

粉末冶金

FENMO YEJIN MOCA CAILIAO

摩擦材料

曲在纲 黄月初 编著



冶金工业出版社

粉末冶金摩擦材料

曲在纲 黄月初 编著

北 京

冶金工业出版社

2005

内 容 提 要

现代机器工作负荷的不断增长和运转速度的不断提高,对摩擦材料提出了更高、更苛刻的要求。在现有的摩擦材料中,粉末冶金摩擦材料的工作可靠性、摩擦系数的稳定性和耐磨性最佳。

本书共分8章,包括概论、粉末冶金摩擦材料基本类型、粉末冶金摩擦材料的组成、粉末冶金摩擦制品的设计、粉末和支承钢板、粉末冶金摩擦制品的制造、产品质量控制和性能检测以及粉末冶金摩擦材料的标准规范等。

本书可供从事粉末冶金摩擦材料设计与制造的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,还可作为粉末冶金摩擦材料生产工人的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

粉末冶金摩擦材料/曲在纲,黄月初编著. —北京:
冶金工业出版社, 2005. 1
ISBN 7-5024-3634-0

I. 粉… II. ①曲… ②黄… III. 粉末冶金—摩擦
材料 IV. TF125. 9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 107813 号

出版人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)
责任编辑 郭庚辰 (13693126653) 美术编辑 李 心
责任校对 刘 倩 李文彦 责任印制 牛晓波
北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销
2005 年 1 月第 1 版, 2005 年 1 月第 1 次印刷
787mm×1092mm 1/16; 14 印张; 338 千字; 212 页; 1-3000 册
39.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893
冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话: (010)65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

机器、机械传动系统和制动系统中的重要部件摩擦制动器、摩擦离合器、安全离合器、摩擦调速器是根据摩擦部件的摩擦力原理来进行工作的。用于制造摩擦部件的摩擦材料应具有的重要特性是：能够吸收动能，并迅速将动能转化为热散发到空气中；材料本身没有破坏性的磨损，摩擦部件不被损坏。所以摩擦材料是机器制造中最重要的结构材料之一。研究摩擦材料已成为独立的科学课题。

现代机器工作负荷的不断增长和运转速度的不断提高，对摩擦材料提出了更高、更苛刻的要求。在现有摩擦材料——钢、铸铁、青铜、石棉橡胶、半金属、有机纸基摩擦材料、粉末冶金摩擦材料和其他摩擦材料系列中，从工作的可靠性、摩擦系数的稳定性和耐磨性等方面来说，粉末冶金摩擦材料居首位。粉末冶金摩擦材料应用领域在不断扩大，估计我国每年需要粉末冶金摩擦制品达 3000 万件以上，并且在逐年增加，因此进一步扩大粉末冶金摩擦制品的生产，改进其生产工艺，提高产品质量，研究出具有更好使用性能的新型粉末冶金摩擦材料是今后的重要任务。

以摩擦学观点研究摩擦过程的能量转换和摩擦起因，揭示摩擦磨损的规律，寻找与各种机器和机构相匹配的摩擦材料是十分必要的。摩擦材料具备优良的摩擦磨损性能，除了材料的组成以外，还必须有合理的制作工艺、必要的制作设备及材料（制品）性能的检测设备和检测规范等。这一连串的环节都是摩擦制品工作者所必须考虑的。

编者根据多年的实践经验和掌握的有关资料编写了这本书。本书试图总结粉末冶金摩擦制品整个设计和制造过程中的实际经验和理论研究，包括粉末冶金摩擦材料的特性、摩擦磨损机理、材料设计、摩擦制品结构设计、生产设备、生产工艺、检测设备、检测规范以及今后的发展方向。其目的是为从事粉末冶金摩擦材料设计与制造的工程技术人员及管理者提供参考。

由于编者的水平有限，倘若书中的论述存在不妥和不足之处，敬请读者批评指正。

本书编写中，荣幸地得到韩凤麟教授的指点、修改和审校，并引用了国内外许多学者的研究成果，在此，对于他们以及为本书编写给予热情支持与帮助的同事们表示真诚的感谢。

编 者

2004 年 10 月 1 日

目 录

1 概 论	(1)
1.1 摩擦材料	(1)
1.2 摩擦和摩擦机理	(3)
1.2.1 摩擦的分类	(3)
1.2.2 摩擦和摩擦机理	(3)
1.2.3 影响摩擦系数的因素	(5)
1.3 摩擦扭矩和摩擦能量	(9)
1.3.1 摩擦扭矩	(9)
1.3.2 摩擦能量	(10)
1.4 摩擦材料的磨损和磨损机理	(11)
1.4.1 正常磨损的3个阶段	(11)
1.4.2 磨损机理	(11)
1.4.3 磨损量的表示方法	(13)
1.5 摩擦材料的技术要求	(13)
1.5.1 足够高的摩擦系数和摩擦稳定性	(13)
1.5.2 摩擦热稳定性高	(14)
1.5.3 良好的抗粘结性能	(14)
1.5.4 高耐磨性能	(14)
1.5.5 良好的磨合性能	(15)
1.5.6 良好的热物理性能	(15)
1.5.7 具有足够高的力学强度	(15)
1.5.8 其他性能	(15)
1.6 摩擦材料的种类	(16)
1.7 各种摩擦材料的说明	(16)
1.7.1 普通软质编织制品	(16)
1.7.2 软质模压制品	(16)
1.7.3 特殊加工硬化编织制品	(16)
1.7.4 半模压制品	(17)
1.7.5 橡胶模压制品	(17)
1.7.6 树脂模压制品	(17)
1.7.7 半金属	(17)
1.7.8 纸基材料	(17)

1.7.9	铸铁	(17)
1.7.10	粉末冶金摩擦材料	(17)
1.7.11	金属陶瓷	(18)
1.7.12	炭/炭复合材料	(18)
1.8	粉末冶金摩擦材料	(18)
1.8.1	发展史	(18)
1.8.2	性能	(21)
1.9	粉末冶金摩擦材料性能现状及主要研究方向	(23)
1.9.1	粉末冶金摩擦材料性能现状与存在问题	(23)
1.9.2	摩擦材料主要研究方向	(25)
2	粉末冶金摩擦材料的基本类型	(26)
2.1	粉末冶金摩擦材料的分类	(26)
2.1.1	按基体材料类型分	(26)
2.1.2	按应用范围分	(26)
2.2	在干摩擦条件下工作的材料	(26)
2.2.1	铁基摩擦材料	(26)
2.2.2	铜基摩擦材料	(32)
2.2.3	铁-铜基摩擦材料	(36)
2.2.4	金属陶瓷	(36)
2.2.5	镍基和钨基粉末冶金摩擦材料	(37)
2.3	在液体润滑条件下工作的材料	(37)
2.4	粉末冶金摩擦制品对偶材料	(39)
2.4.1	钢	(39)
2.4.2	铸铁	(40)
2.4.3	粉末冶金材料	(41)
2.5	国内一些主要粉末冶金摩擦材料生产厂简介	(41)
2.5.1	杭州粉末冶金研究所	(41)
2.5.2	黄石赛福摩擦材料有限公司	(42)
2.5.3	常德常摩擦材料有限公司	(43)
3	粉末冶金摩擦材料的组成	(45)
3.1	材料中组元的分类	(45)
3.2	形成金属基体的组元	(46)
3.2.1	铜基体	(46)
3.2.2	铁基体	(47)
3.3	起固体润滑剂作用的组元	(49)
3.3.1	铅与其他低熔点金属	(49)
3.3.2	石墨	(50)

3.3.3	硫化物与氮化硼	(53)
3.3.4	其他起固体润滑剂作用的组元	(55)
3.4	摩擦剂	(56)
3.4.1	铜基摩擦材料的摩擦剂	(56)
3.4.2	铁基摩擦材料的摩擦剂	(60)
3.5	几种组分的配合	(62)
3.6	材料的组织结构	(63)
3.7	改善材料性能的途径	(65)
3.7.1	改善干式摩擦材料性能的途径	(65)
3.7.2	改善湿式摩擦材料性能的途径	(67)
4	粉末冶金摩擦制品的设计	(69)
4.1	摩擦制品的形状与尺寸	(69)
4.1.1	摩擦制品的形状	(69)
4.1.2	摩擦片的形状和尺寸	(71)
4.2	摩擦片油槽形式及其对性能的影响	(73)
4.2.1	油槽功能	(74)
4.2.2	油槽型式及其功能特点	(74)
4.2.3	油槽尺寸	(76)
4.2.4	油槽型式对摩擦装置性能的影响	(76)
4.3	对偶片设计	(78)
4.3.1	形状	(78)
4.3.2	材料选择	(79)
4.3.3	对偶片厚度	(79)
4.3.4	热处理	(79)
4.3.5	表面处理	(79)
4.3.6	配合间隙	(79)
4.4	湿式摩擦片设计	(80)
4.4.1	传递扭矩的能力	(80)
4.4.2	接合时间和滑摩功	(82)
4.4.3	温升	(83)
4.4.4	冷却油流量	(85)
4.4.5	能量密度 e 值	(85)
4.4.6	平均功率密度 e_{cp} 和最大功率密度 e_{max}	(85)
4.4.7	能量负荷许用值 $e e_{cp}$	(86)
4.4.8	摩擦材料寿命设计	(87)
4.5	粉末冶金摩擦制品的应用	(88)
4.5.1	在制动器中的应用	(88)
4.5.2	在离合器中的应用	(91)

5 粉末和支承钢板	(94)
5.1 原料粉末	(95)
5.1.1 铜粉	(95)
5.1.2 铁粉	(96)
5.1.3 石墨粉	(97)
5.1.4 易熔金属粉	(97)
5.1.5 摩擦剂	(97)
5.2 粉末的补充处理	(98)
5.2.1 还原退火	(98)
5.2.2 干燥	(99)
5.2.3 煅烧	(99)
5.2.4 磨碎	(99)
5.2.5 过筛	(99)
5.3 原料粉末的混合	(100)
5.3.1 混合料中各组元加入量的计算	(100)
5.3.2 原料粉末的混合	(100)
5.3.3 原料粉末混合的质量检验	(101)
5.4 支承钢板的准备	(102)
6 粉末冶金摩擦制品的制造	(104)
6.1 压制成形	(104)
6.1.1 压制设备	(104)
6.1.2 模具	(105)
6.1.3 成形工艺	(109)
6.1.4 压制缺陷及改善措施	(112)
6.2 加压烧结	(113)
6.2.1 烧结设备	(114)
6.2.2 烧结工艺	(118)
6.2.3 烧结过程中发生的物理化学变化	(123)
6.3 喷撒法 (Sprinkling Powder Procedure 或 Dispersion)	(127)
6.3.1 撒粉装置和网带烧结炉	(127)
6.3.2 生产工艺	(128)
6.4 后续处理	(131)
6.4.1 复压	(131)
6.4.2 浸渍	(131)
6.4.3 切削加工	(131)
6.4.4 热处理	(132)
6.4.5 其他类型的加工	(132)

6.5	生产的生产性	(132)
6.6	劳动保护和安全技术	(134)
7	产品质量控制和性能检测	(138)
7.1	产品质量控制和理化性能检验	(138)
7.1.1	目测检查	(138)
7.1.2	几何尺寸的检查	(139)
7.1.3	化学成分检验	(139)
7.1.4	硬度的测定	(139)
7.1.5	摩擦层与支承钢板的粘结强度检验	(142)
7.1.6	显微组织的检查	(143)
7.1.7	抗压强度的测定	(144)
7.1.8	横向断裂强度的测定	(144)
7.1.9	抗拉强度的测定	(145)
7.1.10	密度的测定	(146)
7.1.11	剪切强度的测定	(147)
7.1.12	旋转强度的测定	(148)
7.1.13	热膨胀系数的测定	(149)
7.1.14	吸水(油)率的测定	(150)
7.2	摩擦和磨损性能试验	(150)
7.2.1	小样摩擦试验机	(151)
7.2.2	实样摩擦试验机	(165)
7.2.3	惯性台架试验机	(168)
7.3	湿式摩擦材料摩擦性能试验	(173)
7.3.1	试验设备	(173)
7.3.2	摩擦材料性能实验室评估	(174)
7.3.3	失效判据	(177)
8	相关标准的比较及术语解释	(178)
8.1	性能要求及试验规范	(178)
8.1.1	火车闸瓦和闸片	(178)
8.1.2	汽车用制动器衬片 [GB5763—98 (代替 GB5763—86)]	(182)
8.1.3	汽车用离合器面片 [GB/T5764—98 (代替 GB/T5764—86)]	(183)
8.1.4	汽车制动器衬片摩擦性能评估小样台架试验方法 (GB/T17469—1998)	(184)
8.1.5	货车、客车制动器性能要求 (QC/T239—1997) 及货车、客车 制动器台架试验方法 (QC/T479—1999)	(185)
8.1.6	轿车制动器性能 (QC/T582—1999) 及轿车制动器台架 试验方法 (QC/T564—99)	(186)
8.1.7	汽车干摩擦式离合器总成技术条件 [QC/T25—2000 (代替 QC/T25—1992)]	(188)

8.1.8	工业机械用石棉摩擦片 (GB11834—2000)	(188)
8.1.9	一汽集团公司有关标准	(190)
8.1.10	二汽集团公司有关标准	(193)
8.1.11	中国重型汽车集团公司企业标准	(194)
8.1.12	中国台湾地区汽车摩擦材料有关标准	(194)
8.1.13	德国克劳斯公司有关试验规范	(196)
8.1.14	德国大众汽车公司有关标准	(200)
8.2	摩擦材料术语	(201)
8.2.1	标准适用范围	(201)
8.2.2	制品及与制品有关的术语	(202)
8.2.3	摩擦、磨损术语	(204)
8.2.4	试验方法及性能术语	(206)
8.3	相关标准目录	(210)
参考文献		(212)

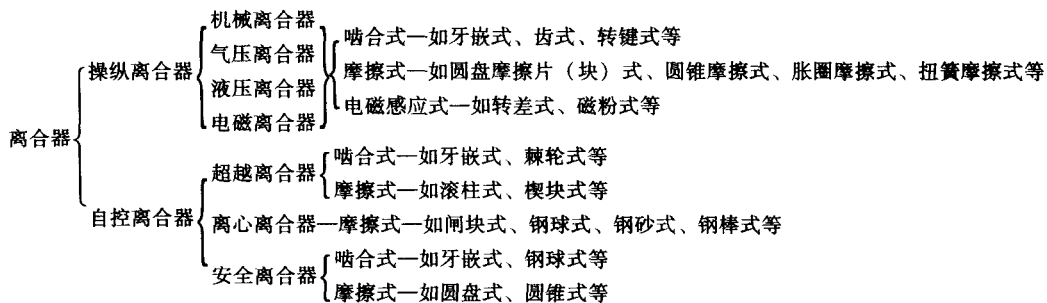
1 概 论

1.1 摩擦材料

根据原机械电子工业部于 1991 年制定并颁布的《JB/T5071—91 摩擦材料术语》“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的材料”称为摩擦材料。

离合器是主、从动部分在同一轴线上传递扭矩和旋转运动时,在不停机状态下实现分离和接合的装置。安装在机械设备传动系统中的离合器通过操纵或自控进行离合,可以完成工作机起动、停止、换向、变速等工作。有的离合器还具有软起动、节能、吸收冲击能量、减缓振动、实现速度超越、防止逆转以及对传动系统的过载保护等功能。

根据 GB/T10043—1988,离合器按操纵和接合方式以及结构型式分类如下:



摩擦离合器的摩擦部件是由摩擦元件及其对偶元件组成的摩擦副。它可以在主、从动部分转速差较大的状态下接合,且接合时较平稳;但在接合过程中,摩擦副之间的相对滑动摩擦导致发热和磨损,且主、从动部分经过一段时间后才能同步运转;过载时,摩擦副打滑可起安全保护作用。

按摩擦离合器摩擦面形状分类,通常有盘式离合器、圆锥形离合器和鼓式离合器(见图 1-1)。盘式离合器又有单盘离合器和多盘离合器之分,圆锥形离合器又分为单锥离

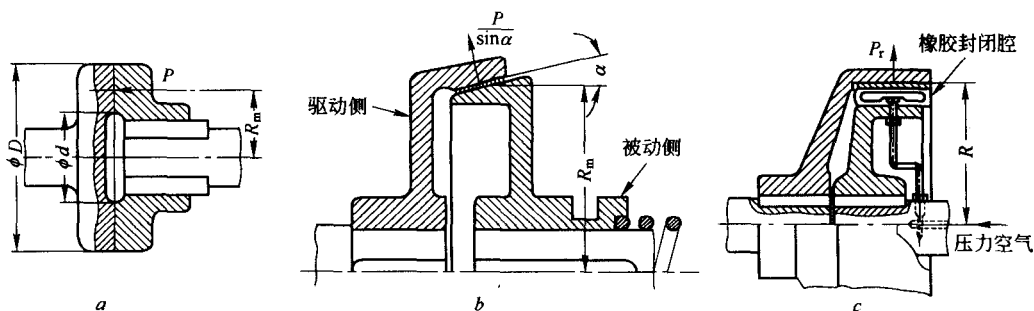
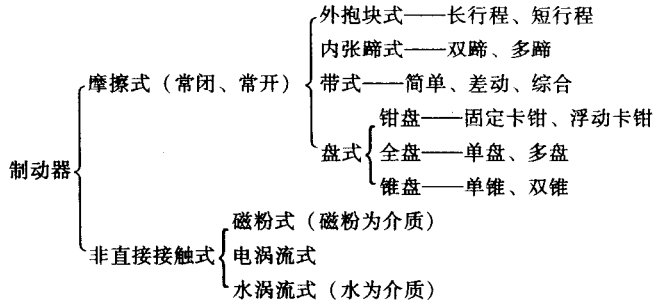


图 1-1 按摩擦面形状摩擦离合器的类型
a—盘式离合器; b—圆锥形离合器; c—鼓式离合器

合器和双锥离合器。

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。

根据工作原理和结构特征制动器分类如下：



根据摩擦制动器的摩擦面的形状，摩擦制动器分为：盘式制动器、鼓式制动器、带式制动器和铁道车辆用闸块式制动器（图 1-2）。

综上所述，摩擦材料是指积极利用其摩擦特性，用于摩擦离合器和摩擦制动器中，实现动力的传递、阻断，运动物体的减速、停止等行为所用的材料。根据使用的环境，可分

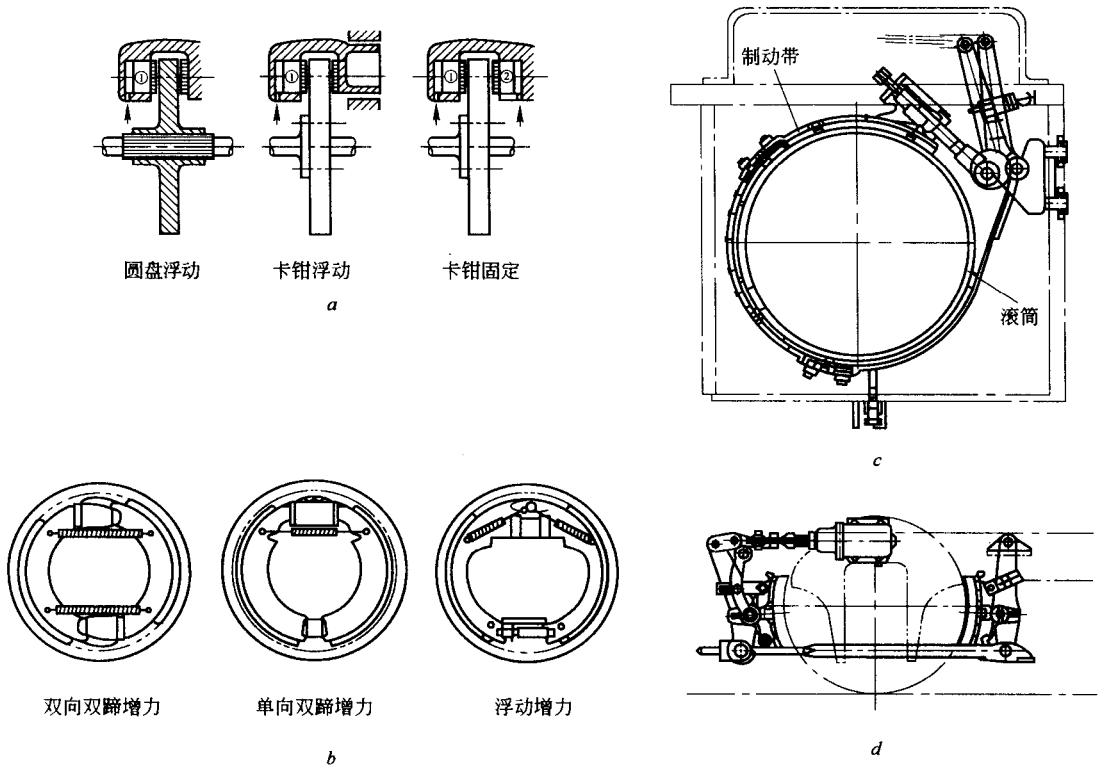


图 1-2 摩擦制动器的种类

a—盘式制动器；b—鼓式制动器；c—带式制动器；d—铁道车辆用闸块式制动器

为接触摩擦面上没有添加润滑油的干式摩擦材料和添加了润滑油的湿式摩擦材料。

1.2 摩擦和摩擦机理

1.2.1 摩擦的分类

根据运动学的特征，摩擦可分为：滑动、滚动和旋转摩擦3种形式。在实际发生摩擦时，亦可同时兼备两种以上的形式。

根据物体位移大小及其与切向力的大小关系，摩擦力可分为动摩擦力、静摩擦力。

按摩擦副运动形式分，把摩擦分成滑动摩擦和滚动摩擦，根据摩擦材料定义，这里只限定讨论滑动摩擦。

按照摩擦物体表面状态，可以把摩擦分成4类：

(1) 干摩擦。通常讲的干摩擦是指在无润滑剂条件下，两物体表面之间可能存在着自然污染膜时的摩擦。

(2) 纯净摩擦。纯净摩擦也称物理干摩擦，指两物体表面无其他介质（吸附膜、化合物及其他人为加入物）时的摩擦。

(3) 液体摩擦。液体摩擦指有充分润滑剂存在时，两物体的摩擦表面有一层连续的液体薄膜，摩擦表面完全被薄膜层隔开的摩擦。假如将气体膜也包括在内，则统称为流体摩擦。

(4) 混合摩擦。混合摩擦指液体摩擦中，当油膜变薄出现微凸体触点的相互作用的摩擦。它分为3种情况：

1) 边界摩擦：混合摩擦中，当两物体接触面积内相互作用的微凸体的数量增多，油膜厚度减至几个单分子层或更薄时的摩擦。

2) 半干摩擦：摩擦表面同时存在干摩擦和边界摩擦情况的摩擦。

3) 半液体摩擦：摩擦表面同时存在液体摩擦和边界摩擦或同时存在液体摩擦和干摩擦情况的摩擦。

1.2.2 摩擦和摩擦机理

两个相互接触的物体在外力作用下发生相对运动或有相对运动趋势时称为摩擦。在接触面间产生切向运动阻力，这种阻力称摩擦力，其方向始终与运动方向相反。物体在外力作用下对另一物体有相对运动趋势，而处于静止临界状态时的摩擦称静摩擦。有相对运动时的摩擦称动摩擦。例如图1-3所示，对与接触面垂直的力 P （垂直负荷）和与接触面平行施加作用力 F ，当 F 较小时，接触面表现出的摩擦力 F' 与外力相抵消，物体并没有滑动。物体开始滑动前的摩擦力称为静摩擦力。

$$F' \leq \mu_s P \quad (1-1)$$

式中 μ_s ——静摩擦系数。

当 F 比 $\mu_s P$ 大时，物体开始滑动，滑动时接触面之间也有摩擦力在作用，这种作用力称为动摩擦力。

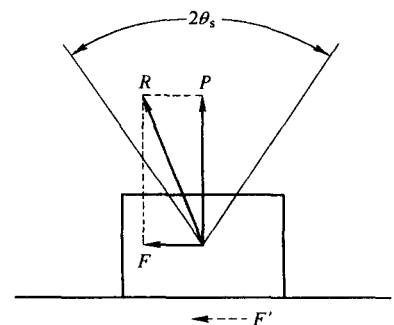


图 1-3 滑动摩擦力学

$$F' \leq \mu_d P \quad (1-2)$$

式中 μ_d ——动摩擦系数。

μ_s 和 μ_d 全为无量纲，一般情况下， $\mu_s > \mu_d$ 。摩擦系数随接触材料的种类、接触面之间存在的膜的种类和状态变化而变化。特别在润滑状态下，受润滑材料的种类和数量、表面微观形状、表面压力、滑动速度、温度等影响。 P 和 F 的合力用 R 表示时， R 和法线形成角 θ 的关系用下式表示：

$$\tan\theta_s \leq \mu_s \quad (1-3)$$

此时， R 无论多大，物体也不会滑动。与此界限相关的 θ_s 称为静摩擦角，用下式表示。

$$\theta_s = \tan^{-1}\mu_s \quad (1-4)$$

摩擦是物体两个接触表面相互作用引起的滑动阻力和能量的损耗。摩擦现象涉及的因素很多，因而提出了各种不同的摩擦理论。

1.2.2.1 机械啮合理论

早期的摩擦理论认为摩擦起源于表面粗糙度，滑动摩擦中能量消耗于粗糙峰的相互啮合、碰撞以及弹性变形，特别是硬粗糙峰嵌入软表面后在滑动中形成的犁沟效应。

1785年阿蒙顿和库仑提出，摩擦力 F_F 与法向载荷 F_N 成正比，把摩擦力与法向载荷之比称为摩擦系数，即

$$\mu = \frac{F_F}{F_N} \quad (1-4a)$$

式(1-4a)称为阿蒙顿、库仑古典摩擦定律，认为：

- (1) 摩擦力与法向载荷成正比；
- (2) 摩擦系数的大小与几何接触面积无关，摩擦表面到处是凹凸不平的，而摩擦起因于接触表面上微凸体的互嵌作用；
- (3) 静摩擦系数大于动摩擦系数；
- (4) 摩擦系数与滑动速度无关。

根据研究发现大多数经典摩擦定律并不完全正确，但是的确在一定程度上反映了滑动摩擦的机理，因此在许多工程实际问题中依然近似地引用。

1.2.2.2 分子作用理论

19世纪20年代科学家提出摩擦的“粘附理论”。认为摩擦力来自接触表面之间的分子粘附力，摩擦力的大小与接触面积成正比，即表面越粗糙，实际接触面积越小，因而摩擦系数应越小，而与法向载荷无关。可是这一点与许多摩擦试验结果不符合，而试验表明摩擦力与接触面积无关。

1.2.2.3 分子机械理论

在摩擦分析发展中的各个阶段认识到，摩擦的物理起因非常复杂，不能用简单的理论进行解释，而需要作精确的试验和详细的物理分析。1940年前后科学家才弄清楚上述分歧。认为摩擦力既来自于摩擦副表面凹凸微区的机械互嵌作用，又来自于摩擦时变形过程的粘附作用。这种摩擦“二重性的分子机械理论”已被大家公认为是一种综合的摩擦理论。

可以用图1-4表示互相啮合一定深度的两微凸体之间形成的微观触点，在结合和分离时发生的过程：

- (1) 微凸体弹性变形；
- (2) 微凸体塑性变形；
- (3) 犁沟；
- (4) 剪切粘结点。

根据分子机械理论，每项分过程综合结果显示摩擦为摩擦副表面接触点上机械啮合作用和分子吸引作用所产生的剪切阻力的总和，即

$$F = \alpha A_r + \beta P \quad (1-5)$$

$$\text{或} \quad F = \beta \left(\frac{\alpha}{\beta} A_r + P \right) \quad (1-6)$$

式中 F ——摩擦力；
 A_r ——真实接触面积；
 P ——负荷；
 α 与 β ——系数。

上式叫做摩擦二项式定律，其中 α 与 β 分别为由摩擦表面的物理和力学性能所决定的系数。由此，可得到摩擦系数：

$$\mu = \beta + \alpha \frac{A_r}{P} \quad (1-7)$$

式中， β 是一个定值，它是根据纯机械啮合理论确定的摩擦系数， α 是分子引力引起的一个变量，它是对纯机械啮合理论的修正。

实验指出，对于塑性材料，由于真实接触面积与负荷成正比，摩擦系数与负荷无关，为一定值。对于弹性材料，由于真实接触面积因负荷增高而缓慢地增大，因此，摩擦系数因负荷增大而减小。

摩擦二项式定律不仅能解释干摩擦摩擦力的由来，也能解释边界摩擦摩擦力的来源。通常，摩擦系数是在一定条件下，通过仪器测定并经过计算获得，而不能通过上式获得。摩擦系数受各种因素影响而变化。

1.2.3 影响摩擦系数的因素

1.2.3.1 干式摩擦材料摩擦系数的影响因素

摩擦系数是摩擦材料的主要性能之一，它与材料、材料的表面状况、介质或环境等因素密切相关。所以，在给出一种材料的摩擦系数时，必须同时注明得出该数值的条件和所用的测试设备。

A 表面膜的影响

表面膜——摩擦时摩擦材料发热氧化金属表面形成的薄膜，也称第三体。

金属表面上的原子通常处于不平衡状态，易与周围介质形成表面膜。摩擦中的表面变形和温升促进表面膜的形成。为了防止摩擦副表面过度磨伤和稳定摩擦系数，粉末冶金摩擦材料中总加有一定量的固体润滑剂，这些固体润滑剂在摩擦过程中便生成表面膜。在高温摩擦过程中，粉末冶金摩擦材料中的摩擦剂也参与表面膜的组成。

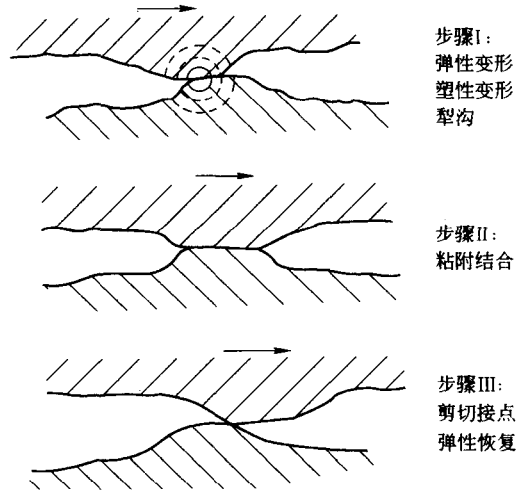


图 1-4 摩擦过程示意图

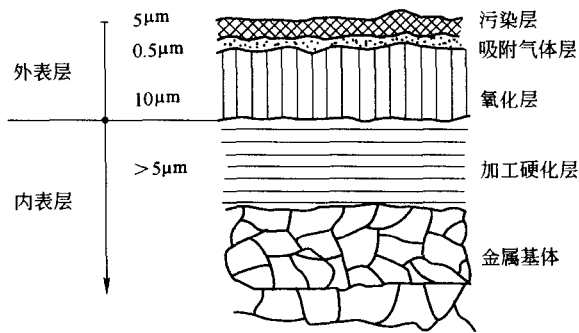


图 1-5 摩擦表面横剖面组成示意图

为了描述真实表面的组成，早在 1936 年 Schmalzly 就把“内表层”（即基体材料和加工硬化层）和“外表层”（即污染物，吸附层）区分开来，图 1-5 为摩擦表面横剖面组成示意图。

表 1-1 为几种摩擦副的氧化膜和硫化膜的减摩作用数据。从表中看出，在干摩擦条件下，表面膜的减摩作用十分显著，由此可知，当表面膜破坏以后摩擦系数将急剧增加。

表 1-1 氧化膜和硫化膜的减摩作用

摩擦条件	摩擦副	摩擦系数		
		纯净表面	氧化膜	硫化膜
干摩擦	钢-钢	0.78	0.27	0.39
	铜-铜	1.21	0.76	0.74
硬脂酸润滑	钢-钢	0.11	0.19	0.16

表面膜的存在可防止或减少粘着胶合现象的产生，从而降低了材料的磨损，并促进摩擦系数和摩擦力矩的稳定。希望表面膜比较软，有一定变形能力，表面膜与金属有较强的连接力。

干摩擦副的摩擦过程就是表面膜生成和剥落的过程。假如表面膜塑性和机械强度比金属材料差，摩擦过程中，膜先破坏，表面不发生粘着，摩擦系数降低，磨损小。

假如负荷增大，摩擦表面温度升高，膜松弛、脱落，污染物脱附，发生真实金属表面的粘着，即发生焊接现象。摩擦副表面产生共同塑性变形，发生金属连接，形成一层结合牢固的胶合层，这种现象称为胶合现象。胶合现象是材料破坏的主要因素。当胶合层强度小于两种金属的强度时，磨损小，且在表面磨损；当胶合层强度大于一种金属的强度而小于另一种金属的强度时，主要是软金属破坏，软金属转移到硬金属表面，磨损厉害；当胶合层强度大于两种金属的强度时，破坏大部分在软金属中产生。

粉末冶金摩擦材料中加入高比例的非金属组元和软金属时，可以防止和减小胶合现象的产生，尤其是石墨在摩擦过程中形成的表面膜能获得稳定的摩擦系数。

B 材料性能的影响

同种金属和互溶性大的金属摩擦副，易发生粘着现象，摩擦系数增大。这种摩擦副发生胶合现象时，胶合层强度大于金属强度，所引起变形和焊接的破坏具有向摩擦体内发展的特征，磨损很大。所以摩擦副不建议使用同类金属来制造。

由以上分析知道，依靠摩擦表面的粘附力来提高摩擦系数，过程难控制，负荷增大时，将形成胶合，破坏不可控制和材料严重破坏，所以不希望用粘着机理提高摩擦系数。我们偏重于选择硬质相夹杂物依靠机械啮合机理调节摩擦系数。但是，粘着机理和机械啮合机理对摩擦系数的作用是相互交织错综复杂的，同时很大程度上取决于温度、压力、滑动速度和润滑等因素。

不同种的金属摩擦副，由于互溶性差，不易产生粘着现象，摩擦系数一般都较低。

从材料的组织结构考虑，多相金属比单相金属的抗粘着磨损能力高。通过材料的组成，摩擦过程中摩擦表面生成硫化物、磷化物等薄膜将减少粘着效应，同时表面膜也限制了破坏深度，从而提高抗粘着磨损能力。

C 负荷的影响

在弹性接触情况下，负荷小时由于真实接触面积与负荷无关，摩擦系数随负荷增高达到一极大值。负荷足够大时，真实接触面积变化很小，因此摩擦系数趋于稳定。

在弹塑性接触情况下，材料的摩擦系数随负荷增大而达到一极大值，然后随负荷的增大而逐渐减小。

D 滑动速度的影响

当滑动速度不引起表面层性质发生变化时，摩擦系数几乎与滑动速度无关。在一般情况下，滑动速度均引起表面层发热、变形、化学变化和磨损等，从而显著地影响摩擦系数。

图 1-6 为滑动速度与摩擦系数的关系曲线。对于一般弹塑性接触状态的摩擦副，摩擦系数随滑动速度增加而越过一极大值，然后降低，如图中曲线 2 和曲线 3 所示，并且随着表面刚度或者载荷增加，极大值的位置向坐标原点移动。当载荷极小时，摩擦系数随滑动速度的增大曲线只有上升部分，而在极大的载荷条件下，曲线却只有下降部分，如图中曲线 1 和 4 所示。实际上，摩擦材料在应用的负荷和滑动速度范围内的正常滑动情况下，摩擦系数均随负荷和滑动速度的增高而减小。

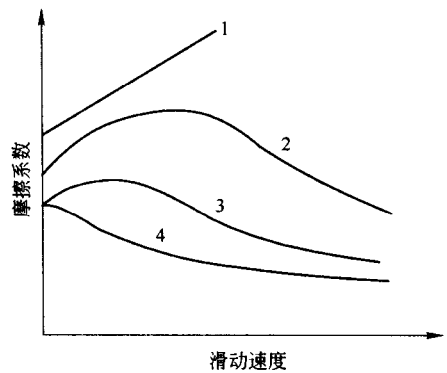


图 1-6 滑动速度与摩擦系数的关系
1—极小载荷；2、3—中等载荷；4—极大载荷

E 表面粗糙度对摩擦系数的影响

在塑性接触的情况下，表面粗糙度对真实接触面积影响不大，故表面粗糙度对摩擦系数影响不大。

一般情况下，表面粗糙机械啮合作用增大，摩擦系数有所提高。当表面粗糙度达到表面分子吸引力有效地发生作用时，机械啮合作用减弱，粘着机理起主要作用，此时表面越光洁，真实接触面积影响越大，摩擦系数也越大。

F 温度的影响

摩擦副滑动时，温度变化使材料表面的性质发生变化，从而影响摩擦系数，并随摩擦副工作条件不同而改变。

摩擦副表面的接触是无数个点接触，接触点在滑摩过程中产生热，接触点就是热源。接触点位置也就是热源位置随滑摩速度和压力不断变化，这样在摩擦表面形成温度场。表面热能不断向摩擦副深处传导，从而也提高了体积温度。表面温度、体积温度和温度梯度大小与速度、压力、材料的热物理性能、零件的结构有直接关系，直接影响摩擦系数的大小和磨损。

曾得出摩擦副的摩擦系数不仅取决于总温度，而且取决于温度梯度的关系。根据摩擦