

国家示范性专业重点规划教材

摩擦材料测试技术

主编 张君才 雷建斌
参编 石志刚 姜 娟 朱文婷

 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

国家示范性专业重点规划教材

摩擦材料测试技术

主 编 张君才 雷建斌
参 编 石志刚 姜 娟 朱文婷



 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

摩擦材料测试技术/张君才,雷建斌主编. —天津:天津大学出版社,2017.12

国家示范性专业重点规划教材

ISBN 978-7-5618-6052-6

I. ①摩… II. ①张…②雷… III. ①摩擦材料-测试技术-高等学校-教材 IV. ①TB36-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 005574 号

出版发行 天津大学出版社
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647
网 址 publish.tju.edu.cn
印 刷 北京京华虎彩印刷有限公司
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm × 260mm
印 张 10.5
字 数 262 千
版 次 2017 年 12 月第 1 版
印 次 2017 年 12 月第 1 次
定 价 27.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前 言

摩擦材料是应用在制动器或传动器中实现减速、停止和传递动能的关键性安全材料,实际使用过程的复杂性使得其需要具有多方面的优异性能,因此摩擦材料性能的高低是判断其能否达到使用效能的重要依据。但迄今为止,研究者们还未能建立材料配方、制备工艺、工况条件与摩擦材料性能之间的理论关系,通过选择合理的性能试验,从而系统地分析摩擦材料的整体特性。因此性能试验研究在汽车用制动摩擦材料基础配方研究、制备工艺设置、质量检验控制、最终产品认定及验收等过程中占有重要的地位,具有重要的理论研究价值和实际意义。

摩擦材料在世界范围内已经形成了具有一定规模的摩擦材料行业。我国摩擦材料行业虽然有了突飞猛进的发展,但是产品的性能和质量与国际先进水平还有很大的差距。分析原因,除了我国汽车行业起步晚、摩擦材料工业基础差等原因之外,行业测试设备不全、测试技术人员欠缺也是重要原因。本书就是为培养摩擦材料相关测试技术方面的人才而编写的。在文字方面力求通俗易懂、深入浅出,便于读者阅读后有一个清晰的概念。

摩擦材料测试技术是一门综合性的专业基础课,共包含7章内容,主要包括摩擦材料和摩擦理论概述、制动与传动的相关理论、摩擦装置类型及应用、理化性能测试、摩擦磨损性能测试、相关标准比较及摩擦材料筛选实例、摩擦材料的质量控制等部分。本课程以摩擦材料测试技术为主要研究对象,论述了摩擦材料的种类、摩擦理论和磨损理论;制动效能、制动力分配及制动传动理论;常见摩擦装置的类型、工作参数及技术要求;物理机械性能的测试方法;摩擦磨损性能测试的分类、基本原理、试验技术、分析方法、常用设备及应用状况;相关摩擦标准比较及摩擦材料筛选实例;摩擦材料的质量控制等。通过学习,使读者对摩擦材料性能研究的测试技术有一个较全面的认识,使学生能够掌握摩擦材料测试技术中的基本理论、基础知识和基本方法,具有一定的试验操作能力,为日后从事摩擦材料科学研究工作和解决实际工程问题奠定基础。

本书由咸阳师范学院张君才教授、国家非金属矿制品质量监督检验中心雷建斌高级工程师主编,石志刚、姜娟、朱文婷参编。雷建斌编写第1章,石志刚编写第2章,姜娟编写第3章,朱文婷编写第4~7章。全书由张君才教授统稿。

本书在编写过程中,参阅和引用了部分国内外相关专著和论文;此外,在国家非金属矿制品质量监督检验中心陈克文,咸阳师范学院范广、岳建设、李小博、刘洋等各位老师的协助下一并完成,在此向文献作者和老师致以深切的谢意!

鉴于作者学识有限和时间仓促,书中不足和欠妥之处在所难免,敬请读者不吝赐教。

编者

2017年10月

目 录

第 1 章 摩擦材料和摩擦理论概述	1
1.1 摩擦材料概述	1
1.2 摩擦材料种类和发展历史	1
1.2.1 石棉摩擦材料	2
1.2.2 半金属摩擦材料	2
1.2.3 金属陶瓷摩擦材料	2
1.2.4 有机纤维摩擦材料	3
1.2.5 碳纤维摩擦材料	3
1.3 摩擦理论	6
1.3.1 概述	6
1.3.2 粘着 - 犁沟摩擦理论	8
1.3.3 摩擦性能的影响因素	12
1.4 磨损理论	14
1.4.1 磨损类型	14
1.4.2 磨损的控制和防磨措施	21
第 2 章 制动与传动的相关理论	24
2.1 制动性的评价指标	24
2.2 制动时车轮受力	25
2.2.1 制动器制动力	25
2.2.2 地面制动力	25
2.2.3 制动器制动力、地面制动力及附着力之间的关系	25
2.2.4 附着系数与滑动率的关系	26
2.3 汽车的制动效能及其恒定性	26
2.3.1 制动过程分析及制动距离	26
2.3.2 制动效能的恒定性	28
2.4 制动时汽车的方向稳定性	29
2.4.1 制动跑偏	29
2.4.2 制动侧滑	29
2.4.3 转向能力的丧失	30
2.5 制动力分配	30
2.5.1 制动前、后轮的地面法向反作用力	31
2.5.2 理想的前、后制动器制动力分配曲线	32
2.5.3 具有固定比值的前、后制动器制动力及同步附着系数	33
2.5.4 汽车在各种路面上制动过程的分析	34

2.5.5	同步附着系数的选择	37
2.6	制动力的调节和车轮防抱死	37
2.6.1	制动力的调节	37
2.6.2	车轮防抱死	38
第3章	摩擦装置类型及应用	40
3.1	摩擦装置的基本类型	40
3.1.1	汽车制动系构造	41
3.1.2	鼓式制动器	41
3.1.3	盘式制动器	46
3.1.4	驻车制动器	48
3.1.5	带式制动器	48
3.1.6	传动扭矩的离合器	49
3.1.7	制动器的间隙调整	49
3.2	摩擦装置的基本工作参数	51
3.3	摩擦系数的技术要求	51
3.3.1	足够高的摩擦系数和摩擦稳定性	52
3.3.2	摩擦热稳定性高	52
3.3.3	良好的抗黏结性能	52
3.3.4	高耐磨性能	53
3.3.5	良好的磨合性能	53
3.3.6	良好的热物理性能	53
3.3.7	具有足够高的力学强度	54
3.3.8	其他性能	54
第4章	理化性能测试	55
4.1	密度及气孔率的测定	55
4.1.1	密度测定	55
4.1.2	气孔率测定	56
4.2	力学性能测试	57
4.2.1	弯曲强度测试	57
4.2.2	压缩强度测试	58
4.2.3	剪切强度测试	60
4.2.4	硬度测试	63
4.2.5	冲击强度测试	66
4.2.6	离合器面片的旋转破坏程度测试	67
4.3	热膨胀测试	70
4.4	制动噪声测试	75
第5章	摩擦磨损性能测试	78
5.1	摩擦磨损试验设备	78
5.1.1	实验室评价设备	78

5.1.2	模拟试验或台架试验设备	80
5.1.3	全尺寸试验	82
5.2	模拟制动惯性试验和 MM1000 摩擦磨损性能试验机	82
5.2.1	小样缩比试验技术	82
5.2.2	小样缩比模拟制动试验的技术原理	83
5.2.3	模拟制动试验结果对比	88
5.3	JIS D 4411 试验规范与定速摩擦试验机	90
5.3.1	定速摩擦试验机的结构原理	91
5.3.2	定速摩擦试验机的工作原理	93
5.3.3	定速摩擦试验机的主要技术参数	93
5.3.4	定速摩擦试验机的试验方法	94
5.3.5	定速试验的步骤	94
5.3.6	计算	95
5.3.7	定速试验报告	95
5.4	FAST 摩擦试验机	96
5.5	SAE J 661 试验规范及 CHASE 型试验机	98
5.5.1	CHASE 摩擦试验机的主要技术参数	99
5.5.2	CHASE 摩擦试验机的试验标准及试验过程	99
5.6	惯性台架试验机	108
5.6.1	汽车制动器惯性台架试验机	108
5.6.2	火车闸瓦惯性试验台	109
5.6.3	汽车离合器性能试验台	111
5.7	湿式摩擦材料摩擦性能试验	113
5.7.1	试验设备	113
5.7.2	摩擦材料性能实验室评估	114
5.7.3	失效判据	117
第 6 章	相关标准比较及摩擦材料筛选实例	119
6.1	性能要求及试验规范	119
6.1.1	火车闸瓦和闸片	119
6.1.2	汽车用制动衬片	123
6.1.3	汽车用离合器面片	124
6.1.4	汽车制动器衬片摩擦性能评估小样台架试验方法	124
6.1.5	货车、客车制动器性能要求及货车、客车制动器台架试验方法	125
6.1.6	轿车制动器性能及轿车制动器台架试验方法	127
6.1.7	汽车干摩擦式离合器总成技术条件	128
6.1.8	工业机械用石棉摩擦片	128
6.1.9	一汽集团公司有关标准	130
6.1.10	二汽集团公司有关标准	133
6.1.11	中国重型汽车集团公司企业标准	133

6.1.12	中国台湾地区汽车摩擦材料有关标准	134
6.1.13	德国克劳斯公司有关试验规范	135
6.1.14	德国大众汽车公司有关标准	139
6.2	摩擦材料筛选实例	140
6.2.1	基本程序	141
6.2.2	筛选过程与结果评价	142
第7章	摩擦材料的质量控制	152
7.1	质量控制概述	152
7.1.1	质量控制的意义	152
7.1.2	质量控制的基本原则	152
7.1.3	质量控制的主要方面	153
7.2	生产过程质量控制	153
7.2.1	严格把好原材料购入质量	153
7.2.2	控制生产过程主要参数	155

第 1 章 摩擦材料和摩擦理论概述

1.1 摩擦材料概述

摩擦材料是以摩擦特性为基础,实现其使用功能所包含的一切材料。摩擦材料可以是单质,如金属、非金属等;也可以是复合物或混合化合物,如合金、纸基材料、橡胶基材料、树脂基材料等。

摩擦材料是按照摩擦原理进行工作的,一般镶嵌或粘接在机械零件上实现工作过程,本书所涉及的摩擦材料是通过摩擦副实现工作功能的。它装置在制动和传动的机械装置中,如离合器装置、制动器装置、安全保护装置等。

摩擦材料的一大特性是能够吸收动能,并将吸收的动能及时转化为热能散发掉,只对其本身产生一定的磨损而不破坏本身的表面和内部组织结构。

从动力机械被发明和应用以来,在制动和传动机构上就开始使用摩擦材料。摩擦材料按广义来说,可定义为一种用来阻止它和与它贴合的另一表面间发生相对滑动的制品,从而使机械设备在有控制的方式下运行,这类材料在摩擦过程中将吸收的动能转化为热能并散发出去,而其本身没有毁灭性的破坏。其主要功能是将动能吸收或转化为热能耗散掉,同时通过摩擦降低摩擦材料和与它贴合的对偶件之间的相对运动或传递扭矩及动力。在制动和传动方面,摩擦材料都有着广泛的应用。摩擦材料必须具有稳定的摩擦系数和良好的耐磨性,以保证摩擦副工作的可靠性和耐久性。不同的摩擦系统和不同的工况条件对摩擦材料性能的要求也不同,随着各种机械的功率、速度和荷载的不断提高,对摩擦材料性能的要求也越来越高。因此,研制具有更好的制动和传动性能的新型摩擦材料是一项极其重要的工作。

1.2 摩擦材料种类和发展历史

随着交通工具和制造技术的发展,摩擦材料经历了几个发展阶段,主要包括石棉摩擦材料、半金属摩擦材料、金属陶瓷摩擦材料、有机纤维摩擦材料、碳纤维摩擦材料等阶段。摩擦材料分类情况如图 1.1 所示。

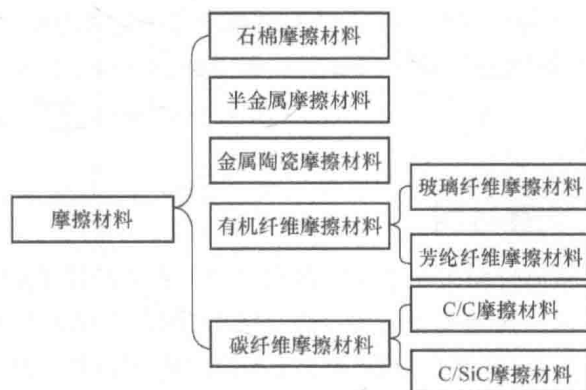


图 1.1 摩擦材料分类

1.2.1 石棉摩擦材料

在摩擦材料应用的历史上,以石棉纤维为增强材料的摩擦材料由于其主要原料石棉纤维具有耐热性好、摩擦系数高、比表面积大、易于和基体材料树脂亲和、柔软、强度较高、价廉、来源丰富等一系列优点,能满足摩擦材料的使用要求,所以自 20 世纪 20 年代到 80 年代石棉摩擦材料一直是使用最广泛的摩擦材料。但是石棉摩擦材料导热性和耐热性差,摩擦热难以散发,工作时容易产生摩擦变质层,加剧磨损,且在 250 ℃ 左右会出现“热衰退”,即摩擦系数严重下降。同时,石棉对环境污染严重,并且石棉被人吸入有致癌风险。石棉致癌的根本原因是它的纤维。随着交通工具向高功率、高速度发展,制动器、离合器向小型化、微型化发展,导致制动噪声增加,因此对摩擦材料的强度、耐热性和制动噪声提出了更高的要求。

由于上述各种因素的制约,石棉摩擦材料已经很难满足这些使用要求,为此,人们开始研究新的不含石棉纤维的摩擦材料。

1.2.2 半金属摩擦材料

半金属摩擦材料是以钢纤维代替石棉纤维作为增强材料而制成的摩擦材料。美国 Bendix 公司于 20 世纪 70 年代初首先开展盘式制动器用半金属摩擦材料的研究,至 20 世纪 80 年代中期已由最初研制的少石棉含量的半金属摩擦材料发展到全部取代石棉纤维的金属纤维及其他类型纤维的摩擦材料。

半金属摩擦材料的优点如下:

- (1) 摩擦系数在 400 ℃ 以下非常稳定,不产生热衰退,热稳定性好;
- (2) 耐磨性好,使用寿命比石棉摩擦材料提高 3 ~ 5 倍;
- (3) 摩擦副接触界面上压力升高时,摩擦系数变化小,在较高负荷下有好的摩擦性能;
- (4) 能量吸收性能好,可使制动器和离合器尺寸缩小;
- (5) 制动噪声小;
- (6) 导热性能好,能够减少表面的摩擦热量,改善摩擦表面的温度分布;
- (7) 对环境污染小。

半金属摩擦材料的缺点如下:

- (1) 产品易生锈,锈蚀后产品强度降低、磨损加大;
- (2) 导热性过好,使制动系统产生气阻以致摩擦片层与钢背脱开;
- (3) 硬度较高,可导致擦伤对偶件材料;
- (4) 产生低频噪声;
- (5) 密度大,价格高。

1.2.3 金属陶瓷摩擦材料

金属陶瓷摩擦材料是通过粉末冶金法制备而成的。粉末冶金是用足够的压力把金属粉末加压使金属颗粒在它们的接触点上形成冷焊合状态,然后在 900 ~ 1 050 ℃ 的可控高温中烧结而成。日本的新干线、德国 ICE2 高速列车和法国 TGV - A 高速列车均采用粉末冶金闸瓦。粉末冶金材料分为铁基和铜基粉末冶金材料两大类。

金属陶瓷摩擦材料的优点如下:

- (1) 摩擦系数大;
- (2) 耐磨损;
- (3) 在湿润条件下,特别是雨雪天气下摩擦系数稳定。

金属陶瓷摩擦材料的缺点如下:

- (1) 对车轮刮削倾向大;
- (2) 价格高、制造工艺复杂;
- (3) 制动噪声大;
- (4) 脆性大以及对偶件的擦伤和磨损大。

虽然金属陶瓷存在以上缺点,但是由于金属陶瓷层具有极好的耐磨性和耐高温性能,因此采用金属陶瓷或在摩擦材料表面喷涂金属陶瓷涂层可以得到良好的使用效果。

1.2.4 有机纤维摩擦材料

1. 玻璃纤维摩擦材料

玻璃纤维的特点是硬度高、热稳定性较好、与树脂亲和性好、价格低廉。玻璃纤维发展历史较长,其表面处理工艺和黏结剂的研究已比较成熟。因此,玻璃纤维是早期无石棉摩擦材料中使用较多的纤维。

(1) 玻璃纤维的热传导性很差,使摩擦表面和次表层的温度很高,且具有极大的温度梯度,聚合物在此高温下软化和分解使纤维和基体的黏结程度降低。

(2) 玻璃纤维硬度过高而塑性极差造成高磨损率,对对偶件产生擦伤和磨损。

(3) 玻璃纤维摩擦材料摩擦磨损特性对荷载、滑动速度及制动温度等因素反应敏感,在重载高温下,摩擦系数波动较大,稳定性较差。

2. 芳纶纤维摩擦材料

芳纶纤维是一种芳香族聚酰胺有机人造纤维,其一般特征是具有相当高的强度、中等的模量、很小的密度、耐磨、耐热、在高温下尺寸稳定性好。其主要特征是在非复合形式下具有高韧性,没有碳纤维与玻璃纤维所呈现的脆性,因此非常适合作为在中高温摩擦下工作的摩擦材料,也最有希望取代石棉成为摩擦材料的新型增强材料。用于摩擦材料的 Kevlar 纤维主要有 6~13 mm 的短纤维和 2~5 mm 的浆粕形式的纤维。

芳纶纤维摩擦材料的优点如下:

- (1) 芳纶纤维增强的摩擦材料具有较高的摩擦系数;
- (2) 其耐磨性优于石棉摩擦材料,特别是在高温下具有和半金属摩擦材料相近的耐磨性。

芳纶纤维摩擦材料的缺点如下:

- (1) 使用温度不高;
- (2) 摩擦性能受纤维含量的影响很大。

1.2.5 碳纤维摩擦材料

碳纤维摩擦材料用做刹车片具有如下一些性能特点:

- (1) 密度低,可以使材料轻量化;
- (2) 制动性好,用碳纤维制成的刹车片制动曲线平稳,同时可承受更多的制动摩擦热冲

击(如图 1.2 和图 1.3 所示);

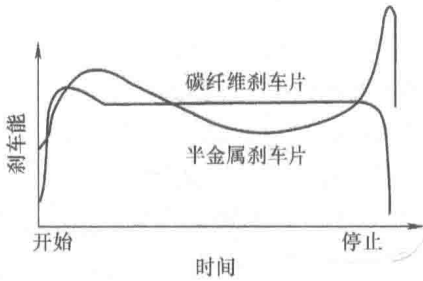


图 1.2 碳纤维刹车片和半金属刹车片制动曲线比较

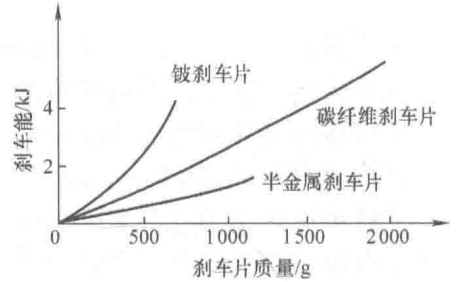


图 1.3 几种刹车材料的性能比较

- (3) 耐磨性好;
- (4) 制动噪声低;
- (5) 适应环境能力强,不发生力学强度衰减。

1. 碳/碳(C/C)摩擦材料

碳/碳(C/C)摩擦材料首次出现是 1958 年在 Chance Vought 航空公司实验室进行碳/酚醛试验时偶然得到的。C/C 摩擦材料不仅具有其他复合材料的优点,还有许多独到之处:

(1) 其整个体系由碳元素组成,由于碳原子之间彼此有很强的亲和力,使 C/C 摩擦材料无论在低温还是在高温下,都有很好的稳定性;

(2) 高比强度、高比模量、抗热震、密度小(小于 2.0 g/cm^3);

(3) 随着温度的升高,强度并不降低,甚至比室温强度还高;

(4) 抗烧蚀性能良好,烧蚀均匀,可承受高于 $3\ 000\ ^\circ\text{C}$ 的高温;

(5) 耐摩擦磨损性能优异,摩擦系数适当且稳定。

与传统摩擦材料相比,飞机刹车用 C/C 摩擦材料,寿命提高近 5 倍,刹车性能也明显高于粉末冶金刹车材料。20 世纪 70 年代中期,英国的 Dunlop 航空公司制造的 C/C 摩擦材料在协和式飞机上首次试飞成功,之后得到很大的发展,现已广泛应用于超音速军用飞机和大型高速民用客机(如 F16、B737、B757、B767、B777 等型号)中。此后 C/C 摩擦材料得到了日益广泛的关注。目前,绝大多数民航客机和军用飞机都采用了 C/C 摩擦材料刹车片。表 1.1 所示为使用 C/C 摩擦材料的飞机机型和产地,从表中可以看出,目前航空刹车用 C/C 摩擦材料主要由世界上的五家公司生产:法国的 Messier,美国的 Goodrich、Bendix、Goodyear 及英国的 Dunlop。

我国的 C/C 摩擦材料的研制起步于 20 世纪 70 年代,首先研制 C/C 刹车片装配战斗机,经过二十多年的努力,已投入使用。现在正在进行大型运输机 C/C 刹车片的研制,以实现进口飞机上的 C/C 刹车片的国产化。

尽管 C/C 摩擦材料在飞机上有了广泛的应用,但是由于湿度和温度对 C/C 刹车片的摩擦系数影响很大,并且其抗磨损率低,使得其很难应用于公共汽车、火车以及各种紧急制动系统中。这就需要研究一种更新的摩擦材料以弥补 C/C 摩擦材料的摩擦性能缺陷。

2. 碳/碳代硅(C/SiC)摩擦材料

碳/碳代硅(C/SiC)摩擦材料具有比强度高、比模量高、导热性好、热膨胀小、高温性能好等一系列优异性能,已成为极具发展前景并有希望满足航空发动机热端部件 $1\ 650\ ^\circ\text{C}$ 工

作温度需要的新一代高温热结构材料。

表 1.1 使用 C/C 刹车片的飞机

国别	飞机型号	类别	主轮个数	C/C 刹车片制造商
美国	F-14	舰载超音速战斗机	2	Goodyear
美国	F-15C	制空超音速战斗机	2	Goodyear
美国	F-15E	双重任务战斗机	2	Bendix
美国	F-18L	舰载战斗攻击机	2	Goodyear
美国	B-1B	超音速战略轰炸机	8	Goodyear
美国	AV-8B	垂直起落战斗机	2	Dunlop
美国	C-5B	军用运输机	24	Goodrich
美国	B757	中程运输机	8	Dunlop
美国	B767-300	中远程运输机	8	Messier
美国	B747-400	中远程运输机	16	Goodrich
美国	B777	中远程运输机	12	—
美国	MD-11	中程运输机	8	Bendix
美国	AS332	直升机	—	Bendix
美国	A129	直升机	—	Bendix
英国	BAe146	中程运输机	4	Dunlop
英国	BAeATP	运输机	4	Dunlop
英国	BAeEAP	战斗机	2	Dunlop
法国	幻影 2000	超音速战斗机	—	SEP 提供, MHB 制造
法国	ACX	战斗机	2	SEP 提供, MHB 制造
法国	50GF	教练机	2	SEP 提供, MHB 制造
法国	900	教练机	2	SEP 提供, MHB 制造
俄罗斯	TY154M-153A	中程运输机	12	—
俄罗斯	TY-204	中远程运输机	8	—
俄罗斯	ИЛ-96	中远程运输机	—	—
加拿大	挑战者	远程运输机	4	Goodyear
瑞典	JAS-39	战斗机	2	Goodyear
日本	MT4	教练机	2	萱场公司
国际合作	协和	超音速运输机	8	Dunlop
国际合作	A300	中程运输机	4	Messier
国际合作	A300-600	中远程运输机	8	Messier
国际合作	A310	中程运输机	8	Messier
国际合作	A320T	中程运输机	4	Messier
国际合作	A320B	中程运输机	4	Messier
国际合作	A321-100	中程运输机	4	Messier
国际合作	A330-A34	中程运输机	4	Messier

尽管 C/SiC 复合材料在航空航天领域已经有了广泛的应用,但是将 C/SiC 复合材料作为摩擦材料来研究是 20 世纪 90 年代以后的事情,经过二十多年的发展,德国宇航院已经率先研制成功用于汽车的摩擦材料,在保时捷 911 Turbo 高档汽车上已经得到了成功应用。但在国内将 C/SiC 复合材料作为摩擦材料来研究的研究机构还寥寥无几。C/SiC 汽车摩擦材料的对偶件一般使用陶瓷刹车盘。

陶瓷刹车盘与铸铁刹车片相比有以下几点明显的优势：

- (1) C/SiC 刹车片比铸铁刹车片质量轻 50% 左右；
- (2) C/SiC 材料的摩擦系数比铸铁高 25% 左右,大大提高了刹车片制动效率；
- (3) 在高温下 C/SiC 刹车片的摩擦系数和刚度几乎不受影响；
- (4) C/SiC 刹车片硬度高,磨损很小。

表 1.2 所示为不同摩擦材料性能粗略的比较,可以看出 C/SiC 摩擦材料可以解决传统摩擦材料在高温下失效以及耐磨性能降低问题,这将对我国的航空航天以及汽车工业的发展产生深远的影响。

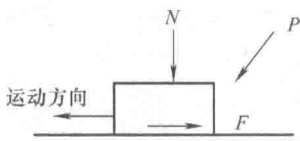
表 1.2 不同摩擦材料比较

摩擦材料种类	工作温度范围/°C	密度/(g/cm ³)	抗磨损性能
石棉	<250	约 2.5	一般
半金属	≤400	>2.5	一般
有机纤维	≤400	1.8~2.5	一般
C/C	<1 000	1.5~1.9	较好
C/SiC	>1 100	约 2	特好

1.3 摩擦理论

1.3.1 概述

两个物体做相对运动时,其接触界面上存在的切向阻抗现象称为外摩擦(通常简称为摩擦)。同一物体(如流体或变形中的固体)各部分做相对运动时,其分子间的阻抗现象称为内摩擦。这里只讨论外摩擦。



两个相互接触的物体在外力作用下发生相对运动(或具有相对运动趋势)时,在接触面上产生切向运动阻力,这种阻力叫摩擦力,这种现象称作摩擦。如图 1.4 所示,在外力 P 的作用下,物体沿接触表面滑动(或具有滑动趋势)时,存在于界面上切向阻力 F 就称作摩擦力。

因摩擦副结构不同和运动形式各异,摩擦可进行如下分类。

(1) 按摩擦副运动形式分类如下。

- ① 滑动摩擦:当接触面相对滑动(或具有相对滑动趋势)时,产生的摩擦。
- ② 滚动摩擦:当物体在力矩的作用下沿接触表面滚动时,产生的摩擦。

(2) 按摩擦副运动状态分类如下。

- ① 静摩擦:当物体受力后,对另一物体具有相对运动趋势,处于静止临界状态时,产生的摩擦。
- ② 动摩擦:当物体受力后,越过静止临界状态而沿另一物体表面发生相对运动时,产生的摩擦。

(3) 按表面的润滑情况分类如下。

- ① 干摩擦:当物体的接触表面上无任何润滑剂存在时,产生的摩擦。

②边界摩擦:当两物体表面被一种具有润滑性能的边界膜分开时,产生的摩擦。

③流体摩擦:当两物体表面被润滑剂膜完全隔开时,摩擦发生在界面间的润滑剂膜内,即流体的内摩擦。

④混合摩擦(半干摩擦和半流体摩擦):半干摩擦是在摩擦表面上同时存在着干摩擦和边界摩擦时的摩擦;半流体摩擦是在摩擦表面上同时存在着流体摩擦和边界摩擦时的摩擦。实际工程表面在摩擦过程中,可能出现一部分被流体膜分隔开,一部分覆有边界膜甚至同时伴有材料直接接触的混合摩擦。

为了搞清摩擦的起因及影响摩擦的因素,以有效地控制摩擦,通常从干摩擦着手分析。严格地讲,干摩擦是两个纯净表面(除了材料本身以外,表面上不存在任何润滑剂膜、吸附膜、反应膜和污染膜等)的摩擦。但在大气环境中很难得到纯净表面,所以人们通常把“大气环境条件下的无润滑摩擦”也称为干摩擦。

对于干摩擦的研究有如下理论。

1. 经典的摩擦定律——阿芒顿-库仑定律

最早达·芬奇、阿芒顿、库仑等对无润滑状态下固体间相对滑动的问题作过研究,并归纳出以下三条摩擦定律。

(1)滑动摩擦力的大小与表观接触面积无关。

(2)滑动摩擦力的大小与滑动速度无关。

(3)滑动摩擦力的大小与接触面之间的法向荷载成正比,如图 1.4 所示,令

$$F = \mu N$$

式中 μ ——摩擦系数;

N ——法向荷载(作用力 P 的法向分量)(N)。

但实际上阿芒顿-库仑定律只是近似地反映了摩擦现象的规律。当滑动速度较大时,摩擦系数与速度有关。另外,一些极硬的或软(弹性)材料,摩擦力与法向荷载间的关系不成正比。摩擦系数只有在一定的环境和一定的工况下才有可能为常数。例如,钢铁的摩擦系数在大气中为 0.6,而在真空中则远大于 0.6。又如石墨在大气中摩擦系数为 0.1,而在真空中能达到 0.5。这些方面都显示出阿芒顿-库仑定律的局限性。

近代的研究已经发现,摩擦力与真实接触面积有关,虽然真实接触面积与荷载有关,但其是否发生塑性变形,还与表面粗糙度 ϵ 和微凸体的平均曲率半径 ρ 有关。同时也发现,同一对摩擦副在不同的工况和环境条件下摩擦系数是变化的。因此经典的摩擦定律尚不足以完整、合理地解释摩擦机理。

由于表面的几何性质(粗糙度、微凸体的形状和大小)、摩擦副材料的机械物理性质(如硬度、弹性模量等)和表面的环境条件等都与摩擦有关,因此,至今也难以确定某种摩擦副固定的摩擦系数。因此需要进行试验,而且必须注明试验条件,离开这些条件得到的数据是没有意义的。

2. 机械嵌合理论(机械互锁理论)

机械嵌合理论认为,静摩擦力是凸峰相互嵌合而阻止相对运动产生的力(图 1.5)。

静摩擦系数

$$\mu_s = \tan \theta_s$$

动摩擦系数

$$\mu_k = \tan \theta_k \approx \mu_s / 2$$

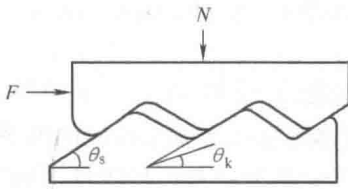


图 1.5 机械嵌合理论模型

只有在表面凸峰被削平、变形及压溃后,两表面才易于做相对运动,即表面越光滑平整,摩擦阻力越小。把表面间涂油进行润滑,解释为用油料填平凹谷而减小摩擦阻力。这种学说也称为“表面凹凸论”。它不能解释当表面粗糙度特别小的时候,摩擦力反而很大的现象。

3. 分子吸附理论

德萨古里亚斯(Desaguliers)发现摩擦表面间存在分子吸附力,指出表面越光滑,摩擦力越大。这种观点与机械嵌合论是矛盾的。实际上当表面十分光洁,两表面接触时,双方表面分子间的吸附力起主要作用,摩擦力确实增大,而在一般情况下不是这样的。

也有人提出过,由于界面分子在摩擦过程中相对极性发生变化,认为是表面间的静电吸引力使摩擦表面粘连在一起,从而引起了摩擦力。

4. 粘着 - 犁沟摩擦理论

直到 20 世纪 40—50 年代,波登(Bowden)等人在研究金属干摩擦时提出了粘着 - 犁沟摩擦理论也称“剪切 - 变形”摩擦理论或“分子机械”理论(前苏联时期的提法)。

他们认为表面承载后,在某些微凸体的顶端(真实接触点)产生了很大的接触应力 σ ,导致两表面(接触点)焊接(粘着)在一起。当两个表面做相对滑动时,必然要将这些焊接点剪断;同时,因表面上的凸起部分穿入软表面,从而使软表面被犁成沟槽。剪断接点的力和在表面上犁沟的力之和,就是摩擦阻力。这个理论对摩擦副的解释是比较满意的,下一节详细介绍本理论。

1.3.2 粘着 - 犁沟摩擦理论

1. 摩擦的起因及摩擦过程中的能耗

承载表面的相对运动阻力(摩擦力)是由表面相互作用引起的。表面的相互作用包括如下两种。

1) 表面粘着作用

表面粘着作用是在洁净金属表面,即微凸体顶端相接触的界面上不存在表面膜的情况下,金属与金属在高压下直接发生接触,导致两表面分子相互吸附而形成连接点(冷焊),如图 1.6 中的 A、C、D 点。

2) 表面材料的位移

在图 1.6 中 B 点处虽没有粘着作用,但是当表面发生相对运动时,B 点处阻碍运动的那部分表面材料仍需要被移动或将软表面犁成沟槽才能继续做相对滑动。

两接触表面做相对运动时,需要施加作用力(即对其做功),以克服运动阻力。这些功主要消耗在如下几个方面。

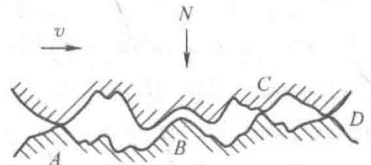


图 1.6 摩擦粘着理论模式

(1) 当两接触表面相对运动时,必须使阻碍运动的微凸体发生弹性变形或塑性变形。对于大多数金属材料而言,塑性变形消耗的功是不可逆的。

(2)当微凸体相互粘着时,必须消耗部分功,以剪断此处的焊点连接。

(3)当微凸体相互嵌合时,必须消耗部分功,剪断一些微凸体的高峰或使较软一方材料发生变形。

摩擦过程中消耗的能量就是摩擦力做的功。

要使两个接触表面做相对运动,必须施加一个切向力来克服摩擦阻力。这个摩擦力由以下两部分组成:

- (1)剪断固相焊接点的力——粘着分量(剪切分量);
- (2)克服硬质微凸体在软表面上的犁沟阻力——犁沟分量。

假定这两项阻力彼此没有影响,则总摩擦力为此两个分量的代数和。摩擦系数也可看作两部分之和:

$$F = F_b + F_v$$

$$\mu = \mu_b + \mu_v$$

式中 F ——总摩擦力(N);

μ ——总摩擦系数;

F_b, μ_b ——摩擦力和摩擦系数的粘着分量;

F_v, μ_v ——摩擦力和摩擦系数的犁沟分量。

2. 摩擦的粘着分量

1) 简单的粘着摩擦理论

在荷载作用下,接触点上的接触应力 σ 很大,当达到金属的压缩屈服极限(流动极限) σ_b 时,接触处发生塑性变形,形成小平面接触,直到接触面积增大到足以支承法向荷载为止。

真实接触面积与荷载的关系如图 1.7 所示,可表示为

$$N_i = \sigma_b \cdot A_{ri}$$

式中 N_i ——第 i 个小接触平面所承受的荷载(N);

A_{ri} ——第 i 个小接触平面的面积(m^2);

σ_b ——金属的压缩屈服极限(Pa)。

$$N = \sum (\sigma_b \cdot A_{ri}) = \sigma_b \cdot A_r$$

式中 N ——荷载的法向部分(N);

A_r ——真实接触面积的总和(m^2)。

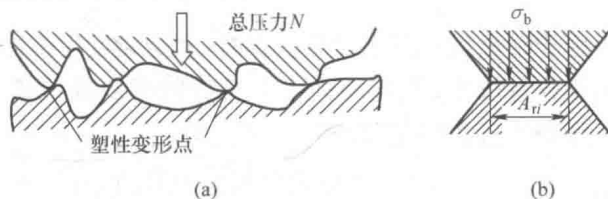


图 1.7 表面接触点的受力情况

(a)微凸体的接触 (b)接触点(放大)的受力情况

在这些真实接触处,出现了牢固的粘着接点。摩擦的过程,就是在切向提供一个力,剪断这些粘着接点,表面就可以发生滑动。摩擦力主要就是剪断这些金属粘着接点的剪切力。

$$F_b = A_r \cdot \tau_b = \frac{N}{\sigma_b} \cdot \tau_b$$