

现代摩擦材料

冶金工业出版社

现代摩擦材料

[苏] И.М.费多尔钦科 等著

徐润译 黄国伟 李金鹏 译



冶金工业出版社

B 043547

现代摩擦材料

〔苏〕И.М.费多尔钦科 等著

徐润泽 黄国伟 李金鹏 译

•

冶金工业出版社出版

（北京灯市口74号）

新华书店北京发行所发行

天津新华印刷一厂印刷

•

850×1168 1/32 印张10 5/8 字数279千字

1983年4月第一版 1983年4月第一次印刷

印数00,001~6,600册

统一书号：15062·3894 定价1.35元

译者说明

为了适应我国社会主义现代化建设中摩擦材料发展的需要，我们将苏联乌克兰科学院1975年出版的《СОВРЕМЕННЫЕ ФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ》一书进行了翻译。

本书系统地叙述了有关摩擦材料方面的问题：摩擦和磨损过程的理论基础，摩擦装置，摩擦元件及摩擦材料的基本类型，影响摩擦材料使用性能的因素，钢背的准备，摩擦制品的生产以及摩擦材料研究中的主要方向等。这是一本内容丰富的摩擦材料专著。本书是从事烧结摩擦材料生产、科研、设计、使用的工程技术人员的极为有价值的参考书，它也可以作为高等院校粉末冶金专业的教学参考书。

本书第一章由徐润译，前言、绪论，第二、三、四章由黄国伟译，第五章由李金鹏译，全书由徐润译审核。由于译者水平所限，书中难免还有缺点或错误，希望读者批评指正。

前 言

用于制动和传动装置的摩擦材料是机器制造中最重要的结构材料。然而，有关其研究和生产方面的问题，在文献中至今没有得到系统和全面的总结。摩擦材料课题已成为独立的科学课题，它包括的问题很多：关于摩擦和磨损机理的理论，对材料要求及与这些要求相适应的材料物理机械性能和其它性能，摩擦材料设计和制备工艺的科学基础，工艺参数对其组织结构和摩擦性能影响，工作条件的分析等等。

由于现代机器和机械的工作负荷和速度迅速增长，在现有摩擦材料——钢、铸铁、青铜、石棉橡胶、烧结摩擦材料和其它材料系列中，从工作的可靠性、摩擦系数大小和耐磨性方面说，粉末冶金方法制造的烧结摩擦材料居首位。

自从1929年创制烧结摩擦材料以来，曾经发表过大量的著作，阐述了制品制造工艺，检验和应用方面的个别问题。有关摩擦材料成分及其制品制造工艺原理、工艺设备及摩擦元件的结构等，在许多国家已作为专利，刊载在相应的专利出版物中。国外文献中有关烧结摩擦材料的资料主要发表在各种技术杂志、会议报告文集及一些粉末冶金专著中，例如戈策尔的《粉末冶金导论》第二卷（1950年）和琼斯的《粉末冶金原理》（1960年），后者1965年已译成俄文。

从20世纪50年代至60年代以来，摩擦材料领域的论文发表在下面这些粉末冶金杂志上：如《普兰西粉末冶金学报》（奥地利，1953年开始）、《粉末冶金的成就》（捷克斯洛伐克，1964年开始）、《粉末冶金》（英国，1958年开始）、《国际粉末冶金杂志》（美国，1965年开始）、《国际粉末冶金杂志》（西德，1969年开始）。1965年在捷克斯洛伐克出版的杜菲克的《金属陶瓷摩擦材料》专著中，主要介绍了捷克斯洛伐克研究工作者在这方面的科研成

果。

苏联和国外一样，直到现在还没有一本将这一领域的工作经验进行概括和系统化的专门著作。1965年出版的普列依格尔左，格恩肯和科夫纳译基的《金属陶瓷摩擦材料》小册子仅仅对烧结摩擦材料成分的某些专利资料作了简短评述。其中基本部分是润滑摩擦的锡青铜基材料和金属塑料材料的研究结果。

在依格拉托夫等人的《铁基摩擦材料的生产》(1968年)一书中，提供了铁基摩擦材料中各种不同组元含量变化对其性能影响的研究结果，详细叙述了铁基摩擦材料制品的生产以及工艺设备。

苏联烧结摩擦材料研究者的论文发表在《粉末冶金》杂志、会议报告、讨论会报告、专题论文集和其它刊物上。

考虑到继续扩大烧结摩擦材料生产和应用的前景，作者们向自己提出了一个目标——总结这一领域中已有的经验。这将有助于：新型摩擦材料的研究；根据具体机构选择摩擦材料的类型及其工作条件；掌握、制订和完善制取工艺。从文献资料的分析及作者们在这方面多年的工作经验可以阐述所需解决的最重要的问题以及在材料成分选择和制造工艺方面确定新的发展方向。

本书的绪论、第一章第二节、第二章第一节和第五节、第三章第七节和第八节、第五章第五节由费多尔钦科编写；第一章第一节、第二章第三节和第四节、第三章第五节、第四章第一节至第四节、第五章第一节、第三节和第六节由克良节克编写；第五章第七节、第八节由巴拉依阿齐编写；第一章第三节至第五节及第二章第二节、第三章第六节由费多尔钦科和巴拉依阿齐合写，第三章第二节至第四节及第五章第四节由克良节克和巴拉依阿齐合写，第一章第六节、第三章第一节和第五章第二节由费多尔钦科和克良节克合写。

绪 论

不用制动和传动装置，现代机器和机构就不能可靠地工作。制动和传动装置是由耐磨的制动材料或通常所称的摩擦材料装配而成。由于各种机构的功率、速度和负荷迅速增长，因而对摩擦材料的要求也越来越高。摩擦部件是机器中最重要的部件，因为它们首先决定了机器工作的可靠性和寿命，在很多情况下（航空、汽车运输）也决定了人们的生命安全。

摩擦部件——制动器、离合器、安全离合器、摩擦传动等——是利用摩擦力的原理来进行工作的。

摩擦材料最重要的特点是它能够吸收动能，并将动能转化为热而散发到空气中，材料本身没有破坏性的磨损、摩擦部件不被破坏。

制动装置的能载在某些情况下达到了极大的数值。比如当飞机着陆时，在30秒内8个制动盘吸收的能量近438000千瓦，相当于使320公斤铁加热到1482°C所需要的能量^[449]。在10秒内要使速度为180公里/时、重量为2.5吨的汽车停止，制动器必须吸收约300马力的能量^[491]。制动时制动部件中所产生的热量应当在下一次制动前散发出去，否则将使摩擦系数大大降低而不能进行制动。

工业上广泛应用烧结摩擦材料始于20世纪30年代末期，当时很多机构的功率和工作温度条件已经达到了能使有机粘结的摩擦材料迅速损坏的程度。在以后的年代里，不断扩大了烧结摩擦材料的生产。美国烧结摩擦材料的生产规模1960年估计为2000万美元，1962年为2400万美元，1968年为3800万美元^[396]。摩擦材料应具有综合性能，其中主要的是：足够高而稳定的摩擦系数，高的耐磨性、耐热性和机械强度，不产生粘结。

由于综合要求的复杂性，所以工业上应用的摩擦材料没有一种能全部满足这些要求。

不久前曾广泛用于汽车、拖拉机、飞机、挖土机及其它机器上的石棉摩擦材料具有高而稳定的摩擦系数，但它不适用于在重负荷工作条件下的现代机器上。在新机器中，对无润滑的制动部件，当压力为25公斤/厘米²时，制动初速达到50米/秒；对润滑部件，当压力为70公斤/厘米²时，制动初速达到100米/秒的更大数值。

摩擦装置短期内吸收巨大的能量，将急剧增高摩擦表面温度（达1200°C）和摩擦偶内温度（达500~600°C），在这样条件下，石棉摩擦材料由于所含的耐热性低的橡胶、甲醛和酚甲醛树脂等粘结剂将碳化，丧失摩擦性能的稳定性而迅速损坏^[49, 97]。石棉摩擦材料的低导热性导致摩擦装置中金属对偶体过热，从而很快损坏。

在某些方面仍在应用的金属摩擦偶件（钢—钢，铸铁—钢，青铜—钢），其特点是摩擦系数不稳定，随温度和滑动速度提高而显著降低，高温时有粘结的倾向。在油中工作时，金属偶件的摩擦系数过低。

粉末冶金工艺的发展，能够合成出各种新型的摩擦材料，这些材料在摩擦装置中的不同工作条件下具有高的耐热性和良好的摩擦性能（摩擦系数和耐磨性）。

苏联烧结摩擦材料在工业上得到应用是从伟大的卫国战争以后开始的。新型摩擦材料的创建及其在各类机器中工作能力的考验是与拉尔多夫、别勃涅夫、拉科夫斯基和布拉金的名字分不开的。目前烧结摩擦材料已广泛用于飞机、内燃机车、汽车、载重汽车、拖拉机、仪表钻探装置以及其它机械。

工业上对摩擦材料的需要量是很大的。用于金属切削机床上电磁离合器的烧结摩擦盘年需要量是500多万片。最近几年来，用于拖拉机传动装置离合器的摩擦盘每年需要500~600万片。

若把现用的银压机上的离合器和制动器改装为烧结摩擦材

料、就可能需要1600多万个轴瓦、摩擦片、摩擦带。所引用的例子仅仅描绘了国民经济对烧结摩擦材料的部分要求。因此，进一步扩大摩擦制品的生产能力，改进生产工艺以提高质量，研制出具有更好使用性能的新型摩擦材料便是今后首要的任务。

目 录

译者说明

前言

绪论 VI

第一章 关于摩擦材料、摩擦装置结构和摩擦过程的一般概念

- 第一节 摩擦材料及其生产情况概述..... 1
- 第二节 摩擦材料摩擦和磨损过程的理论基础.....13
- 第三节 摩擦偶摩擦时表面层中发生的过程.....23
- 第四节 对摩擦材料的要求.....43
- 第五节 制动和传动装置的基本类型.....50
- 第六节 摩擦元件的结构及其对摩擦装置工作参数
的影响.....57

第二章 摩擦材料的基本类型

- 第一节 根据用途分类.....68
- 第二节 在干摩擦条件下工作的材料.....69
- 第三节 在液体润滑条件下工作的材料.....81
- 第四节 在摩擦偶中与烧结粉末片工作的配对零件
材料.....88
- 第五节 摩擦材料的主要研究方向.....94

第三章 影响摩擦材料使用性能的因素及进一步改进

材料的途径

- 第一节 材料中组元的分类.....97
- 第二节 形成金属基体的组元.....99
- 第三节 起固体润滑剂作用的组元..... 109
- 第四节 摩擦剂..... 127
- 第五节 几种组分的配合..... 139
- 第六节 材料的组织结构..... 142

第七节 摩擦参数和外界条件·····	149
第八节 改善材料性能的途径·····	158
第四章 粉末和支承钢背的准备	
第一节 粉末特性·····	163
第二节 粉末的补充处理·····	173
第三节 混合料的制备和称料·····	177
第四节 支承钢背的准备·····	190
第五章 摩擦制品的生产	
第一节 压制工艺·····	197
第二节 烧结工艺·····	228
第三节 烧结制品的补充加工·····	259
第四节 摩擦材料制造工艺参数对其性能的影响·····	266
第五节 摩擦材料及其制品制造工艺的新方向·····	286
第六节 产品质量控制·····	288
第七节 生产的经济性·····	304
第八节 劳动保护和安全技术·····	307
参考文献 ·····	313

第一章 关于摩擦材料、摩擦装置结构和摩擦过程的一般概念

第一节 摩擦材料及其生产情况概述

烧结摩擦材料是一种复杂类型的粉末冶金工业产品，这一领域的工作是在创制和工业利用烧结减摩合金作的多孔轴承所取得成就的基础上发展起来的。

减摩和摩擦材料是用于摩擦工作条件下的一类材料。这些材料的特点是具有高的耐磨性，配对零件摩擦表面不粘结和不擦伤，具有好的磨合性以及高温、高压和高滑动速度下保持其综合性能。

减摩和摩擦材料之间不可能确定一个严格的界限。在与铸铁或钢配对时不润滑条件工作的摩擦系数大于0.20~0.25、润滑条件工作的摩擦系数为0.05的材料属于摩擦材料的范畴；具有较低摩擦系数的材料认为是减摩材料。由于摩擦系数值总是属于组或摩擦偶的两种材料，这种区分标志存在着明显的不足。

可以按摩擦材料的用途更确切地将其分类：用于制动和传动装置、安全离合器的材料属于摩擦材料；用于希望消耗摩擦功最小的轴承、衬套的材料属于减摩材料。这种分类因实际使用方便而沿用下来。

用于摩擦的烧结材料最早是1929年提出的^[204]。材料是含少量铅、锡和石墨的铜基合金^[203]。这种合金中能加入如氧化镁、滑石和白垩这样的添加剂。文献^[473]认为，在摩擦材料领域应用粉末冶金工艺原理的思想是属于施瓦尔茨科普夫的，他是这方面第一个专利的作者。

机器制造工业需要新型的摩擦材料，有机物粘结的石棉基材

料不能满足这种要求。这个问题靠粉末冶金方法制造的材料得到了解决，因为粉末冶金可以将金属和非金属组分的不同性能配合于一种材料中。

用于离合器的烧结摩擦片（粉末片以钮扣状机械联结于支承金属盘的两面）首先是美国通用金属粉末公司于1932年组织生产的^[104, 398]。航空工业是烧结摩擦片的第一个用户^[331]。

当时烧结摩擦材料新领域的基本工艺原理是美国维尔曼及其同事们于1937~1941年间取得专利的^[210, 473]。专利采用锡青铜作为摩擦材料的金属基体，锡青铜能用锌补充合金化。加入铁和二氧化硅来提高摩擦系数，加入石墨和铅作为润滑组分。在钢背表面上电镀一薄层铜可使摩擦层和钢背烧结时达到很好的结合^[209, 210]，摩擦盘的制造工艺过程规定在钟罩炉中进行加压烧结。

美国1935年时的摩擦零件的主要生产单位是维尔曼公司。稍后，用粉末冶金方法制造摩擦材料的美国其他公司有：石墨青铜公司，曼哈顿拉斯别斯托克公司拉斯别斯托克分部^[104, 331]。

在离合器和制动器中广泛利用烧结摩擦材料主要是由于此种材料比传统的有机粘结的材料以下的优越性能^[379]，即：能在相当高的温度和单位压力下工作；有较高的耐磨性；有油或水存在时性能稳定；能抗冲击负荷；受气候寒冷和炎热、大气湿度变化的影响小；不用改变摩擦装置的设计可以代替其他类型的摩擦材料和可以减少工作时的能耗。

1939年美国摩擦材料工业的总产值不低于二百万美元。

第二次世界大战时期，烧结摩擦材料的需要，特别是军事上的需要大大增加，这就刺激了生产的进一步增长^[433, 479]。1944年生产总产值为二千万美元^[104]。近年来，烧结摩擦材料占世界摩擦材料生产量的15%^[396]。

大约1950年以前所有烧结摩擦材料均在干摩擦条件下工作。从1950年开始烧结摩擦材料在汽车的自动传动中得到应用。在润滑条件下工作时摩擦系数降低，摩擦部件结构复杂化，但寿命增长。现在，大约75%的摩擦零件均在油中工作^[396]。

烧结摩擦材料在工业上的应用领域也在不断扩大。例如，近年来，烧结摩擦材料在旅客车厢、中型和重型载重汽车、公共汽车、拖拉机、农业机械、挖掘机、金属切削机床和锻压设备中得到了应用^[284,461,496,507]。五十年代末期汽车摩擦零件占汽车制造中粉末冶金法制造的零件的5.1%^[331]。烧结摩擦材料在遥控（电磁、液压、气动）金属切削机床及其他设备的离合器中得到了广泛应用^[147,497]。

第二次世界大战后，在英、法、西德、日本、捷克斯洛伐克、东德、波兰、罗马尼亚等国家，烧结摩擦材料的研制和生产开始急速发展。

首先，所有摩擦材料都是以铜合金为基制成的。现在，对于干摩擦条件下中等和重负荷工作的材料研制了铁及其合金为基的材料。虽然对烧结摩擦材料的前途和利用潜在性讨论得很早^[512]，但创立这种类型材料的工作在苏联、美国、英国、东德、捷克斯洛伐克是在20世纪50~60年代才开始的。

战后出现了大量的新型摩擦材料，例如，在1951~1952年美国本迪克斯航空公司用于汽车的展式制动器制动片和盘式制动器摩擦元件取得了专利。制成了锡、锌、铁强化的铜基或黄铜屑强化的铜-铅（35%Pb，65%Cu）合金基的材料。为了改善摩擦和磨损性能，合金中加入二氧化硅（5%）、石墨（1~6%）、氯化钙（4~26%）、莫来石、红柱石、硅线石（7%）^[176]。用这种材料制成的制动片，其特点是制动效率比有机材料的高50%，耐磨性比有机材料的大4倍，寿命提高了9倍。

1959年该公司提出了新的材料，这种材料在载重汽车的制动器中不产生粘结，延长了使用寿命^[224]。与已知的材料不同，新的材料含铋（7.5~15.0%）和铈（5%）。除铜外，用铁、镍和铈粉作金属基体。此外，材料含石墨（7.5%）、锌（7.5%）、莫来石（20~35%）、氧化铝、二氧化硅或氧化镁（达15%）。

1962年该公司取得了另一烧结材料的专利。这种烧结材料用石油焦分解的产物作粘结剂^[254]。材料成分（%）为：铜——

84.5、锡——4.5、莫来石——6、石油焦——5。在配对零件完全没有磨损情况下其耐磨性比有机制动展的高19倍，比一般烧结材料的高29倍。铜基、铁基或其他金属基材料的性能改善是由于加入石油焦而得到的。

1955年美国通用电机公司曾研制成功一种制造铁基烧结摩擦片（含石墨20~25%和二硫化钼2~6%）的方法^[247]。为了提高弹性和抗腐蚀性，将多孔材料浸渍以下列物质：蒸馏呋喃甲醛酮的产物、硅酸和硫酸锰在磷酸中的溶液等。根据该公司的评价，这种材料具有好的摩擦性能，工作时不产生噪音。

为了稳定含大量石墨铁基烧结材料的摩擦过程，往材料中加入铁铝合金（Al含量达22.5%）和铁镍合金（Ni含量40~42%）^[228]。

1957年美国制动展公司的专利^[213]，提出向铜基摩擦材料中加入2~8%氧化钼以便提高合金的摩擦系数和耐磨性。对于工作条件更苛刻的情况，该公司研制成功了铜粉和铁粉基加入硅线石的摩擦材料^[220]以及铁基加入二硫化钼和氧化铝的摩擦材料^[214]。

英国有许多公司从事摩擦制品的研究、试验和工业生产。

从1958年起，英国菲洛多股份有限公司^[309,383]与美国维尔曼公司和本迪克斯航空公司合作生产青铜基、铁基和陶瓷基的烧结摩擦材料^[457,468]。

邓洛普摩擦装置股份有限公司1956年取得了熔点不低于1100°C的粘结的非金属基体新材料的专利。这种粘结的材料有焦磷酸锰或者粉状或纤维状的石棉或者高岭土类的矿物质。为了改善耐磨性和摩擦性能，向材料中加入了莫来石（30~80%）、石墨（10~15%）、二硫化钼（15%）^[217]。

为了消除含莫来石材料的缺点（在降低滑动速度时提高摩擦系数，这会引引起制动时的振动），该公司提出加入磷化物包括磷化钴、磷化铜、磷化铁、磷化镍等^[183]。利用铜、铁、黄铜、青铜或热固树脂如酚甲醛树脂作材料的基体，材料中可以加入石棉、二硫化钼和石墨。

加磷化物的摩擦材料主要用于航空盘式制动器，也适用于制动轮和离合器。

材料中加入氮化硅^[255,277]以进一步完善摩擦材料的成分。这种材料的基体金属从铁、铜、镍、钴、锰及它们与变态锡、锌、铅、钼等（达40%）的混合物中进行选择。为了调整摩擦系数和磨损值，建议材料中加入石墨、二硫化钼、焦磷酸锰、矿物纤维（达25%）。这种材料用于航空、拖拉机、起重运输机的制动片和离合器环。

英国不断扩大用于挖土机、飞机、汽车、海船及其他机器中的摩擦零件的生产^[380,386,422]。1965年这种类型零件的年生产值大约为一百万英磅^[432]。烧结制品股份有限公司摩擦材料制造的各种摩擦制品示于图1中^[432]

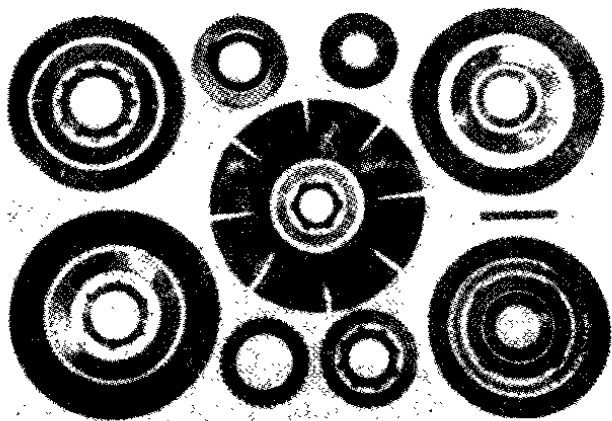


图1 英国烧结制品股份有限公司的摩擦材料制作的各种摩擦制品

法国菲洛多公司的法兰西公司制造的摩擦材料具有新的特点^[240]。在该公司取得专利的烧结摩擦材料中粉状金属组分占40~70%（主要是锡、铅、铜、青铜、黄铜、铁、锌、铬），补充组分是石墨和二硫化钼。为了增加摩擦系数，加入二氧化硅和

硅酸盐；为了提高耐热性，加入玻璃棉，需要时加入熔剂。

上述材料的特点是在其成分中有无定形碳和有机物质（含挥发成分12~20%的焦化煤）。零件用热压的方法制造。

1961年该公司取得专利，专利记述有两接触面的偶件^[248]，其中之一是含15~35%二氧化硅以及如铜、镁、锰、镍、钴、铁、钛等金属添加剂的铝合金，第二个接触面是由40~85%的矿物添加剂（石棉、白垩、重晶石、氧化镁）和10~15%的有机粘结剂组成。这种摩擦偶具有稳定的摩擦系数，磨损小，在200°C下能稳定工作。

一种由铁粉和冶金焦组成的摩擦材料也研制成功了^[256]。此外，材料中加入天然的或合成的石墨和硅酸铝。往冶金焦和硅酸铝混合粉中加入调整摩擦的组分：石墨（5~20%），二硫化钼（0.5~10%）和钼粉（10%以下）。

法国也取得了其他铜基、铁基、多元合金（钴、铬、镍、钨、铁等）基材料的专利^[241, 252, 445]。

西德从事不同类型材料摩擦制品生产的公司有：尤里德有限公司，皂石—镁股份公司，戴姆勒尔—本兹股份公司，卡尔·施密特有限公司。

尤里德有限公司研制成功了一种烧结材料和有机粘结剂组成的复合摩擦材料^[273]。它们用下述方法制成：混合料是由铜、锡、铅、铁等金属粉末与氧化物或陶瓷、天然石墨、二硫化钼添加剂组成，烧结成片、块或带，然后破碎成粒度0.1~5毫米的颗粒，仔细与填充剂（石棉、金属氧化物、石墨）混合，加入粘结剂（例如酚甲醛的蒸馏产物）压制，在低于有机粘结剂分解温度下加热处理。这种摩擦材料的特点是强度和抗压强度高，摩擦系数高（与一般烧结材料比较），耐磨性高，建议用于制造高负荷制动器和离合器的摩擦片。

该公司也研制成功了一种由有机材料作的基片与散热用的烧结材料作的摩擦片构成的制动片，这种制动片的使用寿命比不带烧结摩擦片的制动片寿命长2倍，同时配对零件的使用寿命也延