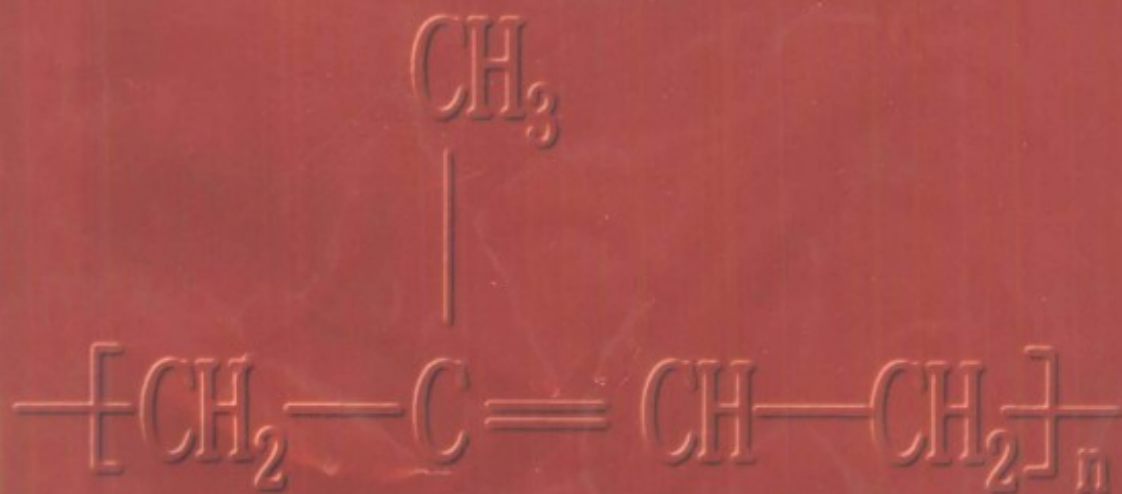


橡胶磨损原理

张嗣伟 著

石油工业出版社



3333



数据加载失败，请稍后重试！

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

I. 橡…
II. 张…
III. 橡胶-磨损
IV. 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 $\frac{1}{2}$ 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

CAK50/11

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

橡胶是国民经济和日常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》，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Г.И.Бродский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限制的。

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。

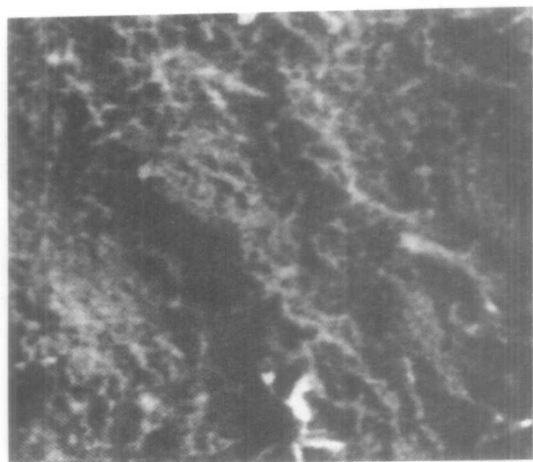
博士生杨兆春在作者指导下编写了第六、七章两章以及第二章第二、三节的初稿，并完成了全书的打字工作，博士生柳琼俊完成了部分章节插图的收集与整理以及数学公式与化学结构式的打字等工作，对此，作者深表谢意。

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。

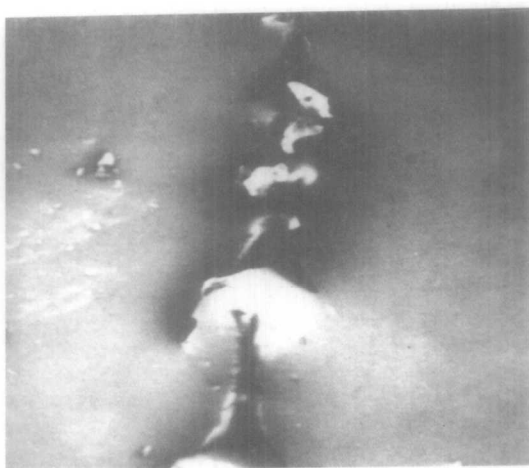
本书在石油工业出版社领导和编辑们的热情鼓励和真诚支持下才得以问世，特此致谢。

张嗣伟

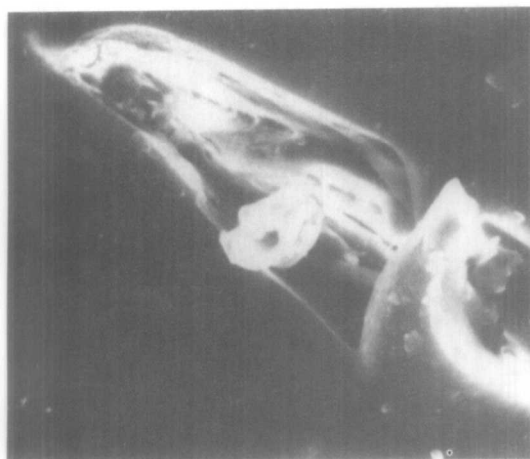
1996年10月



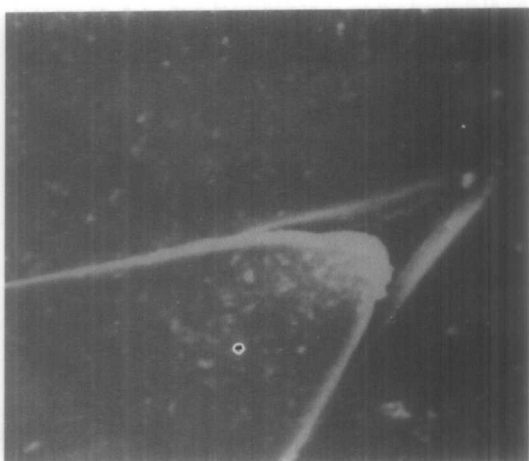
照片1 填充天然橡胶的磨损花纹
($\bar{F}=470\text{N/m}$, $i=500\text{r}$)



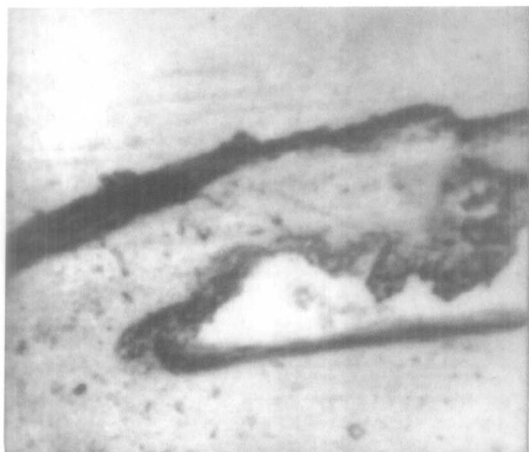
照片2 丁腈橡胶表面撕裂的状态
(干摩擦, 锥顶角 10°)



照片3 天然橡胶表面撕裂的状态
(干摩擦, 锥顶角 60°)



照片4 丁苯橡胶表面撕裂的状态
(干摩擦, 锥顶角 45°)

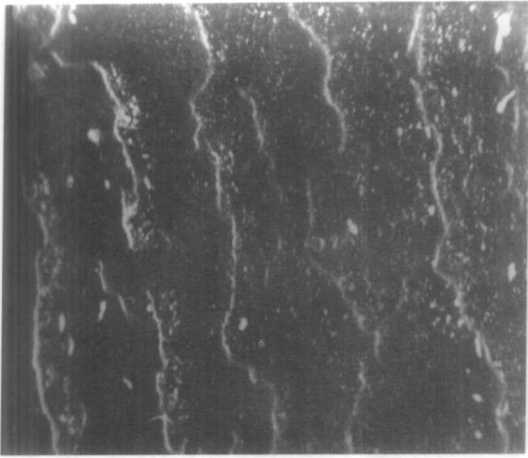


(a)



(b)

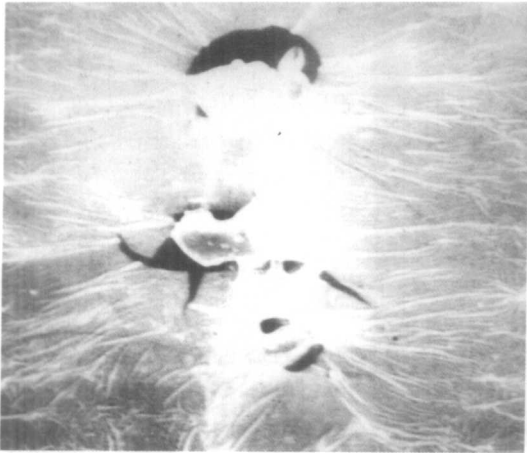
照片6 填充丁腈橡胶形成磨损花纹的过程 (横断面, $W=1.5\text{kJ/m}^2$)
(a)舌状物形成; (b)舌状物断裂



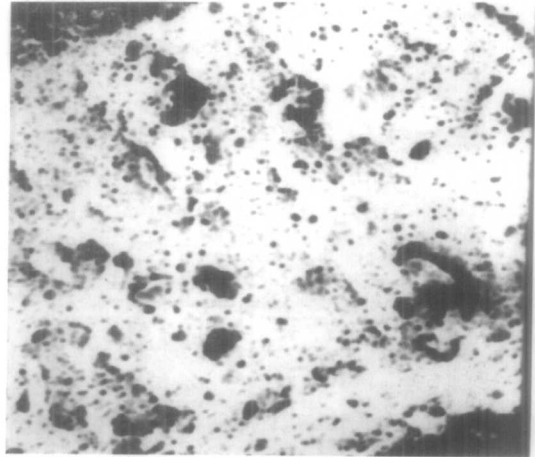
照片5 填充丁腈橡胶的磨损表面
($W=0.3\text{kJ}/\text{m}^2$)



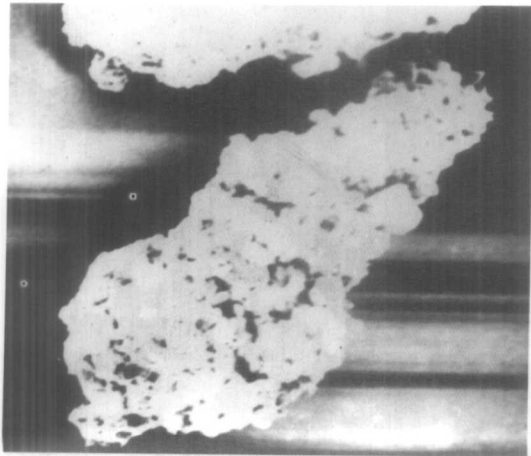
照片7 天然橡胶的油性磨粒磨损花纹
($F=0.41\text{kN}/\text{m}$)



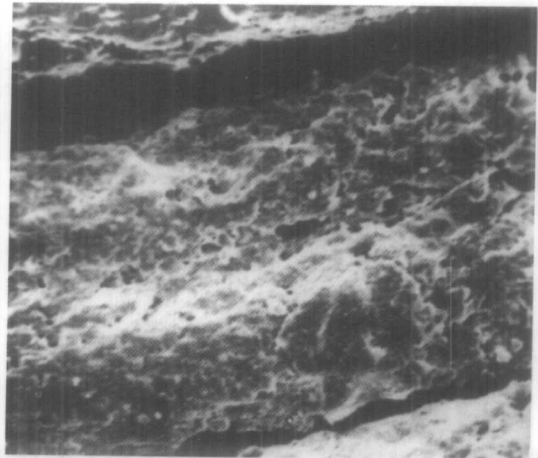
照片8 丁腈橡胶表面撕裂的状态
(润滑, 锥顶角 10°)



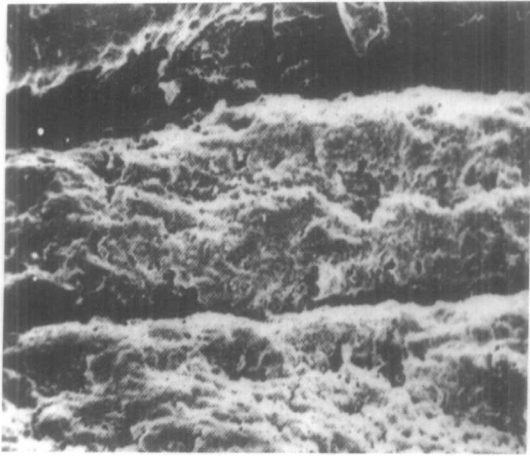
照片9 丁腈橡胶磨损表面的形貌



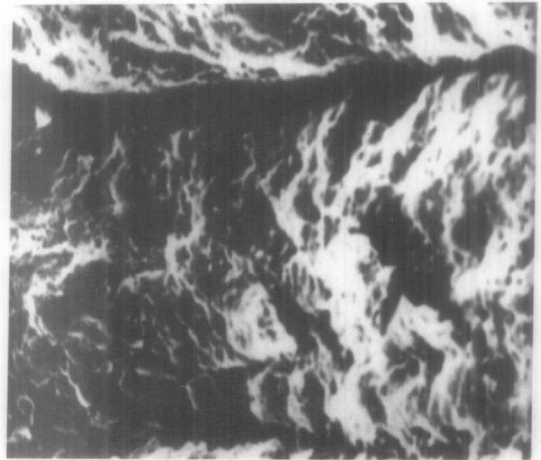
照片10 磨屑的形状



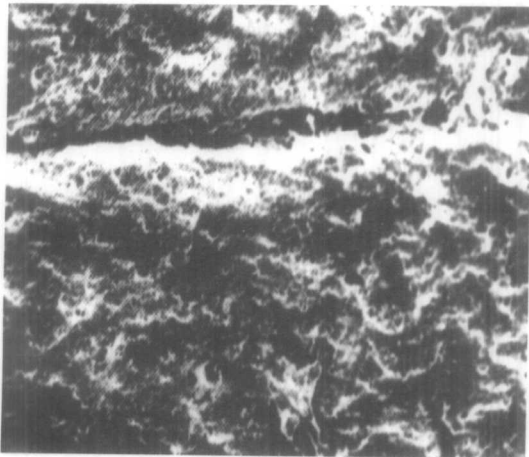
照片11 磨损花纹(按第一组试验参数, 含砂量为2.81%(质量分数), 法向载荷120N)



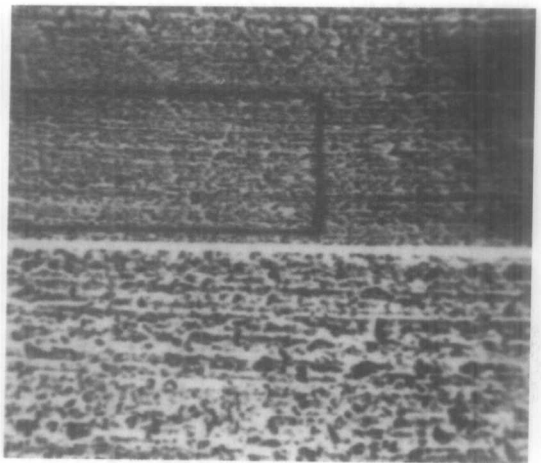
照片12 磨损花纹(按第一组试验参数,含砂量为5.11%(质量分数),法向载荷120N)



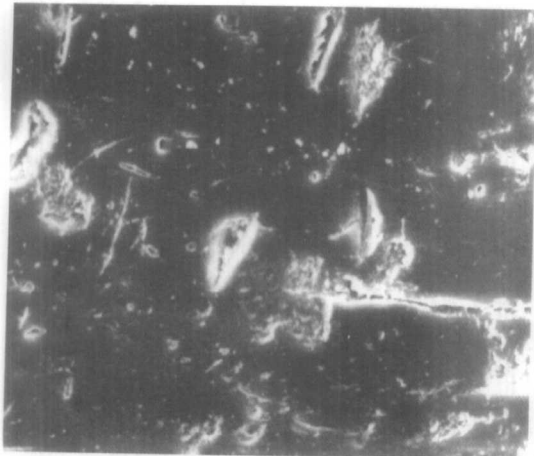
照片13 磨损花纹(按第一组试验参数,含砂量为5.11%(质量分数),法向载荷180N)



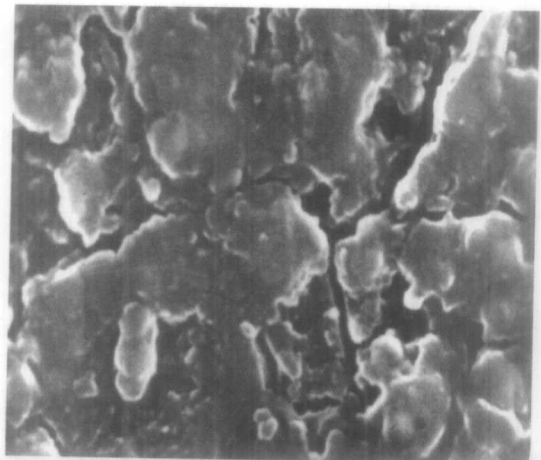
照片14 固定磨粒作用下两体湿磨粒磨损的磨损花纹(按第一组试验参数,法向载荷120N)



照片15 丁腈橡胶的磨损花纹(比压0.177MPa,速度0.670m/s,磨粒平均尺寸63 μ m)

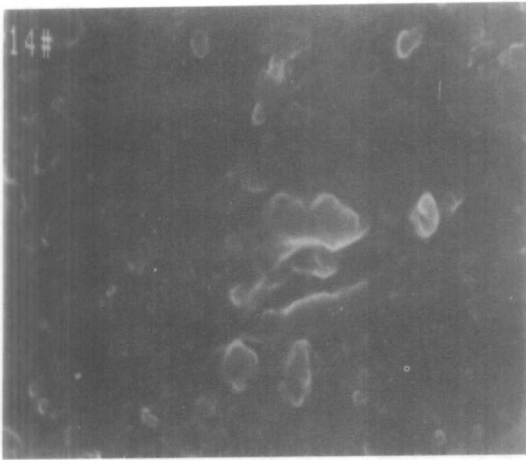


(a)

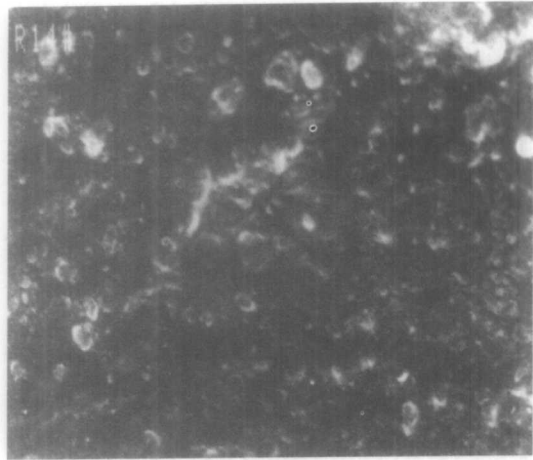


(b)

照片16 聚氨酯在含石英砂的清水介质中磨损后的表面形貌
(a)凹坑和擦伤;(b)裂纹和脱层

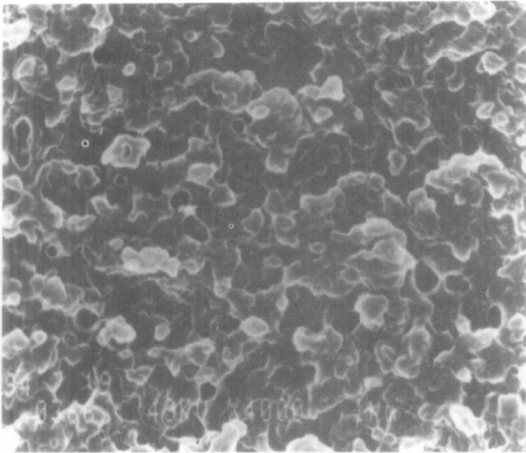


(a)

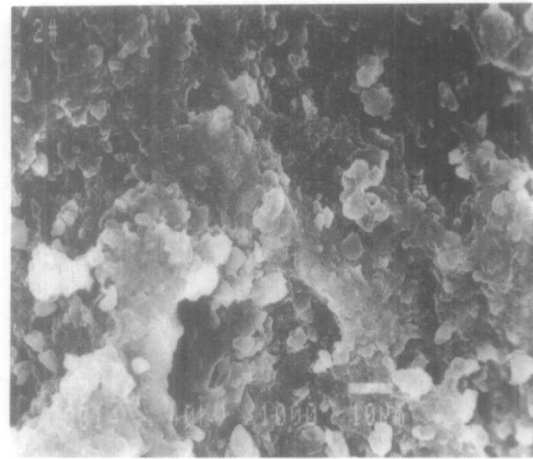


(b)

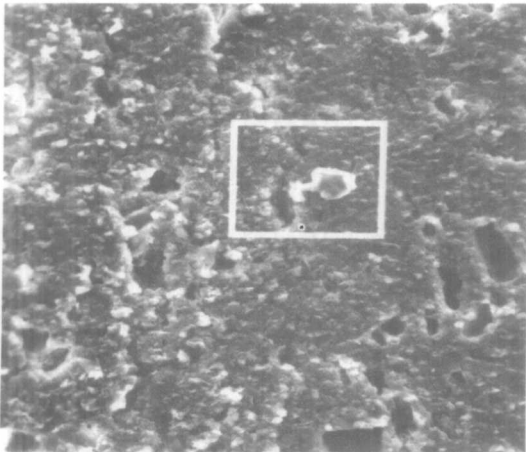
照片 17 聚氨酯在含石英砂的 PAM 溶液介质中磨损后的表面形貌
(a)冲击凹坑;(b)裂纹和脱落



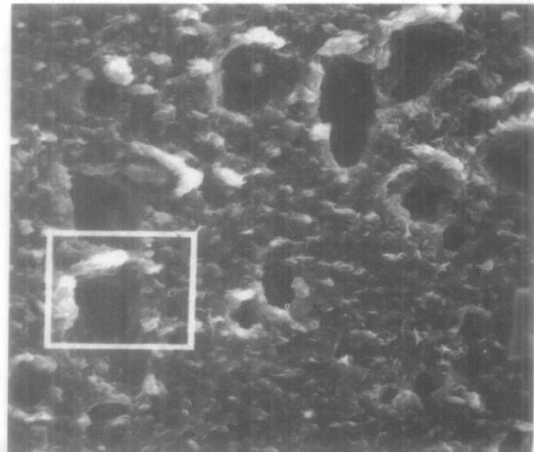
照片 18 聚氨酯在含石英砂的 NaOH 溶液介质中
磨损后的表面形貌



照片 20 天然橡胶在含石英砂的清水介质中
磨损后的表面形貌

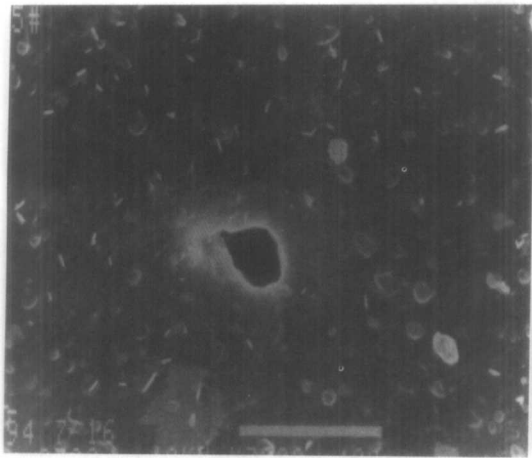


(a)

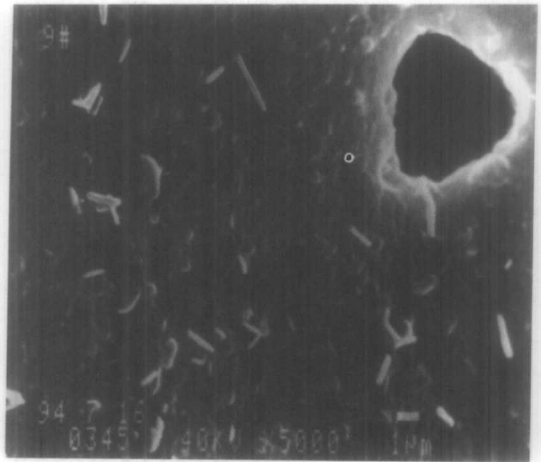


(b)

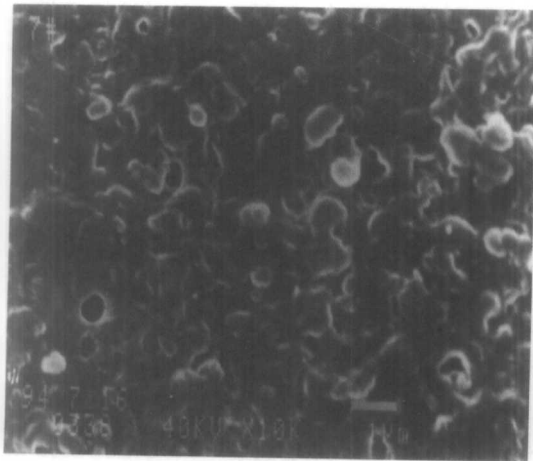
照片 19 丁苯橡胶在含石英砂的清水介质中磨粒侵蚀后的表面形貌
(a)胶粘层;(b)凹坑和隆起



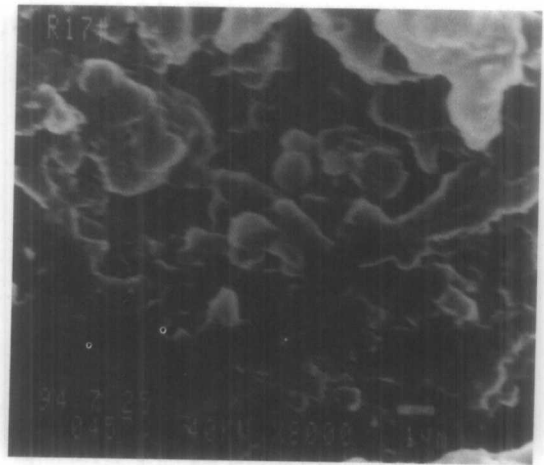
照片 21 天然橡胶在含石英砂的PAM溶液
介质中磨损后的表面形貌



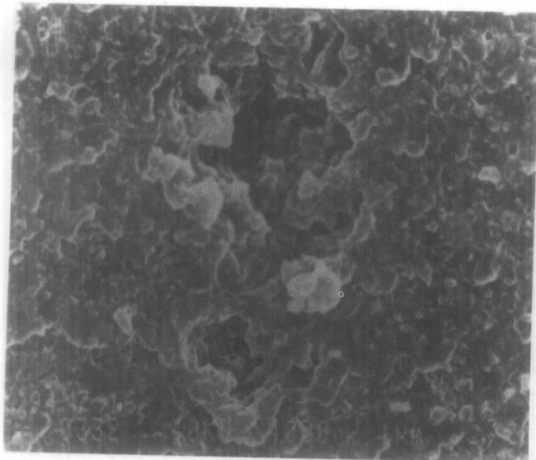
照片 22 天然橡胶在含石英砂的NaOH溶液
介质中磨损后的表面形貌



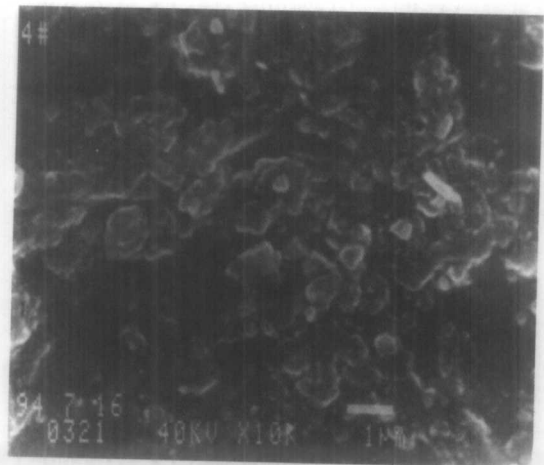
照片 23 丁腈橡胶在含石英砂的清水介质中
磨损表面的形貌



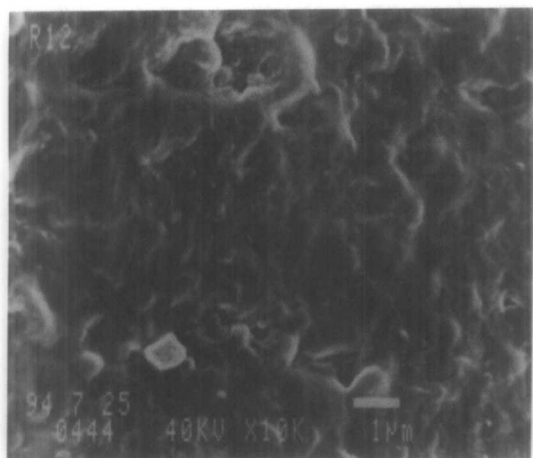
照片 24 丁腈橡胶在含石英砂的PAM溶液
介质中磨损表面的形貌



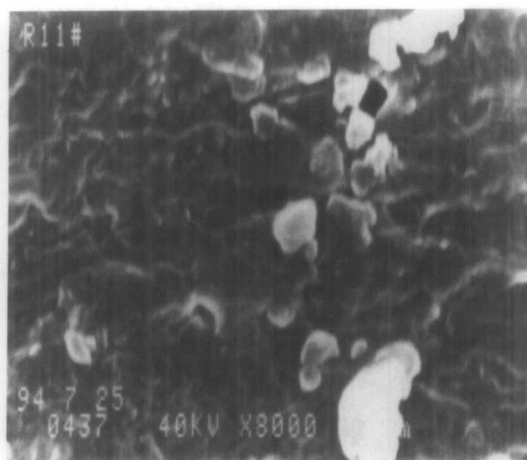
照片 25 丁腈橡胶在含石英砂的NaOH溶液
介质中磨损表面的形貌



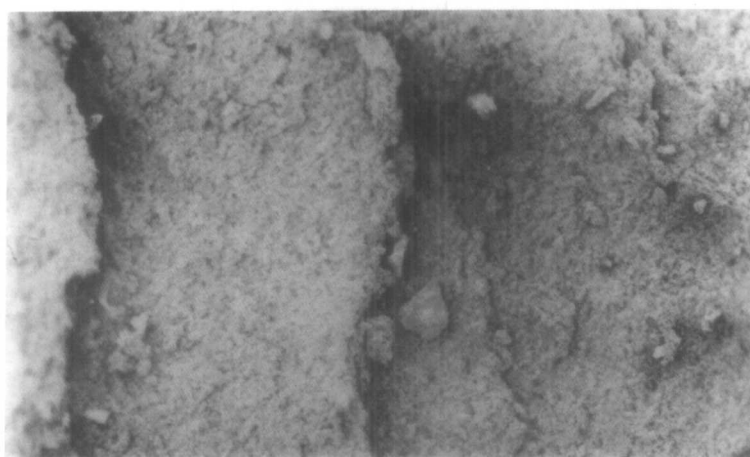
照片 26 氟橡胶在含石英砂的清水
介质中磨损表面的形貌



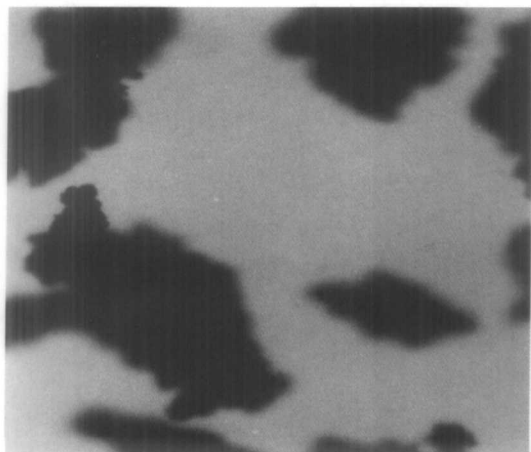
照片 27 氟橡胶在含石英砂的PAM溶液介质中磨损表面的形貌



照片 28 氟橡胶在含石英砂的NaOH溶液介质中磨损表面的形貌



照片 29 橡胶磨损表面上的两级花纹



(a)



(b)

照片 30 橡胶材料的典型磨屑图
(a)SBR($N=12N, T_r=450r$); (b)NBR($N=8N, T_r=1350r$)

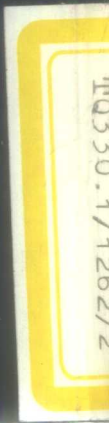
责任编辑 何 莉 封面设计 张畅平

ISBN 7-5021-2152-8/TE·1804 定价: 23.00 元

ISBN 7-5021-2152-8



9 787502 121525 >



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）。

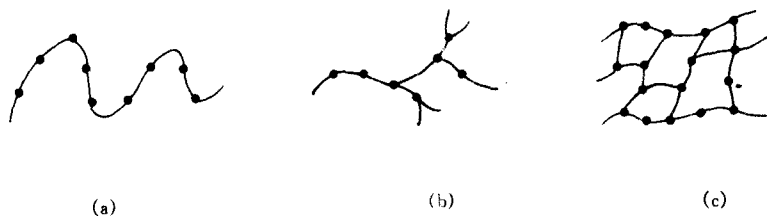


图 1-1 高分子结构的基本型式

(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]。