

橡胶磨损原理

张嗣伟 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是作者在总结多年从事橡胶摩擦与磨损研究所取得成果的基础上所完成的一部专著。它系统地阐述了橡胶磨损原理，并反映了该领域的研究现状。

全书共分七章，内容涉及橡胶摩擦机理、橡胶的四种主要磨损形式——磨粒磨损、侵蚀（冲蚀）磨损、疲劳磨损与摩擦磨损的机理。重点介绍了石油工业中常见的两种橡胶磨损形式即磨粒磨损与侵蚀（冲蚀）磨损，还特别阐述了橡胶磨损中的表面力化学效应以及橡胶磨损理论研究的最新进展。

本书可作为从事设计、制造、研究和应用橡胶材料与制品的工程技术人员参考书，也可作为高等院校有关专业研究生或本科高年级学生的教学用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

橡胶磨损原理/张嗣伟著.
北京:石油工业出版社,1998.3
ISBN 7 - 5021 - 2152 - 8

. 橡...
. 张...
. 橡胶 - 磨损
. TQ330.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 22505 号

*

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里 2 区 1 号楼)
石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787 × 1092 毫米 16 开本 10 印张 3 插页 260 千字 印 1 - 1000

1998 年 3 月北京第 1 版 1998 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7 - 5021 - 2152 - 8 TE·1804

定价: 23.00 元

序

在所有材料中，橡胶占有一个非常特殊的地位。如果没有橡胶的发现，则人类生产和生活方式将和今天会有很大的不同，甚至难以想象。这当然是由于橡胶有很多特殊和可贵的特性。

在橡胶的有用特性中，抗磨损是非常重要的。我们只要看一看汽车轮胎便清楚了。汽车轮胎用橡胶做，固然是为了吸震，但更重要的是在路面条件下没有其它材料在抗磨能力上能和橡胶相比。但我们如果用木锉刀来锉，会发现车胎外层并不抗磨。这是由于橡胶磨损是一种极复杂的现象，不同条件下的磨损机理可能完全不同。到今天，这个问题还是研究的热点。

本书作者张嗣伟教授用了多年时间研究橡胶磨损，在国际上发表过重要成果，是这方面开路人之一。本书主要是讨论四种磨损形式的机理和磨损中涉及的物理和化学问题，是在这重要领域中一部难得的专著。本书虽然是讨论理论问题，但对于实际工作也会有很大影响，因为磨损现象在一般人头脑中常过度地简化了。本书通过理论的阐述，使读者对每一种磨损的实质有所了解。对寻求更耐磨的结构、方法和材料也将有所启迪。

雷天觉

1996年12月4日

前 言

橡胶是国民经济和人民生活中不可缺少的一种重要的原材料，它的传统用途是制造各种车辆用轮胎。然而，橡胶做为一种高弹性材料，具有一般金属和其它高分子材料所没有的一些独特的性能，所以，在一般工业，尤其是在石油工业中获得广泛的应用。因此，提高橡胶制品的耐磨性和使用寿命就成为人们十分关注的一个重要课题。

几十年来，虽然国内外不少学者和研究人员对橡胶材料的磨损问题进行了相当广泛地研究，但是，迄今为止，系统阐述这一问题的专著却极为少见。1967年在伦敦出版了D.F.James主编的《橡胶的磨粒磨损》，但这是一本只涉及到橡胶的磨粒磨损的论文集，随后，1975年在莫斯科出版了 . . . 等人编著的《橡胶磨耗》，该书在查阅了大量文献的基础上对橡胶磨损问题作了比较全面的阐述，但主要是针对轮胎磨损，并侧重于实际应用，而对橡胶磨损的一般原理的阐述过于简略，因而对提高各类橡胶制品的耐磨性的指导作用是很有有限的。

不懂得橡胶磨损原理，就不可能了解橡胶制品磨损失效的机制，从而也就不可能弄清橡胶耐磨性能与其机械性能之间的关系，因而也就无法预测橡胶制品在使用条件下的实际性能和使用寿命。因此，只有深刻了解橡胶的磨损原理，才能正确地制订橡胶配方的设计原则以及测定和评价其耐磨性能的方法，从而才有可能进一步提高橡胶制品的耐磨性和使用寿命。

从1982年以来，作者及其领导的科研组一直坚持从事橡胶磨损及部分橡胶摩擦的研究，从石油工业的实际出发，研究的内容主要侧重于橡胶的磨粒磨损和侵蚀磨损，本书就是这些研究工作的总结。本书的主要内容包括作者80年代先后在美国阿克伦大学高分子材料研究所A.N.Gent教授的高分子物理研究室、美国密执安大学机械工程与应用力学系K.C.Ludema教授的摩擦学研究室和英国帝国理工学院化学工程与化学工艺系B.J.Briscoe教授的微粒技术与界面工程研究室工作期间所取得的研究成果，以及作者后来在国内领导其科研组所做的一些研究工作。为了使读者对橡胶磨损原理以及近十几年来在此领域中所取得的进展有较全面的了解，本书在介绍作者及其科研组的研究工作的同时，也适当介绍了一些国内外有关的主要的研究成果，并且还专门编写了第六章，简要介绍作者没有专门研究过的另外两种橡胶磨损形式，即疲劳磨损和橡胶所特有的摩擦磨损。而在本书最后一章，则集中介绍了作者及其科研组最近几年在橡胶磨损理论研究方面所取得的最新成果。书中有不少内容是第一次公开发表。

橡胶磨损原理作为高分子材料摩擦学的一个学科分支，其学科体系还很不完善，而本书的编著又是以介绍作者的研究成果为主，因此，限于作者的学识与水平，本书在取材和论述等方面肯定会存在不少缺点和错误，恳切地希望读者提出批评指正。

作者80年代在国外所进行的橡胶摩擦磨损的研究工作曾先后得到A.N.Gent教授，K.C.Ludema教授和B.J.Briscoe教授的大力支持和热情帮助，谨向他们致以衷心的感谢。

博士生杨兆春在作者指导下编写了第六、七章两章以及第二章第二、三节的初稿，并完成了全书的打字工作，博士生柳琼俊完成了部分章节插图的收集与整理以及数学公式与化学结构式的打字等工作，对此，作者深表谢意。

作者所完成的橡胶磨粒侵蚀的研究工作曾先后获得高等学校博士学科点专项科研基金和中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑开放研究实验室基金资助。

本书在石油工业出版社领导和编辑们的热情鼓励和真诚支持下才得以问世，特此致谢。

张嗣伟

1996年10月

目 录

第一章 绪论.....	(1)
第一节 研究橡胶磨损的重要意义.....	(1)
第二节 橡胶的基本特征.....	(2)
第三节 磨损的定义与基本特性.....	(3)
参考文献.....	(8)
第二章 橡胶摩擦	(10)
第一节 橡胶的磨合摩擦	(10)
第二节 橡胶点接触摩擦机理	(14)
第三节 橡胶线接触摩擦机理	(25)
参考文献	(27)
第三章 磨粒磨损	(29)
第一节 干磨粒磨损	(29)
第二节 油性磨粒磨损	(50)
第三节 湿磨粒磨损	(51)
参考文献	(59)
第四章 侵蚀磨损（冲蚀磨损）	(63)
第一节 金属材料的侵蚀磨损理论简介	(63)
第二节 磨粒侵蚀的机理	(67)
第三节 磨粒侵蚀理论	(74)
参考文献	(87)
第五章 磨粒侵蚀的表面力化学效应	(89)
第一节 概述	(89)
第二节 天然橡胶的表面力化学效应	(90)
第三节 丁腈橡胶的表面力化学效应.....	(101)
第四节 氟橡胶的表面力化学效应.....	(108)
第五节 聚氨酯的表面力化学效应.....	(115)
参考文献.....	(127)
第六章 疲劳磨损与摩擦磨损.....	(128)
第一节 疲劳磨损.....	(128)
第二节 摩擦磨损.....	(130)
参考文献.....	(133)
第七章 橡胶磨损理论研究的新进展.....	(134)
第一节 分形理论的应用.....	(134)
第二节 计算机在橡胶磨损机理研究方面的应用.....	(144)
第三节 橡胶磨损的能量理论.....	(152)
参考文献.....	(162)

第一章 绪 论

第一节 研究橡胶磨损的重要意义

橡胶是国民经济和国防工业以及人民生活中不可缺少的重要原材料。从本世纪 50 年代以来，橡胶耗用量与国民生产总值之间就存在着密切而稳定的相关性^[1]，它在一定程度上反映了一个国家的国民经济发展水平。据世界银行的统计分析，1960 ~ 1975 年各类国家的橡胶耗用量 CE 与其国内生产总值 GNP (美元) 存在如下定量关系：

发达国家

$$\ln CE = - 3.1506 + 1.2877 \ln GNP \quad (1 - 1)$$

发展中国家

$$\ln CE = - 7.734 + 1.592 \ln GNP \quad (1 - 2)$$

中国

$$\ln CE = - 4.415 + 1.361 \ln GNP \quad (1 - 3)$$

1990 年我国的橡胶耗用量已居世界第四位，橡胶的传统用途主要是制造各种车辆用轮胎，而汽车工业在许多国家都是国民经济的支柱产业之一。

作为一种高弹性材料，橡胶还具有金属和其它高分子材料所没有的一些良好的性能（如耐磨、耐油等），因而它不仅在汽车工业，也在其它工业，尤其是石油工业中获得广泛应用。70 年代以来，橡胶材料在各种车辆轮胎和摩擦元件（如密封件、活塞环、水润滑轴承以及油田设备中的各类橡胶件等）的应用上始终保持不断增长的势头。因此，即使它们的耐磨性和使用寿命提高不多，也会在节约能源、材料和润滑剂等多方面带来相当可观的经济效益和社会效益，所以，提高橡胶制品（尤其是各种轮胎）的使用寿命是一个十分重要的问题。当前，世界各国的工业和交通运输部门都越来越重视开展对橡胶的磨损机理、抗磨技术及其应用的研究（包括制订测定橡胶耐磨性的合理的试验方法，合理设计橡胶的配方，预测橡胶在使用条件下的性能与使用寿命等）。

材料磨损是一种十分复杂的现象，它不仅取决于材料本身的性质，而且还是一个具有时变特征的渐进的微观动态过程，同时还受到它所在的摩擦学系统（包括环境）中多方面因素的相互影响和相互作用。为此，对磨损的研究必然涉及到物理、化学、力学、热力学、材料科学和机械工程等多种学科和科学技术领域的问题。在摩擦学中的三个主要领域——摩擦、润滑和磨损中，对磨损的研究起步最晚。如果从 1938 年 R. Holm 首次提出区别表观接触与实际接触的概念和“两表面原子间相互作用，发生摩擦和磨损”的观点以来，才不过 50 多年的历史，而真正从微观的角度进入实质性的深入研究，只是在 60 年代出现了电子显微镜和各种先进的表面分析技术之后，距今仅 30 来年，由此可见，磨损还是一个很不成熟的领域，所以，早在 1977 年第一届国际材料磨损会议上，就有人提出把磨损从摩擦学领域中独

立出来，作为摩擦学的一个分支学科。因此，加速发展这一交叉学科领域，对科学技术的进步也具有重大的理论意义。

材料磨损原理是研究材料的磨损失效形式、磨损的作用机制、磨损规律、磨损状态的检测与监控以及抗磨技术的一门科学与技术，也可称之为材料磨损学，而橡胶磨损原理则是这门科学与技术领域中的一个重要组成部分或主要分支。

第二节 橡胶的基本特征

一、橡胶的结构与特征

橡胶是由许多大分子所组成的一种高分子化合物。它的每个大分子都是由共价键联结的许多化学结构单元所组成的一条非常长的大分子链。例如，天然橡胶的一条分子链就是由大约 1000 到 5000 个异戊二烯化学结构单元所组成。

单个高分子链的结构有三种基本型式（图 1 - 1），即线型高分子（直链型高分子）、支化型高分子（支链型高分子）和交联型高分子（网状型高分子）。

图 1 - 1 高分子结构的基本型式

(a) 线型高分子；(b) 支化型高分子；(c) 交联型高分子

线型高分子的分子链很容易产生相对运动，所以，它在加热时软化，经过冷却后又可固化，这种性质称为热塑性。至于交联型高分子，由于其分子链的相对运动受到很大的限制，所以，它在加热时不易流动或熔化，这种性质称为热固性。

与金属材料相比，橡胶一般具有以下特征：

(1) 弹性形变很大，而弹性模量极小。橡胶的弹性形变可达 1000%，而大多数高分子材料的弹性形变大约只有 1%，一般金属的弹性形变则小于 1%。橡胶的弹性模量大约只有钢的 $1/10^5$ ，而且会随温度的上升而成比例地增大，而金属材料的弹性模量却正相反。

(2) 泊松比的数值（0.49）比一般金属材料的更大，接近于液体的泊松比（0.5），所以橡胶在发生形变时，其体积几乎不变，而金属则不同。

(3) 未交联的橡胶的弹性形变的发展具有明显的时间相关性，即松弛特性，而金属没有这种特性。

(4) 形变过程中的热效应较明显，即橡胶在快速拉伸时放热，自行恢复时吸热，而金属材料则与此相反。

表 1 - 1 给出了在摩擦学应用中常见的几种橡胶的主要力学性能^[2]。

表 1 - 1 几种橡胶的主要力学性能

材 料	邵氏硬度	拉伸强度 MPa	最高使用温度	玻璃化转变温度
丁基橡胶	30 ~ 100	21	149	- 75
氯丁橡胶	40 ~ 95	21	116	- 49
丁腈橡胶	20 ~ 90	21	149	- 22
硅 橡 胶	10 ~ 85	7	316	- 120
聚 氨 酯	10 ~ 100	34	116	-
天然橡胶	30 ~ 100	25	70	- 70
乙丙橡胶	30 ~ 90	10	125	- 58
聚丁二烯	35 ~ 90	10	70	- 85

二、橡胶与弹性体的概念

由上可见，橡胶作为一种高分子材料，高弹性是其最显著的特征，因此，一般也将橡胶称为弹性体。

天然橡胶（胶乳）是第一个在工程上应用的弹性体，随后开发出硫化橡胶，这是一种热固性弹性体。这类弹性体经一次性固化后，不能再次熔融。在第二次世界大战期间，仿照天然橡胶发展了一系列可供工业应用的性能更广泛的合成橡胶，这也是一种热固性弹性体。50年代发展的聚氨酯弹性体以及后来发展的其它一些弹性体，虽然也具有高弹性，但其它特性都与橡胶不同，而且，其中某些弹性体与热塑性塑料和热固性塑料的结构几乎一样，尤其是一些热塑性弹性体的出现，标志着弹性体加工工业取得了重大进展，因为这类弹性体可以完全利用生产加工热塑性塑料的多种技术，即可以重复熔融，可以用真空成形、吹塑法和高速注塑法等多种模塑和挤塑技术，从而使生产成本大大降低。

因此，严格地说，不能把弹性体的概念完全等同于狭义的橡胶的概念，因为前者是指包括橡胶在内的所有具有高弹性的高分子材料。但考虑到习惯上的用法，可以认为，橡胶一词，从广义上讲就是弹性体，本书中所用橡胶一词一般都是指广义的橡胶概念，因而与弹性体一词通用。

第三节 磨损的定义与基本特性

一、磨损的定义

由于磨损现象的复杂性，至今还没有一个为大家公认的严格的定义。例如，欧洲经济合作与发展组织（OECD）工程材料磨损研究小组给“磨损”一词定义为“相对运动的工作表面上材料的逐渐损耗”^[3]，而在美国材料试验协会（ASTM）标准中关于“磨损”的定义是：由于一个物体的表面与它相接触的物质间的相对运动而造成的固体表面的损伤，通常有材料的逐渐损失^[4]，在此定义中所指的损伤，包括了没有材料损失的情况（如表面残余变形）。Peterson将“磨损”定义为“无用的材料脱落”^[5]。显然，上述定义都太笼统，而美国材料试验协会标准把没有材料损耗的现象包括在内也是不妥当的，尽管物体会因为产生严重的塑性变形而失效。

本书作者根据自己多年在摩擦学方面进行研究和教学的实践，给出“磨损”的定义如

下：磨损是由于机械作用和（或）化学反应（包括热化学、电化学和力化学等反应）在固体摩擦表面上产生的一种材料逐渐损耗的现象，这种损耗主要表现为固体表面尺寸和（或）形状的改变。从本质上看，磨损不仅是单一的机械作用的结果，而往往是伴随着化学反应综合作用的结果。上述定义阐明了磨损现象的三个主要特征：

（1）磨损是发生在物体表面上的一种现象，一般由于物体内部裂纹引起的典型的断裂和疲劳破坏不属于磨损的范畴。

（2）磨损是发生在物体摩擦表面上的一种现象，即其接触表面必须有相对运动。单纯的腐蚀和橡胶表面老化都是在静止表面上发生化学反应（包括氧化）的结果，因而不属于磨损的范畴。

（3）磨损必然产生物质损耗（包括材料转移），而且是一个具有时变特征的渐进的动态过程，因此，不产生材料逐渐损耗的单纯的塑性变形不属于磨损的范畴。

二、磨损的基本特性

磨损具有如下两个基本特性：

（1）磨损是机器零件正常运转过程中不可完全避免的一种现象，只要机器零件的磨损量（或磨损率）在规定的使用期内不超过允许值，就可认为这是在运行中允许的正常磨损现象。

机器零件的典型磨损过程一般可划分为以下三个阶段（图 1 - 2）：

磨合（跑合）阶段（图 1 - 2， $0 \sim t_1$ 段）。

刚刚制造出的摩擦副，在其摩擦表面上各微观突起部分的高度参差不齐，其顶峰也较尖锐，从而使其实际接触面积小。因此，必须在正式投入使用之前，逐渐加载磨合，以增大其接触面积，防止损坏配合表面。在此阶段，其磨损率在开始时增长较快，以后逐渐减缓，直到进入正常运

图 1 - 2 机器零件典型的磨损曲线

行的稳定磨损阶段。

正常磨损阶段（图 1 - 2， $t_1 - t_2$ 段）。

在此阶段，磨损率基本上保持不变，磨损缓慢。

事故磨损阶段（图 1 - 2， $t_2 - t_3$ 段）。

零件经过长期运行后，配合间隙增大，精度和性能下降，润滑条件恶化，磨损率急剧增长，磨损加剧，整个机器的性能和效率明显下降，而且往往会产生异常的噪音和振动，摩擦副的温度上升，最后导致零件完全失效。

（2）磨损不仅是材料本身固有特性的表现，更是摩擦学系统特性的反映。

磨损之所以具有这一基本特性是由于它不仅取决于材料本身的固有特性（如强度，硬度等），而且还在很大程度上受到组成该摩擦学系统的许多元件、工作参数和环境以及它们之间相互作用的各种关系与过程的影响，是一种十分复杂的现象。一般可用下式来表示这种特性^[6]：

$$W = f(x, s) \quad (1 - 4)$$

式中 x ——工作参数，包括载荷，相对运动的速度和形式以及时间等；
 s ——摩擦学系统的结构。

$$s = \{ A, P, R \} \quad (1 - 5)$$

式中 A ——组成摩擦学系统的各元素（包括环境）；
 P ——组成摩擦学系统的各元素的性质；
 R ——组成摩擦学系统的各元素之间的相互关系。

同一种元件在不同的摩擦学系统中会表现出不同程度甚至不同形式的磨损，即使在同一摩擦学系统，不同的工况也会导致不同程度或不同形式的磨损。因此，在处理磨损问题时，必须全面考虑该元件所在的摩擦学系统的结构，才能对其磨损现象做出准确的判断和正确的分析。有时，可以不改变工况，而仅仅改变该摩擦学系统的结构（如改善润滑条件或环境），就可以使摩擦副的一方或双方的磨损状况得到改善。

表征磨损特性的基本参数是磨损率，通常采用以下三种磨损率：

线性磨损率

$$R_L = h / L \quad (1 - 6)$$

体积磨损率

$$R_V = V / (L \cdot A_a) \quad (1 - 7)$$

重量磨损率

$$R_W = W / (L \cdot A_a) = R_V \quad (1 - 8)$$

在以上三式中， h ， V ， W 分别代表材料被磨损的厚度、体积和重量； L 为滑动距离； A_a 为表观接触面积； ρ 为被磨损的材料的密度。

在一般文献中，有时还可看到以下几个表征磨损特性的参数：

磨损因数

$$= V / (N \cdot L) = R_V / \rho \quad (1 - 9)$$

式中 p ——正压力；
 N ——法向载荷。

磨损度（能量磨损率）

$$= V / (F \cdot L) = V / (fN \cdot L) = \text{磨损度} / f \quad (1 - 10)$$

式中 F ——摩擦力；
 f ——摩擦系数。
 耐磨性系数（耐磨性）

$$= 1 / \text{磨损度} = 1 / (f \cdot \text{磨损度}) \quad (1 - 11)$$

磨损系数^[5]

$$K = WH / Nvt \quad (1 - 12)$$

式中 W ——磨损量；
 H ——材料硬度；
 v ——速度；
 t ——时间。

其它符号同前。

磨损系数表示磨损量与工况之间的关系，当载荷与速度为已知，并可求出一定工况下的磨损系数时，就可估算磨损量，以预测摩擦学系统的寿命。也可根据磨损系数来确定磨损类型，因为不同的磨损类型具有不同的磨损系数。

磨损速率（磨损强度）

$$I = W / t \quad (1 - 13)$$

或

$$I = W / t \quad (1 - 14)$$

此外，还采用相对耐磨性的概念，即标准橡胶的磨损率与试验橡胶磨损率之比（%）。

三、磨损的分类

半个多世纪以来，许多学者从不同的角度提出了各种不同的分类方法，然而，到目前为止，还没有取得完全统一的认识，甚至对各种磨损现象也都还没有完全为大家所公认的统一名称和定义。这种状况说明磨损作为一个领域或学科分支还很不成熟，对复杂多样的磨损现象及其机理缺乏深入的认识，甚至把磨损现象（形式）和磨损机理（本质）相混淆，因而在磨损的分类上出现概念不清和似是而非的情况。有鉴于此，本书采用一般比较通用的，由Burwell^[7]提出的按磨损机理的分类方法，即将磨损划分为：

- (1) 粘着磨损或粘附磨损；
- (2) 磨粒磨损或磨料磨损；
- (3) 疲劳磨损或表面疲劳磨损；
- (4) 腐蚀磨损或摩擦化学磨损；
- (5) 其它，如侵蚀磨损或冲蚀磨损以及橡胶类高弹性材料所特有的一种磨损，即摩擦磨损。

本书将着重介绍橡胶的磨粒磨损和侵蚀磨损，并简要介绍橡胶的疲劳磨损和摩擦磨损。

橡胶的磨粒磨损、疲劳磨损和摩擦磨损都是橡胶在刚性基体表面上做相对运动时产生的磨损，它们在很大程度上与刚性基体表面的粗糙度有关，所以其磨损机理与摩擦机理密切相关（图1-3）^[8,9]，这是橡胶磨损的一个重要特点，至于金属，在其磨损与摩擦之间，一般不存在如此明显的关系。

橡胶的磨粒磨损和疲劳磨损一般发生在基体具有粗糙表面的情况，而摩擦磨损则往往发生在具有高摩擦系数的光滑表面的情况。从磨损的严重程度看，磨粒磨损和摩擦磨损最严重，而疲劳磨损较轻。

图 1 - 3 橡胶的摩擦机理与磨损机理的相关性

四、研究磨损问题的基本方法——系统分析法

鉴于工程实际中的磨损问题十分复杂，因此，对任何一种磨损现象或过程的分析都离不开具体的摩擦学系统，因而必须采用系统分析法来研究磨损问题。

早在 70 年代末，Czichos 就曾经对系统分析在摩擦学中应用的原理和方法作了系统的阐述^[6]。但是，本书作者认为，根据系统工程的基本原理，为了更完全和更准确地描述和评价一个摩擦学系统，有必要再引入系统工程和集合理论中的一些概念^[10,11]。

摩擦学系统是为了执行某种功能，而通过某种结构使之形成一个有机整体的一些元素的集合。这些元素可以是零件、部件或子系统，但其中至少应有一对具有相互作用表面的、并做相对运动的摩擦副。

任何一个系统都可以根据其功能的不同，在不同等级上划分成若干个子系统。因此，由 n 个子系统 f_i 组成的一个摩擦学系统 F 可以是一个大系统 L 中的一个子系统，即

$$f_i \in F \in L \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1 - 15)$$

根据系統工程的观点，只有通过结构、功能和目标函数或评价指标这三个基本因素，才能全面地描述一个摩擦学系统。

结构是对系统内部的描述。它是由若干个元素和它们的相关性质以及各元素之间和各元素与系统之间的相互关系所组成的一种集合，即

$$S = C \cup R = \{x \mid x \in C \cup x \in R\} \quad (1 - 16)$$

其中，

$$C = A \times P = \{(a, p) \mid a \in A, p \in P\} \quad (1 - 17)$$

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\} \quad (1 - 18)$$

$$P = \{p_1(a_i), p_2(a_i), \dots, p_m(a_i)\} \quad (1 - 19)$$

$$R = \{r_1(a_1, \dots, a_j), r_2(a_1, \dots, a_j), \dots, r_k(a_1, \dots, a_j), \\ R_1(a_i), R_2(a_i), \dots, R_k(a_i)\} \quad (1 - 20)$$

式中 x 、 a_i 、 p_i 、 r_i 、 R_i ——元素， $i = 1, 2, \dots, n$ ； $2 \leq j \leq n$ 。

集合 A 和 P 之间的关系可以归纳成如图 1 - 4 所示的几种类型。

功能是对系统外部的描述。它描述从输入 X 到输出 Y 的转换，可以表示为

$$\{X\} \xrightarrow{I} \{Y\} \quad (1 - 21)$$

式中， I 是输入—输出转换函数。

至于目标函数或评价指标则是用于评价该系统的效能。

系统分析的程序一般可用以下框图表示（图 1 - 5）。在分析处理实际中的磨损问题时，对磨损过程进行系统分析是十分必要的。

图 1 - 4 元素集合 A 与其相关性质
集合 P 的相关图

图 1 - 5 系统分析框图

参 考 文 献

- [1] 刘大华主编 . 合成橡胶工业手册 . 北京: 化学工业出版社, 1991
- [2] Glaeser W A . Materials for Tribology . Amsterdam: Elsevier, 1992
- [3] Rowe G W . Friction Wear and Lubrication Terms and Definitions . Organization for Economic Cooperation and Development, Birmingham
- [4] ASTM G 40 - 82, Standard Terminology Relating to Erosion and Wear
- [5] Peterson M B and Winer W O 主编, 汪一麟主译 . 磨损控制手册 . 北京: 机械工业出版社, 1994 . 3, 285
- [6] Czichos H . Tribology - A Systems Approach to the Science and Technology of Friction . Lubrication and Wear, Amsterdam: Elsevier, 1978
- [7] Burwell J T . Survey of possible wear mechanism . Wear, 1957/ 1958, (1): 119
- [8] Moore D F . Some observations on the interrelationship of the friction and wear in elastomers . The Wear of Non - metallic Materials, Dowson D, Godet M and Taylor C M (eds), London: Mechanical Engineering Publication Ltd ., 1978 . 141
- [9] Moore D F . Friction and wear in rubber and tyres . Wear, 1980, (61): 273
- [10] 张嗣伟 . 摩擦磨损润滑学的系统工程原理与方法结构 . 润滑与密封, 1980 (6): 7

- [11] Zhang Siwei (张嗣伟) . Application of the systems analysis to improving the wear characteristics of drilling rigs brake pairs . 机械工程学报 (英文版), 1993 (6): 60

第二章 橡胶摩擦

如前所述，磨损机理与摩擦机理之间密切的相关性是橡胶磨损不同于金属磨损的一个重要特征，因此，对橡胶摩擦机理及其规律的了解将有助于深入了解橡胶磨损机理。然而，迄今为止，尽管不少学者对橡胶摩擦进行了广泛的研究，但对橡胶摩擦的全过程以及在点接触和线接触状态下橡胶摩擦的机理与规律的研究还很不充分，为此，本章的第一节主要介绍 80 年代中期本书作者在美国密执安大学摩擦学研究室进行橡胶磨合摩擦研究方面的工作^[1,2]。第二节和第三节的内容，除了部分是 80 年代中期本书作者在国外取得的研究成果之外，其余的部分都是近年来本书作者及其研究组在国内开展研究工作所取得的结果。

第一节 橡胶的磨合摩擦

磨合摩擦是一种非稳态摩擦，它是指物体在开始产生相对运动的一段时间内，其摩擦系数随滑动时间（滑动行程）而不断变化的一种摩擦状态。早在 40 年代初，Roth, Driscoll 和 Holt^[3]就研究了橡胶在玻璃对偶件上滑动的磨合摩擦，并指出研究这种摩擦状态的重要性，但他的观点一直没有受到重视。直到 80 年代初，橡胶磨合摩擦的问题才重新引起了人们的关注。Cooper 和 Ellis^[4]研究了碳黑增强的橡胶在有机玻璃上滑动的磨合摩擦，得到了与 Roth 等人相类似的结论，即磨合摩擦的摩擦系数的数值随滑动距离（滑动时间）的增加而逐渐增长到一个固定的极限值。后来，Ellis^[5]又研究了钢、玻璃和有机玻璃等材料制成的球形压头沿橡胶导轨滑动的磨合摩擦，并提出了相应的摩擦系数的经验方程，但他未能阐明橡胶磨合摩擦的物理过程。然而，对于具有粘弹性的橡胶，深入了解其磨合摩擦的机理对全面认识橡胶摩擦的本质是十分必要的。

一、橡胶磨合摩擦的特性

对硅橡胶与玻璃之间，磨合摩擦的基本特性的研究是在如图 2 - 1 所示的试验装置上完成的，玻璃圆盘相对于一个固定的硅橡胶半球体做旋转运动，为了尽量减小摩擦热的影响，其旋转速度控制在 $6.8 \times 10^{-3} \sim 8.1 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 范围内，作用在橡胶试样上的正压力为 1.18 ~ 4.9N。试验环境温度为 25 ~ 29 。

图 2 - 1 摩擦试验机原理图

1—玻璃圆盘；2—主轴；3—橡胶试样；4—试样架；
5—横梁；6—砝码

为了研究橡胶的粘弹性对其磨合摩擦的影响，采用了以下三种不同的试验方式，其主要区别在于橡胶试样与玻璃圆盘在产生相对运动之前，相互静止接触的时间不同。

1. 静止加载

当橡胶试样以预先调好的正压力压在玻璃圆盘下表面上之后，玻璃圆盘立即启动，此时，其静止接触的时间一般不超过 3s。

2. 运动加载

玻璃圆盘先启动并达到预定的稳定旋转速度之后，橡胶试样才以预先调好的正压力压在玻璃圆盘下表面上，此时，其静止接触的时间为零。

3. 持续加载

橡胶试样预先以调好的正压力压在玻璃圆盘下表面上，并保持一定时间（包括 1min, 1h 和 15h 三种情况）以后，玻璃圆盘才开始启动，显然，这种试验方式的静止接触的时间较长。

上述三种不同的试验方式反映了橡胶摩擦的三种初始接触状态。

试验结果表明，硅橡胶与玻璃之

图 2 - 2 在不同的滑动速度 v 和正压力 p 的条件下摩擦系数和磨合时间的关系

A: $v = 1.8 \times 10^{-2} \text{m/s}$, $p = 1.18 \text{N}$; B: $v = 1.8 \times 10^{-2} \text{m/s}$, $p = 2.49 \text{N}$; C: $v = 1.8 \times 10^{-2} \text{m/s}$, $p = 3.63 \text{N}$; D: $v = 9.4 \times 10^{-3} \text{m/s}$, $p = 1.18 \text{N}$; E: $v = 9.4 \times 10^{-3} \text{m/s}$, $p = 2.49 \text{N}$

间产生的磨合摩擦的基本特性是在开始产生相对运动的一段时间内，其摩擦系数随滑动时间（磨合时间） t 或滑动行程的增加而增大，最后达到一个稳定的最大值（图 2 - 2 和图 2 - 3），此最大值即为稳态摩擦系数。

上述结果与 Ellis^[5] 所得到的结果相一致，尽管他所用的试验装置、试样材料、试验程序和试验规范都不相同。橡胶磨合摩擦的这种基本特性不随试验参数 p 、 v 等的变化而改变，而且和稳态摩擦一样，在正压力较小时，其摩擦系数随正压力的增大而减小（图 2 - 2），随滑动速度的增加而增加（图 2 - 3）。

当 $v = 1.8 \times 10^{-2} \text{m/s}$ 时，由图 2 - 2，可得到一个相当满意的非稳态摩擦系数的近似式：

$$f(t) = a \cdot \exp(bt)$$

(2 - 1)

图 2 - 3 在不同滑动速度的条件下摩擦系数和磨合时间的关系 ($p = 1.18 \text{N}$)

A: $v = 8.1 \times 10^{-2} \text{m/s}$; B: $v = 6.2 \times 10^{-2} \text{m/s}$;
C: $v = 4.4 \times 10^{-2} \text{m/s}$