

ZIXIUUFU FUHE CAILIAO
SHACHEPIAN XINGNENG YANJIU

自修复复合材料 刹车片性能研究

张力 黄海明 著



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>

自修复复合材料 刹车片性能研究

张 力 黄海明 著

北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书系统地阐述了对自修复复合材料刹车片性能的研究。

全书共分 6 章, 主要内容为复合材料刹车片概论、自修复复合材料、自修复技术在摩擦材料中的应用研究、断裂力学的应用及微胶囊破裂验证、复合材料刹车片动态性能研究、复合材料刹车片振动噪声性能研究。

本书可供从事自修复复合材料研究及汽车刹车片设计、制造的科技工作者及高等院校相关专业师生阅读和参考。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

自修复复合材料刹车片性能研究/张力, 黄海明著. —北京: 北京交通大学出版社, 2013. 1
ISBN 978-7-5121-1346-6

I. ① 自… II. ① 张… ② 黄… III. ① 汽车-自生复合材料-制动片-性能-研究
IV. ① U463.55

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 011563 号

责任编辑: 赵彩云

出版发行: 北京交通大学出版社

电话: 010-51686414

<http://press.bjtu.edu.cn>

北京市海淀区高粱桥斜街 44 号

邮编: 100044

印刷者: 北京交大印刷厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×260 印张: 9.5 字数: 249 千字

版 次: 2013 年 4 月第 1 版 2013 年 4 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5121-1346-6/U·129

印 数: 1~1 000 册 定价: 32.00 元

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。

投诉电话: 010-51686043, 51686008; 传真: 010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

前 言

本书阐述了自修复摩擦材料的性能研究及应用,通过研究含修复剂的空心颗粒对裂纹尖端应力场的影响,进行了裂纹和内含修复剂的颗粒相交时系统的断裂力学分析,完成自修复材料修复机理与修变过程的理论研究。开展了摩擦材料、空心颗粒用材料的断裂力学分析。以自修复复合材料刹车片为研究对象,建立其有限元分析和动态实验的理论模型,得到新型刹车片在工作条件下的应力场和动态性能,制造自修复复合材料汽车刹车片。

本书汇集了近年来作者的研究成果,并参考了很多资料,全面、系统地论述了自修复复合材料刹车片性能研究,重点讨论了微胶囊自修复技术在刹车片中的应用研究,提出了一种全新的修复刹车片的方法,延长刹车片寿命,这是本研究成果具有的科学意义和理论价值。

在本书的撰写过程中,得到了孟春玲教授、汤晓华教授、张杨、田正兵、叶都长、马艳苗、吴宏、田野、陈凯、聂广远、张硕的大力协助,在此向他们深表感谢。

本书获得“北京市属高等学校人才强教计划资助项目”资助(编号:PHR201107110)。

由于本书涉及面广,限于作者水平,书中难免有不当之处,恳请读者不吝赐教。

作 者

2013年4月

目 录

第 1 章 复合材料刹车片概论 1	3.2 新型复合材料汽车刹车片的研制 26
1.1 引言 1	3.2.1 配方设计..... 26
1.2 制动器简介 2	3.2.2 工艺设计及主要生产设备..... 30
1.3 国内外汽车制动摩擦材料的研究概况 4	3.2.3 性能测试实验 32
1.4 国内外汽车制动振动与噪声的研究概况 5	3.2.4 成本核算..... 39
1.4.1 汽车制动振动与噪声 5	3.2.5 结论 40
1.4.2 汽车制动振动与噪声的研究现状 6	3.3 含自修复微胶囊新型复合材料的研制 40
第 2 章 自修复复合材料 8	3.3.1 微胶囊 40
2.1 自修复复合材料的研究现状 8	3.3.2 配方设计..... 41
2.2 智能自修复材料的自修复原理 ... 9	3.3.3 模具设计..... 42
2.2.1 分子间相互作用的修复机理 9	3.3.4 工艺设计及模压成型 44
2.2.2 液芯纤维自修复机理 10	3.3.5 性能测试..... 44
2.2.3 内置胶囊仿生自修复机理..... 11	3.3.6 结论 47
2.2.4 热可逆交联反应修复机理..... 12	第 4 章 断裂力学的应用及微胶囊破裂验证 48
2.3 自修复微胶囊新型复合材料..... 12	4.1 断裂分析的力学基础..... 48
2.3.1 微胶囊的概念及功能 13	4.1.1 断裂力学及裂纹基本形式..... 48
2.3.2 微胶囊自修复技术的研究进展 13	4.1.2 断裂韧性和应力强度因子..... 49
2.3.3 微胶囊原料的选择 14	4.1.3 Irwin 应力强度因子理论 50
2.3.4 微胶囊的制备方法 15	4.2 自修复材料断裂判据..... 51
第 3 章 自修复技术在摩擦材料中的应用研究 18	4.2.1 均质材料的断裂判据 51
3.1 聚合物基摩擦材料..... 18	4.2.2 弹性夹杂问题的断裂力学分析 52
3.1.1 基体树脂..... 18	4.2.3 自修复材料中微胶囊壳的断裂判据 52
3.1.2 增强体 22	4.3 材料断裂时微胶囊破裂的证明..... 53
3.1.3 填料 24	4.4 含模拟胶囊试件裂纹扩展的有限元模拟分析..... 54
3.1.4 生产工艺..... 25	
3.1.5 结论 25	

4.4.1 有限单元法简介	54
4.4.2 ANSYS 软件简介	55
4.4.3 材料参数	55
4.4.4 有限元模型的建立	56
4.4.5 划分网格	56
4.4.6 加载和求解	57
4.4.7 结果及讨论	57
4.4.8 结论	57

第 5 章 复合材料刹车片动态性能

研究	59
5.1 复合材料汽车盘式刹车片的模态 分析与模态试验	59
5.1.1 拉达轿车前轮滑动浮钳盘式 制动器	59
5.1.2 模态分析理论基础	60
5.1.3 盘式刹车片固有频率的理论 分析	60
5.1.4 影响复合材料弹性模量的因素 分析	61
5.1.5 材料参数测定实验	65
5.1.6 盘式刹车片固有频率的模态 分析	66
5.1.7 摩擦片厚度对其固有频率的影响 的有限元分析	71
5.1.8 模态试验	74
5.1.9 结论	82
5.2 自修复微胶囊对摩擦材料动态 性能影响的研究	82
5.2.1 含微胶囊刹车片的模态分析	82
5.2.2 刹车片的模态试验	86

5.2.3 模态实验与模态分析结果 比较	93
-------------------------------	----

第 6 章 复合材料刹车片振动噪声性能 研究

6.1 刹车片的振动与噪声理论分析 与试验研究	94
6.1.1 材料黏弹性与振动和噪声关系的 理论分析	94
6.1.2 刹车片的振动与噪声试验 研究	98
6.2 自修复微胶囊对复合材料刹车 片振动噪声性能影响研究	110
6.2.1 试验方法与原理	110
6.2.2 试验设备与测试过程	110
6.2.3 试验结果	113
6.2.4 结论	115

附录 A 1~11 号配方摩擦磨损原始 试验记录	117
-----------------------------------	-----

附录 B 1~11 号配方冲击强度和硬度 原始试验记录	128
--------------------------------------	-----

附录 C 1~5 号配方摩擦磨损、冲强、 硬度试验原始记录	132
--	-----

附录 D 新型复合材料汽车刹车片 检验证书	137
--------------------------------	-----

附录 E 部分有限元计算命令流	139
-----------------------	-----

附录 F 模态试验中的第 3 阶振型 系数、节点坐标及节点 关联文件	141
--	-----

参考文献	142
------------	-----

第 1 章

复合材料刹车片概论

1.1 引 言

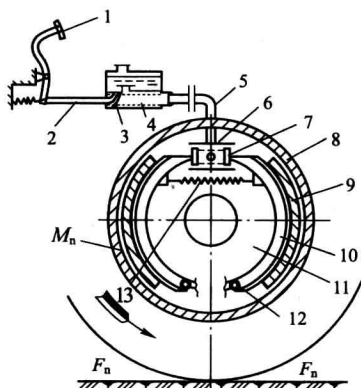
在当今时代，汽车已成为人类陆地客货运输无可替代的现代化工具之一，在可以预见的未来相当长的时期内，汽车工业仍将是我国国民经济重要的支柱产业，在社会生活中发挥着举足轻重的作用。过去几年间，中国汽车市场经历了“井喷”式增长。从 2008 年累计销售 934 万辆，到 2009 年实现 1 365 万辆销量，再到 2010 年销售 1 806 万辆汽车。这也意味着，2009 年汽车销量同比增幅高达 46.2%，2010 年同比增幅也达到 32.4%，连续两年的汽车净增量都超过了 400 多万辆。汽车工业的高速发展将从刹车片存量和增量两个角度来影响未来汽车刹车片的市场需求情况。在存量市场，由于刹车片属于易耗品，更新的频率较快，巨大的汽车保有量将刺激国内售后市场刹车片的需求；同时，在增量市场，产销两旺的态势使得刹车片在配套市场依旧需求很大。按照公布的规划，“十二五”期间，我国摩擦材料制品年平均增长率目标为 15%，到“十二五”末期，我国摩擦材料总产量将达到 70 万吨、总产值要实现 200 亿元，其中出口交货值 60 亿元。2010 年，我国摩擦材料行业年产摩擦材料制品 42.6 万吨，总产值 85.3 亿元，出口创汇 31.8 亿元，其中汽车用摩擦材料占总量的 80% 左右。

我国的环保法规正逐渐与国际接轨，我国规定从 2003 年 10 月 1 日起汽车制动摩擦材料中应不含有石棉，这对我国摩擦材料行业提出了新的挑战和迫切任务。我国汽车制动摩擦材料行业尽管已从过去依靠进口，发展到现在引进国外先进技术和自行设计、研制、生产无石棉摩擦材料，过去主要使用石棉摩擦材料的状况大为改观，但与国外相比仍存在较大的差距，存在的问题主要有：技术含量低，技术力量薄弱，生产工艺落后，设备陈旧，生产效率低；低水平重复建设，导致生产能力超前，供求关系失衡；价格失调，市场混乱；检测手段不全，生产不稳定，产品质量得不到保证，经济效益差；产品结构单一，新产品开发能力弱等。目前国内汽车制动摩擦材料主要是钢纤维增强的半金属摩擦材料，存在密度相对较大，易引起制动尖叫和振颤，易锈蚀，锈蚀后发生粘连，影响汽车换挡分离，并加剧磨损和损伤等缺点。现今汽车噪声已成为现代城市生活不可忽视的一大公害。汽车制动时轮胎摩擦地面产生的尖锐声和振动声响是汽车噪声中的主要部分。强烈的噪声可对人们的生理和心理造成极大的危害，如致使人的听力下降，甚至耳聋；噪声作用于人的中枢神经系统，使大脑皮层兴奋，抑制失调，产生头疼脑涨、昏晕、耳鸣、失眠、心慌等，同时也对人体的消化系统、血液循环系统和内分泌系统产生不同程度的影响。随着交通运输业的日益迅猛发展，特别是在环保意识日益强烈的 21 世纪，降低汽车制动噪声已成为亟待解决的重要问题。

1.2 制动器简介^[1-3]

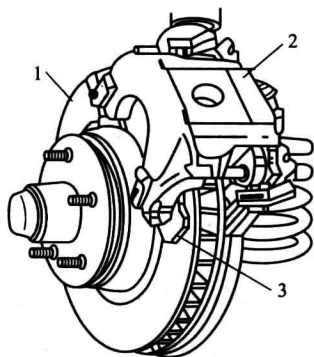
汽车制动器几乎都是机械摩擦式的,即是利用固定元件与旋转元件工作表面间的摩擦而产生制动力矩使汽车减速或停车的。摩擦式制动器按其旋转元件的形状又可分为鼓式和盘式两大类。鼓式制动器的固定摩擦元件是一对带有摩擦蹄片的制动蹄,后者又安装在制动底板上,而制动底板紧固于前梁或后桥壳的突缘上(对车轮制动器)或变速器壳或与其相固定的支架上(对中央制动器),鼓式制动器的旋转摩擦元件为固定在轮毂上或变速器第二轴后端的制动鼓,并利用制动鼓的圆柱内表面与制动蹄摩擦片的外表面作为一对摩擦表面在制动鼓上产生摩擦力矩,如图 1.1 所示。

盘式制动器的主要组件有制动盘、制动钳、刹车片,如图 1.2 和图 1.3 所示。其摩擦副中的旋转组件是安装在轮毂上,与车轮形成整体旋转的,以两侧面为工作面的圆盘形的制动盘。固定摩擦元件是位于制动盘两侧的刹车片。制动盘与刹车片之间只有微小的间隙。当两侧的刹车片沿轴向移动,并以一定的压力压向制动盘时,在刹车片与制动盘之间的摩擦表面便产生相应的摩擦力矩,即制动力矩。

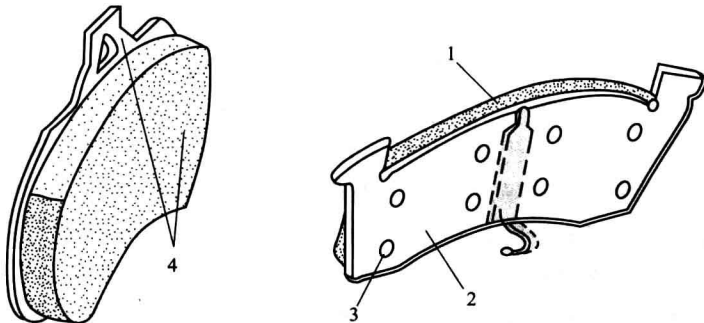


1—制动踏板；2—推杆；3—主缸活塞；4—制动主缸；
5—油管；6—制动轮缸；7—轮缸活塞；8—制动鼓；
9—摩擦片；10—制动蹄；11—制动底板；
12—支承销；13—制动体回位弹簧

图 1.1 鼓式制动器工作原理图



1—制动盘；2—制动钳；3—刹车片
图 1.2 典型的盘式制动器



1—摩擦块；2—金属背板；3—铆钉；4—刹车片

图 1.3 盘式制动器的刹车片（盘式刹车片）

与鼓式制动器相比,盘式制动器的优点有:抗热衰减性较好;抗水衰减性较好;制动效能恒定性好;制动力矩与汽车前进和后退行驶无关;制动盘与刹车片间的间隙小(0.05~0.15 mm),缩短了油缸活塞的操作时间,并使制动驱动机构的力传动比有增大的可能;易于构成多回路制动驱动系统,使系统有较好的可靠性和安全性,以保证汽车在任何车速下各车轮都能均匀一致地平稳制动;能方便地实现制动器磨损报警;在输出同样大小的制动力矩的条件下,盘式制动器的质量和尺寸比鼓式的要小;盘式制动器的刹车片比鼓式的在磨损后更易更换,结构也较简单,维修保养容易;盘式制动器的制动盘热膨胀不会像鼓式制动器的制动鼓热鼓胀那样引起制动踏板行程损失。

盘式制动器常用作轿车的车轮制动器,也可用作各种汽车的中央制动器。按摩擦副中的刹车片的结构,盘式制动器可分为两大类。一类是工作面积不大的摩擦块与其金属背板组成的刹车片,每个制动器中有2~4个。这些刹车片及其促动装置都装在横跨制动盘两侧的夹钳形支架中,总称为制动钳。这种由制动盘和制动钳组成的制动器,称为钳盘式制动器。另一类是刹车片的金属背板和摩擦块也呈圆盘形。使用这种刹车片,因其制动盘的全部工作面可同时与刹车片接触,故该制动器称为全盘式制动器。钳盘式制动器过去只用作中央制动器,但目前则越来越多地被各级轿车和货车用作车轮制动器。全盘式制动器只有少数汽车(主要是重型汽车)用作车轮制动器。盘式制动器的具体分类如图1.4所示。

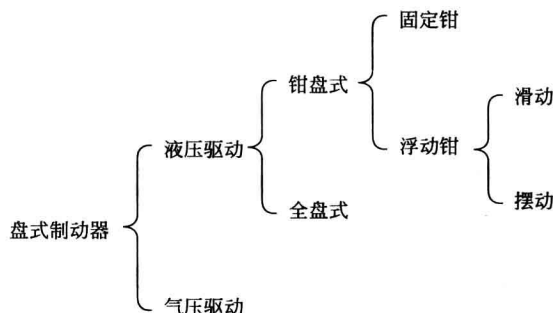


图 1.4 盘式制动器的分类

固定钳盘式制动器的制动钳固定安装在车桥上,既不能旋转,也不能沿制动盘轴线方向移动,因而必须在制动盘两侧都装设刹车片促动装置,以便分别将两侧的刹车片压向制动盘。固定钳盘式制动器存在以下缺点:液压缸较多,制动钳结构复杂;液压缸分置于制动盘两侧,必须用跨越制动盘的钳内油道或外部油管来连通,使得制动钳的尺寸过大,难以安装在现代化轿车的轮辋内;热负荷大时,液压缸(特别是外侧液压缸)和跨越制动盘的油管或油道中的制动液容易受热汽化;若要兼用于驻车制动,则必须加装一个机械促动的驻车制动钳。这些缺点使得固定钳盘式制动器难以适应现代汽车的使用要求,故自20世纪70年代以来,逐渐让位于浮动钳盘式制动器。浮动钳盘式制动器的工作原理如下。

目前,浮动钳盘式制动器已十分广泛地用于轿车的前轮制动。浮动钳盘式制动器的制动钳体是浮动的,制动油缸为单侧的,与油缸同侧的刹车片是活动的,另一侧的刹车片固定在钳体上。制动钳体的浮动方式有两种,一种是平行滑动,另一种是绕一支承销摆动,因而浮动钳盘式制动器可分为滑动式和摆动式两类。制动时在油液压力作用下,活塞推动活动刹车

片压靠到制动盘,而反作用力则推动制动钳体连同固定刹车片压向制动盘的另一侧,直到两刹车片受力均等为止。对摆动浮钳盘式制动器来说,钳体不是滑动而是在与制动盘垂直的平面内摆动。滑动浮钳盘式制动器工作原理如图 1.5 所示。制动钳支架 3 固定在转向节上,制动钳体 1 与支架 3 可沿导向销 2 轴向滑动。制动时,活塞 8 在液压力 p_1 的作用下,将活动刹车片 6 推向制动盘 4。与此同时,作用在制动钳体 1 上的反作用力 p_2 推动制动钳体沿导向销 2 向右移动,使固定在制动钳体上的固定刹车片 5 压靠到制动盘上。于是,制动盘两侧的刹车片在 p_1 和 p_2 的作用下夹紧制动盘,使之在制动盘上产生与运动方向相反的制动力矩,促使汽车制动。

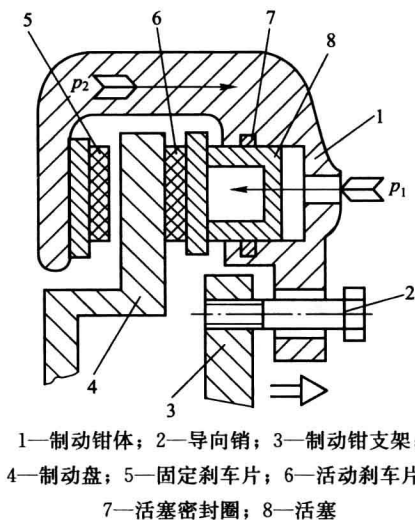


图 1.5 滑动浮钳盘式制动器工作原理图

浮动钳盘式制动器结构简单,造价低廉,易于布置,结构尺寸紧凑,可以将制动器进一步移近轮毂。浮动钳由于没有跨越制动盘的油道或油管,减少了受热机会,单侧油缸又位于盘的内侧,受车轮遮蔽较少使冷却条件较好,另外,单侧油缸的活塞比两侧油缸的活塞要长,也增大了油缸的散热面积,因此制动液温度比用固定钳时低 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,气化的可能性较小。

1.3 国内外汽车制动摩擦材料的研究概况

汽车制动器是保障行车安全的一个关键部件,它通过摩擦将汽车的动能转化为热能,从而达到制动的目的。目前,聚合物基摩擦材料被广泛应用于汽车制动器中,它是由基体树脂、增强体和填料三大类组分复合热压而成的^[4-5]。

汽车制动摩擦材料自产生以来,其发展过程经历了三个阶段:天然材料阶段、合成材料阶段、多种材料复合使用阶段。最早的汽车制动摩擦材料是选用木材与皮革。这些材料具有合理的摩擦系数,但当车辆的速度日益提高时,无法抵御刹车产生的高温。19 世纪,英国人 Mr. H. Froot 开始研究以沥青、毛发及棉花混合而成的带子来取代已有的制动摩擦材料。结果显示,刹车性能虽然有所改进,但是仍无法满足高温要求。1908 年,石棉编成的石棉布开始应用于制动摩擦材料中。随着制动摩擦材料使用要求的日益提高,其他组分被陆续加入配方中,同时石棉短纤维替代了石棉布。20 世纪 30 年代,石棉摩擦材料研制成功。由于石棉摩擦材料具有较稳定的摩擦磨损性能、良好的工艺性和价格低等优点,在其后五六十年间一直主导着汽车制动摩擦材料领域。

石棉具有质轻、价廉、分散性好、摩擦磨损性能好、增强效果好等优点,被认为是最佳摩擦材料用增强纤维。但在 20 世纪 70 年代,人们研究发现加工和制动尘埃中的细小石棉纤维被吸入肺内后,会引起一种叫做石棉肺的疾病,甚至会导致肺癌,石棉被证实属致癌物质。同时,随着汽车工业的发展,人们发现石棉摩擦材料的高温摩擦性能不好,石棉在

400℃左右时将失去结晶水, 550℃时结晶水将完全丧失, 同时失去弹性和强度, 此时石棉纤维已基本失去增强作用, 摩擦性能变得不稳定, 损伤对偶和产生制动噪声。目前许多国家已颁布相关法令, 禁止在汽车制动摩擦材料中使用石棉, 并相继展开了石棉代用纤维和无石棉摩擦材料的研究。从近年来国内外所发表的专利来看, 无石棉摩擦材料的专利占汽车制动摩擦材料专利总数的90%以上。

随着车辆向高速、高效、节能、轻量化方向发展, 特别是自20世纪70年代以来, 由于对环保及安全的突出要求, 摩擦材料呈现出多元化的发展趋势, 相继开发出了多种类型的新型汽车制动摩擦材料。

国外无石棉摩擦材料研究较多且最成功的是钢纤维和玻璃纤维增强的摩擦材料。以美、英、日、德为首的发达国家, 仍在大力改进已开发的无石棉摩擦材料, 以进一步寻求全面提高其综合使用性能的有效途径。

我国汽车制动摩擦材料的研究比国外起步晚, 在工业基础、技术水平、工艺设备以及产品的品种、数量和性能等方面与国外发达国家相比还有一定差距。在“八五”和“九五”期间, 国内摩擦材料行业在国际国内形势紧迫的影响下, 也加快了开发研究的步伐, 如杭州、上海等摩擦材料生产厂家先后引进国外配方和设备, 积极开展新型无石棉摩擦材料的研究, 特别是成功研制了半金属摩擦材料, 具有良好的散热性, 稳定的摩擦系数和较好的耐磨性, 是国内唯一被研制推广应用的无石棉摩擦材料^[1-2,6-8], 大大加快了进口车的国产化进程。但国内摩擦材料行业的生产自动化、智能化程度还很低, 过多地依赖人工控制, 突出存在产品质量不稳定和废品率高等问题。

1.4 国内外汽车制动振动与噪声的研究概况

1.4.1 汽车制动振动与噪声

汽车噪声主要包括发动机噪声、传动噪声、制动噪声、轮胎噪声及喇叭噪声等。在这些噪声中, 制动噪声又是主要的噪声源之一。制动噪声是由于制动器工作中发生振动造成的。这种振动噪声主要是由于摩擦片和制动盘(或鼓)接触恶化、摩擦片和制动盘(或鼓)间的摩擦系数随滑动速度而变化等引发^[3]。振动一般首先发生于制动摩擦片, 而后刚度较小的制动鼓和底板被加速, 形成较大的声源。同时, 制动摩擦片与制动鼓(盘)间的摩擦力不断变化, 制动构件受到该持续交变力作用而产生自激振动, 发出连续噪声。制动噪声具有高频的性质, 其频率范围多在1~8 kHz之间, 并且噪声声级较高, 最高时可达120 dB左右, 所以人耳感到的是一种难以忍受的“尖叫声”^[9]。

根据频率范围, 可以将制动噪声分为低频振颤噪声和高频尖叫噪声两类。制动噪声按照人耳能够分辨的可分为五种:

- (1) 制动频率在几百赫兹到一万赫兹间的长尖声称“婴啼”声;
- (2) 在停车的一刹那发出的声音称“鼠叫声”;
- (3) 像用钢丝刷在金属上刷动发生的声音称“丝刷”声;
- (4) 一百赫兹范围内发出的呻吟声称“湿靴”声;

(5) 由数赫兹到十赫兹的高频冲击的断续振颤称为“燕叫声”。

制动摩擦噪声是汽车制动过程中是由于制动副摩擦引起制动器等部件振动而产生的。制动器的振动包括摩擦材料特性引起的摩擦振动和机械部件振动引起的部件振动^[10-11]。

1. 制动副间的摩擦振动

制动时干摩擦接触物体间的摩擦力增大,使摩擦接触表面的瞬间摩擦系数增大,在制动力作用下接触比压增加,瞬间温度突然升高,接触表面出现局部凸起点“粘着”与“分离”,引起摩擦特性发生变化:接触面比压的增大而使摩擦材料磨损增加,因而摩擦副各构件间相对位置发生变化,从而出现振动,在高速强制制动时,这种振动尤为剧烈。摩擦振动与摩擦材料的硬度、气孔率、黏弹性、摩擦系数—温度关系曲线、摩擦系数—速度关系曲线等参数有关。

摩擦振动的趋势随着表面接触压力的增加而增加,也随着摩擦材料的表面温度的升高而加强。相对滑动速度增加时,摩擦系数也随着变化,因而出现振动噪声的可能性也会增加。摩擦系数—速度曲线的负斜率是产生制动噪声的明显参数之一。

2. 制动副的部件振动

制动器部件的摩擦振动是由于作为相对速度函数的摩擦系数变化的结果,而相对速度又产生于制动衬片、摩擦表面(盘或鼓)和机械系统的阻尼器之间,当两摩擦表面的相对速度增加时,若摩擦系数减少,则产生摩擦振动,引起部件的振动而发出噪声。当接触的部件由于摩擦而发生磨损后,其间隙增大也会引起部件振动。摩擦部件的振动也与负载的大小有关,当负载达到足以使摩擦片和制动盘(或鼓)的结构尺寸变化,以及弹性力引起摩擦片和制动器作瞬间的脱离时,整个有关联的机械系统就会产生轻微的变形,一旦摩擦片和制动器脱离啮合,机械系统的弹性力就会很快促使摩擦片和制动盘(或鼓)恢复到原来的状态而在两接触表面产生较低的摩擦,所有的零部件又几乎恢复原状,而这一过程重复下去,将使制动器产生振动,制动频率的大小取决于支持制动衬片恢复原位这一机械系统的等效质量和弹簧常数。

1.4.2 汽车制动振动与噪声的研究现状

20世纪30年代就已经开始了对制动噪声的研究,但是早期的制动噪声研究关注的是当时广泛使用的鼓式制动器,而现在盘式制动器由于其广泛的应用已成为研究重点^[12]。而且,研究者们最初把研究的重点放在摩擦片与制动盘的摩擦特性方面,这一阶段主要有两种主导理论。第一种理论把制动尖叫归因于摩擦副的摩擦特性,基于此理论的研究,可以把制动尖叫简单地归结为当静摩擦系数大于动摩擦系数或动摩擦系数 f 随相对滑动速度的非线性变化问题^[13-21]。但实际情况表明,即使相同的摩擦副,用于不同结构的制动器,发生尖叫的倾向也大不相同。于是产生了第二种理论,即 SpragSplip 理论, SpragSplip 理论解释了当摩擦系数为常数时,仅因摩擦副的几何特性选择不当,便可导致系统自激振动的产生。这一理论进一步发展,形成了几何特性耦合理论。虽然简单模型可以解释制动尖叫的产生,但很难解决具体的实际问题。进入20世纪80年代,研究者们已不再单纯地从简单的物理模型出发研究制动尖叫的问题,人们开始试图通过对实际制动器结构建立动力学模型,从理论上对制动尖叫问题进行定性乃至定量的分析。这一阶段较成熟的观点认为制动尖叫是由摩擦闭环

耦合诱发、制动器各组成部件动态特性参数匹配不当引起的自激振动。基于此观点,在对鼓式制动器制动尖叫的研究中,建立了包括整个制动器部件的闭环耦合模型,较好地解决了鼓式制动器的尖叫问题。在对盘式制动器制动尖叫的研究中,建立了包括制动钳、摩擦片和制动盘在内的耦合模型,并应用此模型分析了结构参数对尖叫倾向的影响,与实际情况符合较好。但值得注意的是,在以上模型的摩擦耦合中都认为摩擦系数是常数,没有考虑摩擦系数随相对滑动速度的变化的影响。

在进行理论研究的同时,国内外学者还进行了大量的实验。进行摩擦噪声试验的目的在于验证现有摩擦噪声产生机理的理论,并揭示细观形貌对摩擦噪声的影响。早在20世纪50年代,英国学者 Fosberry 和 Holubeck 就对盘式制动器的噪声进行了实验研究^[22-23]。但是由于技术手段的限制,早期的实验误差较大,只能定性地说明一些问题^[24]。现在的实验方法和原理已逐渐趋于成熟,并与理论研究结果具有很好的一致性。

制动器的振动主要包括摩擦副特性引起的部件振动和摩擦材料特性引起的摩擦振动。由于汽车在制动过程中要承受十分复杂的条件作用,因此影响因素较多(达20多种),如制动器的结构、材料材质(配方和微观结构)、对偶条件、表面形貌、温度(反复作用)、压力、速度、制动次数、制动环境(潮湿、沙地等)等,且各因素间还不同程度地存在着耦合作用。在过去很长的一段时间内,研究者们把主要精力放在对制动器的结构和摩擦副耦合特性的分析和原理的探讨上,取得了一些实用性的成果。但是更多的时候,研究是在不考虑材料的黏弹性(即阻尼)的情况下进行的。

阻尼技术是解决工程中振动和噪声问题的十分有效的技术。因为阻尼可以将机械振动和声振的能量转变成热能或其他可以耗损的能量,从而达到减振降噪的目的。因此阻尼技术在制动器减振降噪中的应用前景是十分广阔的。

新型复合材料汽车刹车片的研制成功将对我国汽车制动摩擦材料行业的发展起到一定的推动作用,同时将拥有巨大的市场和良好的发展前景,具有可观的经济效益。

第 2 章

自修复复合材料

2.1 自修复复合材料的研究现状

复合材料作为一种新型材料,自 20 世纪 60 年代以来,随着科学技术的不断进步,得到了迅猛的发展。复合材料具有质量轻、结构设计可调整性好、比强度和比模量高、阻尼减振性好、抗疲劳性及耐环境性能优良等优势,其力学性能可以与金属材料相媲美,工艺性又优于金属材料,这些优点使其被广泛应用于航空航天、机械、船舶、土木工程以及电子、医疗、体育用品等领域^[25]。但是,复合材料的初始缺陷或损伤是不可避免的,这是由组分材料本身的性能就具有一定的统计分散性,再加上工艺过程的不完善性和不可避免的损伤等因素造成的。在循环的热或机械载荷作用下复合材料内部容易产生微裂纹,这是聚合物材料使用过程中长期存在的问题。对结构复合材料来说,这些基体微裂纹汇合在一起,从而导致其他破坏模式,如纤维断裂、基体开裂和界面的脱粘滑移及分层等^[26]。一旦聚合物材料中形成裂纹,结构的完整性及材料的机械、电学性能等都会受到严重的损伤。这种损伤往往发生在结构的深层部位,检测起来非常困难,修补也几乎是不可能的。这种微裂纹的出现和扩展将引起材料整体性能的下降,导致构件的过早失效,最终导致材料的破坏。例如,2003 年初美国“哥伦比亚号”航天飞机发生事故,如图 2.1 所示,带来了灾难性的后果。因此,消除或抑制复合材料内部微裂纹的扩展对于维护材料的正常使用至关重要。



图2.1 “哥伦比亚号”航天飞机左翼上的两条清晰的裂纹

于是智能材料应运而生。

智能材料是指能模仿生命系统,同时具有感知和激励双重功能的材料,自诊断与自修复是智能材料的重要功能^[27]。智能材料于 20 世纪 90 年代成为研究热点新型材料,它模仿生

物材料的功能,可以感知和激励。例如,把形状记忆合金(NiTi合金)复合于构件中最易产生裂纹的部位,利用NiTi合金电阻率大、对应敏感以及可以产生巨大回复力的特性可以自动探测裂纹并主动控制或阻止裂纹的扩展,从而避免重要机械设备的断裂事故的发生。在当前制造水平下,要实现结构材料的感知、激励和控制功能,需要一套十分复杂的系统来保证,其工业化还有一个过程。

近年来,智能材料的研究日益深入,对具有自修复能力的复合材料的需求日益增长,已成为各国学者所关注的世界性项目。自修复又称自愈合,是生物的重要特征之一,人们把产生缺陷时无外界作用的情况下,材料本身自我判断、控制和恢复的能力称为自修复。模仿生物体损伤愈合的原理,使得复合材料对内部或者外部损伤能够进行自修复自愈合,消除安全隐患,增强材料的机械强度,延长使用寿命,这在军工、航天、电子、仿生等领域显得尤为重要^[28]。

自修复材料是模仿生物材料的自愈合功能,是具有裂纹自我修补功能的智能材料之一。自愈合的核COS是物质的补给和能量的补给。如骨折后断裂处的血管破裂,血液由血管的撕裂处流出,形成以裂纹口为中心的血肿,继而成为血凝块,初步把裂口联结。接着由新生骨组织增生和加厚,成骨细胞大量生长而制造出新的骨组织(骨痂)把骨裂纹修复。已有很多研究者模仿这一生物自愈合过程做了大量的研究工作。他们的研究思路其本相似,大多是利用复合材料制备工艺在材料中分布许多细小的空心纤维管道,管中装有可流动的修复剂。在外界环境作用下,一旦材料内产生裂纹,空心纤维随即裂开,修复剂流淌到开裂处,由化学作用自动实现裂纹黏合,从而抑制上裂纹的继续扩展。显然,这种研究思路是对动物本体材料中血管系统的最直观最简单的模仿。到目前为止,上述研究工作目前都还停在实验室阶段,难以进入工业应用。原因在于制造工艺上的一个技术难点:当前科学技术可以批量生产空心纤维但不能方便地制造类似于动物血管系统的空心纤维网络。要制造一个空心纤维网络,在其内部充满修复剂并保持一定的内压以便破裂时能使修复剂流出,需要一个十分复杂的手工制备工艺和较复杂的压力维持系统。

自修复复合材料的概念打破了目前材料设计原则中粒度的概念,对于提高产品的安全性和可靠性有着重要的意义。在材料已经投入使用就不可能对其修复或者修复不现实的情况下,这种方法应该能够表现出其特殊的优势,一旦这种自修复技术趋于成熟,并广泛使用于民用工业中,将会给经常由于裂纹断裂而无法使用的零部件提供新的解决方法。

2.2 智能自修复材料的自修复原理

自修复是生物体的重要特征之一。生物体内具有自组装构筑的微结构,这些微结构赋予生物体一些特殊的自修复功能。例如,当皮肤遭受创伤后,受损处的血管发生破裂,血液在破裂处流出并形成血凝块,初步联结破裂面,然后血液在受损表面结痂。当血痂内新的皮肤形成之后,血痂会自行脱落,生物体完成了其自修复过程^[29]。

2.2.1 分子间相互作用的修复机理

这种自修复机理是用热板焊接(类似于烙铁)来修复如聚甲基丙烯酸甲酯那样的热塑性

聚合物裂纹时提出的。润湿与扩散是这一修复过程中的两个重要参数,因此修复温度必须超过材料玻璃化转变温度 T_g 。C. B. Lin 和 E. P. Wang 等用小分子醇增塑热塑性聚合物以降低 T_g ,使修复能在较低的温度下实现;J. Raghavan 等研究了线型聚苯乙烯和交联乙烯基树脂复合材料的修复,发现临界应变在裂纹界面退火后有 1.7% 的回复,这是由线型聚苯乙烯链的贯穿引起的。由此可见,热板焊接修复的机理是界面分子间的非共价键相互作用(分子间氢键或链缠结)。这种基于链缠结和氢键等的修复没有新的共价键形成,而且要有大量的手工劳动,很快就过时了。

2.2.2 液芯纤维自修复机理

液芯纤维自修复的概念是埋入基体的液芯纤维,在裂纹扩展时以释放修复物质而治愈裂纹时提出的。Dry^[30]为探讨材料裂纹的自修复能力,在玻璃微珠填充环氧树脂的复合材料中嵌入空芯纤维,修复剂为单组分或双组分黏合剂,如图 2.2 所示。在动态载荷的作用下液芯纤维破裂,适时释放黏合剂到裂纹处固化,从而填满基体裂纹,阻止裂纹的进一步扩展。

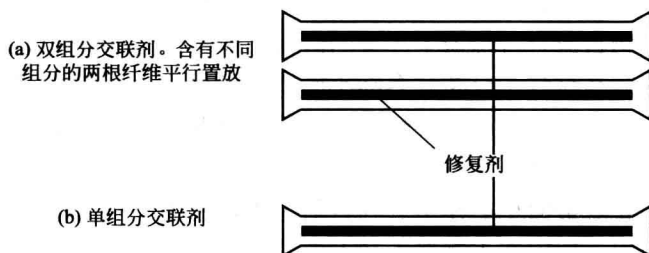


图 2.2 Dry 设计的含修复剂的空心纤维

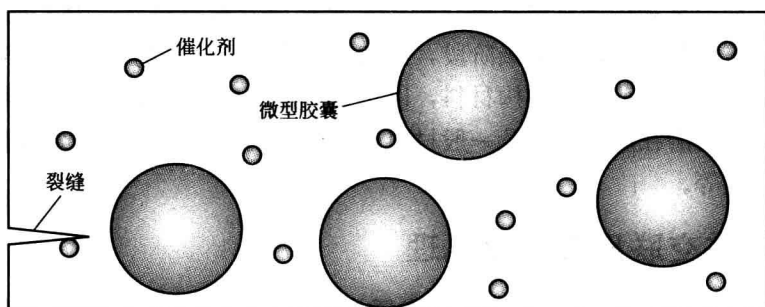
由空心的纤芯、包层和涂敷层组成的多层高纯多模阶跃型石英液芯光纤,在智能结构中极具应用价值。如果在纤芯内注有胶液并埋入聚合物材料(包括复合材料)中,不但可以起到适时修复裂纹的作用,而且能够利用光纤传感器独有的特性实时监测材料的缺陷、振动、冲击、疲劳和损伤等情况。根据这一思路,杨红等^[31]将灌注胶液的液芯光纤埋入到玻璃钢复合材料中制成兼有自诊断和自修复功能的智能材料,测得其对拉伸能力的修复达到原始值的 1/3,压缩达到 2/3 以上。

对由液芯纤维赋予自修复能力的聚合物材料的研究一般包括以下几个部分:(1)导致材料内部损伤的因素,如动力载荷;(2)修复(黏合)剂释放的驱动力,如纤维的破裂;(3)空芯纤维;(4)封入纤维内的化学试剂,包括单体或预聚物;(5)修复剂的加工处理及固化方法等。

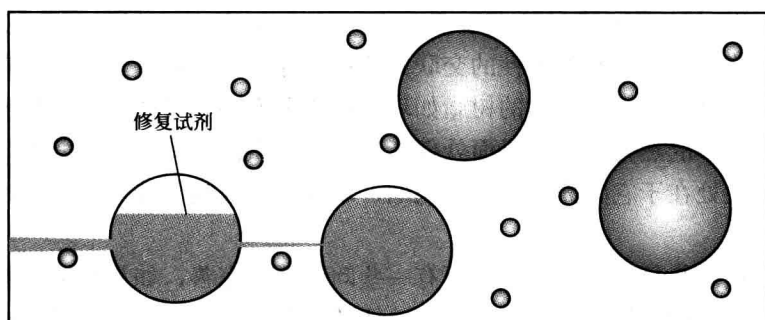
影响这类材料自动修复效率的因素有:(1)液芯纤维管与基材的性能匹配情况,纤维管过韧和过脆都不利于自修复功能的实现;(2)修复后的强度与原始强度的比值是评价修复效果的重要依据,直接决定于修复(黏合)剂自身的黏结强度或固化样品的强度;(3)液芯纤维管的数量,太少不能形成完全修复,多了又可能影响材料的宏观力学性能。此外,在材料中要实现修复剂的流动仅靠自身的渗透是一个缓慢甚至很难进行的过程,因此管内的压力和修复剂的流动性也都要考虑。

2.2.3 内置胶囊仿生自修复机理

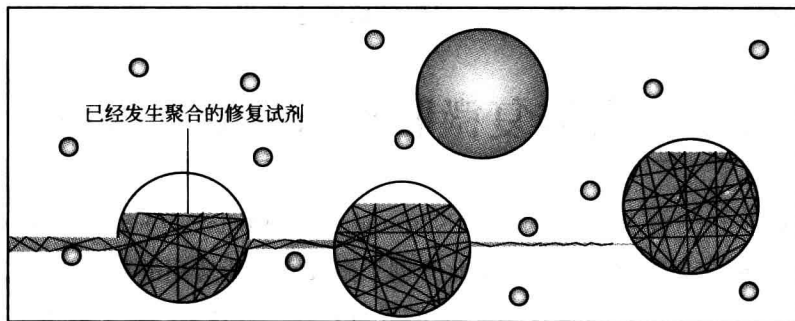
受生物体损伤自动愈合的启发, White 等^[32]报道了一种具有自动修复裂纹能力的聚合物材料。这种材料嵌有内装修复剂的微胶囊, 每个微胶囊约有头发丝宽, 这些微胶囊遇到裂纹入侵时由于裂纹尖端的应力集中破裂, 并通过毛细作用释放修复剂到裂纹面, 修复剂接触预先埋入环氧基体的催化剂而引发聚合, 黏合裂纹面, 如图 2.3 所示。冲击实验结果表明这种材料能恢复 75% 的韧性, 而且该方法有望适用于其他脆性材料, 如硅酸盐和玻璃。



(a) 母体损坏, 出现裂缝



(b) 裂缝使微型胶囊破裂, 通过毛细作用将其中的修复试剂释放到裂缝表面



(c) 修复试剂与催化剂接触, 引发聚合反应, 使断裂面粘接修复

图 2.3 微胶囊自修复机理

同液芯纤维修复机制一样, 用于微胶囊自愈合的单体必须具备低黏度、低挥发性和室温下快速反应的特点。另外, 体系还要满足寿命长、在聚合过程中收缩率低等条件。White 等^[33]以金属钌配合物作催化剂在损伤区域引发双环戊二烯 (DCPD) 聚合形成高度交联的聚