



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属

理论与技术前沿丛书
SERIES OF THEORETICAL AND TECHNOLOGICAL FRONTIERS OF
NONFERROUS METALS

高性能粉末冶金制动摩擦材料

HIGH-PERFORMANCE POWDER METALLURGY FRICTION MATERIALS

姚萍屏 著
Yao Pingping



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团



国家出版基金项目

NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属理论与技术前沿丛书

高性能粉末冶金制动摩擦材料

High - Performance Powder Metallurgy Friction Materials

姚萍屏 著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团

图书在版编目(CIP)数据

高性能粉末冶金制动摩擦材料/姚萍屏著.

—长沙:中南大学出版社,2015.11

ISBN 978-7-5487-2022-5

I. 高... II. 姚... III. 粉末冶金-摩擦材料

IV. TF125.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 267386 号

高性能粉末冶金制动摩擦材料

姚萍屏 著

☐责任编辑 胡业民

☐责任印制 易建国

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙市宏发印刷有限公司

☐开 本 787×1092 1/16 ☐印张 22.5 ☐字数 448 千字 ☐插页

☐版 次 2015 年 11 月第 1 版 ☐2015 年 11 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-2020-5

☐定 价 110.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内容简介

Introduction

本书主要阐述了著者团队近 20 年来关于粉末冶金制动摩擦材料相关的研究成果，系统描述了航空制动粉末冶金摩擦材料、风电制动粉末冶金摩擦材料、空间制动粉末冶金摩擦材料以及高速列车制动粉末冶金摩擦材料等关于其材料设计、制备技术、摩擦试验、性能表征以及摩擦学规律分析等研究内容。

本书可供从事摩擦学研究的科研工作者使用，也可供高等工业院校与摩擦学相关专业的教师、研究生和高年级学生参考。

2018080309

作者简介

About the Author

姚萍屏 博士，中南大学粉末冶金研究院研究员，博士生导师，长期从事高性能粉末冶金摩擦材料、减摩与耐磨材料等新材料的研究。现为湖南省摩擦学会理事长、中国机械工程学会摩擦学分会常务委员、中国机械工程学会摩擦与耐磨减摩材料与技术专业委员会主任委员、《润滑与密封》杂志编委。

主持和承担了国家 863 计划、国家自然科学基金面上项目、铁道部重大技术引进与吸收项目、中国民航总局航空制动材料项目、国防攻关项目和湖南省杰出青年基金等 20 余项课题。研究发明的空间对接机构摩擦副作为国家对接机构项目中的两项关键部件之一，成功应用在天宫一号和神舟系列飞船的对接中；发明的波音 737NG 系列飞机粉末冶金摩擦材料，解决了高能制动高耐磨性和可靠性难题，研制的粉末冶金制动材料性能优于进口材料，达到国际先进水平，全面实现了波音 737NG 飞机制动材料的国产化，保障了我国航空战略安全的需要；开发了国内最早提速列车的铁基闸瓦材料和结构，为国内目前 75% 粉末冶金闸瓦的生产提供技术支持。在粉末冶金摩擦材料方面发表论文 50 余篇，合作主编教材 1 部，申请国家发明专利 12 项，获得国家发明专利授权 8 项，获得湖南省科学进步一等奖 1 项（第一名），上海市科学进步奖三等奖 1 项，部级科技进步三等奖 2 项。

学术委员会

Academic Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主 任

王淀佐 中国科学院院士 中国工程院院士

委 员 (按姓氏笔画排序)

于润沧	中国工程院院士	古德生	中国工程院院士
左铁镛	中国工程院院士	刘业翔	中国工程院院士
刘宝琛	中国工程院院士	孙传尧	中国工程院院士
李东英	中国工程院院士	邱定蕃	中国工程院院士
何季麟	中国工程院院士	何继善	中国工程院院士
余永富	中国工程院院士	汪旭光	中国工程院院士
张文海	中国工程院院士	张国成	中国工程院院士
张 懿	中国工程院院士	陈 景	中国工程院院士
金展鹏	中国科学院院士	周克崧	中国工程院院士
周 廉	中国工程院院士	钟 掘	中国工程院院士
黄伯云	中国工程院院士	黄培云	中国工程院院士
屠海令	中国工程院院士	曾苏民	中国工程院院士
戴永年	中国工程院院士		

编辑出版委员会

Editorial and Publishing Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主 任

罗 涛(教授级高工 中国有色矿业集团有限公司总经理)

副主任

邱冠周(教授 国家“973”项目首席科学家)

陈春阳(教授 中南大学党委常委、副校长)

田红旗(教授 中南大学副校长)

尹飞舟(编审 湖南省新闻出版局副局长)

张 麟(教授级高工 大冶有色金属集团控股有限公司董事长)

执行副主任

王海东 王飞跃

委 员

苏仁进 文援朝 李昌佳 彭超群 谭晓萍

陈灿华 胡业民 史海燕 刘 辉 谭 平

张 曦 周 颖 汪宜晔 易建国 唐立红

李海亮

总序

Preface

当今有色金属已成为决定一个国家经济、科学技术、国防建设等发展的重要物质基础，是提升国家综合实力和保障国家安全的关键性战略资源。作为有色金属生产第一大国，我国在有色金属研究领域，特别是在复杂低品位有色金属资源的开发与利用上取得了长足进展。

我国有色金属工业近 30 年来发展迅速，产量连年来居世界首位，有色金属科技在国民经济建设和现代化国防建设中发挥着越来越重要的作用。与此同时，有色金属资源短缺与国民经济发展需求之间的矛盾也日益突出，对国外资源的依赖程度逐年增加，严重影响我国国民经济的健康发展。

随着经济的发展，已探明的优质矿产资源接近枯竭，不仅使我国面临有色金属材料总量供应严重短缺的危机，而且因为“难探、难采、难选、难冶”的复杂低品位矿石资源或二次资源逐步成为主体原料后，对传统的地质、采矿、选矿、冶金、材料、加工、环境等科学技术提出了巨大挑战。资源的低质化将会使我国有色金属工业及相关产业面临生存竞争的危机。我国有色金属工业的发展迫切需要适应我国资源特点的新理论、新技术。系统完整、水平领先和相互融合有色金属科技图书的出版，对于提高我国有色金属工业的自主创新能力，促进高效、低耗、无污染、综合利用有色金属资源的新理论与新技术的应用，确保我国有色金属产业的可持续发展，具有重大的推动作用。

作为国家出版基金资助的国家重大出版项目，《有色金属理论与技术前沿丛书》计划出版 100 种图书，涵盖材料、冶金、矿业、地学和机电等学科。丛书的作者荟萃了有色金属研究领域的院士、国家重大科研计划项目的首席科学家、长江学者特聘教授、国家杰出青年科学基金获得者、全国优秀博士论文奖获得者、国家重大人才计划入选者、有色金属大型研究院所及骨干企

业的顶尖专家。

国家出版基金由国家设立，用于鼓励和支持优秀公益性出版项目，代表我国学术出版的最高水平。《有色金属理论与技术前沿丛书》瞄准有色金属研究发展前沿，把握国内外有色金属学科的最新动态，全面、及时、准确地反映有色金属科学与工程方面的新理论、新技术和新应用，发掘与采集极富价值的研究成果，具有很高的学术价值。

中南大学出版社长期倾力服务有色金属的图书出版，在《有色金属理论与技术前沿丛书》的策划与出版过程中做了大量极富成效的工作，大力推动了我国有色金属行业优秀科技著作的出版，对高等院校、研究院所及大中型企业的有色金属学科人才培养具有直接而重大的促进作用。

王淀佐

2010年12月

前言

Foreword

粉末冶金摩擦材料自 20 世纪 20 年代初发明以来,随着研究的不断深入,它的应用已涉及海洋中的舰船、陆地上的高铁、风电和工程机械、航空中的飞机以及航天中的宇航器等领域,已成为现代摩擦材料领域中应用最广泛的材料。

没有制动就没有高速。随着现代机器运转速度和负荷不断地增加,其制动对摩擦材料提出了更高、更苛刻的要求。粉末冶金制动摩擦材料已成为各行业广泛应用的现代摩擦材料。

著者长期从事高性能粉末冶金摩擦材料的研究与应用工作,本书主要内容为著者团队近 20 年研究工作的研究成果,主要阐述了粉末冶金制动摩擦材料的研究进展,系统描述了航空制动粉末冶金摩擦材料、风电制动粉末冶金摩擦材料、空间制动粉末冶金摩擦材料以及高速列车制动粉末冶金摩擦材料等方面的主要研究进展。

本书共分 5 章,包括绪论、航空制动粉末冶金摩擦材料、风电制动粉末冶金摩擦材料、空间制动粉末冶金摩擦材料以及高速列车制动粉末冶金摩擦材料等。

本书的研究成果得益于国家自然科学基金、国家“863”计划、国防攻关计划以及湖南省杰出青年基金等相关项目的支持,著者在此表示感谢。

书中所引用文献资料都尽量注明出处,便于读者检索与查阅,但为了达到全书整体的要求,部分做了取舍、补充和变动,而对于没有说明之处,望原作者或原资料引用者谅解,笔者在此表示感谢。

本书的出版,得到了 20 年来与笔者一起工作的同事们和研究生的大力支持,在此表示衷心的感谢。

由于粉末冶金制动摩擦材料使用条件的多样性,著者虽力求全面阐述,但限于研究的深度和广度,书中还存在一些不妥之处

和错误，恳请专家和读者批评指正。

本书可供从事粉末冶金制动摩擦材料设计与制造的研究人员、工程技术人员及管理人员参考，也可供大学和中专相关专业的师生参考。

姚萍屏
2015 年 10 月

目录

Contents

第1章 绪论	1
1.1 摩擦学基础知识	2
1.2 摩擦表面接触的力学和物理特征	3
1.3 摩擦过程中表面层的变化	4
1.4 摩擦性能参数及影响因素	5
1.5 制动摩擦材料的发展趋势	6
参考文献	8
第2章 航空制动粉末冶金摩擦材料	11
2.1 航空制动摩擦材料的发展	11
2.2 航空制动摩擦材料的特点	15
2.3 航空制动粉末冶金摩擦材料的发展概况	16
2.3.1 航空制动粉末冶金摩擦材料的成分设计	16
2.3.2 航空制动粉末冶金摩擦材料的制造工艺	19
2.4 航空制动粉末冶金摩擦材料的研究	21
2.4.1 材料设计的基本准则	21
2.4.2 温度场模拟	22
2.4.3 基体及其强化组元对摩擦材料组织与性能的影响	35
2.4.4 摩擦组元对摩擦材料组织与性能的影响	57
2.4.5 润滑组元特性及其对摩擦材料性能的影响	64
2.5 航空制动粉末冶金摩擦材料的制备	92
2.5.1 混料	92
2.5.2 压制成形	100
2.5.3 烧结	105

2.6 航空制动粉末冶金摩擦材料的摩擦磨损性能	124
2.6.1 航空制动摩擦材料的组织结构和基本性能	125
2.6.2 实验室模拟条件下的铜基摩擦磨损特性	127
2.6.3 实验室模拟条件下典型摩擦表面分析	132
2.6.4 航空制动铜基摩擦材料表面层结构分析	134
2.6.5 航空制动摩擦材料摩擦过程中裂纹分类及萌生机制	138
2.6.6 航空制动摩擦材料磨屑的初步表征	141
2.6.7 地面惯性台模拟条件下的摩擦磨损特性	148
2.7 小结	152
参考文献	154
第3章 风电制动粉末冶金摩擦材料	156
3.1 风电制动摩擦材料的发展概况	156
3.1.1 国内外风力发电概况	156
3.1.2 风电制动摩擦材料的发展及特点	160
3.2 风电制动粉末冶金摩擦材料设计研究	164
3.2.1 基体组元对摩擦材料组织与性能的影响	164
3.2.2 摩擦组元对摩擦材料组织与性能的影响	177
3.2.3 润滑组元对摩擦材料组织与性能的影响	178
3.3 沙尘对风电制动粉末冶金摩擦材料的影响	198
3.3.1 沙尘对摩擦材料和对偶摩擦磨损性能的影响	199
3.3.2 沙尘对摩擦材料摩擦表面的影响	200
3.3.3 沙尘对制动曲线的影响	202
3.3.4 沙尘环境下摩擦材料的磨损机制分析	203
3.4 小结	206
参考文献	208
第4章 空间制动粉末冶金摩擦材料	210
4.1 空间制动摩擦材料的发展概况	210
4.2 空间用摩擦材料设计及各组元作用机理	211
4.2.1 基体组元的选择及其作用机理	212

4.2.2 摩擦组元的选择及其作用机理	217
4.2.3 润滑组元的选择及其作用机理	220
4.2.4 对偶材料的优化设计研究	232
4.3 制动条件对摩擦副材料摩擦学性能的影响	234
4.3.1 压力对摩擦材料摩擦性能的影响	234
4.3.2 真空度对摩擦材料摩擦性能的影响	239
4.3.3 外界温度对摩擦材料摩擦性能的影响	241
4.3.4 空间用摩擦副材料的抗原子氧及紫外辐照侵蚀能力	242
4.4 空间对接用粉末冶金摩擦副的研制与应用	244
4.4.1 空间对接用粉末冶金摩擦副的磨合特性	244
4.4.2 三种功能条件下的摩擦曲线	251
4.4.3 环境对空间对接用摩擦副摩擦学性能的影响	253
4.4.4 空间用粉末冶金摩擦副的应用与展望	262
4.5 小结	263
参考文献	264
 第5章 高速列车粉末冶金制动摩擦材料	 267
5.1 高速列车发展现状	267
5.1.1 高速列车发展及特点	267
5.1.2 国内外高速列车发展历程	267
5.2 高速列车制动摩擦材料发展现状	270
5.2.1 高速列车制动系统	270
5.2.2 制动摩擦材料特点及结构	270
5.2.3 高速列车制动摩擦材料的发展历程与现状	271
5.3 高速列车粉末冶金制动摩擦材料研究	276
5.3.1 高速列车粉末冶金制动摩擦材料有限元分析	277
5.3.2 摩擦组元对高速列车粉末冶金制动摩擦材料的影响	318
5.4 小结	336
附录	338
参考文献	339

第1章 绪论

摩擦材料是指积极利用其摩擦特性,以提高摩擦磨损性能为目的,用于摩擦离合器与摩擦制动器的摩擦部分,实现动力的传递、阻断,达到使运动物体减速、停止或协同运动等行为目的所用的材料^[1, 2]。

制动器是使运动中的机构或机器迅速减速、停止并保持停止状态的装置;有时也用于调节或限制机构或机器的运动速度。通常而言,在描述术语中将使用在制动器中的摩擦材料称为制动摩擦材料,如汽车制动摩擦材料、火车制动摩擦材料及航空制动摩擦材料等。制动摩擦材料所在部件和与它贴合的部件(以下简称为对偶材料)共同构成摩擦副,全部摩擦副构成刹车副总体,通过摩擦材料与对偶的摩擦,将动能转变为热能并将热量吸收或散发掉,从而逐步降低制动摩擦材料与对偶之间的相对运动速度,直至停止相对运动,达到制动目的^[3, 4]。其工作过程在力学上可简化为图1-1所示模型。

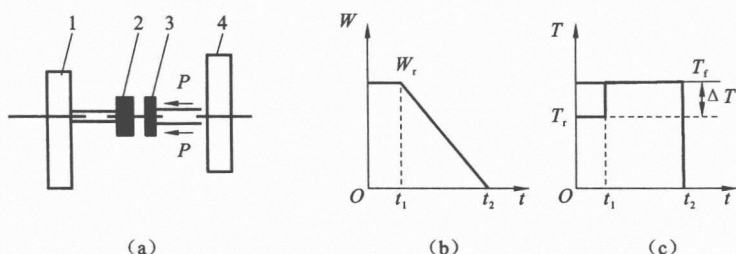


图1-1 制动摩擦材料工作模型

(a) 力学模型; (b) 制动过程; (c) 力矩变化模型

1—主动件; 2—对偶材料部件; 3—制动摩擦材料部件; 4—从动件; P —制动压力;

W_r —主动件转速; T_f —制动力矩; T_r —阻力矩

制动过程可以简单描述为通过对制动摩擦材料部件施加压力 P 使之与对偶材料部件贴合,从而使主动件转速逐步降至零。在此过程中,假定制动力矩 T_f 和阻力矩 T_r 均为常数,为了达到制动目的,制动力矩 T_f 除了应能克服主动件的惯性阻力矩 T_r 以外,还应提供一减速力矩 ΔT 以降低主动件的惯性力矩: $\Delta T = T_f - T_r$ 。制动初期,由于刹车装置的接合力矩不足以克服主动件的阻力矩,因而,在这段时间内主动件仍保持原速,当 T_f 等于 T_r 时,主动件开始减速,并经过时间 $t_2 - t_1$,

速度降低至零。刹车装置所产生的摩擦力矩应等于或大于制动力矩，其大小取决于刹车副材料的摩擦因数、制动压力、几何形状与尺寸等。

要使刹车副完成上述制动过程，理想的制动摩擦材料应具有以下性能^[5-8]：合适而稳定的摩擦因数、高的导热性与耐热性、高的耐磨性、良好的耐油、耐湿和耐腐蚀能力、足够的强度，在和对偶进行摩擦接触时不产生或产生很小的噪音，在工作中不发生咬合或黏结，原材料来源充裕，性能价格比高，工艺性能良好等。

制动摩擦材料要同时完全满足上述各点要求是困难的，但应依据工况条件，满足所需的摩擦因数及其变化范围和预定寿命的要求。

摩擦材料最早应用于制动，因此，摩擦材料的发展历程也揭示了制动摩擦材料发展的全过程。

1.1 摩擦学基础知识

两个相互接触的物体在外力的作用下发生相对运动或具有相对运动的趋势时，在接触面间产生切向的运动阻力，这一阻力称为摩擦力，这种现象称为摩擦。这种摩擦与两物体接触部分的表面相互作用有关，而与物体内部状态无关，所以又称为外摩擦。阻碍同一物体（如液体和气体）各部分间相对移动的摩擦称为内摩擦。摩擦可以按照不同的分类方式来分类，按照摩擦副的运动状态可分为静摩擦和动摩擦；按照摩擦副的运动形式可分为滑动摩擦和滚动摩擦；按照摩擦副表面的润滑状况可分为纯净摩擦、干摩擦、流体摩擦、边界摩擦和混合摩擦等。

人们对摩擦现象的研究比实际应用要晚得多，最初的研究是在 15 世纪意大利的文艺复兴时期，1508 年意大利的科学家达·芬奇首先对固体摩擦进行了研究并提出了摩擦力的概念。1699 年法国工程师阿蒙顿进行了摩擦实验，并建立了基本的公式。随后在 1785 年法国科学家库仑也进行了相同的实验，总结出了阿蒙顿-库仑摩擦定律^[41]，一般称它为古典定律，综述如下：

1) 摩擦力与作用在摩擦副间的法向载荷成正比，即

$$F = \mu P \quad (1-1)$$

式中： F ——摩擦力；

μ ——摩擦因数；

P ——法向载荷。

摩擦因数是评定摩擦性能的重要参数。公式(1-1)通常称为库仑定律。

2) 摩擦力的大小与名义接触面积无关。

3) 静摩擦力大于动摩擦力。

4) 摩擦力的大小与滑动速度无关。

5) 摩擦力的方向总是与接触面间的相对运动速度方向相反。

古典摩擦定律是实验中总结出的定律,它揭示了摩擦的理想性质,几百年来,它被认为是合理的,并广泛地应用于工程计算中。但是,近代对摩擦的深入研究,发现上述的古典定律与实际情况有许多不同的地方。比如在上述古典定律中,摩擦因数 μ 对一定的材料是一个常数。但实际试验表明,各种材料在不同环境条件下的摩擦因数都是变化的。如硬钢表面在正常大气条件下,摩擦因数的值为0.6,但在真空中高达2;石墨对石墨在正常大气条件下的摩擦因数为0.1,但在很干燥的空气中可超过0.5。可见摩擦因数并不是一个常数,而是随条件而变化的。

1.2 摩擦表面接触的力学和物理特征

由于粉末冶金制动摩擦材料中的金属与非金属组分形成带有孔隙的假合金,其摩擦磨损是一个极其复杂的过程,除了材料的复杂相及孔隙与填充物以及对偶材料等自身因素的影响外,材料经受诸如压力、温度、速度、运动形式、运动过程、制动时间和外界环境等因素的作用,发生一系列物理、化学、力学变化,表现为摩擦材料表层与次表层的弹塑性变形、相组织变化、以及材料成分变化,表面层的形成和材料成分选择性转移等^[42]。因此,对于粉末冶金制动摩擦材料摩擦磨损过程的研究包括过程的宏观变化和微观变化研究。宏观变化包括相互作用的摩擦表面形貌的变化、大小磨粒的剥落、摩擦表面由于薄层的脱落产生或多或少的磨损等。微观变化包括组织和亚组织变化。这些变化或多或少地反映在摩擦副工作时的总行为上,并决定摩擦副的摩擦磨损性能。

摩擦材料工作的特点是在很薄的摩擦表面层中发生变形^[41],因此,研究摩擦磨损过程,最终归结于对摩擦表面相互作用的认识,这种相互作用是在不连续接触点即接触斑点的形成中出现的,在这种情况下发生的过程,往往是在很高的局部压力与很高的局部温度下进行的。

摩擦时发生的某些过程是不希望出现的,因为它们将引起摩擦表面破坏,如:硬度和强度同时降低、大的塑性变形、疲劳裂纹的出现以及黏结等。属于有利的因素有:加工硬化、出现强度较高的组织和相、产生在摩擦条件下稳定的新化合物、在工作表面出现所谓稳定的活性工作层等^[43]。

如上所述,摩擦过程的变化主要发生在摩擦部件的接触表面,下面对表面接触的特性略加描述^[43]:

1) 接触的不连续性。由于表面的不均匀磨损及本身固有的粗糙度与孔隙的存在,粉末冶金制动摩擦材料在与对偶材料接触时,总是不连续的。根据这种情况,接触面可分为三种不同的形式:名义的、轮廓的、实际的。实际接触面积的