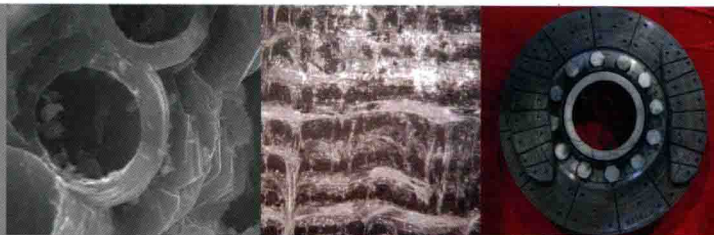




“十二五”国家重点图书出版规划项目
材料科学技术著作丛书

碳陶摩擦材料的制备、性能与应用

肖鹏 熊翔 李专 著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目
材料科学技术著作丛书

碳陶摩擦材料的制备、性能与应用

肖 鹏 熊 翔 李 专 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

碳纤维增强碳基和碳化硅基(碳陶)摩擦材料,是20世纪90年代中期发展起来的新一代高性能制动材料,具有耐高温、抗腐蚀、摩擦系数高且稳定、耐磨损、全环境适用和使用寿命长等一系列特点。本书深入地总结作者15年来在碳陶摩擦材料领域的研究成果,系统地介绍碳陶摩擦材料的发展历史、不同方法制备碳陶摩擦材料的工艺与原理、材料的本征结构和性能、碳陶摩擦材料在不同制动系统上的考核和应用情况等。

本书可供碳基、陶瓷基复合材料领域的大专院校师生、科研与生产人员及高性能摩擦材料产品应用单位人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

碳陶摩擦材料的制备、性能与应用/肖鹏,熊翔,李专著. —北京:科学出版社,2016.7

(材料科学技术著作丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-049381-1

I. ①碳… II. ①肖… ②熊… ③李… III. ①陶瓷复合材料-碳纤维增强复合材料-摩擦材料-研究 IV. ①TB39

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第159934号

责任编辑:牛宇锋 罗 娟 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年7月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年7月第一次印刷 印张:24 1/4

字数:470 000

定价:145.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《材料科学技术著作丛书》编委会

顾问	师昌绪	严东生	李恒德	柯俊
	颜鸣皋	肖纪美		
名誉主编	师昌绪			
主编	黄伯云			
编委	(按姓氏笔画排序)			
	干勇	才鸿年	王占国	卢柯
	白春礼	朱道本	江东亮	李元元
	李光宪	张泽	陈立泉	欧阳世翕
	范守善	罗宏杰	周玉	周廉
	施尔畏	徐坚	高瑞平	屠海令
	韩雅芳	黎懋明	戴国强	魏炳波

序

如今,全球面临资源、能源与环境的严峻挑战,不可再生资源严重短缺,节能、节材和降耗压力空前。随着我国国民经济的快速发展,航空工业、高速铁路、现代汽车、工程机械、石油化工和冶金工业等诸多领域对摩擦材料行业提出了更高的要求。摩擦材料研究对于减少能源和材料消耗具有十分重大的意义,同时可为高技术机械装备的先进设计和制造奠定材料基础,可解决影响系统可靠性和寿命的瓶颈问题。

我国已经是摩擦材料生产大国,但远不是强国,我国的摩擦材料行业仍未摆脱低水平重复的怪圈,在市场上仍然是以低端产品为主。越来越高的质量要求和各种门槛,使我们进入高端市场面临重重难关;而越来越严格的环保要求,将可能危及企业的生存。中南大学粉末冶金研究院从 20 世纪 70 年代开始一直从事摩擦材料的研究与开发,已成功应用于海、陆、空、天各个领域,包括合成摩擦材料、粉末冶金摩擦材料、炭/炭摩擦材料和碳陶摩擦材料。碳陶摩擦材料具有低密度、耐高温、能载水平高、寿命长和全环境适用等优点,被公认为是极具竞争力的新一代制动材料。

该书作者于 2001 年在国内率先开展了碳陶摩擦材料的理论和应用基础研究,主持了科技部国际合作、863 计划、国家自然科学基金等 10 余项国家级科研项目,申请了 20 余项国家发明专利,发表了 100 余篇高水平学术论文。《碳陶摩擦材料的制备、性能与应用》一书代表了作者 15 年来的工作思路和成果总结。该书共包含 13 章内容,可以分为四部分来解读。

第 1 章和第 2 章为第一部分,即碳陶(C/C-SiC)摩擦材料的研究背景和性能特点,介绍摩擦材料的性能特点、分类和发展趋势,在此基础上阐述 C/C-SiC 摩擦材料的发展,包括 C/C-SiC 摩擦材料的来源、材料组成、材料结构和性能。

第 3 章到第 8 章为第二部分,即 C/C-SiC 摩擦材料的制备。首先介绍 C/C-SiC 摩擦材料不同类别的制备方法,包括气相法、液相法、固相法和综合法;其次介绍 C/C-SiC 摩擦材料用预制体的结构、致密化方法和不同预制体采用化学气相渗透法致密化的模拟仿真,然后分别介绍化学气相渗透法、熔硅浸渗法和温压-原位反应法制备 C/C-SiC 摩擦材料的理论分析、影响因素、显微结构和界面形貌等;最后介绍不同基体改性 C/C-SiC 摩擦材料的制备及微观结构。

第 9 章到第 12 章为第三部分,即 C/C-SiC 摩擦材料的性能,详细介绍采用化学气相渗透法、熔硅浸渗法和温压-原位反应法制备 C/C-SiC 摩擦材料的热物理性

能及影响因素、力学性能及其失效机制、氧化行为及机制,以及摩擦磨损行为及机理等。

第 13 章单独为第四部分,即 C/C-SiC 摩擦材料在不同制动系统上的应用,主要介绍中南大学研发的 C/C-SiC 摩擦材料在汽车、轨道交通车辆、工程机械和磁悬浮列车等不同领域的应(试)用情况。

我国快速发展的现代交通运输装备,以及新能源、海洋工程等重大装备,对速度、载荷、能效和安全性等的要求越来越高,研究轻质、高性能新材料在现代装备设计及制造中的应用,实现其自重轻量化、性能高端化、节约环保化、服役全域化,是材料研究者面临的新挑战。我相信读者会对该书的内容感兴趣并能从中得到许多收获。

中国工程院院士

2016 年 6 月

前 言

随着高速列车、汽车、风力发电机组等现代交通运输工具和动力机械向高速高能载发展,对制动摩擦材料提出了更高制动效能、更高安全性和可靠性、更苛刻环境适应性等要求。碳陶摩擦材料,源自航空航天器热端部件用陶瓷基复合材料,是一种碳纤维(C_f)增韧碳基(C_p)和陶瓷基(SiC 为主)双基体先进复合材料,不仅继承了炭/炭(C/C)摩擦材料“三高一低”(即耐高温($\geq 1650^\circ C$)、高比强、高耐磨、低密度($\sim 2.0 g/cm^3$))的优点,还因基体中引入了 SiC ,有效提高了材料的抗氧化性能和摩擦系数,显著改善了摩擦性能在各种外界环境介质(潮气、霉菌和油污等)中的稳定性,已成为轻量化、高制动效能和全环境适用摩擦材料的一个重要研究方向,在飞机、高速列车、地铁、赛车、汽车、工程机械等高速、高能载、苛刻环境制动系统上具有广泛的应用前景。

20世纪90年代初,德国斯图加特大学和德国宇航院等率先开始碳陶摩擦材料的研究,并于2002年研制出碳陶制动盘应用于Porsche(保时捷)轿车;法国TGV高速列车和日本新干线已试用碳陶制动盘;美国碳陶飞机刹车盘现已进入装机考核与飞行验证阶段。我国中南大学在2001年开始碳陶摩擦材料的研究,在后续西北工业大学、国防科技大学等高校,以及湖南博科瑞新材料有限责任公司、西安鑫垚陶瓷复合材料有限公司等单位的共同努力下,碳陶摩擦材料的制备技术、性能和应用技术等方面都取得了长足进展,在汽车、赛车领域的应用与世界先进水平的差距在逐步缩小,在军机、坦克、高速列车等领域的应用研究已走到国际前列。

作者肖鹏博士师从西北工业大学材料学院张立同院士期间,奠定了 SiC 陶瓷基复合材料的理论和制备技术基础;毕业后有幸进入中南大学在合作导师黄伯云院士协助下从事碳基和陶瓷基复合材料基础理论、低成本制备技术、环境服役与防护的研究。在过去15年间,作者先后承担了十多项与碳陶摩擦材料相关的863计划项目、国家自然科学基金项目、科技部国际合作项目、教育部重点项目、铁道部科技项目、国防军工项目和湖南省重大专项等研究工作,积累了较丰富的研究经验,获得了多项省部级以上科技奖励,研制的碳陶摩擦材料产品已成功应用于坦克、上海磁悬浮列车和港口工程机械等制动系统,显示了优异的制动性能,并取得了显著的经济与社会效益。为了总结以往的研究成果,促进今后的研究和应用向纵深发展,作者撰写了本学术专著,希望通过本书的出版,能够让更多的科技人员、高校师生和管理人员增进对这个领域的了解,进而推动碳陶摩擦材料的研究和应用。

在本课题组攻读博士和硕士学位的李专、闫志巧、时启龙、王林山、任芸芸、吴庆军、付美容、谢建伟、旷文敏、杨阳、龙莹、秦明升、韩团辉、李鹏涛、周伟、张本固、刘逸众、李娜、岳静、逯雨海、曾志伟、李金伟和李杨等在碳陶摩擦材料的基础理论、制备技术和应用技术等方面开展了诸多富有成效的工作,为本书的撰写做出了很大的贡献。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏之处,敬请读者不吝指正。

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 摩擦材料的特点及性能要求	1
1.2 摩擦材料的分类及发展趋势	2
1.2.1 树脂基摩擦材料	2
1.2.2 金属基摩擦材料	4
1.2.3 炭/炭复合材料	7
1.2.4 陶瓷基摩擦材料	11
1.2.5 碳陶摩擦材料	12
参考文献	13
第 2 章 C/C-SiC 摩擦材料的发展	16
2.1 C/C-SiC 摩擦材料的起源	16
2.2 C/C-SiC 摩擦材料的组成和结构	18
2.2.1 C/C-SiC 的组成	18
2.2.2 C/C-SiC 的结构	23
2.3 C/C-SiC 摩擦材料的性能特点	29
2.3.1 C/C-SiC 的热物理性能	29
2.3.2 C/C-SiC 的力学性能	30
2.3.3 C/C-SiC 的氧化性能	30
2.3.4 C/C-SiC 的摩擦磨损性能	32
参考文献	33
第 3 章 C/C-SiC 摩擦材料的制备技术	36
3.1 气相法	36
3.1.1 等温 CVI 法	37
3.1.2 热梯度 CVI 法	38
3.1.3 等温迫流 CVI 法	39
3.1.4 差温迫流 CVI 法	39
3.1.5 脉冲 CVI 法	40
3.1.6 微波 CVI 法	40

3.1.7 连续同步 CVI 法	40
3.1.8 多元耦合场 CVI 法	40
3.2 固相法	41
3.2.1 粉浆-热压烧结法	41
3.2.2 温压-原位反应法	42
3.3 液相法	42
3.3.1 聚合物浸渗热解法	42
3.3.2 溶胶-凝胶法	45
3.3.3 熔硅浸渗法	46
3.4 综合法	47
参考文献	47
第4章 C/C-SiC 用碳纤维预制体的制备及增密	52
4.1 碳纤维预制体结构与特性	52
4.1.1 连续纤维编织预制体	53
4.1.2 非连续纤维预制体	56
4.2 碳纤维预制体的致密化	61
4.2.1 气态先驱体	61
4.2.2 液态先驱体	61
4.3 预制体 CVI 致密化过程数值模拟	69
4.3.1 基本假设	71
4.3.2 三维正交结构碳纤维预制体	71
4.3.3 针刺碳纤维预制体	76
参考文献	82
第5章 化学气相渗透法制备 C/C-SiC 摩擦材料	85
5.1 化学气相渗透过程的理论分析	85
5.1.1 SiC 先驱体	85
5.1.2 CVI 沉积 SiC 基体的机理	86
5.2 CVI 制备 C/C-SiC 摩擦材料及影响因素	88
5.2.1 CVI 制备 C/C-SiC 的工艺流程	88
5.2.2 C/C-SiC 摩擦材料的物相组成	90
5.2.3 C/C-SiC 摩擦材料制备的影响因素	92
5.3 C/C-SiC 摩擦材料的微观结构	100
5.3.1 C/C-SiC 的微结构	100
5.3.2 SiC 的显微结构	103
5.3.3 C/C-SiC 的界面形貌	105

参考文献	107
第 6 章 熔硅浸渗法制备 C/C-SiC 摩擦材料	109
6.1 熔硅浸渗过程的理论分析	109
6.1.1 熔硅浸渗过程的热力学和动力学	109
6.1.2 熔硅浸渗过程的影响因素	110
6.2 长纤维增强 C/C-SiC 摩擦材料的制备及结构	118
6.2.1 C/C-SiC 摩擦材料的制备	118
6.2.2 C/C-SiC 摩擦材料制备的主要影响因素	120
6.2.3 C/C-SiC 摩擦材料的微观结构	125
6.3 短纤维增强 C/C-SiC 摩擦材料的制备及结构	131
6.3.1 C/C 多孔体的制备	131
6.3.2 C/C-SiC 摩擦材料的微观结构	134
6.3.3 C/C-SiC 摩擦材料的孔隙结构分析	135
6.4 Si+C 熔渗反应模型	141
参考文献	142
第 7 章 温压-原位反应法制备 C/C-SiC 摩擦材料	145
7.1 温压-原位反应的理论分析及设计	145
7.1.1 Si+C 原位反应机理	145
7.1.2 C/C-SiC 摩擦材料的设计	147
7.2 C/C-SiC 摩擦材料的制备	150
7.2.1 温压-原位反应法的制备工艺	150
7.2.2 C/C-SiC 摩擦材料制备的影响因素	153
7.2.3 酚醛树脂的热分解过程及结构	157
7.2.4 C/C-SiC 坯体裂纹形成及影响因素	166
7.3 C/C-SiC 摩擦材料的微观结构	169
7.3.1 C/C-SiC 的微结构	169
7.3.2 C/C-SiC 的界面形貌	174
参考文献	176
第 8 章 基体改性 C/C-SiC 摩擦材料的制备	179
8.1 Cu 改性	179
8.1.1 Cu-Si-C 体系热力学分析	179
8.1.2 材料制备及物相组成	181
8.1.3 材料微观结构	182
8.1.4 组元的显微硬度	185
8.2 Cu-Ti 改性	186

8.2.1 材料制备及物相组成	186
8.2.2 材料微观结构	186
8.2.3 熔渗过程中的反应机制	188
8.3 Fe 改性	189
8.3.1 Fe-Si-C 体系热力学分析	189
8.3.2 材料制备及物相组成	191
8.3.3 材料微观结构	192
参考文献	194
第 9 章 C/C-SiC 摩擦材料的热物理性能	195
9.1 LSI-C/C-SiC 摩擦材料的热物理性能	195
9.1.1 LSI-C/C-SiC 的热扩散率及影响因素	195
9.1.2 LSI-C/C-SiC 的热膨胀系数	199
9.2 WCISR-C/C-SiC 摩擦材料的热物理性能	201
9.3 CVI-C/C-SiC 摩擦材料的热物理性能	203
9.3.1 CVI-C/C-SiC 的热扩散率及影响因素	203
9.3.2 CVI-C/C-SiC 的热膨胀系数	206
9.4 C/C-SiC 在室温~1300℃的导热性能及其导热机制	208
参考文献	212
第 10 章 C/C-SiC 摩擦材料的力学性能及其失效机制	214
10.1 LSI-C/C-SiC 的力学性能及影响因素	214
10.1.1 弯曲和压缩性能	214
10.1.2 拉伸性能	224
10.2 WCISR-C/C-SiC 的力学性能及失效机制	225
10.2.1 弯曲性能	225
10.2.2 压缩性能	230
10.3 CVI-C/C-SiC 的力学性能及失效机制	237
10.3.1 弯曲性能	237
10.3.2 拉伸性能	241
参考文献	245
第 11 章 C/C-SiC 摩擦材料的氧化行为及机制	247
11.1 单一组元的氧化行为	247
11.1.1 组元的 TG-DSC 分析	247
11.1.2 碳相的氧化	248
11.1.3 SiC 的氧化	249
11.1.4 Si 的氧化	250

11.2 LSI-C/C-SiC 的氧化性能及机制	254
11.2.1 C/C-SiC 复合材料的非等温氧化行为	254
11.2.2 C/C-SiC 复合材料的等温氧化动力学和机理	257
11.2.3 C/C-SiC 复合材料的长时间氧化行为	259
11.3 CVI-C/C-SiC 的氧化性能及机制	264
11.3.1 C/C-SiC 复合材料的非等温氧化行为	264
11.3.2 C/C-SiC 复合材料的等温氧化行为	266
11.4 WCISR-C/C-SiC 的氧化行为及机理	270
11.4.1 C/C-SiC 的非等温氧化行为	270
11.4.2 C/C-SiC 的等温氧化行为	272
11.5 Cu ₃ Si 改性 C/C-SiC 的氧化行为及机理	279
11.5.1 材料的等温氧化行为	279
11.5.2 材料的长时间氧化行为	284
参考文献	286
第 12 章 C/C-SiC 摩擦材料的摩擦磨损行为及机理	289
12.1 LSI-C/C-SiC 的摩擦磨损性能及影响因素	289
12.1.1 预制体结构	289
12.1.2 基体炭结构	293
12.2 WCISR-C/C-SiC 的摩擦磨损性能	298
12.3 CVI-C/C-SiC 的摩擦磨损性能	305
12.3.1 自对偶低载能	305
12.3.2 自身对偶高载能	308
12.3.3 与钢对偶	312
12.4 改性 C/C-SiC 的摩擦磨损性能	315
12.5 环境对 C/C-SiC 摩擦磨损性能的影响	319
12.5.1 湿态条件	319
12.5.2 油性环境	321
12.5.3 制动速度	326
12.6 C/C-SiC 的摩擦磨损机理	328
12.6.1 摩擦机理	329
12.6.2 磨损机理	331
参考文献	335
第 13 章 C/C-SiC 摩擦材料在不同制动系统上的应用	337
13.1 汽车	337
13.1.1 台架考核	338

13.1.2 应用	347
13.2 高速列车	351
13.3 工程机械	358
13.4 风力发电机组	363
13.5 其他	366
13.5.1 磁悬浮列车	366
13.5.2 重载卡车	367
13.5.3 摩托车	368
13.5.4 特种机械	369
参考文献	371

第 1 章 绪 论

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。在大多数情况下,摩擦材料都是与各种金属对偶起摩擦的^[1]。一般认为在干摩擦条件下,与金属对偶摩擦系数大于 0.2 的材料称为摩擦材料。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,它们使机械设备与各种机动车辆能够安全可靠地工作。随着科学技术的发展,人们对交通运输工具和动力机械的速度、负荷和安全性要求越来越高,工况条件也日益恶劣,故对摩擦材料的综合性能也提出了更高要求。

1.1 摩擦材料的特点及性能要求

各种交通运输工具(如汽车、火车、飞机、舰船等)和各种机器设备的制动器、离合器及摩擦传动装置中摩擦副的作用是制动及传动,这是一个能量转化过程,即利用摩擦材料的摩擦性能将转动的动能转化为热能和其他形式的能量(声能、振动等)。因此,摩擦材料最主要的特点是能够吸收动能并转化为热能,进一步将热能传入空气中,材料本身无剧烈磨损,也不破坏摩擦副,在反复使用过程中能保持一定的制动和传动效率。图 1-1 为不同制动系统用摩擦材料。

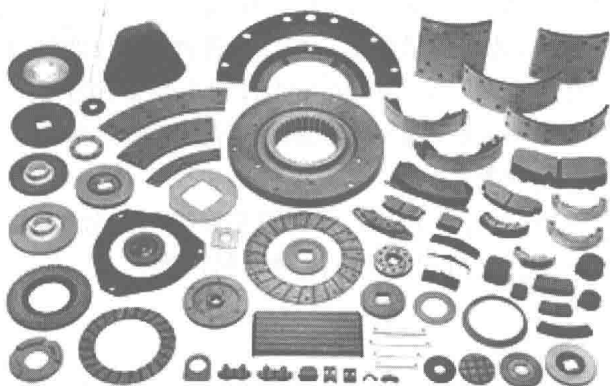


图 1-1 不同制动系统用摩擦材料

为保证制动系统和摩擦传动的可靠性,摩擦材料应满足以下几点要求^[2~5]:

- (1) 具有高且稳定的摩擦系数,对速度、载荷和温度等的改变不敏感。

(2) 具有良好的耐磨性,同时对摩擦对偶件的表面不易划伤及严重黏着,磨合性好。

(3) 环境适应能力强,耐腐蚀、耐油和耐潮湿等。

(4) 良好的力学性能,有一定的高温机械强度。

(5) 摩擦过程中不易产生火花、噪声和振动。

(6) 原材料来源广泛,价格便宜,符合环保要求。

(7) 制造工艺简单,易操作。

要完全满足上述各点要求是很困难的,但基本上应依据工况条件,满足所需要的摩擦系数及其在摩擦过程中允许的变化范围和预定的寿命,即应有足够的耐磨性。

1.2 摩擦材料的分类及发展趋势

自从世界上出现动力机械和机动车辆后,在其传动和制动机构中就要使用摩擦材料。摩擦材料按其摩擦特性可分为低摩擦系数材料和高摩擦系数材料。低摩擦系数材料又称减摩材料或润滑材料,其作用是减少机械运动中的动力损耗,降低机械部件磨损,延长使用寿命;高摩擦系数材料又称为摩阻材料或摩擦材料。

按工作功能可分为传动与制动两大类摩擦材料。例如,传动作用的离合器片,是指通过离合器总成中离合器摩擦面片的贴合与分离将发动机产生的动力传递到驱动轮上,使车辆开始行走;制动作用的刹车片,是指通过车辆制动机构将刹车片紧贴在制动盘(鼓)上,使行走中的车辆减速或停下来^[6]。

按产品形状可分为刹车片(盘式片、鼓式片)、刹车带、闸瓦、离合器片、异形摩擦片。盘式片呈平面状,鼓式片呈弧形;闸瓦(火车闸瓦、石油钻机)为弧形产品,但比普通弧形刹车片要厚得多,25~30mm 范围;刹车带常用于农机和工程机械,属软质摩擦材料;离合器片一般为圆环形状制品;异形摩擦片多用于各种工程机械方面,如摩擦压力机,电葫芦等。

根据摩擦材料材质或基体的不同,又可以把摩擦材料分为树脂基摩擦材料、金属基摩擦材料、炭/炭复合材料和陶瓷基摩擦材料四类。

1.2.1 树脂基摩擦材料

树脂基摩擦材料由黏合剂(树脂)、增强纤维(石棉、金属纤维、玻璃纤维和有机纤维等)、摩擦性能调节剂(各种矿物质、无机盐等)和其他辅助材料(如树脂固化剂、成型工艺改良剂等)组成。树脂基摩擦材料广泛应用于各种车辆及各种机械上的制动器和离合器的衬片材料^[7~9],如图 1-2 所示。

石棉纤维是树脂基摩擦材料工业生产中应用最早,用量最大的增强纤维组分,

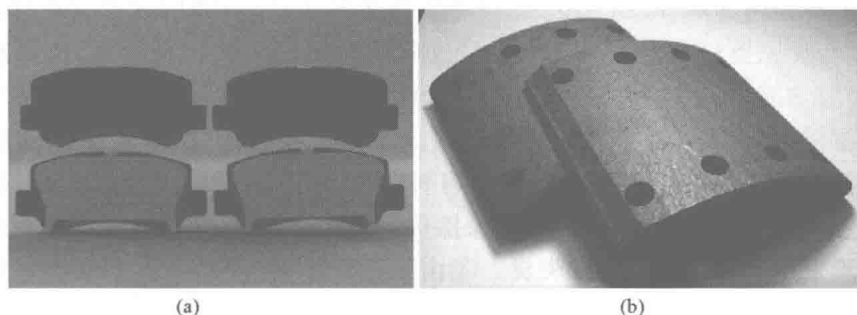


图 1-2 车辆制动器用树脂基摩擦材料

(a) 盘式刹车片；(b) 鼓式刹车片

它对于树脂基体的摩擦系数、抗磨损性、耐热性、强度、模量和硬度等各性能都起到一定的改良作用,且原材料来源广泛,价格低廉。此外,它与树脂的浸润性好,与材料中其他粉粒物料拌合性好(有促进其他物料分散的作用)。但也存在一些缺点,首先是石棉的热稳定性欠佳,因而导致其所增强的树脂基摩擦材料的抗热衰退性不良,一般来说,在 250°C 开始明显衰退,在 350°C 可能出现失效;其次是它对人体的伤害,石棉纤维被大量吸入肺部可能会造成石棉肺、肺癌等疾病。目前国际上虽然已经取消了关于使用石棉的全面禁令,不认为微量吸入石棉必然会导致上述疾病,但在生产及应用环境中,适当控制是必需的^[10~12]。

玻璃纤维是代替石棉纤维用于树脂基摩擦材料的一类极广泛的增强纤维。其优点是:硬度高、强度高、摩擦系数高、热稳定性好、对人体危害低于石棉。但其缺点是:所制得摩擦材料的磨损率大、与树脂的亲水性差、需要偶联剂处理、 800°C 后形成玻璃纤维微珠和价格高于石棉等。

以金属纤维(钢纤维、铜纤维)代替石棉纤维增强树脂基摩擦材料始于 20 世纪 60 年代,又称为半金属基摩擦材料。目前,钢纤维是代替石棉纤维最重要的增强材料之一。半金属摩擦材料也是最重要的一类无石棉树脂基摩擦材料,其材质配方组成中通常含有 $30\%\sim 50\%$ 的铁质金属物(如钢纤维、还原铁粉、泡沫铁粉),半金属摩擦材料因此而得名,是最早取代石棉而发展起来的一种无石棉材料。

半金属摩擦材料是一种性能优良的摩擦材料,它具有以下性能特点^[13~15]: ①摩擦系数在 400°C 以下非常稳定,热衰退率小,热稳定性好;②耐磨性好,使用寿命比石棉摩擦材料提高了 $3\sim 5$ 倍;③摩擦接触面上比压升高时,摩擦系数变化小,较高负荷下有良好的摩擦性能;④优良的能量吸收性能可使制动器和离合器尺寸缩小;⑤导热性能好,能改善摩擦面的温度环境;⑥对环境污染小。

半金属材料的这些特点使它成为一类具有广泛发展前景的摩擦材料,但是也存在一些缺陷,主要表现为:①密度大,使得半金属摩擦材料的密度通常高于石棉