

塑料制品设计指南

徐佩弦 著

SULIAO ZHIPIN
SHEJI ZHINAN



化学工业出版社

塑料制品设计指南

徐佩弦 著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书就塑料制品的力学性能作了系统深入的分析,介绍了塑料结构件设计以及塑料件的装配连接方法。对常用的塑料制造的机械零件,典型的电工、建筑和光学等制品都有材料、加工和应用的介绍以及原理和方法的陈述,并提供了数据和实例。

本书反映了现代塑料工程的新技术和新材料与塑料制品的同步发展。对从事塑料制品设计的工程师是必备的工具书,对从事塑料制品加工的管理、工艺和模具工程师是必需的科技参考书。同时,为从事电子和建筑等各行行业中塑料制品开发的技术人员,提供了全面的技术咨询,也可供有关高分子材料专业师生在教学中参考。

图书在版编目(CIP)数据

塑料制品设计指南/徐佩弦著. —北京:化学工业出版社, 2006. 12

ISBN 978-7-5025-9803-7

I. 塑… II. 徐… III. 塑料制品-设计-指南
IV. TQ320.7-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 161384 号

责任编辑:白艳云 杜春阳

文字编辑:李 胤

责任校对:王素芹

装帧设计:潘 峰

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张31¼ 字数866千字 2007年3月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686)

售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 65.00 元

版权所有 违者必究

前 言

塑料应用于各行各业，是材料工业中发展速度最快的领域。无论是机械仪表或电子电器，还是建筑、轻工、包装和交通工具等，各行业的工程师都在设计、制造和应用塑料制品。塑料件以其独特的性能和经济性，以高效的成型加工，在电子、仪表和电气产品里的零部件中所占的比例高，批量大。

塑料制品首先要满足各种装置和设备的工作要求与环境条件，并且质量可靠，制造成本低。塑料制品生产是一项系统工程。塑料件和橡胶件的设计需要材料及其配方、成型加工、成型模具和成型机械等全面的专业知识。塑料和橡胶制品的设计在此项系统工程中起主导作用。

1993年出版的《塑料制品设计师指南》(唐志玉，徐佩弦主编，国防工业出版社出版)，全面地阐述了各应用领域的塑料制品设计的理论和方法。1998年出版的《塑料件的失效》(徐佩弦著，国防工业出版社出版)，对高分子材料及其复合塑料的力学性能作了较详细的陈述。2001年出版的《塑料件的设计》(徐佩弦著，中国轻工业出版社出版)，较多地反映了塑料件在工业流水线上的装配技术，侧重于力学和连接的设计。在本书编写的两年中，一方面全面梳理了塑料制品设计的理论和方法，去粗存精。另一方面补充了光学、电工和建筑等领域的塑料制品应用和设计、塑料制品的装饰等重要内容。仅使用塑料材料设计抗振缓冲制品和密封件这两大类功能制品的描述过于片面，为此，补充了橡胶材料的抗振和密封制品的应用和设计。

本书反映了现代塑料工程的新技术和新材料，与塑料制品开发和生产的发展同步。对从事塑料制品加工的管理、工艺和模具工程师，是必需的科技参考书。对从事塑料制品设计工程师是必备的工具书。为电子和建筑等各行业，从事塑料制品开发的技术人员，提供了全面的技术咨询，可供有关高分子材料专业师生在教学中参考。

本书第1章概述了塑料制品设计的一般原则。第2章和第3章分析了塑料材料的静态和动态的力学性能。第4章陈述了塑料梁、板、容器和玻璃纤维增强等的力学结构和设计计算。第5章从加工工艺角度，陈述注塑制品、中空吹塑制品、热成型制品、泡沫塑料制品的结构设计。第6章至第9章陈述塑料制品的装配连接。有弹性联接和螺纹联接、活动铰链和压力装配、各种焊接和粘接。第10章介绍了塑料制品的金属被覆、印刷和着色工艺。第11章叙述塑料和橡胶制品的抗振缓冲的结构设计。第12章叙述塑料制造的机械支承和传动齿轮的设计计算。第13章介绍了建筑行业的塑料板材、门窗和管材的应用和结构设计。第14章介绍了塑料光纤和光功能塑料制品的应用。第15章陈述了塑料的电性能和常用接插件、印制电路板和线缆的应用技术。第16章陈述了塑料和橡胶密封件的设计和应用。

本书在编写过程中，得到各位同仁的支持和指教，得到化学工业出版社的热忱帮助和支持，在此表示诚挚的感谢！

本书涉及大量的高分子材料和工程的技术资料，而且还将不断地推陈出新。但愿这些内容有益于读者，也请对书中不足批评指正。

华东理工大学高分子材料系

徐佩弦

2007年1月

目 录

第1章 塑料制品设计和成型	1
1.1 塑料制品设计原则和方法	1
1.1.1 塑料制品设计和生产	1
1.1.2 塑料制品设计步骤	2
1.1.3 塑料制品设计原则	3
1.1.4 塑料制品失效分析	3
1.2 塑料材料的选择	5
1.2.1 塑料材料	5
1.2.2 物理化学性能	9
1.2.3 材料的选择	15
1.3 加工方法的选择	16
1.3.1 热塑性塑料加工	17
1.3.2 热固性塑料加工	19
参考文献	20
第2章 静载荷下的形变行为	21
2.1 应变特性	21
2.1.1 应力-应变	21
2.1.2 弹性模量	23
2.2 屈服特性	27
2.2.1 屈服条件	27
2.2.2 屈服失效	28
2.2.3 影响屈服的因素	29
2.3 蠕变	30
2.3.1 蠕变曲线	30
2.3.2 蠕变计算	33
2.3.3 蠕变失效	36
2.4 松弛	38
2.5 蠕变回复	39
参考文献	43
第3章 动态载荷分析	44
3.1 疲劳强度	44
3.1.1 交变应力和持久极限	44
3.1.2 疲劳试验及影响因素	45
3.1.3 疲劳寿命计算	46
3.1.4 疲劳强度计算	48
3.2 力学致热	50
3.2.1 黏滞热效应	50
3.2.2 动态热力学分析	51
3.2.3 塑料件的热平衡计算	54
3.3 冲击载荷	56
3.3.1 冲击试验和冲击强度	57
3.3.2 影响冲击性能的因素	58
3.3.3 冲击疲劳	59
参考文献	59
第4章 结构件的刚性设计	61
4.1 梁的设计	61
4.1.1 梁的设计过程和特点	61
4.1.2 梁的弯曲	66
4.1.3 非均匀材料和结构的塑料梁	70
4.1.4 各种结构梁的综合分析	72
4.2 常用结构件设计	75
4.2.1 柱体设计	75
4.2.2 悬臂梁设计	78
4.2.3 塑料叶轮设计	80
4.2.4 螺旋弹簧设计	82
4.3 支承板设计	83
4.3.1 四周固定的圆板和矩形板	84
4.3.2 一边自由的矩形板	85
4.3.3 平板的网状加强筋	87
4.4 容器设计	90
4.4.1 储液容器	90
4.4.2 储气容器	91
4.4.3 球形底板	92
4.5 纤维增强设计	93
4.5.1 增强方法	93
4.5.2 长纤维增强	95
4.5.3 短纤维增强	99
4.5.4 纤维增强的复合塑料制品	103
参考文献	104
第5章 塑料制品的工艺结构设计	105
5.1 注塑制品的设计	105
5.1.1 塑料熔体的流动充模	105
5.1.2 注塑制品的取向和残余应力	109
5.1.3 注塑件的精度	111
5.1.4 注塑件的壁厚、脱模斜度、筋和凸台	115
5.1.5 嵌件、孔与圆角、修饰和标记	119
5.1.6 气体辅助注塑制品设计	125
5.2 中空吹塑制品	129
5.2.1 吹塑制品的特征	129
5.2.2 容器的强度和刚度设计	133
5.2.3 吹塑制品的工艺要素	139
5.3 热成型制品	140
5.3.1 热成型加工	140

5.3.2 热成型制品设计	144	9.1.2 吸附原理	237
5.4 泡沫塑料制品	152	9.1.3 粘接特点	238
5.4.1 泡沫塑料制品的应用	152	9.2 胶黏剂和粘接工艺	238
5.4.2 泡沫塑料制品的设计	159	9.2.1 胶黏剂	238
参考文献	163	9.2.2 粘接工艺	241
第6章 可拆联接	164	9.3 粘接强度计算	242
6.1 弹性联接	164	9.4 粘接接头设计	243
6.1.1 卡夹的弹性件	164	9.4.1 设计准则	243
6.1.2 卡夹联接结构	175	9.4.2 接头设计	244
6.2 螺纹联接	179	参考文献	246
6.2.1 螺纹设计	180	第10章 装饰	247
6.2.2 螺纹强度计算	181	10.1 塑料的表面改性	247
6.2.3 螺栓联接	183	10.1.1 脱脂预处理	247
6.2.4 自攻螺钉	185	10.1.2 塑料表面处理	247
参考文献	192	10.2 塑料的涂装	249
第7章 不可拆连接	193	10.2.1 塑料涂装用涂料	249
7.1 铰链连接	193	10.2.2 涂装工艺和质量	252
7.1.1 铰链的力学分析	193	10.3 塑料的金属被覆	255
7.1.2 铰链设计计算和加工	197	10.3.1 电镀	256
7.2 压力装配	200	10.3.2 真空镀膜	260
7.2.1 实芯轴的压力装配	201	10.4 塑料的印刷	263
7.2.2 空芯轴的压力装配	203	10.4.1 凹版印刷	263
7.2.3 压力装配中的蠕变	205	10.4.2 柔性版印刷	264
参考文献	210	10.4.3 丝网印刷	265
第8章 焊接	211	10.4.4 印箔烫印	266
8.1 热气焊接	212	10.5 塑料的着色	268
8.1.1 焊缝结构和熔接强度	212	10.5.1 塑料着色剂	268
8.1.2 熔接强度计算	214	10.5.2 塑料着色工艺	275
8.2 超声波焊接	217	参考文献	278
8.2.1 超声波对焊接	217	第11章 抗振缓冲结构设计	279
8.2.2 超声波铆接	222	11.1 抗振结构设计	279
8.2.3 超声波点焊、墩焊和钎焊	225	11.1.1 塑料的阻尼特性	279
8.3 摩擦焊接	225	11.1.2 减振计算	280
8.3.1 摩擦焊接原理	225	11.1.3 阻尼特性的影响	283
8.3.2 摩擦焊接连接设计	227	11.1.4 印制电路板组件抗振设计	285
8.4 振动焊接	228	11.2 缓冲结构设计	291
8.4.1 振动焊接的设备和原理	228	11.2.1 抗冲校核	291
8.4.2 振动焊接的连接设计	231	11.2.2 缓冲包装设计	292
8.5 热板焊接	231	11.3 橡胶抗振制品设计	296
8.5.1 热板焊接原理	231	11.3.1 橡胶的抗振性能	296
8.5.2 热板焊接的连接设计	231	11.3.2 橡胶承压制品设计	300
8.6 电磁焊接	232	11.3.3 橡胶减振结构设计	306
8.6.1 电磁焊接原理	232	参考文献	308
8.6.2 电磁焊接的连接设计	233	第12章 塑料支承和齿轮设计	309
参考文献	234	12.1 塑料的摩擦和磨损性能	309
第9章 粘接	235	12.1.1 摩擦	309
9.1 粘接原理和特点	235	12.1.2 磨损	313
9.1.1 塑料的表面特性	235	12.1.3 硬度	315
		12.2 塑料支承设计	317

12.2.1 轴承材料	317	参考文献	415
12.2.2 轴承类型	320	第 15 章 电工制品	416
12.2.3 轴承参量设计	321	15.1 塑件的电学性能	416
12.2.4 橡胶轴承	324	15.1.1 介电性能	416
12.2.5 聚四氟乙烯软带导轨	325	15.1.2 导电性能	420
12.3 塑料齿轮设计	327	15.1.3 耐压性能	421
12.3.1 齿轮模塑成型	327	15.1.4 导电和磁性塑料	423
12.3.2 齿轮几何参数计算	329	15.2 接插件	425
12.3.3 齿轮弯曲疲劳强度计算	331	15.2.1 接插件的技术性能	426
12.3.4 齿面接触疲劳强度计算	335	15.2.2 接插件用塑料	428
12.3.5 齿轮摩擦和磨损	338	15.3 印制电路板	431
12.3.6 齿轮材料的选择	340	15.3.1 印制电路板的工艺过程	431
参考文献	342	15.3.2 印制电路板的性能要求	435
第 13 章 建筑制品	343	15.4 线缆包覆层设计	439
13.1 建筑制品和塑料性能	343	15.4.1 电缆用塑料材料	439
13.1.1 建筑用的塑料制品	343	15.4.2 电缆绝缘层厚度计算	445
13.1.2 阻燃性和耐候性	348	15.4.3 电缆料的使用要求	447
13.2 波纹板和夹芯板	354	参考文献	449
13.2.1 波纹板设计	354	第 16 章 密封件设计	450
13.2.2 曲面结构设计	357	16.1 橡胶的密封	450
13.2.3 夹芯板刚性分析	358	16.1.1 密封和泄漏	450
13.2.4 夹芯板的应用设计	365	16.1.2 密封件的自紧机理	451
13.3 塑料门窗的设计	371	16.1.3 密封弹性体材料	453
13.3.1 塑料门窗综述	371	16.2 聚四氟乙烯密封圈	458
13.3.2 塑料门窗结构	374	16.2.1 端盖密封垫	458
13.3.3 外窗抗风强度校核	378	16.2.2 填料密封	459
13.4 塑料管材	382	16.2.3 活塞环	460
13.4.1 塑料管材分类及概况	382	16.3 O形橡胶密封圈	462
13.4.2 输送管的应力分析	385	16.3.1 O形圈密封	462
13.4.3 深埋管载荷和开裂分析	388	16.3.2 静态密封设计	466
参考文献	392	16.3.3 移动密封设计	468
第 14 章 光学制品	393	16.3.4 旋转密封设计	471
14.1 光传递及制品	393	参考文献	473
14.1.1 塑料视窗玻璃	393	附录	474
14.1.2 透镜	394	1. 原国家第四机械工业部推荐的塑料制品	
14.1.3 透明类塑料	397	尺寸公差	474
14.2 塑料光纤和光管	399	2. 德国的塑料制品尺寸公差	474
14.2.1 塑料光纤传光和损耗	399	3. 塑料件表面粗糙度	476
14.2.2 塑料光纤分类和材料	403	4. 塑料的蠕变性能	476
14.2.3 塑料光管传输及应用	406	5. 聚酰胺和聚甲醛的 S-N 疲劳曲线	483
14.2.4 塑料光纤的应用	408	6. 树脂及塑料的缩写代号、英文和中文	
14.3 光功能塑料	410	名称对照	488
14.3.1 塑料的光弹性	410		
14.3.2 光反应塑料和橡胶	413		

第 1 章 塑料制品设计和成型

塑料制品设计首先要确定制品的功能和性能指标，然后选择合适材料，进而决定成型加工工艺。进一步是制品结构的设计和计算，绘制塑料制品生产图。完善的塑料制品设计还应包括制品的失效分析、成本核算和制品的功能和性能测试。因此了解塑料材料各项性能的测试是重要的，以使所设计制品能实现力学、化学、电学和光学等使用要求。

1.1 塑料制品设计原则和方法

塑料制品应用于众多场合，功能各异，品种万千。全面学习塑料件（简称塑件）的设计原则和方法很有必要。本节主要概述设计原则，评说塑料制品生产和设计特点、制品设计步骤、原则和失效分析的方法。

1.1.1 塑料制品设计和生产

塑料制品（plastic products）和塑料件（plastic parts）是难以区分的。在国外，塑料制品通常对生活用品和装饰用品用得较多，是商品市场的商业用语。塑料件是工业产品中的塑料零件，是工业企业用语。按汉语的含义，两者可通用，或者将塑料件视为塑料制品中的一大类。

1.1.1.1 塑料制品量大面广

塑料材料的密度低，比强度高，又具有耐腐蚀和绝缘性能。在较多品种中，有的减摩或耐磨性能良好；有的防振抗冲性能优异；有的耐疲劳性能突出。这使得塑料制品在国民经济的各行各业，无论是机械仪表或电子电器，还是建筑、包装和交通工具等，在人们的日常生活中得到大量地使用。塑料制品能得到广泛使用还由于它的可加工性，可以用注塑、挤塑、热成型和压延等方法高效地生产各种制品。其次，它可经纤维增强或用添加剂改性，一定程度地改善制品所需的某些性能。另外，塑料制品着色容易，又可多样修饰，使它能经浓妆淡抹后走进千家万户。

塑料制品被大量应用作结构件，如电子仪表、家用电器和通信设备等的机壳、机架和机座，建筑上的塑料管道、板条和门窗，汽车上的前后保险杠、仪表板和内饰件。塑料件作为电绝缘零件，与金属导体、半导体器件相辅相存。近年来，透明塑料制品从镜片、光盘、光纤到照明灯具又拓展了新的应用领域。

在许多特殊的应用场合，非塑料件莫属。如输送腐蚀性介质的管道、阀和泵；音响和办公设备中的无噪声的塑料齿轮；无法用油润滑的轴承和导轨，只能采用减摩和耐磨的自润滑的塑料；还有瞬时高温要求的高速飞行器上的特殊制件。

1.1.1.2 技术难度大

塑料只有通过正确的制品设计，才能步入国民经济及尖端技术的各个领域。而且在塑料制品生产中，工程技术人员必须熟悉制品设计和有关理论、方法、结构和造型。塑料制品设计又与成型模具的设计制造和应用的关系密切。

塑料材料的黏弹性，使其制品呈现对时间和温度的依赖性。塑料件不但在强度和刚度等力学性能方面，在静载荷下比钢材差许多；而且在各种频率的交变载荷下或在冲击载荷下，在各种环境条件下有不少特殊的失效形式。对塑料制品的使用寿命和可靠性设计，还处于科研和探索阶段。塑料制品设计的困难之处，在于高聚物材料的弹性模量低。因此，塑料制品

设计更讲究有效地利用材料,使塑料件具有适用的刚性。追求几何形状的完美性的刚性设计,对塑料制品设计很重要。

塑料制品不同于金属零件,很少采用刀具进行切削加工,也极少采用高聚物的溶液状态来成型加工。绝大多数高聚物的加工成型都经过熔体的流动和变形,通过模具来加工成型制品。塑料熔体在压力下充满模具的型腔,或在模具表面边界作用下成型,进而冷却固化。因此塑料制品设计必须熟练掌握与之相应的成型模具的设计、制造和应用,必须掌握生产过程中所面临的流变学和传热学的基础理论。

生产中的塑料熔体经模具的冷却系统作用必须快速骤冷固化,因此制品的收缩存在波动和不均匀,使塑料制品的形状和尺寸精度的控制较为困难。塑料制品的精度取决于塑料材料、模塑成型方法、模具精度和冷却系统等因素。模塑成型也决定了塑料制品壁厚必须厚度均匀。按相等厚度的薄板构成组合的原理设计制品形体。塑料件的厚度必须以所承受力学载荷和绝缘等使用要求,有依据地确定,还必须考虑加工时熔体流动充满型腔的可行性。要考虑到在较高的温度下,塑料制品的热膨胀和软化的后果。考虑到在长期负载下制品的蠕变和长期变形下应力的松弛。现今,塑料件在大批量生产的流水线上装配时,塑料件之间或与其他金属等零件间的连接,必须可靠并适合快装。塑料铰链、弹性卡夹连接及超声波焊接等方法应用时,在塑料制品上应有相应的结构设计。

我国塑料制品设计尚处于仿制和经验设计阶段。理论设计工作正在开展。塑料材料和制品性能测试方法和数据也在逐步完善中,塑料制品设计的CAD也将实现。

1.1.2 塑料制品设计步骤

塑料制品设计者不但要具有机械设计者的制图、公差配合与技术测量、工程力学和机械零件等方面知识和技能,更需要塑料加工工程方面、塑料制品、塑料及配方、塑料加工、塑料成型模具和成型机械方面的知识。它们是相辅相成的,塑料件设计一般可分成三个阶段。在每项塑料制品生产过程中,制品设计起着龙头作用。

1.1.2.1 拟订设计方案

在接受了明确的设计任务后,需全面收集有关各种资料和技术数据。进行了综合和分析后,首先科学地确定制品的功能和性能。塑料件所具有的功能包括使用功能和环境功能,在一定时间、空间和环境下需要完成诸如结构支承、机械传动和电气绝缘等功能。塑料件的性能有力学、热力学、物理和化学等性能。要注意到塑料材料的性能不等于塑料制品的性能。大多数塑料经加热熔融和冷却固化成型,原材料的性能会损失下降,会出现新的内在缺陷,影响塑料件的性能。只有塑料管等几项制品的功能和性能指标,以及测试方法是较为完整的。其他常用塑料制品一般都适用以建筑、包装和电气各专业的指标和测试标准。

第二步是选择合适的塑料材料。不仅要保证实现制品的功能和性能,也要考虑可加工性和生产成本。第三步是确定制品的加工方法。各种加工方法适用于一定形状和尺寸,具有一定的加工精度和生产率,要有相应成型模具和设备。同时确定塑件的装配方法和表面修饰要求。第四步是对塑料件进行失效分析。针对塑料件对时间、温度 and 环境的敏感性,为保证使用期限内塑料件的功能和性能的可靠,必须按主要失效形式进行预测性的理论计算和相应的实验测试。如对压力装配后塑料件计算温度升高和应力松弛后的传递力矩。又如塑料齿轮在弯曲疲劳、接触点蚀、齿面磨损或热膨胀下的模数和中心距的理论计算。在重要的场合需对制品进行冲击或疲劳、耐候或渗透等测试。

拟订方案时,要遵循多个方案分析比较和逐步优化的常规方法。

1.1.2.2 结构设计

塑料件的结构考虑,基本上有功能结构、工艺结构和造型结构三方面。

功能结构设计是结构设计的核心。确定使用功能实现的制品形状、尺寸和壁厚。塑料件

结构设计要做静载荷下短时和长期的形变校核；要作动载荷下冲击、疲劳、滞后热和磨损等校核。

合理的工艺结构设计是制品生产的前提，关系到塑件质量、生产率和成本。聚合物流变学是工艺结构设计的理论基础，用以考虑模塑成型的可行性。必须合理处理流动性、收缩率、嵌件和脱模等技术问题。塑料件的合理连接设计，不但简化了单个塑件，实现与非塑料件的连接，还保证了流水线上对塑料件的高效装配。

对于机壳、面板、仪表板和日用塑料制品，要通过外部造型设计予以装饰和美化。滚花、抛光、彩饰、植绒、镀覆金属和模塑图案等修饰与美术相结合，给人以美感。

结构设计要用工程制图进行形体的空间思维。各种草图、轴侧图和三视图也是交流的工程语言。现代的电子计算机绘图和三维造型，不但保证了设计质量，也为下一步的计算机数值模拟分析，准备了形体造型数据。制作一些模型可以帮助结构设计，如用透明的有机玻璃板黏结成机壳。设计中要跟各专业工程师和模具设计师一起工作。现代计算机技术也为塑料件设计提供各种专业软件与数据库，如弹性卡夹、塑料铰链和塑料齿轮等辅助设计软件。在结构设计的最后阶段，慎重确定塑料件的尺寸精度、形位公差和表面质量要求是重要的工作。

1.1.2.3 生产准备和定型

完成了塑料件的图纸设计后，还必须与工艺工程师和模具工程师合作，对制品进行计算机模拟和生产验证，并进行修改，直至定型。

注射模塑制品有各种 CAE/CAD 分析软件。对注塑件进行二维或三维造型后，数值模拟注射工艺过程，可获知塑料熔体充模流动、保压冷却、固化收缩和翘曲变形的分析结果。在此过程中，需对塑料件的设计进行修正和优化。挤出加工的塑料件也有 CAD 软件，模拟挤出时熔体流动和冷却定型过程。对复杂的吹塑、共挤和热成型加工还必须进行专业的工艺设计，预测和设计型坯。在此期间也需要修改塑件设计。

塑料制品与金属零件一样有规模效应。由于成型模具成本很高，生产批量与每个塑件制造成本成反比。同样，塑料件的制造周期决定了新产品的试制周期，而且塑料件生产周期还包括金属模具的机械加工周期。专门的塑件生产，还需设计和制造专用的成型机械。

1.1.3 塑料制品设计原则

开拓和进取的设计思想，严谨的科学作风应该为塑料件设计师所具备。在塑料制品的设计中，以下四条基本原理必须遵循。

① 保证塑料制品在使用期限中的功能和性能。在塑料件失效分析基础上，进行理论设计计算校核，以及实验测试。

② 在保证塑料制品的功能和性能前提下选择材料，还必须考虑加工的可行性和材料成本低廉。

③ 聚合物的流变和固化过程，及其材料形态变化对塑料制品的影响必须考虑。

④ 大多数塑料制品是各种装置和设备中的组成元件。它的设计应统一在整机产品中。在保证整机质量前提下，降低塑料件的成本。

此外，塑料制品的标准化、系列化程度反映了塑料工业的发展水平。对各种电工线缆、吹塑桶、塑料门窗、塑料管和接头等产品的标准化工作，今后必将有更大进展。

1.1.4 塑料制品失效分析

由于构成的分子和结构不同，塑料与金属材料性能差异很大。金属零件的设计较为容易，因为金属材料与其制造制品的性能相差很少。金属零件的功能和性能可较准确地计算和预测。塑料制品的设计和试验测试必须考虑三个主要特点。

① 负载 作用于塑料件的负载有拉伸、压缩、弯曲、剪切和扭转五种基本类型和它们的组合。金属件的力学计算以强度为主。在精密机械设计时才较多考虑刚度问题。塑料件的力学分析计算以刚度计算为主。普通塑料的弹性模量是钢材的 $1/100 \sim 1/50$ 。塑料结构件在负载下容易产生塑性变形；在大多数场合因变形过大而丧失工作能力。另外，塑料的各种加工方法都要求塑件壁厚不能过厚。塑料制品设计者追求薄壁组合的形体，以结构设计来提高塑件的刚性。

塑料的负载校核计算有短期和长期的区分。塑料件在恒定负载下蠕变和在恒定变形下的应力松弛，在 5 年、10 年或 15 年的使用期限下是很明显的。塑料件在周期性交变载荷下，不但有疲劳破坏、冲击疲劳破坏，还有应变滞后热的生成。塑料件对负载施加的速率很敏感，有特殊的抗冲击性能，这将在第 2 章和第 3 章中以静态载荷和动态负载分别陈述。

② 温度 比起金属件，塑料制品是对环境温度很敏感的材料。塑料的热变形温度和低温脆化温度限制了塑料件的工作温度。各种塑料件的工作温度范围较小。塑料件的屈服应力和弹性模量等力学性能随温度升高而下降。塑料件的电绝缘性能和耐化学腐蚀性能等也会随温度提高而丧失。

③ 时间 在长期的应力与应变作用下，塑料响应有蠕变和松弛行为。塑料的力学性能是时间的函数。塑料材料的弹性模量随时间增长而降低。黏弹性在塑料制品的设计和应用中必须考虑。另外，塑料件在长期使用中，会逐渐衰老而失效。热、光、氧、化学介质、气体和液体会使塑料制品塑化、降解、脆化、渗透、溶胀、变色、脱黏和开裂。有随时间增长而缓慢恶化的过程。

对于不同用途的塑料制品，各有其行业的实用性试验标准和指标。实用性试验（performance test）与塑料材料试验有相同的原理，但注重考察塑料件结构对变形和破裂的抵抗能力；考察塑料件在工作环境下长时期的功能和性能变化。例如塑料管的环境应力裂缝试验，要从挤出的塑料管中截取试样，并采用模拟环境的“加速试验”方法。

塑料制品的性能与其制造材料的性能有很大差距。这是由于材料性能测试试样和环境条件的局限性；是由于塑料件对负载响应的特殊性，对温度、时间、形状和尺寸的敏感性；又由于塑料件的加工经历，使材料损失了一些性能。因此在塑料件的设计过程中，必须进行失效分析来预测失效形式和寿命，以保证使用期内功能和性能满足要求。塑料制品的多样性、工作条件和环境的复杂多变，以致塑料件的失效形式众多，需要正确确定起决定作用的一个或几个主要失效形式，进行理论计算和实验预测。下面陈述几种常见的失效形式，供分析时参考。

① 屈服失效 屈服点是塑性变形的起点。剪切屈服和银纹屈服是塑料件破坏的先兆。短时静态负载作用的塑料件，以一定的安全系数，用屈服点以下的许用应变或允许应力，作为塑件上危险截面上的极限应变或极限应力。

② 蠕变和松弛失效 负载长期作用的塑料件产生过大的蠕变形变，最终会蠕变断裂。蠕变塑料件的材料，其弹性模量称蠕变模量或表观模量，随着时间增长而下降。用蠕变模量计算塑料件上最大的变形量，应该小于工作寿命期的极限变形量。压力装配的连接件和有预应力的密封件，应力松弛会使连接松动，密封失效。

③ 冲击失效 冲击下塑料件的形变和断裂是常见失效形式。冲击负载的作用时间极短，塑件的变形速率很高。材料、取向、缺口、温度和冲击速度都影响着塑料件的冲击性能。脆性聚合物与弹塑性聚合物及其复合塑料，有不同的冲击断裂机理；聚合物在低温和高速变形下有独特的冲击断裂特征。理论预测各种塑料件冲击破坏是困难的。常用塑料件的破坏性冲击性能测试。

④ 疲劳失效 长期的交变应力作用下，疲劳裂纹的生成和扩展导致塑料件最终断裂。各种塑料的抗疲劳性能有较大差异。疲劳破坏是塑料齿轮和传动带等传动零件、也是交通工

具上受振塑料件的失效形式。使塑料件疲劳破坏的交变载荷的作用频率在 10Hz 以下, 过高的频率会产生力学致热的失效。

⑤ 力学致热 在振动负载的激励下, 塑料响应之后使一部分能量以热的形式被耗散。单位时间产生的热量与振动频率、应变幅和损耗角正切成正比。一旦塑料件的工作系统失去热平衡, 塑料件会软化失效。

⑥ 环境失效 气体和液体对塑料制品的渗透、扩散和溶解, 会使整体力学性能劣化, 并引发环境应力裂缝。化学介质、热、光和氧的环境导致塑料件逐渐变质老化, 缩短了使用寿命。

⑦ 摩擦与磨损 摩擦使运动塑料件的工作能量有损失, 导致塑件表面材料的损失和损伤。磨损破坏了塑件摩擦表面的性能、形状和尺寸精度。伴随产生的塑性变形、热软化和热熔化、裂纹和撕裂, 使塑料件过早丧失表面接触运动功能。

⑧ 成型加工形成的损伤 熔合缝是模塑成型塑料件的重要缺陷, 造成了塑料件与原材料的力学性能的差距。模塑成型制品的取向、残余应力和收缩影响塑件的内部和表面质量、形状和尺寸精度。以上两类损伤形成了塑料件材质的弱点和缺陷, 也是上述各种失效产生和加剧的内在原因。

1.2 塑料材料的选择

这里简单介绍塑料材料的分类和常用品种, 介绍它们的应用、加工和失效的特征。讨论塑料材料的选择方法。还简要介绍塑料的一些物理性能。专门的塑料材料和橡胶及它们的实用性能将在各类塑料制品应用的章节中陈述。

1.2.1 塑料材料

塑料是高分子材料中最大的一类材料。塑料的定义是, 以高聚物为主要成分, 并在加工为成品的某阶段可流动成型材料。高聚物是指高分子量的聚合产物, 又称聚合物。塑料以高聚物为基体, 常含有添加剂。

1.2.1.1 热塑性塑料

热塑性塑料是指在特定的温度范围内, 能反复加热软化和冷却硬化的材料。这类塑料基本是以聚合反应得到的高聚物为主配制的。高聚物由长分子链组成。热塑性高聚物的分子链有线型的或支链的结构。用相对平均分子质量来表征和测定高聚物分子链的长度。分子量越大, 固态高聚物的力学强度越好, 黏流态高聚物的黏度更高。

除液晶聚合物外, 高聚物的液态是无定形的, 具有无定形的结构。从冷却期间高聚物的分子结构建立, 热塑性高聚物可分成两大组群。一类是具有无定形结构的高聚物; 另一类是具有结晶结构的高聚物。无定形结构的塑料中的微观分子以缠结的连接形式保持着紊乱状态。结晶结构塑料中, 分子链沿着已生成的晶核有序地折叠着, 但其周围是无定形结构。结晶度是结晶型塑料用来说明结晶态结构的百分率。结晶结构的分子比无定形分子聚集有序且密集。因此结晶型塑料的冷却成型收缩率比无定形塑料大。同种结晶型塑料, 由于冷却过程的温度条件不同, 晶核生成和晶体生长受时间制约, 会有不同的结晶度。结晶度较高的塑料收缩率较大, 刚性和拉伸强度提高, 而冲击强度下降。

① 聚乙烯 (PE) 它是乙烯聚合的结晶型塑料。熔体的流动性能好。低密度聚乙烯 (LDPE), 用高压法生产, 结晶度较低为 45%~65%, 其柔软性、断裂伸长率、冲击强度和透明性较好, 适用于吹塑薄膜和挤出线缆绝缘层。高密度聚乙烯 (HDPE), 用低压法生产, 结晶度高为 85%~95%, 具有较高机械强度和使用温度, 适宜中空吹塑, 注射和挤出各种瓶、盆、桶、片材、管材和异型材。还有一种超高分子量聚乙烯 (UHMWPE), 为相对分子质量大于 70 万的高密度聚乙烯。有很高的机械强度和耐磨性能, 熔体黏度特高, 可制成

减摩耐磨的支承和传动件。

瓶、筒和罐的 PE 密封盖，因为强力打开而被撕裂。主要是由于材料强度不足和盖子太薄。PE 桶上不能直接嵌塑金属手柄。金属柄周围的塑料会因负载应力过大而断裂脱开。储存洗涤液的 PE 容器会引发环境应力裂纹。管装洗头膏的 PE 螺牙帽盖，生成环境应力裂纹后在紧固力的触发下，很容易断裂。PE 吹塑的桶类容器，装水和固态物后坠地，不会破裂。但装了洗手液生成了应力裂纹后，从 1m 高度坠落就会破裂。这种桶的底部需有渐变的斜度和大圆弧的圆角。用短玻璃纤维增强的 PE 塑件，在污染环境又有振动负载时，连接紧固部位较容易出现裂缝。

PE 和聚丙烯 (PP) 在受热和光照下会发生氧降解，致使塑料件脆化，损失了弯曲和拉伸强度。氧化作用的程度与时间，可以用红外线光谱来监察和测量。家用的塑料装饰植物在摆放了 15 年后，会见到叶片从枝梗上脱落。叶根的装配接头断裂。枝杈上插装叶片的套管开裂，这是 PE 的脆化断裂所致。尽管装饰植物的自重小，装配接头处的应力也不大。经红外线谱的对比分析，由氧化产生了羰基吸收比率变化。增大叶根的接头，添加抗氧化剂，能改善此种老化现象。

② 聚丙烯 (PP) 它是密度小而耐热性较好的结晶型聚合物。性能与 PE 相近，其成型收缩率大，熔体流动性好，有突出的抗疲劳性能。

PP 不像 PE 那样因环境应力开裂而失效。但它耐老化能力比 PE 差。在氧化和降解中分子链上失去氢原子，伴有主链断裂导致力学性能下降。如卷发筒在吹风干燥头发时被氧化，使用寿命较短。另外，PP 的低温冲击强度低。它的玻璃化转变温度 T_g 为 -20°C 左右，在此温度早已脆化。PP 制造的壳体等结构件，如经受过 0°C 以下的冷冻，就要注意可能会出现破裂现象。因此需经复合或共混改性方法加以改善。其次，使用着色剂会影响 PP 塑件的收缩率，如用酞菁颜料。着色剂如同成核剂那样会影响结晶度。另外，用 PP 做储有液体食物的扁瓶，保质期不长，瓶中水分会损耗减少。比起 PE，PP 瓶壁的水汽渗透速率要更高些。这样势必要增加容器的壁厚。

③ 聚氯乙烯 (PVC) 根据成型加工和使用的性能要求，在 PVC 树脂中加入各种添加剂，可制成各种性能的塑料制品。添加增塑剂可以降低熔融温度和熔体黏度。添加不同比例的增塑剂，可获得不同软硬程度的 PVC 制品。加入稳定剂使 PVC 在成型过程和使用中不易老化。润滑剂则在加工中减少摩擦热，并使制品表面光滑。

PVC 具有无定形聚合物特征，成型收缩率较小。其熔体的热稳定性差，成型温度的范围小，对模具有腐蚀作用。软 PVC 被用来吹塑薄膜、压延片材和挤出线缆护套。硬 PVC 用来挤出各种棒材、管材、板材、型材和门窗异型材。注射级的硬 PVC 的熔体流动性较差，用于注射成型管接头和较小的结构件。注塑和挤出时的加热塑化温度，对成型制品的断裂性能有影响。硬 PVC 的冲击强度较低，特别在受到高速冲击时。硬 PVC 管道和阀类塑料件，突然受到液压冲击时容易开裂。改性可以提高硬 PVC 的冲击强度，但同时也降低了制品的刚度。 80°C 以上的过热环境，硬 PVC 制品会变形软化，刚性降低，弹性提高，电绝缘性能下降。因而，露天使用的硬 PVC 塑料门窗，宁可用浅色而不用深色，以减少阳光下骤热升温。

④ 聚苯乙烯 (PS) 它是无色透明塑料，透光率仅次于聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)。着色性、耐水性和化学稳定性良好。PS 的电绝缘性优良，但不耐苯和汽油等有机溶剂。PS 是无定形聚合物，熔体流动性好且不易分解，有良好注射工艺性。力学性能一般，抗冲击性能差。模压和蒸汽加热成型生产的发泡 PS，广泛用作包装和保温制品。

聚苯乙烯塑料制品，在坠落和冲击时容易断裂。塑件壁厚应均匀一致，各连接面处应有圆角，且不宜设计嵌件。塑件中残余应力过大时，会出现应力发白和裂纹，使透明性下降。构件不能受动态的弯曲载荷，不能设计制造弹性夹钳等。PS 有较大热膨胀系数。交替的膨

胀和收缩力会使塑件的联接基座产生开裂。蠕变使 PS 塑件只有 15~20 年的正常工作期限。热变形和蠕变综合作用 PS 灯罩类装饰件, 由于灯源的热量, 1 年左右就会开裂。在联接面上, 即使塑件工作温度不超过 45~50℃, 蠕变仍会发生。

⑤ 抗冲聚苯乙烯 (HIPS) 它为丁苯橡胶增韧改性的聚苯乙烯。与 PS 相比有较高的韧性和冲击强度。如果相对分子质量偏低, 或橡胶含量较少, 或注射工艺不良, 则会有较低的强度和更高的残余应力。如图 1.1 所示, 用 HIPS 制造的笔杆有较高的残余应力, 使用几次就会开裂。扭簧扣压的晾衣服衣架, 由于交变弹簧力作用, 钢丝扣压处的夹头很快就断裂。单薄无筋条的简易衣架, 也易弯曲折断。对 200~300mm 以上的 HIPS 构件, 需注意自重。对其支撑位置产生的弯曲应变受

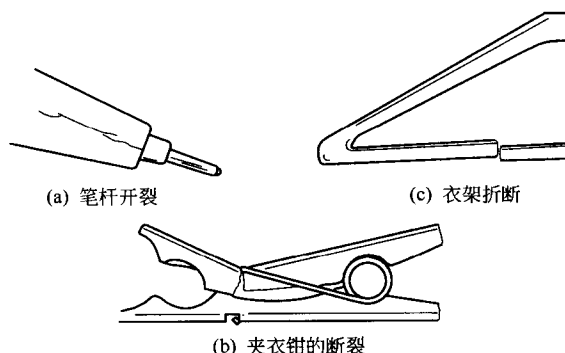


图 1.1 HIPS 塑件的断裂现象

到限制。HIPS 的制品不宜露天使用, 它的抗氧化和热化学阻抗的稳定性较差。尤其在承载情况下, 扭曲和弯曲时会产生热变形或疲劳裂纹。

⑥ ABS 它为苯乙烯-丁二烯-丙烯腈共聚的无定形塑料。ABS 通常有比 HIPS 好的韧性, 有较好的综合力学性能。熔体流动性中等, 易于注射成型。成型收缩率小, 制品尺寸稳定。ABS 是重要的广泛使用的工程塑料。其品种牌号很多, 各品种的物理性能和成型加工性能各有差异。ABS 常用来制造各种壳体和结构件, 以及经电镀等表面处理的装饰件。ABS 的面板、壳体和结构件制造的仪表, 通常设计寿命为 10 年。仪表中最早开裂的部位是壳体上螺纹牙, 及邻近受装配紧固力的螺钉孔和台柱。仪表中动力电机或重物的作用会使结构件开裂损坏, 也会有疲劳裂纹。倘若仪表的环境条件很差, 壳体的横截面上会出现环境应力裂纹。

⑦ AS 其为丙烯腈与苯乙烯共聚的无定形塑料, 也可写成 SAN。透光率与 PS 相当, 韧性和强度超过 PS, 熔体的流动性也较好。但需注意到 AS 制品在模塑成型时易生成残余应力, 会引发裂纹。AS 在成型加工和使用中与溶剂接触, 有环境应力开裂的现象。倘若用 AS 制造热咖啡的容器, 由于化学作用 and 高温, 会使容器开裂。

⑧ 聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 它是丙烯酸类树脂中最重要的一种。透明度高的无定形塑料, 常以板材供应, 俗称有机玻璃。但比无机玻璃轻得多, 且抗冲耐振。它具有良好的电绝缘性、染色性和二次加工的装饰性能。用聚苯乙烯改性的 PMMA 为 372 品种; 还有珠光有机玻璃是国内常用的塑料品种。PMMA 熔体的流动性中等。不良的注射工艺会影响制品的透明度和强度。

由于 PMMA 的脆性, 使它不能承受高的应力。在钻孔切削时很容易开裂。PMMA 的螺纹孔在室温下拧紧时也会开裂。有机玻璃的表面硬度差, 易被硬物擦伤起划痕, 专门的涂覆可以有所改善。环境应力裂纹是 PMMA 的又一弱点, 尤其是在平均分子量较低时。

⑨ 聚酰胺 (PA) 它为多品种的结晶型聚合物。坚韧、耐磨且耐疲劳, 但极能吸湿。熔点高, 熔融温度范围窄。注射前必须充分干燥物料。熔体黏度低, 注射模塑时很容易出现流延和溢边。模具温度高低影响结晶度。塑料件的成型收缩率大, 且有波动。成型的制品因吸湿等原因, 尺寸不稳定。

PA6 弹性好, 冲击强度高, 吸水性较大。PA66 强度高, 耐磨性好。PA610 与 PA66 性能相似, 但吸水性和刚性都较小。PA1010 半透明, 吸水性较小, 耐寒性较好。

聚酰胺制品的失效有四个特征。第一, PA 在高温下加工时的水解作用会使材料降解。

因此原料中的含水量必须严格限制。降解使 PA 的平均分子质量降低,造成制品强度下降。第二,PA 在固化结晶时,要有充裕的结晶时间,结晶度愈高,晶粒愈细,冲击韧性愈好。为获得一定的性能,必须控制好结晶度。第三,制品在使用期内吸水,能起增韧作用。如果制品的水分含量低,常会太脆而失效。水对 PA 制品可能是需要的,也可能不需要。控制制品中含水量,是防止塑件失效的重要方面。第四,PA 制品中含水量也影响到尺寸。吸水膨胀会改变尺寸,使塑料尺寸超出公差,也会使粘接等加工困难。

聚酰胺齿轮与聚甲醛齿轮啮合传动已普遍应用。一般用于小模数齿轮。用来传递动力的模数 1mm 以上的聚酰胺齿轮,还需慎重试验。由于疲劳强度不足,在与金属齿轮啮合时 PA 齿轮上的轮齿会全部折断。

⑩ 聚碳酸酯(PC) 它是无定形聚合物,有突出的抗冲击强度和抗蠕变性能,并较能耐寒耐热。PC 的力学性能和电绝缘性能优良,并有较好的透明度。制品成型收缩率较小,塑件尺寸精度高。它是产量仅次于 PA 的工程塑料。

PC 熔体的黏度高,流动性差。所需模具的温度高,成型件脱模困难。物料注射充模时流动和温差产生的残余应力较高。尤其在塑料件的嵌件周围、成型孔的周边和截面突变处。在外力等环境因素下,易产生应力开裂。PC 制品有较高的缺口敏感性。低温脆化温度在 -15°C 以下。PC 塑料还有高温水解的特性,在 65°C 以上的高湿条件下会产生应力开裂。

⑪ 聚甲醛(POM) 它是高结晶度的聚合物。具有优良的物理和力学性能。耐磨、耐水、耐腐蚀,尺寸稳定性好。熔体流动性中等,物料熔融温度范围小,热剪性强,容易分解。成型收缩率大,且波动范围大。用玻璃纤维增强改性,可减小成型收缩率。添加聚四氟乙烯、石墨和二硫化钼等可制成耐磨自润滑的支承零件。POM 制品的热稳定性差,易燃烧。长期在大气中曝晒老化较快。

⑫ 聚苯醚(PPO) 它是无定形聚合物。成型收缩率和吸水性小,阻燃性能好。热变形温度高达 190°C ,有良好的抗蠕变性能。其熔体流动性差,需 $300\sim 330^{\circ}\text{C}$ 的高温加热熔化。制品容易应力开裂。生产中用各种改性 PPO,其中以混合聚苯乙烯的改性 PPO 的 Noryl 应用最多。其热性能和力学性能与聚苯乙烯含量有关,与聚碳酸酯相近。其黏度比聚碳酸酯低,高于 ABS。制品的工作温度在 100°C 以下,化学阻抗性差。

1.2.1.2 热固性塑料

热固性塑料是指在一定的温度和压力下熔融,保持一定的时间而固化,固化后成为不能熔融、不能溶化的刚硬材料。

① 酚醛塑料(PF) 它是使用最早、产量最高的热固性塑料。其成本低,易模塑。有低蠕变和良好刚性。耐酸和溶剂,但不耐碱。仅能着暗色,冲击强度差。

以酚醛树脂为基体的酚醛塑料品种很多。有酚醛塑料的主要类别及用途 GB 1404 标准。如玻璃纤维填充的酚醛玻璃钢制品,强度高并有良好耐热和耐腐蚀性能。木粉充填的酚醛塑料,俗称胶木。成本低且易成型,用于制造普通的电气开关。石棉纤维增强的酚醛塑料用于化工防腐和摩擦制动。近年来开发的新品种,有快速固化的酚醛塑料、浅色无氨酚醛塑料和阻燃耐电弧酚醛塑料等。

② 环氧塑料(EF) 它是以环氧树脂为基体的各种复合材料。有良好的力学、化学阻抗和电绝缘性能。工作温度可达 130°C ,耐盐水且耐候性好。成型收缩率小,易模塑成型各种电工和机械零件。环氧树脂与金属、无机材料和各种纤维有突出的黏结性能,因此用于微电子器件的塑封,并制造覆铜箔的印制电路板。

③ 脲醛塑料(UF) 它是以脲甲醛树脂为基体,纤维素为填料,有多种添加剂的塑料。可制成半透明和不透明塑料,色泽如玉,俗称电玉塑料。容易着色、难燃、电绝缘性比 PF 好,使用温度 100°C 。用于瓶盖、纽扣、日用品和电工零件。但抗冲击能力差,吸水率高,易吸潮变形开裂。

④ 三聚氰胺甲醛塑料 (MF) 它是以三聚氰胺甲醛树脂为基体, 纤维素为填料, 有多种添加剂的塑料。耐水和耐热比 UF 好, 使用温度可达 150°C 。自熄并耐电弧, 刚硬且表面有玻璃质感, 无毒且不易沾污。用于制造杯盘餐具、桌面层压板和电器零件。但尺寸稳定性和冲击强度低。

⑤ 聚氨酯 (UP) 它是由异氰酸酯与多元醇反应合成。聚氨酯制品的密度为 $6\sim 1220\text{kg}/\text{m}^3$ 。它可以制成低密度的泡沫制品, 密度处于 $10\sim 80\text{kg}/\text{m}^3$ 范围。软质的低密度泡沫, 用于包装、床具和装潢。具有高的断裂伸长率和回弹, 有装饰型、回弹型和阻燃型。硬质的低密度泡沫, 是绝热材料。用于保温冷藏, 也用于防振和包装。制成高密度的泡沫制品, 密度处于 $250\sim 1000\text{kg}/\text{m}^3$ 范围。软质的高密度泡沫, 用于汽车和家具的装饰皮革。硬质的高密度泡沫, 用于家具外壳和鞋底。

大量的结构泡沫制品用反应注射 (RIM) 加工。结构泡沫制品具有皮层-微孔芯-皮层的结构。用于汽车内饰件, 各种器械的外包覆层。反应注射还用来生产聚氨酯弹性体制品, 并有短纤维或填料增强品种, 具有较高弯曲强度和硬度。用来制造薄壁构件, 汽车结构件如防护板和挡泥板等。聚氨酯有热塑性品种, 可成型加工刚性制品。有的品种纺丝制成织物, 有的品种制成涂料。

⑥ 不饱和聚酯 (UPE) 用玻璃纤维增强的不饱和聚酯制品, 在复合材料工业中应用最多。此种不饱和聚酯玻璃钢制品, 质轻强度高, 又能在室温下固化, 便于手糊法加工船体等大型壳体。因此被应用在航空、船舶和建筑行业。不饱和聚酯添加玻璃纤维和多种填料, 在加工线上连续生产片状 SMC 或块状 BMC 模塑原材料。再经热压模塑固化成各种板或壳类结构件, 已用于汽车、建筑和家具等行业。

1.2.2 物理化学性能

塑料的力学性能的最大特点是高弹性和黏弹性, 比金属材料复杂得多。这将在第 2 章和第 3 章中详细陈述。从加工工艺角度设计塑料制品, 还要了解塑料熔体的流动性能, 它的高黏度和剪切变稀的特征。塑料的非力学性能, 主要涉及热性能、化学阻抗、渗透性、易燃性、电性能、耐候性、光学性能、机械摩擦磨损和硬度, 共九个方面。掌握塑料的各种性能和测试, 有助于合理选择材料和拟订塑料制品的性能指标。易燃性和耐候性在第 13 章建筑制品中介绍。电性能在第 15 章塑料电工制品中陈述。光学性能在第 14 章塑料光学制品介绍时说明。机械摩擦和磨损性能在第 12 章塑料支承和齿轮中陈述。硬度在第 11 章和第 16 章叙述塑料和橡胶抗振以及密封件时陈述。

本节简略地陈述热性能、化学阻抗、渗透性三个方面。

1.2.2.1 热性能

塑料的热性能以短期、长期、低温和高温四个领域进行测试研究。

① 短期热性能 聚合物的短期热性能过程是完全可逆的, 也即对试样没有危险性。其性能有熔点、软化温度, 及力学性能随温度的变化。这里所指的力学性能有屈服应力、拉伸强度和硬度, 还有线膨胀系数和热导率。所有这些性能的测试已达到相当高的精确度。但是不能以这些短期的力学性能来推测长时期的老化性能。这些性能被用来比较材料和进行质量控制, 并限制材料的应用。

成型的热固性塑料和硫化的橡胶制品已经交联, 不存在熔点或软化温度。对这些材料有一个分解温度。

拉伸或弯曲的应力-应变试验应该在热箱中进行, 以提供一定温度下的短期的屈服应力、弹性模量和断裂伸长率。绝热的“热箱”也应该可用液态 CO_2 进行低温试验。

热变形温度 (HDTUL 或 HDT, heat deflection temperature under load), 是塑料试样浸在一种等速升温的液体传热介质中, 在简支梁的静弯曲负载作用下, 试样弯曲变形达到规

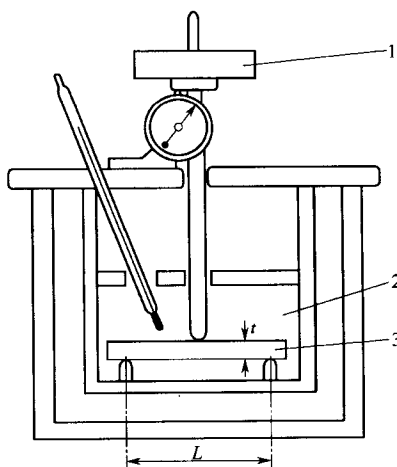


图 1.2 热变形温度的测量仪示意
1—负载 W ；2—传热介质；3—试样

定值时的测定温度。如图 1.2 所示，传热介质常用低黏度的变压器油或硅油。其等速升温的速度为 $(12 \pm 1)^\circ\text{C}/6\text{min}$ 。砝码负载 W ，试样宽度 b ，高度 t ，两支座中心间距离 L 。因此有试样的最大弯曲正应力

$$\sigma = \frac{3WL}{2bt^2} \quad (1.1)$$

负载与试样的几何参数，使试样产生最大弯曲正应力 $\sigma = 1.82\text{MPa}$ 或 0.45MPa 。在试样中点弯曲变形量达到 0.21mm 时，此时的温度即为相应 σ 下的热变形温度。以上所述是 GB 1634 塑料弯曲负载热变形温度，简称热变形温度试验方法。对应美国标准 ASTM D 648，德国 DIN 53458，国际标准 ISO 75。各标准测得热变形温度值相差不大。ASTM D 648 标准中，试样中点下垂量为 0.254mm 。聚醚酰亚胺 PEI+30%FG 在 1.82MPa 下的热变形温度是 213°C ，而聚醚醚酮 PEEK+30%FG 是 288°C 。表 1.1 所列

各种材料的热性能均为 ASTM 标准所测。

维卡软化温度是塑料于液体传热介质中，在一定的负荷和一定的等速升温条件下，试样被 1mm^2 针头压入 1mm 时的温度。我国有 GB 1633 热塑性塑料软化点（维卡）试验方法。在使用负荷 1000g 时与国外 ASTM D 1525 和 ISO 306 标准相似。本方法适用于质量控制和材料热性能比较。对于无定形或低结晶的塑料，此种测试方法排除了软化以前蠕变变形的影响。目前，维卡试验方法还被用于橡胶密封垫的热性能测试。

② 低温下脆化 在低温下所有聚合物都会增加刚度，减小柔度。无定形聚合物和结晶型聚合物中的无定形形态转变到玻璃态。橡胶改性或增塑的混合物的黏度增大。低温也降低了分子链上结合键的柔度，减小了自由体积。所有这些导致了塑料在低温下的脆化，减小了冲击阻抗能力。

标准的低温下拉伸试验要耗费许多时间，其拉伸模量的数据很难理解。因此设计了一些扭转试验的方法测得剪切弹性模量。如 ASTM D 1043，对应 ISO 458 定义了专门的扭转试样被冷冻变形时的温度。又如 ASTM D 746，对应 ISO 974 试验标准，将截面 $0.25\text{in} \times 0.075\text{in}$ ($1\text{in} = 25.4\text{mm}$ ，以下同) 试样的自由端伸出 1in ，浸泡在低温液体中。在控制温度下降过程中，对试样进行冲击。当 10 个试样中有 5 个被击断时，认定为脆化温度。我国有 GB 5470 塑料冲击脆化温度试验方法，它仅适用软质塑料。

③ 长时间的热降解 长时期地处于高温下，会促使塑料产生不可逆的降解。诸如被空气中的臭氧攻击而氧化；增塑剂等添加成分的挥发；较快的蠕变速度和较差的抗疲劳性，引起聚合物分子链的逐步断裂。一些聚合物的分子结构中存在敏感的弱点，如支链、不饱和的双键、聚合时剩余的引发剂、活性的氢原子或不稳定的分子链的始末端。这些弱点是氧、臭氧、潮气、各种辐射的射线或者热的攻击点。热降解的结果几乎都是高分子链的断裂，导致平均分子质量的下降。在这热解聚过程中，分子链束的始末端越来越多，使材料的热稳定性越来越差。当然，每种聚合物在一定条件下有各自的热降解的机理。

各种塑料在较高的温度下，长期连续安全工作的合适温度，国外手册上已有 UL 温度指标。它的全称是无负载下连续安全工作的额定温度。试样如果被作用了负载，会增加塑料热性能的复杂性。因此该实验试样要排除力学应力的作用。大量试样在加热箱中按设定温度保温 60000h （美国 UL 746）或 20000h （ISO 2578）。测得电性能（E）和力学性能（M）为原