了许多建设性的意见,陈磊工程师对电子文档的编辑给予了很多的帮助,张玲工程师为文献、资料的收集和检索做了大量的工作,魏俊伟硕士研究生为本书绘制了部分曲线,在此一并表示衷心的感谢。

本书在编写过程中参考和引用了国内外大量的文献,在此谨向这些文献的作者表示最真挚的谢意。

由于本书涉及的专业学科较多,编著者的学识有限,舛误和不妥之处在所难免,敬请同行不吝赐教,随时指出斧正,不胜感谢之至。

马玉璞
2012年6月

目 录

第一章	绪论	1
	参考文献	8
第二章	聚合物的阻尼原理	9
	第一节 聚合物的分子结构	10
	第二节 聚合物的分子运动	12
	第三节 阻尼性能的定量分析方法	21
	第四节 聚合物的力学行为	27
	参考文献	37
第三章	粘弹性阻尼材料配方设计	39
	第一节 粘弹性阻尼材料的基本要求	39
	第二节 粘弹性阻尼材料配方的组成	44
	第三节 粘弹性阻尼材料常用聚合物的确定	47
	第四节 聚合物的并用和共混	61
	第五节 聚合物的分子设计和改性	66
	第六节 主要配合剂的确定	74
	第七节 粘弹性阻尼材料配方设计的程序	84
	参考文献	87
第四章	粘弹性阻尼材料制造工艺	91
	第一节 粘弹性阻尼材料的分类和基本制造方法	91
	第二节 橡胶型阻尼材料的制造工艺	95
	第三节 多层复合阻尼材料的粘接复合工艺	121
	第四节 阻尼涂料的制造工艺	136
	第五节 阻尼复合材料的制造工艺	141
	参考文献	146
第五章	粘弹性阻尼材料性能表征和测试	148
	第一节 阻尼材料的动态力学性能	148
	第二节 粘弹性阻尼材料的动态力学谱	152
	第三节 阻尼材料的主曲线	154

第四节	阻尼材料的 H-N 模型曲线	163
第五节	阻尼材料动态力学性能的测定方法	168
第六节	各种阻尼特征值间的相互转换关系	179
第七节	粘弹性阻尼材料的复泊松比	181
第八节	粘弹性阻尼材料的老化和动态疲劳性能	188
参考文献		203
第六章	阻尼结构	207
第一节	结构振动	207
第二节	阻尼结构的特点	228
第三节	阻尼结构计算	233
参考文献		248
第七章	粘弹性阻尼材料工程模拟考核与验证	249
第一节	施工工艺模拟试验	249
第二节	减振效果试验	256
第三节	振动模态试验	270
第四节	水下模拟试验	275
参考文献		280
第八章	粘弹性阻尼材料应用技术	281
第一节	粘弹性阻尼材料在减振降噪工程中的作用和意义	281
第二节	阻尼减振基本原理和阻尼处理的一般规则	283
第三节	板(或带)型阻尼材料施工工艺	285
第四节	阻尼材料的应用方式	292
第五节	阻尼材料应用实例	301
参考文献		307
第九章	粘弹性阻尼材料发展趋势	308
第一节	传统型粘弹性阻尼材料	308
第二节	压电阻尼材料	311
第三节	振动的主动控制及智能型阻尼材料	315
第四节	主动约束阻尼结构	320
第五节	仿生阻尼材料	324
第六节	声子晶体和用于阻尼材料展望	327
参考文献		333
附 录	粘弹性阻尼材料的主要性能及其试验方法	336

第一章 绪 论

随着国民经济的飞速发展以及高速机械的广泛使用,振动和噪声的污染日益严重,成为社会公害之一,备受各国政府的重视。振动和噪声常常连在一起,振动可引起噪声(是一种无规律不协调的振动),噪声又可转化为振动,因此,振动和噪声的危害以及振动和噪声的治理也密切相关。

一、振动和噪声的危害

振动和噪声的危害主要表现在以下方面。

1. 对人肉体和精神(心理)上的伤害

振动和噪声能损坏人的听力和神经系统,使人心情烦躁,工作效率降低,甚至精神失常、头晕、胃口不佳、血压上升、心悸等,以致引起职业病。长期暴露于振动和噪声环境中可引起呼吸系统、心血管系统功能的改变,甚至会引起皮炎等症状。振动和噪声对人的危害随着频率的升高而加重。

2. 干扰设备、仪器仪表的正常使用

宽频带的随机振动可以引发结构的多级共振,使设备、仪器、仪表难以正常工作,降低设备的精度与可靠性,尤其在通过共振区时,严重的晃动会损坏设备、仪器、仪表,仪表的指针不能指示在准确的位置,操作人员难以做出正确的判断。例如,振动和噪声对于船舶的观通设备有严重的干扰,影响声纳的正常工作,不易发现敌舰,贻误战机。还有报道说,卫星事故中约有 60% 的故障也与振动和噪声有关^[1]。

振动不仅干扰设备、仪器、仪表的使用功能,还会明显缩短其使用寿命。

3. 降低武器装备的隐蔽性

振动和噪声对作战舰艇的危害更大,降低了舰艇的隐蔽性,暴露了目标,使之处于被动挨打的地位。由此可见,控制舰艇的振动和噪声就是提高其战斗力。

二、振动和噪声及减振降噪材料的分类

振动和噪声污染与其他污染不同,它不是物质的扩散和蓄积,而是能量的扩散,是物质状态的变化^[2]。因此,控制振动和噪声的技术与控制其他公害的技术有本质上的不同。噪声根据其传播途径的不同,可分为空气传播、固体传播和水中传播(或其他液体传播)等,分别形成空气噪声、结构噪声和水中噪声。不同传播途径的噪声可以相互转化,例如空气噪声可引起结构件的振动并辐射出噪声,称为二次固体传播噪声;结构噪声辐射到空气中可成为空气噪声,辐射到水中则形成水下噪声。振动和噪声的传播途径不同,治理的方法也不同,但都可以采用减振降噪材料来治理。根据传播途径、治理对象和功能的不同,减振降噪材料分为吸声材料、隔声材料、阻尼材料和隔振材料,可统称为声学材料,如表 1-1 所列。

表 1 - 1 减振降噪材料的分类

材料类别	功 能	传播途径	治理对象
吸声材料	能量吸收	空气,水	空气噪声,水下噪声
阻尼材料(减振材料)	能量吸收	固体或结构	结构噪声
隔声材料	能量反射	空气,水	空气噪声,水下噪声
隔振材料	能量反射	固体或结构	结构噪声

从表 1 - 1 可见,振动和噪声的传播途径(即传播介质)不同,治理的方法也不同。图 1 - 1 所示为声音和振动在空气中传播和固体中传播及其治理方法的示意图^[3],吸声材料和隔声材料用于控制空气噪声和二次固体噪声,而阻尼材料和隔振材料则用于控制结构噪声或固体噪声。

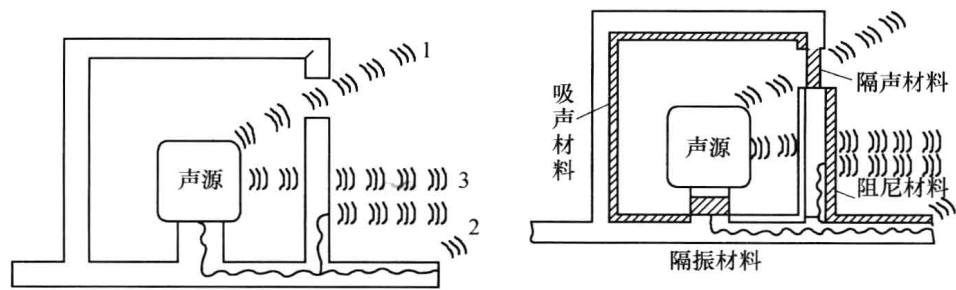


图 1 - 1 声音和振动的传播途径及其控制方法示意图
1—空气噪声;2—结构噪声;3—二次固体噪声。

三、减振降噪技术

从图 1 - 1 可知,吸声材料能将空气噪声吸收而不反射,常用于室内消声处理,吸声材料多为多孔材料;隔声材料能隔断声音在空气中的传播,一般采用高密度的隔声障板;阻尼材料(减振材料)能抑制固体结构的振动,将振动能转化为热能,一般采用粘弹性阻尼材料;隔振材料(防振材料)则隔断振动的传播,使其不向其他结构件传播,一般采用防振橡胶。不同用途的声学材料,其结构和技术要求各不相同。粘弹性阻尼材料对控制固体传播的结构振动和二次激发的结构振动有效,而控制固体传播的结构振动在工程上具有非常重要的意义。

- 对于结构振动或结构噪声的治理很早就受到人们的关注,主要的技术措施有:
- (1) 改变结构的刚度和质量,使结构固有频率与设备的干扰频率错开,减少振动的响应;
 - (2) 改变结构的连接形式,变刚性连接为弹性连接,改变局部结构的振动特性,降低振动加速度,阻断振动的传递;
 - (3) 改变结构的阻尼特性,用高阻尼钢代替普通钢制作基座等结构,吸收和消耗振动的能量;
 - (4) 在结构上贴敷粘弹性阻尼材料,吸收和消耗振动的能量;
 - (5) 采用复合型高阻尼结构材料制造结构,吸收和消耗振动的能量。

这些技术措施可统称为减振降噪技术。其中,用阻尼材料进行减振处理是减振降噪技术的主要技术措施之一,是控制振动和噪声传播的重要手段,也是最经济、最简便、最有效的方法,在减振降噪技术中占有重要的地位。

阻尼材料是一种振动衰减材料,在机械振动传递过程中具有消耗应变能的能力,使结构的共振频率降低或转移,故又称为减振材料、制振材料。由于材料的阻尼,在自由振动中造成振幅的衰减,在强迫振动中产生响应振幅的抑制或形变相位落后于外加载荷,达到振动衰减的目的。阻尼材料可分为金属型阻尼材料和非金属型阻尼材料两大类。金属型阻尼材料也称为高阻尼合金,其内耗比作结构材料使用的金属材料要大得多,能有效地吸收振动能量,减少机械振动和噪声的传播。金属型阻尼材料按其材质可细分为钢基、铜基、铝基等,如 Fe - C、Fe - Co、Fe - Mo、Mn - Cu、Mg - Zr、Fe - Cr - Al 等。根据阻尼机理,可把高阻尼合金分为四种类型^[4]:李晶型、铁磁性型、位错型、复相型。不同类型的阻尼合金,其阻尼机理也不同:李晶型高阻尼合金的阻尼机理是热弹性型马氏体相变李晶的间界或母相与马氏体间的间界,在应力作用下容易移动,使应力松弛,典型的合金是 Mn - Cu 系合金, Mn - Cu 属于双晶系,如英国的 sonostone,其拉伸强度 588MPa,比阻尼能力 SDC(或 ψ) $\approx 40\%$;铁磁性型阻尼合金的阻尼机理是磁 - 机械磁滞和涡流损失,并以磁 - 机械磁滞为主,如 Fe - Co、Fe - Mo、Fe - Cr - Al 等即为铁磁性型阻尼合金,代表性的合金是 Fe - 12Cr - 3Al,铁磁性型阻尼合金的阻尼能力与 Mn - Cu 系相当;位错型阻尼合金的阻尼机理是在外力作用下,位错在晶体中移动,由此产生有时间滞后的应变,代表性的合金是 Mg - Zr(如 Mg - 0.6Zr),如美国的 KIXI 即为位错型阻尼合金,其 $\sigma_b \approx 196$ MPa, SDC $\approx 60\%$;复相型阻尼合金的阻尼机理是在振动应力的作用下,合金坚韧的基体有软质的第二相,基体和第二相的界面或第二相内部会产生塑性变形,在应力 - 应变关系上出现非线性项,结果使振动能量的一部分在材料内部变为热能而散逸,代表性的合金是铸铁(Fe - C)、Al - Zn 等, Fe - C 的 SDC 为 15% ~ 30%。

高阻尼合金与普通金属材料相比具有较高的阻尼性能,但与非金属型阻尼材料相比却要逊色得多,甚至低一二个数量级,更存在腐蚀、焊接等技术问题,因此在工程上的应用远不如非金属型阻尼材料广泛。非金属型阻尼材料中最广泛使用的是粘弹性阻尼材料,具有更高的减振降噪能力。

粘弹性材料有很多种,如高分子材料、玻璃、陶瓷、水泥等。其中,高分子材料的粘弹性更为突出,内耗更大,阻尼作用更强,最适合制作阻尼材料。粘弹性阻尼材料通常就是指以高分子材料为主要成分的阻尼材料,是目前工程上应用最广泛的减振降噪材料,本书将对粘弹性阻尼材料进行全面的论述。

四、粘弹性阻尼材料的特点、类型和阻尼作用机理

粘弹性阻尼材料是高分子聚合物和各种添加剂的复合体系,其阻尼性能主要源于聚合物的内耗。高分子聚合物同时具有黏性液体和弹性固体的特征,当振动力作用于粘弹性聚合物时,聚合物内部产生拉伸变形、弯曲变形或剪切变形,作用于聚合物弹性成分的机械能可以像位能那样被储存起来,外力除去后又释放出去,重新返回外界,变形恢复,材料表现为弹性;而作用于黏性成分的机械能不能返回外界,转化为热能而被耗散掉,变形不能恢复,振动的幅值随时间迅速衰减。这种能量的转换和耗散,就是减振作用,亦称阻尼作用,辐射的噪声也因此而降低,这就是结构的减振和降噪。从共振的角度看,固体质点在振动能作用下

产生共振,并辐射出噪声,阻尼材料的作用就是使固体质点的共振峰值降低,减小辐射噪声。

然而,并非所有聚合物都可以直接用于制作阻尼材料,而且并非聚合物的所有力学状态都具有阻尼作用,只有那些结晶度不高或交联度不高的聚合物在由玻璃态向橡胶态的力学转变过程中(这个转变范围称为玻璃化转变区)才具有较高的内耗,即具有较大的阻尼作用,因此粘弹性阻尼材料是其工作温度范围与玻璃化转变区温度范围重合的材料。一个性能优良的阻尼材料不仅要求其玻璃化转变区的温度范围与工作温度范围一致、阻尼能力强,还要求其有效的阻尼温度范围和频率范围要宽,这些基本要求无论对阻尼材料的研究还是应用都是非常重要的。粘弹性阻尼材料研究的基本目标就是运用物理的和化学的方法将高分子聚合物的玻璃化温度调整到工作温度范围,提高其阻尼性能,拓宽其有效阻尼温度范围和频率范围。

粘弹性阻尼材料的阻尼能力用其动态力学性能表征,基本参数是动态模量和损耗因子,如式(1-1)和式(1-2)所示。

$$M^* = M' + iM'' = M'(1 + i\beta) \quad (1-1)$$

$$\beta = \tan\delta = \frac{M''}{M'} \quad (1-2)$$

式中 M^* ——复数模量,简称复模量(Pa);

M' ——复模量的实部,称储能模量(Pa);

M'' ——复模量的虚部,称损耗模量(Pa);

i ——虚数单位, $i = \sqrt{-1}$;

$\beta(\tan\delta)$ ——损耗因子(无量纲);

δ ——相位角(也称损耗角)[弧度(rad)]。

损耗因子是能量损耗和阻尼能力的直接量度,阻尼材料在使用温度和频率范围内应具有较高的损耗因子和相应的弹性模量。粘弹性阻尼材料动态力学性能(模量和损耗因子)通常采用强迫非共振法和共振曲线法测定,强迫非共振法可直接测定粘弹性阻尼材料自身的动态力学性能,所用的仪器称粘弹谱仪,如法国的 01-dB Metrabi 的 DMA 粘弹谱仪、日本 Rheovibron 的 DDV 型粘弹谱仪、美国的 TA 和 DMTA 等;共振曲线法亦称悬臂梁法,通常(多数情况下)测得的是粘弹性阻尼材料和金属复合梁的动态力学性能,测试仪器一般由激励和检测等部分构成。ISO 国际标准化组织和国内已制定出两种方法适用的测试标准。

在实际工程应用中,粘弹性阻尼材料一般不作为承力材料使用,而是附加在承力结构即振动的金属结构上,阻尼材料与金属结构构成阻尼复合结构。常用的阻尼复合结构有自由型阻尼结构和约束型阻尼结构两种:在振动结构外表面直接附加一层损耗模量较大的阻尼材料便构成自由型阻尼结构,如图 1-2 所示;在粘弹性阻尼层外面再加一层弹性模量高的材料(称为约束层或约束板,通常为钢板或铝板),即构成约束型阻尼结构,又称为夹心阻尼结构,如图 1-3 所示。

自由阻尼结构简便易行但效果差些,约束阻尼结构效果显著,但处理起来较麻烦,实践中应根据具体情况做出恰当的选择。自由阻尼结构用的阻尼材料称为自由(型)阻尼材料,要求具有较高的损耗模量;约束阻尼结构用的阻尼材料称为约束(型)阻尼材料,要求具有较高的损耗因子。

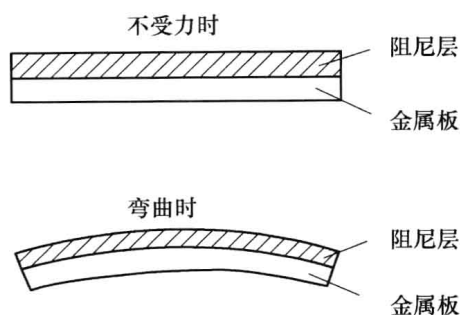


图 1-2 自由阻尼示意图

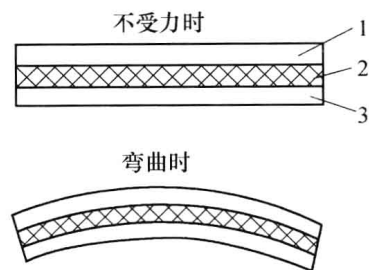


图 1-3 约束阻尼示意图

1—约束层;2—阻尼层;3—基层。

粘弹性阻尼材料以板(或带)和涂料等形式居多,有厚薄之分、单层和多层之分等。一般可按塑料、涂料和橡胶的加工工艺进行加工制造,常用的粘弹性阻尼材料多以橡胶为主要原料,故可按橡胶的加工工艺进行塑炼、混炼、硫化和粘接复合。

粘弹性阻尼材料既可直接作自由阻尼材料或约束阻尼材料使用,又可用于制造减振制品如隔振器、阻尼垫等。作自由阻尼材料或约束阻尼材料使用时,一般是借助胶粘剂与金属结构粘接复合(亦称胶接、粘合)。粘接质量的优劣直接影响减振效果和使用寿命,影响粘接质量的主要因素是金属结构的表面处理和胶粘剂的正确选择和使用。金属表面可采用物理的或化学的方法进行处理,包括除锈处理和除油处理,表面处理的质量是影响阻尼材料粘贴质量的主要因素。胶粘剂是粘接复合的基本材料,应正确使用胶粘剂,包括正确的选择、配制、涂敷、粘贴、固化(或硫化)等。

减振降噪技术是一项系统工程,包括阻尼减振设计、材料研究、施工工艺及试验测试技术等,阻尼减振设计和粘弹性阻尼材料的使用应发生在产品的设计之中。

五、粘弹性阻尼材料的发展进程和趋势

粘弹性阻尼材料的研究和应用有悠久的历史,早在 20 世纪 30 年代就有人用海绵橡胶作阻尼材料控制振动^[5],20 世纪 50 年代初,德国 H. Oberst 和法国 P. Lienard 首先发明了自由阻尼结构,并实际应用于工程中;20 世纪 60 年代美国 E. M. Kerwin、E. E. Ungar、J. E. Ruzicka 等又研究出约束阻尼结构,并应用于核潜艇。1969 年,美国 NASA 对各种梁和板结构编制了设计手册 NASA-CR1269,此后阻尼材料的研究和应用得到快速的发展,在阻尼理论、制造工艺、结构形式、测试方法以及应用技术如复模态试验分析、有限元分析预测等方面都取得了长足的进步,阻尼减振成为一门专门技术。美国是最早在潜艇(如潜艇的导流罩和上层建筑)、驱逐舰、破冰船、导弹、卫星、飞机上采用阻尼材料的国家。苏联在减振降噪技术和阻尼材料的研究领域同样取得了显著的成就,特别是在舰艇上大量应用阻尼材料,使舰艇的噪声明显降低。目前,粘弹性阻尼材料已广泛用在一切工业部门,尤其是航空、航天、船舶、交通(铁路车辆、汽车、道路、桥梁、隧道等)、机械以及建筑等工业部门。

粘弹性阻尼材料研究和应用受到各国的重视,国外许多大公司、高等学校和研究单位从事粘弹性阻尼材料的研究和阻尼减振技术的研究,阻尼材料已经商品化、系列化,新的品种、新的规格不断出现,如美国 3M、Soundcroad、DuPont 等 16 家公司生产的近 50 个牌号的阻尼

材料,可涵盖-173℃~900℃的温度范围。其中较著名的有3M公司的ISD系列阻尼材料,EAR公司的1000、2000、3000系列,Soundcoad公司的GP系列以及GE公司的SMRD等。

国内最早研究和应用阻尼材料的单位是上海开林油漆厂、中国科学院声学研究所等。20世纪50年代末,开林油漆厂在中国科学院声学研究所等单位协助下,研制出一种小轿车用的阻尼涂料,牌号为6731,后来又陆续研制出54-11、54-12、80-1、42-9、52-2、55-1等新品种。这些阻尼材料主要用在小轿车上,也可用在薄壳结构如电机和内燃机外壳等。20世纪70年代中国科学院力学研究所、航空航天部703研究所、北京橡胶工业研究院等单位开展了阻尼材料和阻尼技术的研究工作,对阻尼技术的基础理论、应用设计、阻尼材料的研究做了大量的工作,在航空航天领域广泛采用粘弹性阻尼材料。20世纪80年代初,中国船舶重工集团公司第七二五研究所和第七〇一研究所、中国科学院声学研究所共同开展了舰船结构的减振降噪研究,研制出一批适用的粘弹性阻尼材料,率先应用在舰艇上,取得了显著的效果。自20世纪80年代以来,国内开展粘弹性阻尼材料研究和应用的单位多达20多家,如无锡减振器厂、常州兰陵橡胶厂、中国科学院长春应用化学研究所、上海交通大学、西北工业大学、青岛海洋化工研究院、天津市橡胶工业研究所、同济大学等院所陆续开展了阻尼材料和阻尼技术的研究工作,在材料研究、减振理论、测试技术等方面取得了很大的成绩,开发出适合不同场合使用的粘弹性阻尼材料,有些材料的性能已达到了国外先进水平,使许多重要产品如导弹、卫星、火箭、飞机、舰船等的振动和噪声明显降低,收到了良好的社会效益和经济效益。

粘弹性阻尼材料在舰船减振降噪技术中得到广泛的应用,应用的数量也最多。国外舰艇用粘弹性阻尼材料的主要品牌如表1-2所列;国内舰艇用粘弹性阻尼材料的主要品牌如表1-3所列。

表 1-2 国外舰艇用粘弹性阻尼材料的主要品牌

国别	日本	日本	日本	美国	美国	美国	印度	印度
牌号	AC-60	EX-30	CF-4	丁腈橡胶 6100	丙烯酸 乙酯橡胶	ISOLOSS 系列 (聚氨酯)	NBR-PVC	NBR-PMMA 互穿网络 阻尼材料
材料 类型	片状 自由型	涂敷型	约束型	片状自由型	片状自由型	约束型	片状自由型	片状自由型
性能 参数	$\tan\delta_{\max} \geq 0.5$	$\tan\delta_{\max} \geq 0.3$	$\tan\delta_{\max} \geq 0.1$ 厚度比 16:9	4kHz 下 $\tan\delta_{\max} \geq 0.1$	20℃~80℃ $\tan\delta \geq 0.3$	0.025mm 镀铝聚酯薄 膜+2.54cm 阻尼层, 在 20℃, 1 kHz 下结 构损耗因 子 0.0072	90℃ 下, $\tan\delta_{\max} \geq 0.6$	-10℃ 下, $\tan\delta_{\max} \geq 0.45$
应用 部位	声纳舱	声纳舱	声纳舱	设备基座	设备基座	设备基座 舱壁板	设备基座 浮筏	设备基座