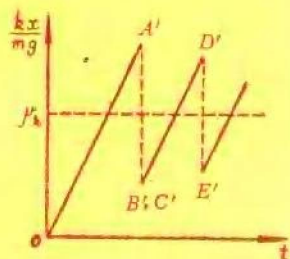


高等教育用书

摩擦学导论

陆大雄 编著



北京出版社

高等 教育 用 书

摩 擦 学 导 论

北 京 市 成 人 教 育 学 院

陆 大 雄 编 著

北 京 出 版 社

高等 教育 用 书
摩 擦 学 导 论

北京市成人教育学院

陆大雄 编著

*

北 京 出 版 社 出 版

(北京北三环中路6号)

新华书店北京发行所发行

北京北苑印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 13.625印张 287,000字

1990年8月第1版 1990年8月第1次印刷

印数, 1—3,000

ISBN 7-200-00736-6/G·197

定 价: 4.95元

前 言

摩擦学(Tribology), 作为独立学科的专用名称, 于1966年才问世。它以摩擦、磨损、润滑为研究对象, 以材料力学、弹性力学、塑性力学、断裂力学、流体力学、流变学、金属物理、高分子物理、表面物理、热力学、物理化学、高分子化学、表面化学、系统科学为理论基础, 是一门年轻的综合性技术科学。

摩擦是相互接触的物体表面在有相对运动趋势或作相对运动时产生切向力的现象, 磨损是动摩擦使固体表层物质损失和表面形貌改变的过程, 润滑是隔离一对相互作用和相对运动的固体之间的接触藉以减小摩擦和避免磨损的措施。

摩擦的作用既可以制动、也可以传动, 磨损的作用既会损坏零件、又能磨削工件, 针对不同情况有控制摩擦和磨损的需要; 并且在经济上, 由于摩擦与磨损依次是机械能与原材料的耗散的主要原因, 为了达到节约能源和资源、延长零件的使用寿命、减少停机检修、提高机械运行的可靠性、降低生产成本等目的, 尤其有减少摩擦和磨损的需要。现代可以利用多种物理方法, 有了分别测定固体的表面形貌与表层结构、固体之间实际接触面积、液膜的厚度与动压分布、固体表层的温度分布等动态特性的可能。基于上述的需要与

可能，近二十多年来，摩擦学发展很快。

零件的设计和设备的管理都应该考虑摩擦、磨损、润滑，而这方面的知识对于工科高校毕业的技术人员来说，仅零散地在普通物理、理论力学、机械零件等教材中，作为一节或一章学习过，缺乏比较全面的深入的认识，尤其不了解有关的近代理化知识，有必要予以补充和更新。理化专业人员要尽可能为发展社会生产力作贡献，可是不掌握材料力学、流变学等工程技术方面的基本知识，难以参与摩擦学的研究和应用，需要改变自己的知识结构。针对上述情况，为了使读者初步理解摩擦学书刊涉及的各种专业术语，本书第一章提供理工两类专业人员各取所需关于固体性质的准备知识，与已出版的摩擦学教材相比，这是一种新的尝试，难免在广度和深度上顾此失彼。

由于摩擦学牵涉的问题颇为复杂，有些论述仍处于百家争鸣的探索阶段，尚未取得一致的见解，因此本书只介绍摩擦学的主要内容，作为读者进一步研讨的基础。由于真理既有绝对性、又有相对性，本书特别强调建立理想模型、分析基本规律、推导估算公式等方面的简化假设，以便读者联系实际时能够正确地掌握它们的适用条件。同时，本书注意了近代科学方法的运用，例如用量纲推导物理关系和设计模拟实验、用数学变换实现热与电之间的类比和时间与温度之间的等效替代、用框图描绘摩擦自振中的信息反馈、用树图分析零件失效的原因、用系统方法总结摩擦学的基本内容。此外，每章还配有复习题。本书可作为大学本科高年级或继续工程教育的教材或参考书。

在本书的编写、制图、出版等方面，对于我国摩擦学老

一辈专家邵荷生教授的热情指导、赵城璧和阎恒久以及张宝光三位同志的大力支持、刘斌同志的认真绘图，谨在此表示由衷的感谢！

最后应该说明的是，国内已出版的摩擦学教材都由机械专业教师编著，而本书作者一直从事物理专业的教学与科研，所以独自编写这样一本涉及理工方面多种专业的教材，深知自己在理论基础和实践经验上之不足，而且编写又十分仓促，书中必然存在不少缺点和错误，热诚欢迎读者批评指正。

北京市成人教育学院

陆大雄

1988年10月

目 录

第一章 固体的性质	(1)
§ 1-1 固体的受力变形	(2)
一 应力与应变	(2)
二 弹性与塑性	(7)
三 压缩与剪切	(9)
四 弹塑性模型	(13)
五 粘性与内耗	(16)
§ 1-2 固体的受力破坏	(18)
一 应力分析与应变分析	(18)
二 体变比能与形变比能	(26)
三 破坏类型与强度理论	(28)
四 裂纹扩展与断裂韧度	(32)
五 疲劳破坏与耐劳极限	(35)
§ 1-3 固体的微观结构	(42)
一 固体材料	(42)
二 结合力与聚集态	(46)
三 晶体的结构	(49)
四 晶格的缺陷	(60)
五 晶格缺陷与晶体性能	(69)
六 玻璃态与高弹态	(73)
七 能弹性与熵弹性	(84)

§ 1-4 固体的表层性能	(92)
一 内聚功与粘着功	(93)
二 吸附膜	(100)
三 反应膜	(105)
四 表层结构	(107)
§ 1-5 固体的表面形貌	(109)
一 二维轮廓线	(109)
二 轮廓参量	(112)
三 高度分布函数	(115)
复习题	(118)
第二章 固体的接触	(121)
§ 2-1 接触力学	(121)
一 线载荷下的应力分布	(122)
二 赫兹接触	(125)
三 屈服压力	(130)
四 压痕硬度	(132)
五 塑性指数	(134)
§ 2-2 界面粘着	(135)
一 粘着实验	(136)
二 粘着机理	(138)
三 影响粘着的因素	(139)
四 粘着面积与切向力	(141)
五 预位移与剪切预应力	(144)
§ 2-3 接触面积	(145)
一 表观值与真实值	(145)
二 真实值的估算	(147)

三	真实值的测定	(151)
§ 2-4	界面升温	(154)
一	热-电类比	(155)
二	静热源	(158)
三	动热源	(160)
四	界面温升的测定	(162)
§ 2-5	量纲分析	(166)
一	物理量的单位	(167)
二	物理量的量纲	(168)
三	物理关系的推导	(170)
四	无量纲方程的确定	(173)
五	模拟实验的设计	(176)
复习题	(178)
第三章	摩擦	(181)
§ 3-1	流体的内摩擦	(182)
一	层流与湍流	(182)
二	粘性流体	(183)
三	塑性流体	(186)
§ 3-2	固体的内摩擦	(187)
一	机理	(188)
二	模型与规律	(189)
三	粘滞回线	(191)
四	时-温等效变换	(193)
五	检测方法	(196)
§ 3-3	固体的外摩擦	(198)
一	古典摩擦定律	(198)

二	机理	(200)
三	边界摩擦	(208)
四	滚动摩擦	(210)
五	摩擦的热效应	(215)
六	影响摩擦的因素	(219)
§ 3-4	摩擦与振动	(224)
一	力学系统的振动	(224)
二	振动对摩擦的影响	(226)
三	切向自激振动	(227)
四	摩擦系数的测定	(236)
§ 3-5	非金属固体的摩擦	(239)
一	层状结构的固体	(239)
二	脆性固体	(242)
三	粘弹性固体	(245)
§ 3-6	摩擦副的选材	(248)
一	概述	(249)
二	工作状态	(250)
三	失效形式	(251)
四	低摩材料	(252)
五	高摩材料	(253)
	复习题	(255)
第四章	磨损	(258)
§ 4-1	概述	(258)
一	磨损的类型	(259)
二	磨损的计量	(260)
三	磨损与摩擦	(262)

四	磨损的过程	(263)
五	磨损的分析	(265)
§ 4-2	疲劳磨损	(267)
一	分类	(267)
二	机理	(268)
三	经验公式	(271)
四	影响因素	(273)
§ 4-3	磨料磨损	(275)
一	分类	(275)
二	机理	(276)
三	估算公式	(276)
四	影响因素	(278)
§ 4-4	粘着磨损	(283)
一	分类	(283)
二	机理	(284)
三	估算公式	(286)
四	影响因素	(287)
§ 4-5	腐蚀磨损	(289)
一	化学腐蚀磨损	(289)
二	电化学腐蚀磨损	(293)
§ 4-6	磨损的复合与派生	(296)
一	微动磨损	(296)
二	气蚀磨损	(300)
三	冲蚀磨损	(304)
§ 4-7	失效分析与检测技术	(306)
一	树图分析	(307)

二	实物检验	(309)
三	监测技术	(311)
§ 4-8	耐磨措施	(313)
一	材料的选择	(313)
二	表层的处理	(314)
三	结构的设计	(318)
四	保养的要求	(319)
复习题	(320)
第五章	润滑	(323)
§ 5-1	流体力学基础	(323)
一	流动的分类	(323)
二	流动的描述	(326)
三	基本的规律	(327)
§ 5-2	流体动压润滑	(331)
一	雷诺方程	(332)
二	挤压效应	(337)
三	楔入效应	(339)
四	疏密效应	(351)
五	伸缩效应	(357)
六	流变动压润滑	(359)
§ 5-3	弹性流体动压润滑	(364)
一	基本方程组	(365)
二	膜厚公式	(370)
三	影响因素	(377)
四	监测方法	(380)
五	粘弹性液体动压润滑	(383)

§ 5-4 润滑的动态分析	(385)
一 润滑的转化	(385)
二 润滑的失效	(389)
三 润滑的失稳	(392)
§ 5-5 液态润滑剂	(396)
一 润滑油	(396)
二 润滑脂	(398)
三 添加剂	(400)
§ 5-6 固态润滑剂	(403)
一 特性	(403)
二 品种	(404)
三 选用	(407)
四 自润滑复合材料	(408)
复习题	(409)
代总结—摩擦学的系统分析	(412)
§ 1 系统科学的基础知识	(412)
一 现实世界的三要素	(412)
二 系统的描述	(413)
三 系统的共性	(414)
四 系统的控制	(415)
§ 2 摩擦学系统的分析	(416)
一 结构参量	(416)
二 功能参量	(417)
三 反馈作用	(417)
〈中文参考书目〉	(418)

第一章 固体的性质

摩擦学是一门综合性技术科学，需要理科与工科两方面的专业人员彼此沟通和共同协作，以便加快摩擦学在理论研究与实际应用上的发展。

可是，理科专业人员往往不了解工科的材料力学、弹性力学、塑性力学、断裂力学、金属材料、非金属材料、复合材料、机械零件、机械制造工艺等方面的基本知识，而工科专业人员往往不熟悉理科的热力学、统计物理、金属物理、高分子物理、表面物理、物理化学、高分子化学、表面化学等方面的基本知识；并且，摩擦学的专著在用到上述各学科的基本概念和基本规律时，一般不作说明，令人费解，以致知其然而不知其所以然。上述种种因素不同程度地妨碍了理工专业人员之间实现横向联合、彼此取长补短、发挥各自优势。

为此，在第一章里，结合固体的受力变形、受力破坏、微观结构、表层性质、表面形貌这五个方面，尽可能扼要地系统地介绍摩擦学专著经常涉及的上述各学科中的一些基本概念和基本规律，供理科与工科两方面专业人员各取所缺，作为进一步分析固体的接触、摩擦、磨损、润滑这四个方面的理论基础。显然，在有限的篇幅内介绍上述众多的基本概

念和基本规律难免过于简略，只能起着引导入门的作用。

§ 1-1 固体的受力变形

发生摩擦的两个固体界面上，同时存在法向和切向这两种相互作用力，为了研究摩擦的宏观规律和微观机理，必须熟悉固体受力变形的基本知识。本节先扼要说明固体在拉压或剪切下显示的弹性、塑性以及粘性，再简略介绍金属、陶瓷、高聚物、复合材料这四种工程材料的力学性能。

一 应力与应变

1) **载荷**：作用于物体的外力，在工程上称为载荷。载荷分为两种，作用点、方向、大小都不随时间改变的称为静载，作用点、方向、大小中至少有一个随时间改变的称为动载。应该指出，实际的物体，即使在失重的情况下，仍然或大或小地存在着内力，因而形成不同的聚集态。

2) **应力**：由外力 \vec{F} 、温度分布不均匀等因素引起，物体内部某个微小截面上每单位面积附加的内力，称为应力 \vec{P} 。应力是矢量，相对于截面作正交分解，沿截面法向的分量称为正应力 σ (拉应力为正、压应力为负)，沿截面切向的分量称为剪应力 τ ，见图1-1-1。

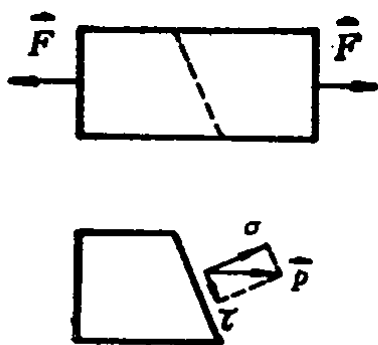


图 1-1-1

3) **应变**：由外力、温度分布不均匀等因素引起，物体局部的相对变形，称为应变。

是没有量纲的数。

① 应变按几何性质分为三种。物体内部某个方向上微小线段的长度的改变量 $\Delta l = l - l_0$ 与原有量 l_0 之比 $\frac{\Delta l}{l_0}$ ，称为线应变 ϵ ($\epsilon > 0$ 的称为伸应变、 $\epsilon < 0$ 的称为缩应变)；物体内部某两条相互垂直的微小的有向线段所夹角度以弧度为单位的改变量，称为切应变 γ (直角减小为正)；物体内部某个微小体积的改变量 $\Delta v = v - v_0$ 与原有量 v_0 之比 $\frac{\Delta v}{v_0}$ ，称为体应变 θ 。

② 应变按变形性质分为两种。应变中，在引起变形的上述因素撤去后，能够自动消除的可逆部分称为弹性应变 ϵ_e 或 γ_e ，不能自动消除的不可逆部分称为塑性应变 ϵ_p 或 γ_p 。

4) 应力与应变的关系：它不仅与材料的化学成分和微观结构有关，而且受温度的高低、应变速度 $\left(\frac{d\epsilon}{dt} \text{ 或 } \frac{d\gamma}{dt}\right)$ 或应力速度 $\left(\frac{d\sigma}{dt} \text{ 或 } \frac{d\tau}{dt}\right)$ 的大小、加载时间的长短等条件的影响。

以常温、静载下单向拉伸试验为例。先将材料制成标准试件如图 1-1-2，其中横截面用阴影区表示。横截面处处相等的直杆称为等直杆，其中两端标有横线的部分称为工作段，它的长度称为标距 L_0 。一般规定，圆形截面的直径 d_0 等于 $\frac{L_0}{10}$ 或 $\frac{L_0}{5}$ ，矩形截面的面积 A_0 等于 $\left(\frac{L_0}{11.3}\right)^2$ 或 $\left(\frac{L_0}{5.65}\right)^2$ 。试件两端的粗大部分与材料试验机的夹具相连接。图 1-1-2 中的点划线是所有横截面的形心的连线，称为轴线。若有一对等值反向的拉力，沿轴线作用于试件的两端，将工作段中的

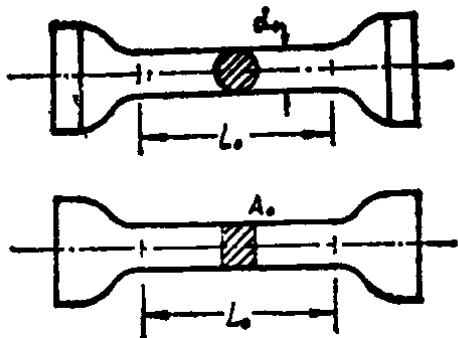


图 1-1-2

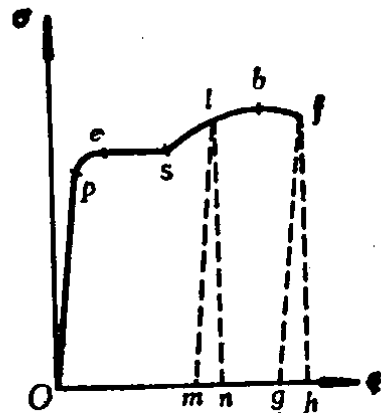


图 1-1-3

轴向内力 F_n 与原有横截面积 A_0 之比 $\frac{F_n}{A_0}$ 称为名义正应力 σ 、工

作段的伸长量 $\Delta L = L - L_0$ 与原有长度 L_0 之比 $\frac{\Delta L}{L_0}$ 称为名义线

应变 ϵ ；在应变速率 $\frac{d\epsilon}{dt}$ 很小的条件下，测得典型的 σ — ϵ 曲线如图1-1-3，以下分段予以说明。

① oe 是弹性阶段，产生弹性应变，这个阶段中 σ 的最大值称为弹性极限 σ_{e0} 。

op 是 oe 的直线部分，称为线弹性变形。这部分的斜率 $\frac{\sigma}{\epsilon}$ 是恒量，称为弹性模量 E ，即有

$$\frac{\sigma}{\epsilon} = E,$$

这是胡克(Hooke)定律的关系式；这部分中 σ 的最大值称为比例极限 σ_p ，由它决定上述定律的适用范围。

又试件在横向同时发生线应变 ϵ' （对于圆形截面的试