



高新技术丛书

# 塑料摩擦学

塑料的摩擦、磨损、润滑理论与实践

王承鹤 著

机械工业出版社

1111  
1010

77703

# 塑料摩擦学——

塑料的摩擦、磨损、润滑理论与实践

王承鹤 著



机械工业出版社

(京) 新登字054号

0104 B1  
内 容 简 介

人类已经进入高分子材料的时代, 工程塑料在民用和军工各部门的摩擦系统中的应用越来越广泛, 但至今专门研究塑料摩擦和应用的著作极少。本书是一本系统研究塑料的摩擦、磨损和润滑理论及其应用的专著。全书共分二篇: 总论部分, 介绍人类研究摩擦的历史和建立塑料摩擦学的必要性; 第一篇塑料基础, 简要介绍各种工程塑料和高分子复合材料的结构和性能; 第二篇塑料摩擦学, 是本书的重点, 详细介绍各种塑料的摩擦、磨损和润滑理论及其在工程中的应用。

本书可供从事塑料研究和应用工作的工程技术人员、科研工作者以及大专院校有关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

塑料摩擦学: 塑料的摩擦、磨损、润滑理论与实践/  
王承鹤著·—北京: 机械工业出版社, 1994  
ISBN 7-111-04127-5

- I. 塑…
- II. 王…
- III. ①塑料-摩擦学②摩擦学-塑料
- IV. TH117

出版人: 马九荣 (北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)

责任编辑: 夏曼苹 盛君豪 版式设计: 冉晓华

责任校对: 肖新民 封面设计: 方芬

责任印制: 路琳

北京市房山区印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1994年10月第1版·1994年10月第1次印刷

850mm×1168mm<sup>1</sup>/<sub>32</sub>·10.875 印张·280千字

0 001—1 900册

定价: 20.00元

## 前 言

1987年3月，在中国塑料工程学会氟塑料工程委员会召开的学术会议上，笔者发表了“塑料摩擦学简论”一文，建议建立“塑料摩擦学”这一新学科。

这本小书最初于1988年元月油印，作为研究生、大学生“摩擦学”与“塑料摩擦学”课程的教材与参考书，曾用来在一些学术集会上讲学，还在工程技术人员的讲习班上用过。这次出版，改动较大，增加了许多内容，主要补充了著者在理论上的探索、实验结果及应用经验。

这是一门边缘与交叉学科，读者可能相当广泛。机械、塑料、化工领域以及国防、军工方面的科学与技术工作者、摩擦学者及大专院校师生都会对它发生兴趣。我的目的在于描述“塑料摩擦学”的轮廓。在“总论”中叙述由于人类进入了高分子材料的新时代，塑料正在取代金属，论证了建立“塑料摩擦学”的必要性。现在从事机械设计与制造以及塑料生产的工程技术人员与科学工作者，包括许多刚刚从大学出来的年轻朋友，大多没有机会系统地研究过“摩擦学”，而“塑料摩擦学”的体系是以“金属摩擦学”为参考的，但限于篇幅，有关金属摩擦学的内容就不予介绍了。读者中大多数是从事机械设计与制造的人，对工程塑料陌生；而在“塑料摩擦学”中，无论讨论什么问题都要涉及塑料的“聚合—结构—运动—性能”，因此，对塑料的宏观与微观方面作一个起码的介绍是必要的。这就是第一部分“塑料基础”。第二部分才是“塑料摩擦学”。二个部分相互独立却又有机的联系成为一个体系。我深信，各方面的读者不但可以从书中找到自己感兴趣的篇章，而且还会看到其它部分的价值。因为，这是一片辽阔深邃而又神奇的疆土，勘探与开发还处于初始时期。

我感到遗憾的是，这本书的初稿是1987年作为研究生“塑料摩擦学”课程的讲义写出来的，当时没有把介绍、引用的论点、资料来源一一注明，现在却无法重新来做了，只好在此对原作者们表示歉意！好在我阅读的主要参考文献已经列出来了。再者，当今已有许许多多计算公式，那是令人十分振奋的。但是，在我看来，一些计算公式，特别是那些繁难复杂的公式，大多还没有实用价值，只好暂时割爱。因为篇幅与印刷条件的限制，我们的不少实验数据与图片都没有收入，是很可惜的。我接触的资料有限，可能有些非常重要与精彩的论述和有用的资料没有看到。读者还会在书中发现一些相互矛盾的论述与数据，这是因为学者们都是立足于自己的实验来解释现象，而塑料摩擦十分复杂，实验条件又不一律，特别是有些学者忽略了蠕变对实验结果的影响，以致结果纷繁、论点各异。在这里我要做的工作并不单纯是证明与传播我自己的论点。所以，我不想根据自己的判断对学者们的论述取舍而使读者失去自己比较各种高论的乐趣。

一门新学科的出现是科学技术发展的结果。我们倡议的这一学科，只有在国际学术界、教育界与产业界充分认识到它的必要性，以及这一新学科具有更为广博精深的理论基础与应用基础之后，才能最终确立自己在科学领域的地位。从国际研究动向来看，已经有一些学者意识到对这一学科的需要并且加紧在这方面的研究。但要成为一门成熟的学科，需要国际上一、二代学者、专家共同努力，用几十年时间才有可能。1966年在英国创立（金属的）摩擦学时，已经有人类数千年经验与近代许多代学者辛勤工作的成果作基础，知识广博而雄厚。四分之一世纪过去了，至今尚且难说已经有一部公认的完美与经典之作。而塑料在摩擦系统中的应用历史非常短，大约只有五六十年；理论研究的历史更短，相对来说，资料很少；我们的经验与研究也非常有限。个人的力量在这么辽阔、深奥而神奇的天地里实在太渺小了。因此，现在奉献给读者的这本书，只能说是对这一领域提出一个供国内外工程界、学术界与产业界使用、讨论与研究的基础，要做

的工作还非常多。但是，这毕竟是一部比较全面、系统与深入地阐述塑料摩擦学的论著，我为能在这个领域放下一块基石而自豪。我深信本书会受到机械、高分子、军工、摩擦学及表面科学等方面的应用与研究工作者的欢迎，对教育工作者提供了一本参考书，或许还可以作教材，用途很广。

我要感谢轻工业部军工办公室高级工程师王桂芬、杨士英与吴杰工程师。他们的有力支持使这本书得以完成。机械、塑料领域的朋友们的鼓励与帮助对我是很重要的，如果要一一列出他们的大名，那名单就太长了！我所在的北京联合大学机械工程学院的领导与老师们给了各种有力而及时的帮助；我的众多的学生参加了实验与数据整理乃至稿件抄写，这些都是我不会忘记的。

我要特别感谢我国工程界与学术界的老前辈，中国科学院学部委员、全国政协常委雷天觉先生及国际摩擦学理事会副主席、清华大学摩擦学研究所所长郑林庆教授，他们年事已高且非常忙碌，还审阅了这本小册子，对著者给了宝贵的意见与支持。清华大学高分子教研室主任赵安赤副教授对全书进行了仔细的审校，使质量得以提高。

国际摩擦学理事会主席、英国机械工程师学会副主席彼得·乔斯特教授，对开拓这一新领域的研究给予高度评价与支持，并与著者一起确定本书的书名，解决了我们一大难题，这也是著者特别高兴的。

在这里，我预先向那些对本书提出宝贵意见的读者表示感谢！

王承鹤

1993年10月

# 目 录

## 前言

## 总 论

一、人类研究摩擦概况 .....	1
二、摩擦学 .....	5
三、高分子科学发展简史 .....	12
四、塑料发展历程 .....	14
五、塑料摩擦学 .....	17

## 第一篇 塑料基础

第一章 高分子化合物 .....	27
第一节 概述 .....	27
第二节 高分子化合物的分类和结构 .....	28
一、高分子化合物的分类 .....	28
二、高分子化合物的组合 .....	28
三、高分子的相对分子量 .....	31
四、分子链的主链 .....	31
五、链的形式 .....	32
六、大分子链的柔性 with 刚性 .....	33
七、影响分子链柔性的因素 .....	36
八、单个大分子链的形态 .....	39
第三节 主价力与范德华力 .....	39
第四节 结晶与无定形结构 .....	43
一、缨状胶束模型 .....	44
二、折叠链片晶模型 .....	45
三、半晶高聚物的Hosemann缺陷分布模型 .....	47
四、侧序度的概念 .....	47

五、高分子的晶体形态·····	49
第五节 高分子化合物的物理状态·····	51
一、高分子热运动的特点·····	51
二、线型无定形高聚物的物理状态·····	52
三、结晶聚合物的物理状态·····	55
四、半结晶聚合物的物理状态·····	56
第二章 工程塑料的性能·····	58
第一节 塑料分类·····	58
第二节 塑料的组成·····	59
第三节 工程塑料的形变·····	61
一、普弹形变·····	61
二、高弹形变·····	62
三、粘弹形变·····	63
四、塑性形变·····	66
第四节 工程塑料的机械性能·····	67
一、聚合物的理论强度·····	67
二、力学性能·····	68
第五节 工程塑料的热性能·····	73
一、耐热性·····	74
二、导热性·····	78
三、热膨胀·····	79
第六节 工程塑料的化学稳定性·····	79
一、氧化降解·····	80
二、水解、酸解及其它·····	81
第七节 工程塑料的电性能·····	82
一、电绝缘性·····	82
二、静电现象·····	83
第八节 工程塑料的磁性能和光学特性·····	85
一、磁性能·····	85
二、工程塑料的光学特性·····	85
第九节 工程塑料的成型与加工·····	85
一、成型·····	85



二、加工	87
<b>第三章 工程塑料各论</b>	<b>88</b>
<b>第一节 高分子材料的命名</b>	<b>88</b>
一、通俗命名法	88
二、以原料名称命名	89
三、专利商标名称、商品名称与习惯名称	89
四、缩写代号	90
五、系统命名法	90
<b>第二节 热固性工程塑料</b>	<b>91</b>
一、酚醛(PF)树脂	91
二、环氧树脂(EP)	93
三、玻璃钢塑料	95
四、不饱和聚酯树脂(UP)	96
五、其它	96
<b>第三节 热塑性工程塑料</b>	<b>97</b>
一、聚酰胺(尼龙、PA)	97
二、聚四氟乙烯(PTFE)	100
三、聚甲醛(POM)	103
四、聚酰亚胺(PI)	105
五、聚砜(PSF)	107
六、聚碳酸酯(PC)	107
七、氯化聚醚(聚氯醚塑料)	108
八、苯乙烯-丙烯腈共聚树脂(SAN, AS塑料)	109
九、ABS塑料(苯乙烯-丁二烯-丙烯腈共聚物)	109
十、聚苯醚(PPO)	110
十一、聚苯硫醚(PPS)	111
十二、聚乙烯(PE)	111
十三、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)	113
十四、聚氯乙烯(PVC)	114
十五、聚丙烯(PP)	114
十六、聚苯乙烯(PS)	115
十七、聚对苯二甲酸丁二醇酯(PBT)	115
十八、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)	115

十九、其它 .....	116
<b>第四章 塑料复合材料 .....</b>	<b>119</b>
第一节 概述 .....	119
第二节 复合机理 .....	120
一、粒子增强 .....	120
二、弥散增强 .....	120
三、纤维增强 .....	121
四、原位复合自增强 .....	121
第三节 复合材料分类 .....	121
第四节 塑料复合材料 .....	122
第五节 复合材料的特点 .....	124

## 第二篇 塑料摩擦学

<b>第一章 塑料表面与静接触 .....</b>	<b>129</b>
第一节 塑料表面的形貌与结构 .....	129
一、塑料表面的形成 .....	129
二、塑料表面的宏观形貌 .....	130
三、塑料表面的微观与亚微观形貌 .....	132
四、塑料的表层结构 .....	133
五、塑料表面的大分子结构 .....	134
六、塑料的表面缺陷 .....	135
第二节 塑料表面的特性 .....	136
一、表面能 .....	136
二、化学引力场与物理引力场 .....	137
三、表面的润湿性 .....	138
四、表面的自润滑性 .....	139
五、塑料表面的异向异性 .....	144
六、塑料表面的降解 .....	147
七、塑料表面的“银纹” .....	150
八、塑料表面的静电现象 .....	152
九、塑料表面的模量 .....	152
十、吸油吸湿特性 .....	152
第三节 塑料与金属的静接触 .....	153

一、塑料与金属的静接触模型 .....	153
二、塑料与金属的静接触变形 .....	154
三、塑料与金属的静接触面积 .....	154
第二章 塑料的摩擦 .....	156
第一节 塑料的摩擦学特性 .....	156
一、塑料作为摩擦件材料的优点 .....	156
二、塑料作为摩擦件材料的缺点 .....	158
第二节 塑料摩擦分类 .....	160
一、按摩擦副的运动形式分类 .....	160
二、按摩擦副的运动状态分类 .....	160
三、按摩擦副材料配合与运动综合分类 .....	160
四、按接触界面润滑状况分类 .....	161
五、按摩擦发生的部位分类 .....	162
第三节 聚四氟乙烯的干摩擦 .....	162
一、聚四氟乙烯的摩擦机理 .....	162
二、聚四氟乙烯的摩擦系数 .....	168
第四节 塑料的干摩擦理论 .....	173
一、塑料-金属的摩擦模型 .....	173
二、塑料干摩擦的粘着理论 .....	174
三、塑料干摩擦的分子-机械理论 .....	183
四、塑料干摩擦的转移理论 .....	184
五、塑料干摩擦的转移-依附理论 .....	186
六、塑料干摩擦的定向论 .....	187
七、气体润滑说 .....	188
八、吸湿减摩擦论 .....	188
九、自润滑说 .....	188
十、关于干摩擦机理的横向讨论 .....	189
十一、附论：合成胶粘剂的粘结机理 .....	191
第五节 塑料的摩擦系数 .....	194
一、塑料的摩擦系数公式 .....	194
二、塑料的摩擦系数值 .....	197
三、各种因素的作用 .....	199

第六节 爬行 .....	204
一、爬行现象 .....	204
二、爬行现象的原理模型 .....	205
三、发生爬行的临界速度 .....	207
四、塑料与爬行 .....	209
第七节 塑料的吸湿特性与摩擦 .....	210
第八节 塑料在二次加工中的摩擦 .....	211
第九节 塑料摩擦与发热 .....	212
第十节 塑料摩擦与能耗 .....	214
第十一节 塑料摩擦学与人机工程学 .....	216
第十二节 塑料摩擦与振动 .....	217
第十三节 真空中的塑料摩擦 .....	218
第十四节 塑料与非金属的摩擦 .....	219
一、塑料与塑料的摩擦 .....	219
二、塑料与花岗岩的摩擦 .....	220
第十五节 塑料与滚动摩擦 .....	221
第十六节 塑料摩擦与经济效益 .....	222
第十七节 塑料摩擦与环境保护 .....	223
<b>第三章 塑料的磨损 .....</b>	<b>227</b>
第一节 概述 .....	227
第二节 塑料的磨损过程 .....	228
第三节 塑料的磨损类别与机理 .....	229
一、粘着磨损 .....	229
二、磨粒磨损 .....	231
三、疲劳磨损 .....	234
四、腐蚀磨损与微动磨损 .....	236
五、切削磨损 .....	239
六、老化磨损 .....	241
七、蠕变磨损 .....	244
第四节 影响塑料磨损的因素 .....	252
第五节 塑料的耐磨性对比 .....	256
第六节 耐磨性与硬度的关系 .....	257

## Ⅷ

第七节 塑料的磨损计算 .....	258
一、体积磨损值计算 .....	258
二、磨损深度计算 .....	258
三、耐磨性计算 .....	258
四、失重 .....	259
第八节 聚四氟乙烯的磨损与磨损计算 .....	259
一、PTFE的磨损 .....	259
二、填充PTFE的磨损规律 .....	262
三、PTFE的磨损计算 .....	263
第九节 塑料作摩擦件的使用条件—— $p_v$ 值 .....	263
第十节 减少磨损的原理 .....	265
一、保护层 .....	265
二、换位及转移原理 .....	265
三、预磨损原理 .....	265
四、“无磨损”原理 .....	265
第四章 塑料的润滑 .....	266
第一节 对塑料表面的润滑原理 .....	267
一、不使摩擦偶件接触 .....	267
二、使用结合力弱的结构 .....	267
三、使结合部附近比较弱 .....	268
四、只是接触部位滑动 .....	268
五、使用本质上摩擦与磨损都小的材料 .....	268
六、使用润滑剂易于附着的摩擦副 .....	269
七、使用自润滑材料 .....	269
八、进行复合润滑 .....	270
第二节 塑料的可润滑性能 .....	277
第三节 聚合物浸润机理 .....	279
第四节 塑料-金属摩擦副的润滑 .....	281
第五节 工程塑料润滑各论 .....	283
一、热固性工程塑料的润滑 .....	283
二、热塑性工程塑料的润滑 .....	287
第五章 应用中的问题 .....	295
第一节 概述 .....	295

第二节 应用与研究中考虑的问题 .....	295
一、强度 .....	295
二、变形 .....	296
三、蠕变现象 .....	296
四、温升 .....	297
五、化学稳定性 .....	299
六、摩擦系数 .....	299
七、运动平稳性 .....	300
八、耐磨性 .....	301
九、润滑 .....	302
十、 $pV$ 值 .....	302
十一、配对材料 .....	303
十二、应用中的试验 .....	303
第六章 应用实例 .....	304
第一节 塑料滑动导轨 .....	304
一、材料 .....	304
二、设计原则 .....	305
三、设计方法 .....	305
四、应用实例 .....	306
五、经济效果 .....	307
第二节 塑料轴承 .....	308
一、材料 .....	308
二、设计原则 .....	309
三、应用实例 .....	310
四、经济效益 .....	312
第三节 塑料齿轮 .....	313
一、材料 .....	313
二、设计原则 .....	314
三、应用实例 .....	316
四、经济效益 .....	317
第四节 塑料活塞环类 .....	317
一、材料 .....	317

## XV

二、设计原则 .....	317
三、应用实例 .....	318
四、社会效益与经济效益 .....	319
第五节 塑料人工关节 .....	319
一、材料 .....	319
二、设计原则 .....	320
第六节 塑料车轮、滚轮 .....	321
第七节 塑料料筒 .....	321
第八节 其它 .....	322
主要参考文献 .....	328

# 总 论

现代，人类社会进入了高速发展与高度发达的阶段，却面临生存的危机。对人类生存的威胁有：人口的急剧增长、粮食匮乏与资源的行将耗尽、环境被严重污染与破坏；此外，还有核战争、艾滋病、吸毒以及世界范围的经济混乱。

为了生存下去而且更加繁荣昌盛，出路的一个基本方面在于加速科学技术的发展。从70年代末至80年代初，兴起了一大批新的科学技术群体，主要有以下六大群体：信息技术、新材料技术、新能源技术、生物技术、海洋技术及空间技术。其中的信息技术、新材料技术与新能源技术被誉为现代文明的三大支柱，而新材料是技术革命的引爆剂。这本新书中要讨论的塑料摩擦学，正是以人类面临的威胁为背景，以新兴的科学技术群体为基础提出来的。为了论证这一新学科的必要，下边分别介绍人类研究摩擦与磨损的概况、摩擦学的出现、高分子科学发展简史、塑料发展历程，最后说明我们为什么要提出塑料摩擦学。

## 一、人类研究摩擦概况

摩擦、磨损与润滑和人类的生活、人类为生存而斗争的活动从一开始就密切相关。根据我国著名的传说，遂人氏发明钻木取火，以及远古时代就有的击石取火，都是利用摩擦生热的原理。用石杵或石磨粉碎谷物的外壳，也是利用摩擦与磨损的规律。而且在原始时代，为了钻孔或取火制作的钻孔器，已经配有鹿角或骨头作的轴承。

人类早在开化初期，就已经知道滚动摩擦的阻力比滑动摩擦阻力小，大约公元前3500年就已经发明了车轮，可能也就在这一时期，就已经开始使用润滑剂。埃及的一处古墓中的战车车轮轴承中使用的是动物脂肪润滑剂；相传我国早在战国时代就已经



知道用糖水来润滑门枢。在商周时代的《诗经》中即已有这样的诗句：“载脂载聿，还车言迈”。意思是，用油脂充分地润滑车轴，可以乘车轻快地回去。据考证，当时的战车与民用车辆的车轴与轴瓦均是木料，外加金属箍，而润滑脂是羊脂或牛脂。在古埃及和美索不达米亚，约在公元前2000年，就已经在他们的宏伟工程中用滚子和滑板来搬运石块和雕塑这样一些巨大的重物。那时是用圆木作滚子。这可算作原始的木制滚动导轨。约在公元前10世纪，中欧的塞尔特人在车轴和轮索之间嵌入木圈，磨损后可以更换。这便是早期的滑动轴承。首先使用滚动轴承的也是塞尔特人，他们在轮索上的轴承内装上木制的滚柱，制造了滚柱轴承。至于球轴承，是在公元40年前后出现的。

但是，在漫长的历史中，有关摩擦的经验与知识的积累和发展是非常缓慢的，而这是与这一历史时期的生产水平相一致的。

到了16世纪，对于摩擦的研究有了重要的发展。达·芬奇不仅是意大利文艺复兴时代伟大的画家，而且是历史上最早对摩擦进行试验与研究的工程师。当时，由于航海技术等方面的需要，摩擦问题引起了达·芬奇的注意，他进行了有关摩擦的试验并提出了科学的论断。他于1508年得出结论：“物体滑动的能力是不同的，因此，摩擦具有不同的数值。表面光滑的物体具有较小的摩擦。任何经过研磨的平直平面的物体，在相互摩擦时显示出来的摩擦阻力为自身重量的四分之一。”

这样，达·芬奇提出了关于摩擦的两条定律：摩擦力和物体接触面间的正压力成正比；摩擦力和物体相互接触的名义面积的大小无关。”可以看出，这里已暗含有摩擦系数的概念。

在此后的200年间，在摩擦研究上没有什么重大的进展。直到17世纪末、18世纪初，在法国的路易十四时期，由于船舶制造、机械加工、钟表以及磨粉业等的迅速发展，越来越多地使用新机器，因而对摩擦的研究有了很大的发展。在这一时期，力学是一门发展得最快、最完善的科学，对摩擦研究的影响也最大，成为研究摩擦的基础。法国的阿芒汤（G.Amonton, 1663~