

本书共分7章。第1章介绍了摩擦材料的概念、技术要求、结构与性能等内容；第2章介绍了摩擦与磨损的概念；第3章~第7章分别介绍了摩擦材料的有机黏结剂、增强材料、填料、增强材料及填料的表面改性、生产工艺等内容；书末附录介绍了摩擦材料的性能检测及标准规范。

本书可供广大从事摩擦材料生产、科研、教学人员及相关专业技术人员参考使用，也可作为矿物加工及矿物材料、无机非金属材料、复合材料等专业的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

矿物复合摩擦材料/高惠民编著. —北京: 化学工业出版社, 2007.5
ISBN 978-7-122-00131-3

I. 矿… II. 高… III. 摩擦材料-研究 IV. TB39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 068674 号

责任编辑: 朱 彤

文字编辑: 杨欣欣

责任校对: 李 林

装帧设计: 潘 峰

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 化学工业出版社印刷厂

850mm×1168mm 1/32 印张 12 $\frac{3}{4}$ 字数 333 千字

2007 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686)

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 29.00 元

版权所有 违者必究

前 言

摩擦材料在运动机械和装备中起传动、制动、减速、驻车等作用，广泛应用于汽车、化工、石油、电力、机械、冶金乃至航空航天领域，其中汽车工业消费量占 80% 以上。在我国汽车工业迅速发展的同时，国内摩擦材料生产企业也从 20 世纪 80 年代中期的三四十家发展到目前的几百家以上并保持继续增长，总产量也从当时的几万吨增加到目前的几十万吨，产品类型囊括了国内外市场绝大部分品种。

随着对汽车安全、环保要求的不断提高，结构材料的组成也不断发生着变化，有机黏结剂的用量逐渐减少，增强纤维的用量也逐渐减少；同时以矿物为主的填料用量越来越多，特别是由于颗粒较小，纳米橡胶、纳米塑料用于摩擦材料后进一步提高了有机黏结剂的分散性，使其用量进一步降低成为可能。所以，矿物纤维和填料的增强作用就变得越来越重要，使摩擦材料和填料成为以矿物纤维和填料为主的复合材料。因此，考虑到为了符合上述发展趋势，本书书名确定为《矿物复合摩擦材料》。

摩擦材料是涉及化工、矿物学、无机非金属材料、机械等多学科的交叉领域，有关书籍甚少，无法反映当前摩擦材料工业的发展技术水平。为了集中反映当今国内外在摩擦材料领域技术开发和利用方面的最新成果，编者总结了多年从事相关工作的研究成果，收集了大量资料，在此基础上编成本书，以供各位同行参阅。

本书在编写、成书过程中得到了许多专家、学者的大力支

持，他们为本书提供了丰富的资料并给予了宝贵的建议和帮助，在此表示深深的谢意！谢超凌、王金玲、王向荣为本书的资料收集、整理、打字、校对付出了辛勤的劳动，在此也一并表示感谢！

由于时间仓促，编者水平有限，书中不当之处在所难免，敬请各位同行专家不吝指教。

编著者
2007 年 2 月

目 录

1	概论	1
1.1	摩擦材料概述	1
1.1.1	简介	1
1.1.2	制动摩擦材料的发展与研究现状	4
1.2	摩擦材料的技术要求	7
1.3	摩擦材料的结构与性能	11
1.3.1	有机黏结剂	11
1.3.2	纤维增强材料	13
1.3.3	填料	15
1.4	摩擦材料的发展趋势	17
1.4.1	发达国家摩擦材料的现状	17
1.4.2	制动摩擦材料的研究与开发	20
2	摩擦与磨损简介	26
2.1	摩擦与磨损的基本概念	26
2.1.1	摩擦和运动	26
2.1.2	摩擦的机理	27
2.1.3	摩擦的分类	30
2.1.4	磨损的分类	30
2.1.5	影响摩擦与磨损的因素	31
2.2	摩擦材料的摩擦与磨损	32
2.2.1	摩擦材料的摩擦机理	32
2.2.2	摩擦材料的磨损类型	34
2.2.3	摩擦材料的摩擦磨损特点	36

3	摩擦材料黏结剂	42
3.1	摩擦材料黏结剂概述	42
3.1.1	合成树脂	42
3.1.2	橡胶	43
3.2	酚醛树脂	44
3.2.1	概述	44
3.2.2	原理	52
3.2.3	合成过程	58
3.2.4	酚醛树脂的固化	69
3.3	改性酚醛树脂	78
3.3.1	腰果壳油改性酚醛树脂	79
3.3.2	三聚氰胺-腰果壳油改性酚醛树脂	83
3.3.3	胶乳改性酚醛树脂	84
3.3.4	聚乙烯醇改性酚醛树脂	87
3.3.5	其他改性酚醛树脂	89
3.4	橡胶	96
3.4.1	摩擦材料中的常用橡胶	96
3.4.2	橡胶的硫化	108
3.4.3	橡胶配合剂	111
3.5	共混改性树脂	114
3.5.1	摩擦材料工业中橡胶和树脂共混的目的	115
3.5.2	共混机理(聚合物混容性及其混合)	117
3.5.3	共混改性的分类	121
3.5.4	橡胶和树脂的共混工艺	124
3.5.5	其他共混设备	146
4	增强材料	151
4.1	概述	151
4.2	石棉	152

4.2.1	概述	152
4.2.2	石棉分级	153
4.2.3	石棉的结构与性能	156
4.2.4	石棉的摩擦作用	165
4.2.5	石棉的使用形式	168
4.3	海泡石纤维	174
4.4	纤维水镁石	177
4.4.1	纤维水镁石的结构与性能	177
4.4.2	纤维水镁石	177
4.5	针状硅灰石	179
4.5.1	硅灰石的结构与性能	179
4.5.2	针状硅灰石的应用	180
4.6	片状增强材料	183
4.6.1	膨胀蛭石的化学成分和结构	183
4.6.2	膨胀蛭石的性能	183
4.7	人造矿物纤维	186
4.7.1	玻璃纤维	186
4.7.2	FKF 纤维	189
4.7.3	其他人造矿物纤维	196
4.8	有机纤维	198
4.8.1	英特 ETF 纤维	198
4.8.2	芳纶纤维	199
4.8.3	其他有机类天然、合成纤维	205
4.9	碳纤维	207
4.9.1	聚丙烯腈基碳纤维	209
4.9.2	沥青基碳纤维	212
4.10	金属纤维	213
4.10.1	钢纤维	214
4.10.2	铜纤维	214
4.11	混杂纤维	215

5 摩擦材料填料	217
5.1 概述	217
5.1.1 填料在摩擦材料中的作用	217
5.1.2 填料的应用概况和分类	219
5.2 填料特性对摩擦材料性能的影响	220
5.2.1 填料的硬度对摩擦系数与磨损率的影响	220
5.2.2 填料对制品物理机械性能的影响	224
5.2.3 磨尘填料	228
5.3 无机填料	230
5.3.1 重晶石	230
5.3.2 硅灰石	231
5.3.3 萤石	231
5.3.4 氧化铁	231
5.3.5 铬铁矿粉	232
5.3.6 长石	232
5.3.7 氧化铝	233
5.3.8 锆英石	233
5.3.9 石英岩	233
5.3.10 刚玉	233
5.3.11 金红石与钛铁矿	234
5.3.12 硫化锑	234
5.3.13 人造石墨	234
5.3.14 焦炭	235
5.3.15 沸石	235
5.3.16 石灰石	235
5.3.17 高岭土	235
5.3.18 硅藻土	235
5.3.19 白云石	236
5.3.20 铝矾土	236
5.3.21 冰晶石	237

5.3.22	石墨	237
5.3.23	二硫化钼	239
5.3.24	滑石	239
5.3.25	云母	240
5.3.26	无水氧化铝	240
5.3.27	氧化锌	240
5.3.28	石灰	240
5.3.29	硫酸钡	241
5.4	有机填料及金属填料	241
5.4.1	有机填料	241
5.4.2	金属填料	245
5.5	摩擦粒	248
5.5.1	摩擦粒的作用	249
5.5.2	摩擦粒的制备	251
5.5.3	摩擦粒的性能	252
5.5.4	含摩擦粒配方的缺点	253
6	增强材料及填料的表面改性	255
6.1	概述	255
6.2	表面改性剂及改性原理	255
6.2.1	偶联剂	256
6.2.2	有机酸及其盐类改性剂	260
6.2.3	聚烯烃低聚物	261
6.3	表面改性工艺及设备	261
6.3.1	矿物填料的偶联处理工艺与设备	261
6.3.2	几种填料表面改性实例	264
7	摩擦材料的生产工艺	275
7.1	概述	275

7.2	干法模塑料生产工艺	276
7.2.1	直接混合法工艺	276
7.2.2	热辊炼法工艺	277
7.2.3	压塑粉料的配混料操作与设备	279
7.2.4	冷辊炼法工艺	283
7.3	湿法模塑料生产工艺	287
7.3.1	短纤维材质的生产工艺	287
7.3.2	连续纤维的生产工艺	294
7.4	模塑料的工艺性能	295
7.4.1	固化速度	296
7.4.2	流动性	297
7.4.3	颗粒均匀度	300
7.4.4	比容	300
7.4.5	压缩率	301
7.4.6	压坯性	302
7.5	预成型	303
7.5.1	预成型的目的	303
7.5.2	模压预成型	304
7.6	成型和固化	307
7.6.1	热压成型固化工艺	308
7.6.2	辊压法成型固化工艺	331
7.6.3	冷压一次成型工艺	336
7.7	压制品的后加工处理	338
7.7.1	热处理	338
7.7.2	磨削加工	340
7.7.3	钻孔	344
7.7.4	印标	346
附录		350
附录一 摩擦性能检测设备及试验方法		350

附录二	摩擦材料性能要求及试验规范	359
附录三	摩擦材料术语	375
附录四	摩擦材料质量标准	387
参考文献		391

1 概论

1.1 摩擦材料概述

1.1.1 简介

矿物复合摩擦材料（以下简称摩擦材料）是一种应用在动力机械上，依靠摩擦作用来执行制动和传动功能的部件材料，它主要包括制动器衬片（俗称刹车片）和离合器面片（俗称离合器片）。刹车片用于制动；离合器用于传动。

任何机械设备与运动的各种车辆，都必须要有制动或传动装置。摩擦材料是这种制动或传动装置上的关键性部件。它最主要的功能是通过摩擦来吸收或传递动力。离合器片传递动力；制动片吸收动能。它们使机械设备与各种机动车辆能够安全可靠地工作，所以说摩擦材料是一种应用广泛，又甚关键的材料。

摩擦材料是由以矿物为主的无机材料与有机材料复合而成，以高聚物（橡胶与树脂）为黏结剂、有机和无机纤维为增强材料，矿物粉体和有机粉体为填料，经过复合、加工而制成的功能材料。这种材料的特点是具有良好的摩擦系数和耐磨损性能、同时还具有一定的耐热性和机械强度，能满足车辆或机械的传动与制动的性能要求。它们被广泛应用在汽车、火车、农用车辆、飞机、船舰、石油钻机、矿山机械及各类工程机械设备以及自行车、洗衣机等生活用品方面，作为动力的传递或制动减速用不可缺少的材料。

在当今时代，火车、汽车、摩托车等已毫无例外地成为人类陆地客货运输无可替代的现代化工具，在社会生活中发挥着举足轻重

的作用，并在可以预见的未来相当长的时期内，车辆工业仍将是国民经济重要的支柱产业。随着社会的发展与进步，人类对车辆的要求越来越高，如高速、重载、安全可靠、乘坐舒适、操作方便、低能耗、无公害、轻量化等，车辆工业也相应呈现出蓬勃的多元的发展态势。

制动是车辆运行的重要行为之一，目前车辆制动除采用动力制动外，大多数是采用摩擦制动，即通过摩擦片与刹车盘（鼓）间的相对运动产生的摩擦力作为制动力，使运动物体减速制动。因此制动系统能够显著影响车辆行驶的安全性、舒适性、能耗以及污染等关键问题，已成为车辆发展的热点研究领域。其中制动系统中摩擦副的性能与结构是乘坐舒适性、耐久性特别是行驶安全性的根本影响因素。据统计，我国每年各种车辆因制动失灵形成的事故损失平均约为十亿元。此外，摩擦副性能差，车辆的高速化与重载化也受到根本的限制。可见制动摩擦材料及其结构已成为制约汽车工业发展和上水平、上档次的技术障碍之一。

近年来国内外制动摩擦材料行业的生产、技术和市场情况也发生了重要变化，使制动材料面临着更加严峻的形势。

（1）无石棉、无污染化

自 1972 年国际肿瘤医学讨论会确认，广泛应用了一个世纪的石棉摩擦材料中的石棉纤维属影响人体健康的致癌物质，被列入十大有害工业原料之一；加之人类对安全与社会环保方面意识的日益增强，摩擦制品的无石棉和无污染化已成为发展的共识，各国纷纷用法规予以限制。如美国环境保护局（EPA）于 1983 年提出在美国禁止使用石棉，并明确规定了环境中石棉纤维的含量，对汽车制造商则要求在新车出厂时避免使用石棉制动材料；而欧洲的一些国家如瑞典则明令禁止使用石棉。我国于 1999 年 10 月 1 日开始实施国家标准《汽车制动系统结构、性能和试验方法》（GB 12676—1999），在其第 4.1.3 条款规定“制动衬片应不含有石棉”，并在标准实施起 48 个月后强制执行，这对我国制动摩擦片研究与生产提

出了紧迫的要求,也使石棉摩擦材料面临着彻底退出历史舞台的命运。

(2) 高速化

随着技术的发展与高速公路、铁路的普及,车辆的行驶速度越来越快,相应对制动摩擦材料的要求也越来越苛刻。以轿车为例,当车速分别以 50km/h、100km/h、200km/h 的情况下制动,制动的热负荷则分别达 282.609kJ、1130.436kJ、4521.744kJ (67.5kcal、270kcal、1080kcal),制动材料的吸收能基本上与车速的平方成正比;另一方面为保证车辆高速下的稳定性和制动安全性,降低汽车重心,制动比缩小,热容量也相应减少,特别是轿车,促使制动器结构由鼓式改为盘式,减少了重量,而摩擦表面积只有鼓式的 $1/4 \sim 1/6$,单位面积的吸收能量则增加 $4 \sim 6$ 倍,摩擦副表面闪温可高达 1000°C 。因此适应车辆高速化和重载化的高温摩擦材料的研究与应用,是汽车发展亟待解决的关键问题。

(3) 轻量化

从 20 世纪 70 年代开始,由于石油资源的短缺,汽车轻量化的问题被提到了议事日程,因此,汽车工业相应将许多汽车从较重的后轮驱动型改变为更小、更轻、更省油的前轮驱动型,这就必然带来制动器尺寸和制动力分配上的重大变化,出现了更小且轻的制动器,以及前制动加强(制动温度更高),因此,要求摩擦材料的性能也要相应变化,以适应发展的要求。

此外,摩擦材料属易消耗件,随着汽车工业的迅猛发展,摩擦材料也必须相应保证足够的供给。到 2000 年,我国汽车保有量已达到 1700 万辆,相应一年需要摩擦材料 17 万吨,再加上汽车与配件的出口所需,摩擦材料的需求量将非常可观。

因此,适应摩擦材料研究与应用的发展要求,致力开发高性能、无危害、易加工、性能价格比适宜,同时又具有足够的原料来源的摩擦制动材料,不仅成为摩擦材料行业的当务之急,也是国

民经济发展的重要问题。

1.1.2 制动摩擦材料的发展与研究现状

从 19 世纪初到 20 世纪 70 年代,汽车制动系统主要采用鼓式制动器和有机石棉制动摩擦片。随着制动要求的不断提高,特别是针对制动安全和稳定性的突出要求,迫使制动系统由传统的鼓式改为更小、更轻、更省油的盘式制动结构。而制动摩擦片材料,由于石棉纤维在 400°C 左右将失去结晶水,石棉脱水后不仅失去增强效果,而且导致摩擦性能不稳定、损伤对偶及出现制动噪声。特别是在石棉被确认对人体健康存在危害以后,各国都迅速开展了新型无石棉摩擦片的研制工作,投入了大量的人力、物力和财力,取得了许多突破性进展,相继开发出了多种类型的新型摩擦材料,如钢纤维、玻璃纤维、碳纤维、有机纤维、陶瓷纤维、矿纤维等增强的摩擦材料。从近年来美国、英国、德国、日本等发达国家所发表的专利分析,无石棉摩擦材料的专利占汽车摩擦材料专利总数的 90% 以上。

1.1.2.1 近年来国内外无石棉摩擦材料的研究情况

无石棉摩擦材料大体上可划分为三类。

(1) 单一纤维增强摩擦材料

采用单一天然或合成纤维取代石棉,如钢纤维、玻璃纤维、钛酸钾纤维、碳纤维等,从美国、日本、欧洲的生产和近几年的专利来看,目前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。钢纤维强度高、表面活性好、导热性好、价格便宜,因此在半金属摩擦材料中得到广泛应用。但钢纤维密度相对较大,易锈蚀,当钢纤维含量大于 10% 时,制动时易引起尖叫并产生振颤等问题。玻璃纤维发展历史较长,产品质量稳定,产量较大,价格也较便宜,且热稳定性较好,但主要存在硬度过高 (HB50 以上)、磨损大、易损伤对偶、摩擦系数不稳定等不足。其他如碳纤维和有机纤维还存在价格、表面处理、分散工艺等问题,有待进一步开发。

(2) 混杂纤维增强摩擦材料

目前开发出的代用纤维种类很多,但却没有一种能够完全在成本上、性能上取代石棉,特别是面临着越来越高的应用技术要求,单一纤维增强摩擦材料已有一定局限,因此国外近年来的研究与应用从积极开发高性能单一纤维逐渐转向了采用纤维混合。如钢纤维与碳纤维混合,其力学性能和热性能、耐磨性和摩擦热衰退性能都明显好于单一纤维增强,且成本大大降低。其他纤维的混合,如玻纤与聚酯纤维混杂、Aramid 纤维与玻纤混杂、辉绿岩纤维与钢纤维、丙烯纤维混杂等,都取得了良好效果。研究表明,由两种或两种以上纤维混杂增强,不仅可降低成本,而且可充分发挥不同纤维以及复合效应的优点,尤其是非线性效应(包括乘积效应、交叉耦合效应、系统效应、诱导效应等)的控制,弥补单一纤维的不足,使性能更加全面和优异,已成为无石棉摩擦材料发展的重要趋势。

(3) 无纤维摩擦材料

采用一般工程塑料填充大量无机填料的方法取代石棉,即无纤维增强摩擦材料。采用片状、粒状填充料,如蛭石、氧化锌、碳酸钙及它们的混合物等,配以树脂改性和橡胶增韧基体,经研究表明可保证良好的摩擦性能,耐磨,噪声小,而且无纤维危害,也成为无石棉摩擦材料研究的又一重要发展方向。

我国摩擦片研究较国外起步晚,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发达国家还有一定差距。目前我国汽车摩擦片的应用状况是大多数车辆,特别是国产车仍主要装用石棉摩擦片。自 20 世纪 80 年代以来,我国先后引进了许多车型及生产线,其中产量在 5 万辆以上的就有上海大众、一汽捷达、二汽神龙、天津夏利、重庆长安、江西五十铃、上海通用等,但至今制动件国产制品进入原厂配套的尚无一家,摩擦片仍是靠国外配给和“双引进”来维持。在“八五”和“九五”期间,国内摩擦片工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、山东、武汉等摩擦片生产厂先后引进国外配方和设备,积极开展新型无石棉摩擦片的研究,特别是成功研制了

钢纤维增强的半金属有机摩擦片，这是目前国内唯一被研制成功并被推广应用的无石棉摩擦片，大大加快了进口车的国产化进程。

1.1.2.2 目前我国摩擦材料存在的一些亟待解决的问题

(1) 摩擦材料品种单一，不能满足性能多样化和系列化的要求

随着汽车的多元化发展，以及制动工况的复杂性，摩擦材料性能的多样化要求日益突出。目前我国摩擦材料品种较单一，主要应用石棉和半金属摩擦材料。无石棉摩擦片的研究较多，但应用率却很低，加之安全性与社会环保方面的意识还不十分强烈，甚至至今仍主要是在原有石棉和半金属摩擦片的基础上，通过改性和调整来增加品种以适应不断发展的需求。

(2) 综合性能欠佳

在研究及应用中发现，目前我国摩擦材料的综合性能欠佳，如有的摩擦材料性能虽提高了，但生产工艺复杂，成本增加，能耗增多；有的摩擦材料在与对偶材料的相容性、黏结强度、制动噪声、生产率等方面还不理想。因此至今为止，人们还未能找到一种完全取代石棉，同时又满足综合性能要求的摩擦制动材料。

(3) 高性能摩擦材料亟待开发

针对发展提出的要求，高性能摩擦材料，特别是适应车辆高速化和重载化的高温摩擦材料亟待开发。

从国内外研究及应用情况分析，目前的摩擦材料存在限制其高温应用的两大根本问题：

① 高温摩擦性能热衰退 聚合物基摩擦材料中的有机组分在摩擦制动产生的高温条件下将发生热分解，有机物热分解产生的液态物与剥落的粒子、微纤在摩擦界面上形成一层复杂组分的界面膜。由于在高温下液态分解物是界面膜的主体，因此界面膜的形成将有利于减少磨损，但由于界面膜的存在，使摩擦力产生机制由低温条件下主要由表面微凸体的切削阻力，转变为高温下抵抗界面膜流体的剪切变形的抗力，因此导致摩擦力降低，产生热衰退现象，这是严重影响制动安全与可靠性的关键问题。

② 耐高温综合性能差 在高速和高压作用下摩擦材料与对偶表面的温度可高达 $800\sim 1000^{\circ}\text{C}$ ，因此对摩擦材料的高温综合性能要求很高。而对于聚合物基摩擦材料，由于基体有机材料的耐热性能和导热性能较低，因此目前主要通过基体树脂改性和在复合材料中添加高导热材料来提高其高温性能。但作为有机基体，依赖改性毕竟还是有限的。另外，选用热导率高的纤维（如半金属摩擦材料）虽然可以较好地改善散热性，但同时又出现锈蚀、黏着、损伤对偶现象，导致磨损加剧，并有 $100\sim 300\text{Hz}$ 的低频噪声产生。

针对高速制动的技术需要，国内摩擦材料的研究与生产主要是在通用型常规摩擦材料的基础上进行改性，目前尚没有定型产品。特别是在国内，这一现状不仅制约了行车安全性以及进一步的高速化，而且进入 WTO 后也将影响我国摩擦材料行业的发展和市场竞争能力。

（4）产品质量稳定性还不理想

由于我国目前摩擦材料的基础研究还未被引起足够的重视，以及摩擦材料生产水平的限制，导致产品质量稳定性还不理想。特别是针对摩擦材料的配方优化、结构优化以及工艺优化的相关研究和可控性研究还不足，生产自动化程度还较低。产品质量不稳定，不仅影响制动的安全可靠，也严重制约了我国摩擦制品的上档次、上水平，成为汽车等相关工业发展的技术障碍之一。

（5）检测与产品性能评价方法与手段有待统一

针对汽车的发展要求进行摩擦材料的系统基础性研究与新产品的开发，成为目前国内外汽车业、摩擦学和材料科学与工程领域工作重点与当务之急。

1.2 摩擦材料的技术要求

摩擦材料是车辆和机械的离合器总成和制动器中的关键安全零件，在传动和制动过程中，主要应满足以下技术要求。