



Fe_3Al 基

复合材料的制备与性能

李 静 著



化学工业出版社

Fe_3Al 基

复合材料的制备与性能

李 静 著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书基于作者在 Fe_3Al 基复合材料方面多年来的研究成果基础上整理而成。主要研究了 Fe_3Al 基合金和 Fe_3Al 基复合摩擦材料。采用机械球磨和热压烧结法制备了添加不同合金元素的 Fe_3Al 基合金材料,并对其力学性能和耐磨性能进行了详细研究。在此基础上设计制备了一种新型 Fe_3Al 基复合摩擦材料,并对其制备工艺、微观结构、物理和力学性能以及摩擦学特性和机理进行了系统研究。

本书适合材料类专业科研人员、高等院校材料类专业高年级本科生、硕士和博士研究生等阅读和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

Fe_3Al 基复合材料的制备与性能/李静著. —北京: 化学工业出版社, 2016.12

ISBN 978-7-122-28823-3

I. ①F… II. ①李… III. ①粉末冶金-摩擦材料-研究 IV. ①TF125

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 311727 号

责任编辑: 闫敏 杨菁

文字编辑: 徐一丹

责任校对: 宋玮

装帧设计: 张辉

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: 北京科印技术咨询服务公司海淀数码印刷分部

710mm×1000mm 1/16 印张 7¼ 字数 135 千字 2016 年 12 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: 39.80 元

版权所有 违者必究

前言

> FOREWORD



粉末冶金摩擦材料在重型机车、火车、飞机、工程机械等重载高速场合下已经获得了广泛的应用，形成了铜基、铁基、铁-铜基为主体的粉末冶金摩擦材料体系，但由于其组成特性致使其摩擦学性能以及应用方面存在缺憾，如铜基摩擦材料导热性好，摩擦性能稳定且磨损小，但其成本高且高温性能差；铁基摩擦材料的摩擦系数高，耐热性好且成本较低，但易与对偶件表面黏着，耐磨性不如铜基摩擦材料，而且抗氧化性差，易锈蚀；陶瓷及其复合材料密度低、强度高、耐磨性及化学稳定性高，高温下摩擦系数稳定，但脆性和难加工性是阻碍陶瓷基材料作为摩擦材料广泛应用的主要原因。因此，研究开发具有优异综合性能的新型摩擦材料是十分重要而又迫切的。

Fe_3Al 金属间化合物具有超点阵晶体结构，原子间的结合既有金属键，又有共价键和离子键。独特的结构决定了其特殊性能，其高温强度、高温蠕变以及抗氧化耐腐蚀性能优于大部分金属材料，而导热性、塑性优于陶瓷材料，是介于合金与陶瓷之间的一种新型低密度的廉价材料，被称为半金属-半陶瓷材料。同时 Fe_3Al 金属间化合物具有良好的耐磨性，在摩擦材料领域有着极大的应用潜力。

本书主要研究了 Fe_3Al 基合金和 Fe_3Al 基复合摩擦材料。采用机械球磨和热压烧结法制备了添加不同合金元素的 Fe_3Al 基合金材料，并对其力学性能和耐磨性能进行了详细研究。在此基础上设计制备了一种新型 Fe_3Al 基复合摩擦材料，并对其制备工艺、微观结构、物理和力学性能以及摩擦学特性和机理进行了系统研究。

本书由山东建筑大学材料科学与工程学院的李静副教授撰写，采用的素材主要来自于作者近年来的科研工作积累。作者感谢在近年来的工作中给予指导的各位师长，感谢作者所指导的研究生对本书所做的贡献。特别感谢上海海事大学海洋科学与工程学院的尹衍升教授、山东大学材料科学与工程学院的张景德教授给予的指导和支 持。山东建筑大学的刘科高教授认真审阅了本书，并提出了许多宝贵意见，在此一并致谢。

由于水平所限，书中难免存在不当之处，恳请专家和读者批评指正。

作者

Chapter 1

第 1 章

摩擦材料概况

1

1.1 摩擦材料发展	1
1.2 摩擦材料的基本性能要求	3
1.3 烧结金属摩擦材料概况	4
1.3.1 烧结金属摩擦材料特性	4
1.3.2 烧结金属摩擦材料组成与结构特点	5
1.3.3 烧结金属摩擦材料的类型和性能	9
1.3.4 烧结金属摩擦材料制造技术与工艺	12
1.3.5 烧结金属摩擦材料发展动向	13
1.4 铁-铝金属间化合物研究现状	15
1.4.1 Fe-Al 金属间化合物的结构特点	15
1.4.2 Fe-Al 金属间化合物的摩擦学研究	16
1.5 Fe ₃ Al 基复合摩擦材料的研究方法	17

Chapter 2

第 2 章

热压烧结 Fe₃Al 金属间化合物及耐磨性研究

19

2.1 试样制备及性能测试	19
2.1.1 原材料选择	19
2.1.2 试样制备	20
2.1.3 性能测试	20
2.2 Fe ₃ Al 粉体的制备	22
2.2.1 Fe ₃ Al 粉体的机械合金化	22
2.2.2 低温退火过程中的有序转变	23
2.3 热压烧结 Fe ₃ Al 块体材料的微观结构与力学性能	27
2.3.1 Fe ₃ Al 块体材料的相组成与微观特征	27
2.3.2 Fe ₃ Al 块体材料的力学性能	29
2.4 热压烧结 Fe ₃ Al 块体材料的磨损行为	32
2.4.1 Fe ₃ Al 块体材料的耐磨性能	32
2.4.2 Fe ₃ Al 块体材料的磨损机制	38
2.5 本章小结	40

Chapter 3	第 3 章	42
	Fe ₃ Al 基复合摩擦材料的制备	
	3.1 Fe ₃ Al 基复合摩擦材料的成分设计	42
	3.1.1 Fe ₃ Al 基复合摩擦材料组元的选择	42
	3.1.2 Fe ₃ Al 基复合摩擦材料中组元间相容性分析	44
	3.2 Fe ₃ Al 基复合摩擦材料的制备	47
	3.2.1 Fe ₃ Al 基复合摩擦材料的制备工艺	47
	3.2.2 Fe ₃ Al 基复合摩擦材料的致密化	48
	3.3 本章小结	53
Chapter 4	第 4 章	54
	Fe ₃ Al 基复合摩擦材料的微观结构与力学性能	
	4.1 实验方法	54
	4.1.1 微观结构分析	54
	4.1.2 力学性能	54
	4.1.3 抗氧化性	55
	4.2 Fe ₃ Al 基复合摩擦材料的微观结构	55
	4.2.1 Fe ₃ Al 基复合摩擦材料的相分析	55
	4.2.2 Fe ₃ Al 基复合摩擦材料的显微结构分析	56
	4.2.3 Fe ₃ Al 基复合摩擦材料的界面与亚结构	62
	4.3 Fe ₃ Al 基复合摩擦材料的力学性能	63
	4.3.1 力学性能的影响因素	64
	4.3.2 摩擦材料的断裂形式	65
	4.4 Fe ₃ Al 基复合摩擦材料的抗氧化性	67
	4.5 本章小结	68
Chapter 5	第 5 章	69
	Fe ₃ Al 基复合摩擦材料的摩擦学特性	
	5.1 摩擦磨损理论	69
	5.1.1 固体摩擦表面的接触	69
	5.1.2 有关摩擦理论	70

5.1.3 有关磨损理论	71
5.2 摩擦磨损试验过程	73
5.3 Fe ₃ Al 基复合摩擦材料的摩擦学特性	73
5.3.1 材质对摩擦磨损性能的影响	74
5.3.2 孔隙度对摩擦磨损性能的影响	91
5.3.3 速度、载荷对摩擦磨损性能的影响	91
5.3.4 摩擦磨损机制小结	92
5.4 对偶件的磨损	93
5.5 本章小结	93

Chapter 6

第 6 章	95
分形理论在 Fe ₃ Al 基复合摩擦材料中的应用	

6.1 研究方法	95
6.2 实验过程	97
6.2.1 表面形貌测量	97
6.2.2 分形维数计算处理	97
6.3 摩擦材料表面轮廓分形维数的计算	98
6.4 分形维数与摩擦学性能的关系	101
6.5 本章小结	102

参考文献	103
------	-----

第 1 章 摩擦材料概况

1.1 摩擦材料发展

制动是任何运动系统必不可少的行为之一，凡是运动的系统，都需要减速和停止，如飞机着陆，火车、汽车行驶中的减速与停止，起重运输设备升降和位置控制等。目前除采用动力制动外，大多数是采用摩擦制动^[1]。因此，摩擦材料广泛应用于各种交通运输工具和机器设备的制动器、离合器及摩擦传动装置中，是各种动力机械的最重要功能材料之一，在传动、制动、控速和转向等过程中起关键作用^[2~3]。用于制动的摩擦材料，主要是利用其摩擦性能，将动能转化为热能以及其它形式的能量，从而使传动装置制动，因此摩擦材料也称为制动材料或刹车材料^[4]。

20 世纪 70 年代中期以前，传统的石棉摩擦材料由于具有耐热性好、摩擦系数高、硬度较低、强度较高、价廉、来源丰富等一系列优点，在世界摩擦材料领域占据主导地位，但石棉摩擦材料在高温下使用时会出现摩擦系数大幅度降低的“热衰退”现象，磨损剧增，此外，石棉粉尘，特别是石棉刹车片在制动过程中产生的磨削微粒，有很强的致癌作用。因此，70 年代开始，许多国家开始禁止生产和使用石棉纤维制品，之后世界各国都致力于无石棉摩擦材料的研制开发，我国石棉制品工业协会已经宣布于 2003 年 10 月 1 日起全面禁用石棉刹车片。

目前研究较多的摩擦材料主要有无石棉树脂基摩擦材料、半金属摩擦材料、烧结金属摩擦材料、陶瓷基摩擦材料和碳/碳复合摩擦材料等。其中烧结金属摩擦材料具有良好的高温摩擦性能及良好的耐磨性、导热性等，从而使其得以在重载及恶劣工况下被广泛采用，作为诸如飞机制动器衬面和高速列车、重载汽车、工程车辆的离合器面片及制动衬片材料等^[5~14]。

烧结金属摩擦材料是以一种金属或合金为主要成分，添加摩擦、润滑或起某些特殊作用的其它金属、非金属组分，用粉体冶金技术制成的复合材料，又称粉体冶金摩擦材料、金属陶瓷摩擦材料。它具有足够的强度、合适而稳定的摩擦系数、工作平稳可靠、耐磨性好及污染小等优点，是伴随着工业发展而发展起来的一种摩擦材料。粉体冶金方法在材料配方上具有极大的灵活性，可将性质完全不同的金属、合金、非金属、化合物、有机物等组成多元的统一体，并较易通过工艺技术手段调整材料的微观组织结构，还可运用物理学、化学及热力学等对材料进行表面处

理。因此,粉体冶金材料具有非常广泛的综合使用性能,最适用于制造各类摩擦材料^[15]。

和目前其它摩擦材料比较,烧结材料在湿式、湿/干混合型、干式三种工况下都可以应用;既可做离合,也可用于滑摩;能适应不同的载荷、速度、温度及许多特殊要求,因此它是现代摩擦材料家族中唯一能够全方位、多功能应用的材料,尤其是在高负荷和冲击载荷这两种使用场合,是现有的其它材料难以替代的。目前,烧结金属摩擦材料的研究已经取得了较大的成功,形成了以铜基和铁基为主的粉体冶金摩擦材料体系,并获得了广泛的应用。但是粉体冶金摩擦材料由于其组成方面的特性(金属基体添加润滑、摩擦组元)致使其摩擦学性能以及应用方面仍存在某些缺陷,例如铜基摩擦材料具有良好的导热性、耐磨性,摩擦性能稳定,对偶件磨损小等优点,但高温性能差、成本高,因而极大限制了其应用;铁基摩擦材料的耐磨性、柔软性通常不如铜基材料,但其摩擦系数高,耐热性好,实际使用成本并不高于石棉基材料且无毒、安全可靠,因而日益受到人们的重视,但铁基摩擦材料仍然存在很多不足之处,如高温磨损严重,易与对偶件表面黏着,对偶件磨损大,而且抗氧化性差、易锈蚀,对其摩擦学性能有很大影响。

前苏联、日本以及我国曾对 B₄C、SiC 和 Al₂O₃ 等陶瓷基摩擦材料进行了试验研究,这些材料具有密度低、强度高、耐磨性及化学稳定性高等优异性能,在 1200℃ 下摩擦系数仍很稳定,但对偶材料磨损严重,且噪声较大,另外脆性和难加工性也是阻碍陶瓷基材料作为摩擦材料广泛应用的重要原因^[16~19]。

随着科学技术的发展,现代运输工具和工程机械向着高速、重载、结构紧凑的方向发展,普遍重视提高其最大行驶速度、加速度、转向灵活和制动能力等,这就要求摩擦部件在较苛刻的条件,如在真空、高温或低温、高速、重负荷、腐蚀介质和强辐射等恶劣条件下工作,因此摩擦材料工业不得不加速新型摩擦材料的开发应用工作,全面提高摩擦材料的综合性能,以满足一系列更苛刻的要求。我国摩擦材料行业和国外相比,存在 10~20 年的差距,主要表现在专业化程度不高,产品质量很不稳定,工艺水平落后。国家发展计划委员会、科学技术部已经在 2001 年将粉体冶金摩擦材料的研究与开发列为当前优先发展的高技术产业化重点领域之一^[20]。

金属间化合物原子排列长程有序、结合力强,兼有金属键和共价键特征,具有高温结构材料所期望的优异性能而成为近二十年来材料研究的热点之一。其中 Fe-Al 系金属间化合物原料易得、成本低廉、密度小、比强度高,且具有优异的抗高温氧化和耐腐蚀性能,是航空航天、汽车、化工等领域极具潜力的工程材料^[21]。Fe-Al 系金属间化合物中最受关注的是 Fe₃Al 和 FeAl 金属间化合物。Fe₃Al 金属间化合物一般是指铝含量为 25%~35% (原子分数) 的 Fe-Al 合金,具有超点阵

晶体结构,原子间结合既有金属键,又有共价键和离子键,这种结构决定了它的特殊性能,其抗氧化、硫化性,抗硝酸腐蚀性以及高温强度、高温蠕变性能都优于大部分金属材料,而导热性与塑性好于非金属材料,是介于合金与陶瓷之间的一种新型廉价材料,被称为半金属-半陶瓷材料^[22~25]。最近研究表明 Fe_3Al 基合金还具有良好的抗黏着磨损、磨粒磨损和高温下抗腐蚀磨损的性能,是一种潜在的良好耐磨材料。将 Fe_3Al 金属间化合物作为摩擦材料的基体,利用其耐磨、耐腐蚀、高温强度好等方面的优势,添加起增摩、减磨作用的其它组元,通过成分设计和烧结工艺调整,有望获得一种综合性能良好且低成本的新型粉体冶金摩擦材料。

1.2 摩擦材料的基本性能要求

应用于制动的摩擦材料主要是通过摩擦,将动能转变为热能并将热量吸收或散发掉,从而逐步降低刹车材料和与其贴合部件之间的相对运动速度,直至停止运动,达到制动目的。各种机器和机构的能力、速度和载荷在不断增大,因此,对摩擦材料的要求也不断提高^[26]。对摩擦材料的基本要求如下。

① 具有足够高的摩擦系数和摩擦系数稳定性。实践证明,要想制造出有效的盘式、鼓式及带式刹车装置,摩擦副的名义平均摩擦系数应为 0.35 ± 0.05 。在某些场合下,规定最小摩擦系数为 $0.22 \sim 0.25$ 。同时,即使在有湿气、油及其它物质落入的场合,也能保证摩擦系数稳定。在刹车循环末期,摩擦系数不应小于平均值。在工作过程中,在滑动速度和压力变化的情况下,摩擦系数的变化不应超过 $\pm 20\%$ 。

② 耐磨性好且对摩擦材料损伤小。磨损率是衡量摩擦材料使用寿命的一个重要参数。摩擦材料的磨损现象主要是动能转变成热能所引起的热分解,以及同时存在的物理破坏所造成的质量损失。磨损对摩擦系数有着直接的影响,产生的磨屑会影响摩擦系数的稳定性,同时不断产生新鲜磨损表面也可以稳定摩擦系数,因此适中的磨损速率对摩擦材料是非常必要的。推荐的磨损速率是 $2 \times 10^{-5} \sim 8 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。干摩擦时,摩擦副零件的耐磨性一般根据比线性磨损来评定。对于轻工作条件,每刹车 1000 次,线性磨损不得大于 $0.01 \sim 0.02 \text{ mm}$;对于中等工作条件,每刹车 1000 次,线性磨损不得大于 0.04 mm ;对于重工作条件,单次制动线性磨损不得大于 $0.007 \sim 0.01 \text{ mm}$ 。湿式摩擦时,耐磨性是根据运转条件决定的,每一工作循环的线磨损为 $0.001 \sim 0.002 \text{ mm}$ 到 $0.10 \sim 0.15 \mu\text{m}$ 。

③ 磨合快。从摩擦表面凹凸不平到能使用,这一期间就是摩擦副的磨合期。这一期间的特点是实际接触面积增大,在摩擦力矩增大的同时,温度从最高温度降低到某一稳定的中等温度,在摩擦区形成具有稳定使用性能(摩擦系数和耐磨性)

的工作层。对摩擦材料要求尽快磨合,对于重载荷制动,刹车 5~7 次后;对于中等载荷的摩擦副,工作 500~700 个循环;对于油中工作的摩擦副,工作 1000 个循环后,摩擦力矩的变化均不超过 $\pm 20\%$ 。此时,目测摩擦面积应不小于名义值的 80%,摩擦表面应当平滑,没有擦伤。

④ 抗黏结性好。材料的抗黏结性在很大程度上影响摩擦系数的稳定性。摩擦副的工作表面不应当发生黏结,这种破坏会导致摩擦表面在工作过程中形成剥落、擦伤、焊接及其它破坏性的破坏。

⑤ 具有足够高的机械强度。要求材料保证摩擦零件在离心力、剪切力、压应力及其它安装和运转时产生的力的作用下不发生破坏。在使用过程中,材料不得产生开裂、分层、从钢背剥离等。

⑥ 物理性能好。要求摩擦材料能抵抗频繁的热变化,也就是抗热疲劳性好。材料应具有相当高的导热性和尽可能小的线膨胀系数。另外,材料应能在相应的气候条件下工作,长期处于 $-60\sim 50^{\circ}\text{C}$ 下和潮湿气氛中具有足够的抗腐蚀性。

⑦ 舒适性和环保性。材料及其磨损产物不应燃烧、冒烟及散发异味。啮合和滑动平稳,无啸叫声,噪声小,对环境污染小。

⑧ 制造简单,良好的可加工性,价格便宜。

在所有情况下,必须保证三个基本条件:给定的摩擦系数、必需的耐磨性和摩擦表面不发生黏结。

1.3 烧结金属摩擦材料概况

早在 1929 年,美国就开始了烧结金属摩擦片的研究,20 世纪 30 年代末期首先将该材料用于 D-7、D-8 铲运机中的离合片上,发展到今天,已经形成了粉体冶金铁基、铜基、铁-铜基为主的摩擦材料体系,对材料的组成、工艺等与性能之间的关系进行了大量研究。目前所有载荷量高的飞机包括前苏联的米格、伊尔,美国的波音 707、747 和英国的三叉戟等,其制动器摩擦衬片材料都采用了烧结金属摩擦材料;日本的新干线,瑞士、加拿大等国的高速列车、大功率机车和法国的 TGV 高速列车等也均使用这种材料^[27]。在我国,特别是自 1965 年以后,烧结金属摩擦材料的科研、生产得到迅速发展。迄今,我国已有十多个具有一定生产规模的生产企业,年产铜基和铁基摩擦制品约 850 万件,广泛应用于国防和民用机械,如飞机、坦克、船舶、重型汽车、工程机械和农用机械等^[28~36]。

1.3.1 烧结金属摩擦材料特性

烧结金属摩擦材料虽具有类似于金属的物理和力学性能,但因有 15%~40% 的非金属颗粒分散隔离,其量值要远低于致密金属,也不及单元素的烧结金属。尽

管如此,和其它摩擦材料相比,它具有一系列优异的使用特性。

① 高的机械强度。在工作温度下,适应拉、挤、弯、剪等不同性质载荷,尤其是重载和冲击载荷,是目前唯一能够胜任的材料。

② 高的使用温度。基体金属熔点高,使材料在较高的温度下使用仍能保持稳定的强度和摩擦磨损性能。

③ 大的热容量。材料的比热容和密度大,单位体积内能吸收较多的摩擦热量。这对于易产生“尖峰负荷”的运行工况是相当重要的。因为尖峰负荷产生的巨大热量不可能在短时间内导出、散发,如果材料自身能将摩擦表面较多的热量吸收,则表面温度将迅速降低,不会导致摩擦面的材质和性能变坏,甚至烧损失效。

④ 优良的导热性能。铜、铁等金属具有良好的导热性,摩擦面的热量,一方面很快传向对偶钢片,被其吸收和散发;另一方面向内传导进入摩擦层和钢质芯板被其吸收、散发,摩擦面温度能始终保持在允许的范围内,使材料长期稳定的工作,这对重载工况尤其重要。

⑤ 高的抗蚀能力。有较高的抗大气腐蚀能力,在油和水中不易破坏。这种对环境介质的强适应能力,使其成为唯一能胜任在湿、干、湿/干混合型工况下工作的摩擦材料。

⑥ 优良的抗磨损性能。基体耐磨,嵌镶物中又有抗磨、减磨组分,使得整体材料耐磨,寿命长。

⑦ 稳定的摩擦特性。由于材料的热稳定性好,当摩擦面的温度升高时,摩擦系数和耐磨性能不会明显下降,冷却时再使用时回复能力强。这种优良的抗热衰退能力,保证了使用过程安全、可靠。

⑧ 可以制造薄型材料。由于材料强度高、耐磨,可以制成摩擦层薄至 0.3mm 的摩擦制品,这是其它材料无法做到的。这样不但减小了主机体积,还能满足某些特殊结构的设计要求,制造成本也相应降低。

1.3.2 烧结金属摩擦材料组成与结构特点

烧结金属摩擦材料其组织均可分为基体和基体嵌镶物两大部分。基体可以是单一金属,如铜或铁;也可以是铜基或铁基合金。基体不仅作为载体,将互相分离的各种添加物与自身连成一体,使它们各自发挥作用,而且是承受载荷和热传导的主体,还具有足够的抗磨、抗蚀能力。嵌镶物由多种金属和非金属的固态粉体颗粒组成,它均匀地分布在基体中,起摩擦、抗磨、减磨、耐热、耐蚀等作用。

1.3.2.1 基体组元

粉体冶金摩擦材料的强度、耐磨性和热稳定性主要取决于基体的结构、物理及

化学性质。基体是否形成连续而牢固的金属连接，是评价基体组织结构优劣的首要因素。目前粉体冶金摩擦材料应用较为广泛的主要有铜基和铁基^[37]。

(1) 铜及铜合金 铜基摩擦材料导热性好、摩擦性能稳定、磨损小，虽然成本较高，仍是目前应用较多的摩擦材料，铜基摩擦材料中铜含量在 50%~90% 范围内波动。铜的导热率高，这可保证将摩擦过程中的热量导出。很少采用纯铜粉体作为摩擦材料的基体，为强化铜，赋予它较高的热稳定性和改进摩擦性能，往往在基体中添加其它金属粉体，使其合金化，应用最多的合金元素是锡。铜粉中加入 4%~12% 的锡后，提高了压坯的强度，烧结制品的强度和硬度也得到显著提高，摩擦系数有某些降低，但耐磨性得到提高。铜-锡合金（锡青铜）属于摩擦条件下最有效的合金之一，但是由于锡稀少且价格昂贵，同时在高温工作时会向黏结摩擦层的钢背扩散，引起钢背因晶间腐蚀而破裂。因此又进一步发展了 Al、Zn、Ni、Fe、Sb、Ti、Mo、W、V 等合金元素。从物理和力学性能以及某些特殊性能综合来看，铜-铝合金（铝青铜）甚至优于锡青铜。例如，在提高铜的强度上铝比锡更有效，特别是当铝含量在 7%~10% 范围内；铝是有效提高铜与钢黏结力的合金元素，这是用于摩擦材料的主要性能之一；铜-铝合金的耐热强度也比锡青铜高，例如某些铜-铝合金 500℃ 时的机械强度高于锡青铜的室温强度；铜-铝合金室温和高温的抗腐蚀性大大超过了其它铜合金。铜-铝合金的上述优点使它能成为烧结摩擦材料的基体。另外，为了节约成本，铜基摩擦材料中用锌部分或全部代替锡，锌含量达 12%~15%，同时加锌显著强化了烧结时的扩散过程。摩擦材料中加入钼和钨时，除强化铜外，还有以下目的：这些金属热容量高，易于氧化，可吸收摩擦过程中产生的大量热，材料中加 1%~10% 的钼和钨可降低工作表面温度和稳定摩擦过程^[38~40]。

合金元素在铜基摩擦材料中所起的作用是很复杂的。对铝含量为 1%、4%、6%（质量分数）的铝青铜的摩擦磨损行为研究表明：铝青铜在干摩擦条件下的摩擦性能主要取决于表面层氧化物的成分、机械稳定性和近表面层的力学性能和黏结，随着铝含量的增加，合金的抗磨损性能降低。表 1-1 是部分合金元素对铜基摩擦材料性能的影响^[2]。

表 1-1 部分合金元素对铜基摩擦材料性能的影响

合金元素	基体显微硬度 HV	抗弯强度/MPa	平均摩擦系数	磨损率/[mm/(次·面)]
—	99.9	82.62	0.355	0.0163
Sn	119.4	139.14	0.290	0.0060
Al	130.4	89.54	0.346	0.0047
Sn、Al	112.3	115.30	0.300	0.0072

(2) 铁及铁合金 铁基摩擦材料有较高的耐热性及高温强度、硬度及热稳定性,且铁粉及铁粉为基的混合料易于压制和烧结,成本低,经济性好,因此目前对于摩擦材料的研究愈来愈倾向于铁基材料^[41~46]。但是它与对偶(铸铁或钢制动鼓、盘)具有亲和性,易产生黏着,因此需要添加合金元素,降低铁的塑性,提高强度和硬度来克服,合金化还可以提高材料的耐热强度和抗氧化性。为了提高导热性,可以加入铜粉或铜纤维,铜与铁合金化对工艺无特殊要求,因此对于铁基摩擦材料首选的合金元素便是铜。不同的合金元素对铁基材料的摩擦性能的影响不一样,有研究表明,加入 Ni、Cr、Mo 元素主要为了提高材料的物理和力学性能以及耐热、耐腐蚀性能;Mo 的加入还因形成铁钼固溶体而阻止 Fe_2O_3 的形成,可降低制动中的振动和噪声;Ni 元素的添加改善了基体对非金属组元的润湿性,从而改善了摩擦性能;加入 P 能提高材料的强度和耐磨性;添加 Mn、Ni、Cr、Al 等合金元素,铁基摩擦材料中珠光体数量明显增加,改善了摩擦磨损性能,同时合金元素的添加抑制了马氏体和网状渗碳体的析出,使高温制动性能明显改善;Cr 可显著提高材料的耐磨性,但摩擦系数的稳定性较差;铁中加入 20% 的 W 可使摩擦系数从 0.35 提高到 0.41。部分合金元素对铁基摩擦材料摩擦磨损性能的影响见表 1-2^[26],由表中可以看出,合金元素的加入均在一定程度上降低了黏着程度,即降低最大摩擦系数值以保持摩擦稳定性和提高耐磨性。

表 1-2 部分合金元素对铁基摩擦材料摩擦磨损性能的影响

合金元素	摩擦系数		单次制动线磨损/ μm	
	平均摩擦系数	最大摩擦系数	铁基摩擦材料	对偶铸铁
—	0.28	0.39	12.0	5.5
Cu	0.29	0.37	12.0	2.5
Mn	0.30	0.37	10.0	4.0
Al	0.24	0.36	3.5	4.5
Co	0.25	0.31	8.5	3.0
Mo	0.27	0.33	11.5	3.0

为了充分利用铜基摩擦材料的高导热性和耐磨性以及铁基摩擦材料可承受高负荷、高速高温的特性,同时可以节约有色金属、降低成本,又研制了铁铜比例接近为 1:1 的铁-铜混合基摩擦材料^[47~50]。有研究表明,在铁-铜混合基摩擦材料中,可以选择添加 0.5%~1% 的锡来强化铜,也有人采用铝元素内氧化弥散的方法来增强摩擦材料在苛刻条件下的耐热性,使之在高温高压下仍保持合适的摩擦系数。

总而言之,基体的选择和用量是决定摩擦材料性能好坏的关键。除铁基、铜基

外,人们还研制了铍基、铝基和镁基摩擦材料,并仍在致力于寻求新的金属或合金作为摩擦材料的基体组元,要求解决下列问题:强化和提高基体耐磨性能,提高耐热强度,改善摩擦表面导热性,采用价廉易得的金属代替贵重稀缺的金属并设法达到与其同等的摩擦性能。

1.3.2.2 润滑组元

摩擦材料中的润滑组元能提高材料的抗咬合性、抗黏结性和耐磨性,特别有利于减轻和改善对偶材料的磨损程度,使摩擦副工作更平稳,但同时也在一定程度上使材料的机械强度和摩擦系数降低。常用的润滑组分有:低熔点金属(Pb、Sb、Bi等)、非金属固体润滑剂(石墨、MoS₂、WS₂、CuS、滑石、BN等)、Cu、Fe、Ni、Co的磷化物、铁基材料中硫酸钡、硫酸亚铁等^[51~58]。

石墨、二硫化钼和氮化硼是目前应用最为广泛的固体润滑剂,它们具有相似的层状结晶构造。石墨几乎是粉体冶金摩擦材料中必不可少的润滑组分,它可降低材料磨损,促进摩擦平稳,还有利于摩擦组分配料的压制成型。青铜基摩擦材料中最佳石墨含量为5%~10%,且基体越硬,石墨含量要越高些。而对铁基摩擦材料而言,不仅与石墨的加入量有关,而且与其存在状态有关,因为在烧结过程中部分石墨溶解于铁,改变基体显微组织。实践证明,铁素体基体材料耐磨性最差,基体为珠光体-少量渗碳体组织时,材料的耐磨性能好,由珠光体和起固体润滑作用的游离石墨相结合的组织为最好。综合考虑,铁基摩擦材料中石墨含量范围一般为5%~25%,最佳含量为7%~9%。另外,石墨的粒度组成和颗粒形状对材料性能也有很大影响,一般认为较宽粒度组成范围的石墨性能好,细片状石墨比其它形状的石墨性能好。MoS₂适用于摩擦温度低于400℃的摩擦材料,少量的MoS₂有利于材料力学性能和摩擦性能的提高。铁基摩擦材料中,MoS₂在高温下部分分解,Mo固溶于铁可强化基体,S与Fe反应生成FeS,有助于改善材料的摩擦性能。摩擦材料中MoS₂的含量在2%~4%为宜,过多则会使材料性能变坏,这是由于MoS₂在增加耐磨性的同时显著降低摩擦系数,且在高温下易被还原成Mo粉变成磨粒,从而加速磨损。BN在高温下十分稳定,既不分解也不烧损,在高温下能保持良好的润滑性能,大量研究表明,应用BN代替石墨和MoS₂作为干式润滑剂很有前途。

摩擦材料中还常采用易熔金属作为润滑剂,在摩擦过程中,摩擦表面温度超过易熔金属熔点时,这些金属熔化,并在摩擦表面上形成润滑薄膜平稳摩擦过程,同时也降低了表面温度。铅常与石墨或其它非金属润滑剂共同使用,铅作为金属润滑剂,能大大改善混合料的压缩性能,但材料的力学性能有所降低,随着铅含量的增加,摩擦材料耐磨性提高。在现代摩擦材料中,提出用铋来代替铅或使用铋、砷和镉。

1.3.2.3 摩擦组元

摩擦剂的主要作用在于补偿润滑组分的影响,并在不损伤摩擦表面的前提下增加滑动阻力,即提高摩擦系数达到所要求的水平,另外摩擦剂还应当消除摩擦表面上从烧结粉体片转移过来的金属,减少对偶表面的擦伤和磨损。因此,摩擦剂的主要任务是对偶件不产生磨料磨损,与对偶件工作表面具有最佳啮合并使对偶表面保持良好的性能。选择摩擦组元时必须注意它与基体相比较的硬度、颗粒形状和大小,对摩擦剂有如下要求:①熔点和离解热高;②在室温至烧结温度或使用温度范围内不产生多晶转变;③与其它组分或烧结气氛不发生反应;④具有足够高的力学强度和硬度,以保证在摩擦过程中破坏它消耗大量能量,但也不能过高以免磨损对偶件;⑤基体合金对摩擦剂组分润湿性好。金属氧化物、某些碳化物、硅化物、硼化物及难熔金属可以满足上述要求,如 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 Cr_2O_3 、 SiC 、 B_4C 、难熔金属 W 、 Cr 、 Mo ,以及矿物性的复杂化合物石棉、莫来石、硅灰石等^[59~64]。

在烧结金属摩擦材料中,作为摩擦添加剂最早使用的是 SiO_2 ,在干摩擦条件下工作的锡青铜基材料中,加入 SiO_2 能提高和稳定材料的摩擦系数,特别是在高的摩擦温度下。在铜-锡-石墨材料中 SiO_2 的含量不应超过 6%,以免使对偶件强烈磨损。而对铁基摩擦材料, SiO_2 的最佳含量为 2%~4%。其它氧化物应用较多的是 Al_2O_3 ,含量一般为 1%~3%, Al_2O_3 熔点高、热强性好、硬度高、热稳定性和化学稳定性好。用于青铜基摩擦材料中的难熔金属摩擦添加剂首先为铁,一般为保证适当的摩擦系数同时铝青铜材料具有高的耐磨性,加入 10%~12% 的铁为宜。

摩擦组元的选择应根据工况条件(温度、载荷、润滑介质)及使用要求,确定其种类和用量,一般在轻载荷和中载荷工作条件下,采用 SiO_2 和 Al_2O_3 ,平均粒度为 80~150 μm ;在重载荷下采用 SiC 和 B_4C ,最佳含量为 4%~6%,适宜的粒度为 40~500 μm 。

1.3.3 烧结金属摩擦材料的类型和性能

常用的粉体冶金摩擦材料主要有铁基和铜基两类,铁基材料一般用于中等载荷和重载荷干摩擦工作条件下;铜基材料多用于轻载荷和中等载荷条件下,既用于干摩擦,又可用于油润滑的湿式摩擦条件下。摩擦材料要求良好的综合性能,国内外摩擦材料配方有成千上万种,但根本上都是由基体、摩擦、润滑三要素组成。烧结金属摩擦材料在制造时,通过组成或工艺的变化,其物理和力学性能以及摩擦磨损性能可在很宽的范围内变化;另外由于摩擦过程并非只是单纯的机械作用过程,它伴随着一系列物理、化学乃至金属学方面的变化,这些变化可能导致摩擦条件的改

变或材料自身的变化，因此摩擦工况对材料的最终性能有着很大的影响，同一材料在不同条件下使用，其摩擦性能差异很大。

烧结金属摩擦材料的物理和力学性能，尤其是摩擦磨损性能，是设计和选择材料的主要指标。我国于1982年制定了铜、铁基两类共11种材料的性能部颁标准，表1-3、表1-4分别列出了我国标准规定的粉体冶金摩擦材料的组成、力学性能和应用^[26]。

表 1-3 我国粉体冶金摩擦材料组成（质量分数） %

牌号	铜	锡	铁	铅	石墨	二氧化硅	氧化铝	二硫化钼	石棉	碳化硅	铸石	硫酸钡
FM-101S	69	8	6	8	6	3						—
FM-102S	75	3	8	5	5	4						
FM-103G	68	5	8	—	10	4						5
FM-104S	73	8.5	8	4	4	2.5	—	—				
FM-105G	64	7	8	8	8	5			—	—		
FM-106G	72	10	5	3	2	8						
FM-201G	5		69	10	11	1		4				—
FM-202G	10	—	73	8	6	—	3	—				
FM-203G	—		69	—	23	1		5	2			
FM-204G	1.5	1	69	8	16	1	—	—	—			
FM-205G	—	3~5	65~70	2~4	13~17	—					3~4	

注：G表示干式，S表示湿式。

表 1-4 我国粉体冶金摩擦材料的力学性能和应用

牌号	密度/(g/cm ³)	硬度 HB	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	应用
FM-101S	5.8~6.4	20~60	>200	>30	用于船用齿轮箱系列离合器，拖拉机主离合器，载重汽车及工程机械等湿式离合器。
FM-102S	5.5~6.4	30~60	>200	>30	用于中等负荷(载重汽车、工程机械)的液体变速箱离合器。
FM-103G	5.5~6.4	25~50	>150	>30	用于各种干式离合器及制动器。
FM-104S	5.8~6.4	20~60	>200	>30	用于12V-180型1000HP柴油机等传动装置半干式离合器。
FM-105G	5.5~6.2	15~55	>100	>20	用于拖拉机、齿轮箱、冲压及工程机械等干式离合器。
FM-106G	5.5~6.2	25~65	>200	>30	用于DLM2型、DLM4型等系列机床、动力头的干式电磁离合器和制动器。