
聚合物与复合材料力学

〔苏〕 A.K. 马麦斯捷尔 B.П. 达穆日 Г.А. 捷捷尔斯 编

刘统畏 等译 王震鸣 刘雁铭 校

新 时 代 出 版 社

聚合物与复合材料力学

A.K.马麦斯捷尔

〔苏〕 B.П.达 穆 日 编

Г.А.捷 捷 尔 斯

刘统畏 张玉坤 王 虹 译

王震鸣 刘雁铭 校

新 时 代 出 版 社

内 容 简 介

本书专门论述聚合物与复合材料产品和结构工程计算的理论和 方法。叙述和分析各种固体应力-应变状态所需的有关知识;探讨用于描述 聚合物与复合材料的各种变形关系;分析了非线性各向异性体的弹性力学方程;详细地研究了粘弹性的微分和积分表达式以及非线性粘弹性的各种描述方法。通过大量试验研究表明,可用温度-时间和湿度-时间比拟来预测各种聚合物与复合材料的蠕变。阐述了塑性力学的三种基本理论,即描述聚合物材料复杂加载效应的流变理论、形变理论和局部形变理论。提出了根据材料组分性能计算复合材料刚度的简单工程算法。

本书很注重复杂应力状态下的强度问题。用各种试验资料证实了强度曲面理论的正确性。研究了各种材料损伤的积累过程,并根据这一现象提出了材料破坏的统计理论。

在阐述各种结构元件计算原理的同时,本书系统地研究了由聚合物与复合材料制成的各种杆、梁、板和薄壳结构,特别着重分析由这些材料制成的结构的稳定性问题。探讨波在聚合物与复合材料内传播的计算特点,并对复合材料结构优化设计问题也作了专门研究。

本书可供从事复合材料研究、设计、生产的工程技术人员和有关院校师生使用参考。

СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ
И КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
А. К. Малмейстер В. П. Тамуж Г. А. Тетерс
Издательство «Знание», 1980

聚合物与复合材料力学

〔苏〕 А. К. 马麦斯特尔 В. П. 达穆日 Г. А. 捷捷尔斯 编
刘统畏 张玉坤 王 虹 译
王震鸣 刘雁铭 校

新时代出版社出版 新华书店北京发行所发行

国防工业出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 26印张 599千字

1988年4月第1版 1988年4月北京第1次印刷

印数: 0001—2450册

ISBN7-5042-0013-1/O2 定价6.40元

译者的话

本书是由苏联拉脱维亚科学院聚合物材料力学研究所的一些学者编写的，也是他们多年来从事聚合物与复合材料研究的成果。

书中全面而系统地论述聚合物材料与复合材料工程计算的理论和方法，内容比较丰富，有较大的参考价值。

聚合物与复合材料一般指近代使用的各种工程塑料和合成树脂，包括一些复合材料与复合结构。随着这些材料在国民经济各部门的广泛应用，在理论计算方面需要进行深入研究和不断完善。只有进行正确计算，才能做到合理设计和使用，并保证产品和结构的质量。虽然本书探讨的问题属于一般性基础理论，但所做的各种试验和论证，包括各种计算方法，对于我国当前的教学与科研生产是有益的。

在本书翻译过程中，得到了中国科学院力学研究所王震鸣研究员的大力帮助，并审校了全部译稿；吴贻芝为本书插图作了精心的描绘，在此一并表示感谢。

由于译者水平有限，缺点错误在所难免，敬请读者指教。

第三版前言(摘译)

目前,全世界都在大力推广用聚合物生产各种新型结构材料。越来越普遍地利用各种聚合物作为各种纤维增强的高强度复合材料的粘合剂。同时,特别注意更加合理地利用各种聚合物和复合材料。对用聚合物和复合材料制成的各种结构元件与产品,作进一步的科学论证,引起了极大的兴趣。这一方面,已有许多专著,其中一些重要的已列在本书的参考文献中。

本书的第三版保持了以前各版的特点:深入探讨聚合物与复合材料结构计算的理论和方法,但是,在此只限于阐述这方面值得研究的主要问题,因此,本书可作为阅读其他专著的入门书。

聚合物与复合材料力学,除了引用一些已经经典化的原理外,本书还收入了近年来一系列新的研究成果。值得指出的是,1974年美国将本书的第二版译成英文出版;1977年德意志民主共和国又译成德文出版,并作了许多补充,补充的内容已收入在这一版之中。

本书完全保持了以前各版的内容结构:关于聚合物与复合材料力学方法的资料;粘弹性和塑性力学、增强理论、强度与破坏理论等方面的基础知识;简单结构元件:杆、板、薄壳的计算方法。此外,增加了关于聚合物及复合材料的粘弹性特性、强度与破坏理论的内容;补充了关于瞬时强度、持久强度和复杂应力状态下破坏的一些典型试验资料;阐明了计算聚合物与复合材料力学性能的理论 and 试验方法;还补充了复合材料薄壳的理论、计算和稳定性问题;介绍了复合材料薄壳、薄板优化设计的原理。

第一版前言

目前,在工业、农业、建筑和运输部门中,广泛采用各种聚合物材料,这意味着技术发展前进了一大步,并可以改进和加速工艺流程,有助于完善各种机器及设备结构,降低成本,提高产品质量和劳动生产率。

在苏联,由于各种塑料与合成树脂生产的迅速发展,摆在设计人员面前的重要任务是,在各种建筑、结构、产品和零件中广泛采用塑料,甚至能够在复杂条件下工作:如长时间加载、且压力大速度高;有腐蚀性介质、辐射、电场、磁场、电磁场、声场和高真空等。

为了使塑料更广泛地应用到日常生活中去,并探讨这种通用而且先进的材料,必须综合开展各项研究工作,总的看来可分为两个主要阶段:1)按照要求的性能合成各种新的聚合物材料,研究这些材料生产与加工工艺方法的理论和实践问题;2)利用第一阶段研究出来的聚合物材料(即生产工艺已经稳定,均质性已有充分保证的材料)制作各种结构和产品,并建立它们的计算理论和改进计算方法,在一定范围内研究它们的各种性能。

聚合物材料结构的计算理论和方法的发展,当然要依据现有各种金属、混凝土、钢筋混凝土、木质结构及制品的计算理论和方法,但是,由于聚合物材料有各种不同的特点和更复杂的性质,而一些传统材料的计算理论与方法已不能再直接应用。

以聚合物为基础合成的各种材料有一套特殊的力学性能:聚合物力学性能对温度的敏感性;非晶体结构线性聚合物的三种物理状态(玻璃态、高弹性态、粘性流态);极其多样的力学松弛过程,它与聚合物内存在的松弛和弹性滞后时间值的范围很宽有关;结晶聚合物的力学特性,取决于晶化、溶解和再晶化过程的缓慢及多阶段性;固体聚合物的强制高弹性现象。

各种复合材料,或由若干成分(其中包括聚合材料)组成的聚合物结构,还具有一些更复杂的性能。例如大家知道,在聚合物材料中充填有增强材料,其强度和变形性能是各向异性的。

聚合物材料结构的计算理论将更为复杂,它应比各种传统材料结构的计算理论具有更高的普遍性。如果说在此以前,对大多数情况下材料的性能可以近似地用虎克定律描述,那么,现在必须考虑从已知的定律中选出适合于实际应用的更精确的定律,甚至要建立加载和其他各种因素影响下,适应于聚合物材料性能的一些新的定律。

由此可见,对于阐述和探讨一般结构计算理论和方法的各种书籍中,目前,迫切需要增加聚合物材料结构的计算内容。

本著作只探讨各种聚合物材料结构的计算理论和方法,并限于初步阐述一些有关的基本问题。

现要求读者具有材料力学经典理论的全面知识,因本书对此阐述的不够全面,有不少地方介绍得很简单。许多公式的证明都省略了,有些地方只是给出了经典材料力学方

面的结论。除个别情况外，一般引证不说明来源。附上很长的参考文献，目的是帮助读者独立地找到所需要深入了解和加深认识的资料。

高等学校中的经典材料力学课程，主要研究符合虎克定律的一些各向同性弹性材料，并且其中的每一章节和每个例子，都是经过几十次甚至上百家杂志的论述，或作过专门研究的。

的确，非弹性或半弹性材料（如聚合物材料）的性状及其在各种结构和构件或零件中的应用方面，已解决了不少问题，但是，介绍这方面情况的文章大多分散在一些杂志和学术专著的个别章节中，还没有认真总结和给予应有的评价。在现代，关于聚合物材料力学的学说有大批学者（物理学家、物理-化学家、化学-物理学家、机械师）和实际工作者（工艺师、设计师）正在进行研究。在这方面，已经取得的初步成就是：通过聚合物材料的温度-时间特性解决了一些实际问题；研究出确定聚合物材料性能的许多方法；出版了论述聚合物材料制品和结构的生产与使用等问题的一些专著及参考手册。

还须进一步深入研究的任务有：在材料承载时的应力、应变、温度、时间、外界环境及其他条件之间的物理结构关系的基础上，建立各种工程计算方法，因此，

1) 对设计师，必须选择合适的材料和制造方法，确定产品和结构的最佳结构形式，规定它的有效使用期限；

2) 对工艺师，必须执行规定的工艺方法，以保证产品或结构材料的规定性能和最佳性能；

3) 对于机械制造者，必须用各种聚合物材料按最佳的工艺流程生产出各种零件和构件，并装配成新机器。

上述的第二和第三点，是保证产品和结构制造的必要措施和方法，在本书中不作研究。我们只限于研究聚合物材料的力学问题，即在正确应用工业部门生产的各种聚合物材料、产品和结构中遇到的有关力学问题。

应当指出，现有的各种精确度的工程计算方法还是必需的，即

1) 叠加计算（精确度为 $\pm 20\%$ ）：用于选择合适的材料和制造（加工）方法；

2) 近似计算（精确度为 $\pm 10\%$ ）：用于比较制成结构时在选择材料和制造方法的各种可能方案；

3) 精确计算（精确度为 $\pm 5\%$ ）：用于确定产品的最优造型和决定有效使用期。

产品结构的技术方案用逐次逼近法确定。因此，在设计阶段上述三种计算方法都要使用。

各种计算参数应制定标准，需制定标准的有：计算载荷、材料的计算特性、使用条件、强度和刚度贮备以及根据这些参数确定产品标准的有效使用期限。应在制定标准的基础上确定载荷分配、材料特性和工作条件的统计曲线，以及确定材料费用和产品制造费用的各种经济指标。关于制定材料计算标准的工作，应由主管机关负责。因为很明显，象造船、汽车制造和建筑等生产部门中的一些标准是各不相同的。

为了更详细地研究各种可能的计算方法，首先必须进行产品和结构的刚度计算。众所周知，某些聚合物材料（如玻璃钢等）的强度不低于钢材，在许多情况下甚至超过钢材。但是，聚合物材料的弹性模量则比钢低1至3个数量级。因此，在工程计算中，无论是强度计算还是刚度计算，对于聚合物材料，首先要进行刚度（稳定性）计算。为此，

要改进聚合物材料产品和结构强度的计算方法，正确地计算持久强度是当前迫切需要解决还未解决的问题，因为刚度计算通常是与确定产品最优造型分不开的。

编写本书的目的是向广大化学家、工艺师和工程师们介绍聚合物材料结构的工程计算特点。编写这种书是一个尝试，它不可能阐述得很完整，作者努力在各版中加以改进。

目 录

主要符号	1
导论	2
1. 物理力学——工程计算方法发展的理论基础	2
2. 材料力学的研究方法	4
2.1 作用于结构上的内力和应力的确定方法	5
2.2 结构计算图	5
2.3 载荷计算图	6
2.4 载荷值的分布曲线	6
2.5 结构承载能力的确定方法	7
2.6 载荷标准与材料强度标准的制定方法	7
2.7 制定标准的经济依据	8
2.8 抗变形能力	9
2.9 材料的计算模型	10
2.10 应力张量和应变张量	11
2.11 张量之间的关系	12
2.12 对称性	14
2.13 复合材料	14
2.14 初应力、局部应力和特殊应力与相应的应变	14
第一章 应力-应变状态	15
1.1 应力状态理论	15
1.1.1 标量和矢量的概念	15
1.1.2 求和法则与科罗内克(Кронекер)符号	16
1.1.3 应力张量	17
1.1.4 特殊情况——平面应力状态	19
1.1.5 应力张量的对称性和平衡方程	20
1.1.6 二阶张量主轴和张量的不变量	23
1.1.7 张量的连乘和叠加以及推导张量不变量的另一方法	24
1.1.8 莫尔圆作图法	24
1.1.9 应力偏量和剪应力集度	27
1.2 应变的几何理论	28
1.2.1 一维应变	28
1.2.2 二维与三维应变	29
1.2.3 有限应变张量	32
1.2.4 微小应变张量	33
1.2.5 应变张量的几何学	34
1.2.6 应变张量的不变量	35
第二章 应力与应变之间的关系	37
2.1 线性弹性体	37
2.1.1 广义虎克定律	37
2.1.2 矩阵符号	39
2.1.3 弹性力的功和弹性体的势能	41
2.1.4 在特殊情况下独立系数个数的减小	42

2.1.5	坐标轴转动时系数 a_{ij} 和 A_{ij} 的变换	46
2.1.6	坐标系—坐标轴转动时正交异性体柔性系数的变换公式	47
2.1.7	柔性系数的特征曲面	49
2.2	非线性弹性体	51
2.2.1	非线性弹性体的单向拉伸	51
2.2.2	高阶弹性张量	52
2.2.3	建立非线性弹性体方程的另一方法	56
2.3	滞弹性材料	57
2.3.1	流变方程的统计解释	58
2.3.2	应力与应变间的积分关系	73
2.3.3	温度-时间比拟法和蠕变的预测	85
2.3.4	非线性典型物体	94
2.3.5	非线性遗传材料的蠕变	96
2.3.6	各向异性材料的蠕变	101
2.4	塑性体	104
2.4.1	形变理论	104
2.4.2	屈服条件	105
2.4.3	流动理论	107
2.4.4	数学塑性理论的一般基础	110
2.5	局部应变的理论基础	120
2.5.1	坐标系集	120
2.5.2	虎克定律	122
2.5.3	加载与卸载	123
2.5.4	不可压缩塑性体的各向同性张量	125
2.5.5	滞弹性体	128
2.5.6	麦克斯韦-托姆松物体	129
2.5.7	局部应变理论的方案	130
2.5.8	蠕变材料的分阶段复杂加载和硬化理论	133
2.5.9	局部应变理论中的屈服面	137
2.6	增强理论	139
2.6.1	单向增强材料的弹性柔度张量	143
2.6.2	双向增强材料的弹性柔度张量和刚度张量	151
2.6.3	确定空间增强复合材料的应变	159
3	第三章 极限温度-时间的应力-应变状态与强度理论	164
3.1	强度理论的几何学	164
3.1.1	简单加载	165
3.1.2	强度曲面	166
3.1.3	一维拉伸或压缩	167
3.1.4	二维拉伸-压缩	168
3.1.5	平面应力状态	171
3.1.6	立体的应力状态	172
3.1.7	历史资料	173
3.1.8	极限状态的其他曲面	177
3.1.9	通过试验确定复合材料的强度曲面以及温度对强度曲面几何图形的影响	177
3.2	持久强度	182
3.2.1	在单面应力状态下复合材料的等持久强度曲面	182
3.2.2	应变与破坏之间的关系	186
3.3	聚合物与复合材料的疲劳强度	187
3.3.1	基本资料	187
3.3.2	在周期性拉伸-压缩下玻璃胶布板内能量耗散的试验数据	191

3.3.3 低周疲劳	195
3.3.4 考虑损伤累积的寿命计算	196
3.3.5 不定常载荷下损伤累积的试验研究	199
3.3.6 疲劳的快速试验法	200
3.3.7 复杂应力状态的计算	201
3.3.8 各向同性体在简单拉伸与二轴拉伸时持久强度的比较以及等持久强度曲线的建立	203
3.3.9 上述方法与某些理论的比较	208
3.3.10 带损伤材料的常数计算	210
3.3.11 用声发射法记录玻璃钢的损伤过程	218
3.3.12 研究复合材料损伤的方针与工具	219
第四章 杆件及梁的刚度	224
4.1 杆件的拉伸	224
4.1.1 各向异性弹性杆件在轴向力和自重作用下的拉伸	224
4.1.2 粘弹性材料制作的杆件	227
4.1.3 蠕变特性不同的两种粘弹性材料制作的杆件内力的再分布	228
4.2 梁的弯曲	231
4.2.1 各向异性弹性杆件在端部加载时的弯曲	231
4.2.2 各向异性悬臂梁在横向力作用下的弯曲	233
4.2.3 定向复合材料梁弯曲时剪力的计算	235
4.2.4 粘弹性梁的弯曲方程	239
4.2.5 在弯曲振动问题中对剪切的考虑	241
4.3 在粘弹性杆件中波的传播	242
4.3.1 谐波的传播	242
4.3.2 应力矩形脉冲的传播	244
第五章 板和壳	247
5.1 板	247
5.1.1 各向异性板弯曲的微分方程	247
5.1.2 矩形正交异性板的弯曲	248
5.1.3 正交异性板弯曲时考虑横向剪力的计算	249
5.1.4 圆形和椭圆形板的弯曲	252
5.1.5 一般各向异性矩形板在四周均布力矩作用下的弯曲	253
5.1.6 复合材料板的蠕变	255
5.2 壳	257
5.2.1 壳的几何学	257
5.2.2 具有有限剪切刚度的各向异性薄壳理论的基本关系式	261
5.2.3 承受对称载荷的圆柱形薄壳的无矩理论	268
5.2.4 在圆柱形薄壳中剪切对边界效应扩展的影响	273
5.2.5 具有有限剪切刚度的各向异性扁壳	274
第六章 稳定性	292
6.1 杆件和薄壁杆件	292
6.1.1 两端铰支的弹性杆件的稳定性	292
6.1.2 小剪切刚度情况下的临界力	293
6.1.3 开口弹性薄壁杆件的稳定性及基本方程式	295
6.1.4 中心受压薄壁杆件的稳定性	297
6.1.5 纯弯曲下平面剖面的稳定性	299
6.1.6 弹-塑性杆件的稳定性	302
6.1.7 十字形截面薄壁杆件在塑性变形时的扭转失稳模型	304
6.1.8 在线性蠕变下杆件的稳定性	307
6.1.9 在非线性蠕变下杆件的稳定性	309
6.2 薄板的稳定性	312

6.2.1 各向异性弹性薄板的稳定性	312
6.2.2 材料蠕变时各向异性薄板的稳定性	315
6.2.3 在考虑横向剪切变形蠕变时薄板的稳定性	317
6.2.4 在塑性变形过程中受压薄板的稳定性	320
6.2.5 利用流动理论研究受压薄板的稳定性	324
6.2.6 局部变形理论在稳定问题中的应用	327
6.3 薄壳的稳定性	329
6.3.1 薄壳小挠度局部失稳的基本关系式	329
6.3.2 正交异性圆柱壳在轴压下的稳定性	330
6.3.3 薄壳在大挠度情况下的稳定性	333
6.3.4 正交异性圆柱曲板在轴压下的稳定性	335
6.3.5 在塑性变形时圆柱壳的稳定性	338
6.3.6 在材料蠕变情况下圆柱壳的稳定性	339
6.3.7 复合材料的力学性能特征及其在计算板和壳时对选择运动学模型的影响	342
6.3.8 铁摩辛柯模型在线性范围内的几何关系	343
6.3.9 在非线性提法中的几何关系	346
6.3.10 正交异性圆柱壳在考虑横向剪切变形及蠕变时的稳定性	348
6.3.11 正交异性球形扁壳在大挠度下考虑剪切变形及蠕变时的稳定性	354
6.3.12 粘弹性薄壳在屈曲后阶段的变形	362
6.3.13 血管壳的稳定性	364
第七章 优化设计	368
7.1 复合材料层壳	368
7.1.1 优化问题的一般概念	368
7.1.2 增强层合塑料圆柱壳的目标函数和约束条件	370
7.1.3 层合塑料圆柱壳参数的优化	373
7.1.4 加有粘弹性填料的复合材料圆柱壳受轴压时的优化	374
7.1.5 沿厚度不均匀增强的圆柱壳的优化	377
7.2 复合材料的空间结构与混合结构	380
7.2.1 在稳定性问题中空间增强复合材料结构的优化	380
7.2.2 混合复合材料三层板的优化	386
参考文献	391

主要符号

A_{ij}	——弹性系数的矩阵符号	S_1^*, S_2^*, S_3^*	——张量 σ_{ij} 的不变量的另一种形式
A_{ijkl}	——弹性系数	s_{ij}	——应力偏量分量
a_{ij}	——柔性系数的矩阵符号	S_{1D}, S_{2D}, S_{3D}	——应力偏量不变量
a_{ijkl}	——柔性系数	T, σ_u	——切向应力强度
E	——弹性模量 (有时也代表持久弹性系数)	t	——时间
e_{ij}	——应变偏量分量	U	——物体的势能
F	——横截面面积	$u_i (u_1, u_2, u_3)$	—— x_i 轴上的位移分量
F_i	——体积力	u, v, w	——在坐标系 x, y, z 中的位移分量
G	——剪切模量	$x_i (x_1, x_2, x_3)$	——坐标轴
G_{12}, G_{13}, G_{23}	——各向异性体的剪切模量	x'_i	——旋转后的坐标轴
H	——瞬时弹性模量	Γ, ε_u	——剪切强度
H, H_{12}, H_{21}	——扭矩	δ_{ij}	——科罗内克符号
I	——惯性矩	ε_i	——应变分量的矩阵符号
I_1, I_2, I_3	——应变张量不变量	ε_{ij}	——应变张量分量
I_1^*, I_2^*, I_3^*	——应变张量不变量的另一种形式	$\varepsilon = \frac{1}{3} (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33})$	——平均应变
I_{1D}, I_{2D}, I_{3D}	——应变偏量不变量	ν	——泊松比
k	——体积压缩模量	$\nu_{21}, \nu_{31}, \nu_{23}$	——各向异性体的泊松比
l_{ij}	——旋转轴的方向余弦	$\sigma = \frac{1}{3} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$	——平均应力
M_1, M_2, M_x, M_y	——弯矩	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	——主应力
N_1, N_2	——法向力 (薄膜力)	$\sigma_i (\sigma_1, \dots, \sigma_6)$	——应力分量的矩阵符号
n	——松弛时间	$\sigma_{ij} (\sigma_{11}, \sigma_{12}, \dots, \sigma_{33})$	——应力
$n(n_1, n_2, n_3)$	——平面的法线矢量	σ'_{ij}	——在旋转后坐标系中的应力
$p(p_1, p_2, p_3)$	——应力矢量		
Q_1, Q_2, Q_x, Q_y	——横向力 (剪力)		
S	——曲面		
S, S_{12}, S_{21}	——切向力		
S_1, S_2, S_3	——张量 σ_{ij} 的不变量		

只在个别章节中使用的符号, 在引用时加以说明。

导 论

1. 物理力学——工程计算方法发展的理论基础

力学是物理学的一个基本组成部分，它研究物体、介质、部件、系统和机械等在空间和时间上的运动。自从量子力学出现以后，力学的传统定义应加以修正，也就是说，力学是研究远慢于光速的物体的运动。尽管有这种限制条件，力学所包括的科学内容在人类的现实生活中也是极其重要和非常广泛的。

根据现代的理解，运动中应变的或限运动限应变的各种刚体、介质、部件、系统（等离子体、气体、液体、材料，由现代最优性能的材料所制成的产品、结构、机械和设备）等，处在大载荷、高速加载和高速运动、高温、低温、真空、腐蚀性介质的情况下，在引力场、磁场、电场、电磁场、声场和超声波场，有光照和辐射，瞬时的、短时期或长时期工作的情况下的运动、变形或不允许运动和限制变形的状态、有效功及相互作用的一般理论认识，这就是力学。

根据这一定义，材料力学的内容也属于力学的一个范畴。为了解决某些特殊问题，力学还有下列各种分学科：固体力学、可变形体固体力学、连续介质力学等。在这些学科中，只有在少数情况下可以遇到材料力学或具体材料（金属、混凝土、聚合物）的力学概念。

对任何结构材料均适用的固体物理理论，至今还没有完全确立起来。现在，已经掌握了各种高质量材料的生产方法，然而，这些材料的力学理论还处在发展之中，而发展这些理论的困难是多方面的。

弹性理论作为各种可靠的工程计算的基础，已经有一百多年的历史了。弹性理论的基础是牛顿力学的一些基本定律：质量守恒定律、动量守恒定律和热力学第一定律（即能量守恒定律）。在这里，能量转换仅指机械能的转换，即外力对位移所做的功或弹性体变形时内应力对应变所做的功，将转换成与所做的功相等的可逆的内部弹性势能。把弹性理论看作“万能”，认为可以根据弹性理论来解释材料承载过程的实质，并用弹性理论方法来进行各种工程计算——这是阻碍材料力学发展的原因之一。

当然，各种真实材料有效功的深入研究表明，能量守恒定律还是有效的，但是，应变能不仅仅可以转换成弹性势能，而且可以转换成热能、化学能和表面能。材料变形时它的结构发生变化，即部分应变能消耗于改变它的结构和进行第一和第二相的变换。在强载荷下，一部份应变能消耗于材料破坏和化学分解过程中，在高速加载下，应变能部份消耗于产生爆炸能，甚至是发射能。应变能即机械能向其他各种非机械能的转换，与腐蚀性介质（表面的和渗透性的）、各种场（磁场、电场、电磁场等）和光照情况的存在，尤其是与温度有关。

一部份机械能转换为非机械能，也意味着材料的性能发生了变化，即出现非弹性特性。因此，应变与应力之间的关系不能仅根据热力学定律确定。在热力学第二定律的表

达式中应加入一数值,以考虑与材料的成分和结构、物体和作用于物体的周围介质物理状态及其变化情况有复杂联系的无法补偿的一部分热量。早在本世纪四十年代末,在拉脱维亚科学院首先成立了材料力学研究室,开始把物理力学当作一门学科来研究,通过近年来的研究,对上述问题的认识比较清楚了。

这一新学科的术语还没有完全确立起来。通常把它叫做物理力学,物理-化学力学,力学化学;有时也将这些学科统称为流变学。毫无疑问,为了得到材料在各种载荷条件下有效功的一般概念,应致力于发展建立各种具体材料不可逆过程统计理论的学科——物理力学。

在现代,不断用合成的办法制造出不同成分和结构的种类繁多的材料。因此,必须有研究这些材料的一般方法。机械能转换为各种非机械能的定量数据,必须对具体材料进行试验测定。

材料的力学是建立在物理、化学、物理化学、化学物理等方法及其综合运用的基础上的。为了把材料力学当作一门独立的新学科加以发展,必须从三个方面进行综合研究。第一,探讨在产品、结构和设备中材料的使用理论,即建立各种工程(产品)结构计算的新理论,获得工业部门使用的一些新材料的试验参数。第二,探讨材料及其制品、结构和建筑的制造和生产中的力学问题。第三,探讨全新材料的复杂力学问题。这一方面对于从事材料合成的化工人员来说,实际上是一个“基本”问题,即测定材料的有效功,确定对新材料的力学要求和可能的力学方法及其综合。

应用于材料的力学是对形变理论和断裂理论的发展。值得注意的是,温度-时间的体积应力-应变状态是由温度、六个应力张量、六个应变张量及它们的时间导数来表示的。在力学中材料的状态,通常是用 n 维空间的点来描述的,这里的数值 n 为影响因素的数量,它一般不少于14(不考虑外部介质、电场、磁场、电磁场、光照和真空之类的实际特征)。为了证明材料的状态规律,必须进行试验,但是,因为不可能进行无限次(∞^{-1})试验,因而要对每一种材料的加载情况提出各种假设,并上升为理论,然后再对若干特殊情况检验它的正确性。因为具体材料的种类繁多,所以目前有关的理论也众说纷纭。显然,今后应该通过科学概括的方法,有效地建立起适用于各种材料的比较一般的理论。每一种形变理论的发展,都应达到建立材料的数学模型的程度,并且模型的特征应由在一定范围内与材料状态和外部环境无关的物理-力学量来表示。

应变张量和应力张量之间的关系,应具有温度-时间特性。某些聚合物之类的材料,在不同的温度下可能处于不同的状态。这就是说,同一种材料在低温情况下可能是玻璃状或结晶状的,当温度较高时,将变成高弹性的,如果温度再升高,则可能变成塑性-粘性流体状的。

各向异性现象使实际材料和结构的有效功的概念大大复杂化。尽管各向异性现象不是我们所希望的,但是,如想要生产具有所需性能的各向异性材料,或者由于工艺方法所致不可避免地出现各向异性,那么各向异性可能具有工艺特点。具有完全各向异性的材料,线性参数就有21~45个,非线性参数多达数百个,确定这些参数值的试验方法目前还不十分清楚。

所有的实际材料都具有非均质的内部结构。仅在一级近似中,从力学的观点看可把某些材料看作是均质的。某种材料用其他材料填充和增强,可以得到具有所需性能的各

种复合材料。因此,必须研究填充、增强和胶接的一般理论。

在目前,正从各个方面致力研究非均质各向异性材料的力学问题。因为非均质各向异性材料广泛应用于新技术中,所以解决复杂加载,薄壁结构的稳定性与强度、腐蚀介质中的强度、疲劳强度、化学稳定性和在真空或光照下的强度等方面的各种问题,就具有十分重要的意义。

正如上面所指出的,材料力学发展的第二个方面,是材料及材料制品生产工艺的力学理论问题。一直用挤压法生产各种材料,然而流体静压对材料内部结构形成的物理-化学过程的影响的理论,研究得还很不够。振动法作为钢的生产方法时间还不长。在最近的5~10年中,已经解决了一些实际问题,并建立了有关振动粉碎(磨碎、压碎)、振动拌合、振动捣固、振动造型、振动压榨和为消除内应力而采用的重复振动、振动拉延等理论。在采用注塑法制造机器时,要求将一般的力学理论创造性地应用于各种粘-弹-塑性材料制作的实际产品中。毫无疑问,被加工材料的各种参数影响着机械的最优参数。非通常的流体力学应进一步加以发展。

必须强调指出,机械加工法包括各种振动加工法的应用,要求我们研究这些方法对材料内部结构的影响。材料内部结构的研究,或者确切地说材料内部结构力学,随着一些探测手段(偏振光,紫外线,红外线, α 、 β 、 γ -射线,电子束,中子束,声波,超声波,低声波)、谐振方法(电子顺磁谐振、核子磁性谐振、核子四极谐振等)和介电试验及其他各种物理试验的运用而不断发展。

随着各种新型材料的出现以及确定材料物理力学性能新手段的采用,非破坏性的研究方法起着关键作用,这些方法能确定结构材料的应变和强度与其物理性能之间的关系。显然,对于材料强度的各种物理性能了解得越清楚,在不作材料-结构和产品的破坏试验的条件下,材料强度的确定、预测和保证也就越可靠。

各种新型材料特别是聚合物材料,具有各种特殊性能,为了测量这些性能指标,必须设计完全新型的专用测量工具,对于各种聚合物材料几乎要建立新的计量学。为了积累关于工业用的聚合物和复合材料性能的统计资料,还要重新修订现行的一些物理-力学量的计量方法,并制造各种新的计量仪器。这项工作应与制定材料物理-力学性能的各种新标准(标量值)同时进行。

2. 材料力学的研究方法

所谓材料强度,一般是指它抵抗各种作用的能力。最初只研究机械力的作用,首先是指静力的作用,然后是动力的作用。现在,外界作用的种类增多了,因此必须研究低温、高温、变温、腐蚀性介质、真空、宇宙空间、各种光照和场(电场、磁场等)的作用。

材料力学理论研究的主要方法是:比较作用力与反作用力,保证承载能力大于作用力,与确定经济上的最佳方案。

物体在机械力作用下,作用力可用物体最小截面所承受的载荷或物体内某点的应力计量。若机械力的作用随时间变化,那么,它不能只按作用力或应力来确定,还应考虑作用的速度和加速度。结构物的机械抗力有两种计量方法:第一,按破坏情况计量;第二,按变形情况计量。结构抗破坏能力的数值,由使结构物破坏的作用力大小来反映。结

构物抗变形能力的大小,是用应变量(或结构上某点的位移量)随应力(载荷)值而变化的关系式来表示的。如果抗破坏的能力等于作用力(应力)的极限值(即所谓强度),那么,抗变形的能力可以用应变与应力(或位移与作用力)之间的函数关系表示。显然,应变量和位移量不应超过结构在给定使用条件下的允许值。

对于其他各种作用,也应相应确定作用力和抵抗力的计量办法。例如在电场作用下,作用力的量值将为电场强度,而抵抗力的量值则为使材料破坏(击穿)时的最大场强;在温度场的作用下,作用力的量值是温度和作用时间,而抵抗力的量值为发生破坏时的力,或是用应变与应力、温度和时间的关系表示。

在大多数非机械力作用的情况下,抵抗力的量值是机械抗力的量值,这就是非机械力作用条件下的强度和应变。

2.1 作用于结构上的内力和应力的确定方法

结构物某一假想截面所承受的力或材料某点的应力,都可作为机械力作用的量值。内力可用两种方法确定,即试验法和计算法。

用试验法确定结构某截面的内力,只有将测力计安放在结构实际切面的位置上才能测定。显然,这不是在任何时候都可以办得到的,特别是正在使用中的结构物根本不可能这样做。

杆件所承受的内力和内力矩有:轴向力、横向力(或剪力)和弯矩。

用试验法确定轴向力,有时可达到很高的精确度。用试验法确定横向(剪)力和弯矩则很困难,因此,常常需要用计算方法确定。用计算法确定内力的原理在结构力学这样的学科中有确切的论述,但在材料力学课程中也要研究最简单的构件中内力的计算方法,首先是杆件、薄板和薄壳等。

由于没有直接测量应力的手段,所以,结构内某点的应力不能用试验法测定。的确,要在现场测定结构在加载时的应变是很困难的,但在已知材料性能的情况下,可以对实际应力进行估算。通常是在设计阶段用计算方法确定应力。

结构内某点的应力状态不能用一个标量来表征,物体内某点应力的总和是一个张量值。用计算法确定应力张量问题将在本书第一章中加以研究。

2.2 结构计算图

为了对结构的各种内力进行计算,应明确给出结构计算图和载荷计算图的概念。由具体材料制作的结构具有许多特性。为了计算和查明结构中内力的分布情况,必须知道:结构物的几何尺寸;结构之间的连接和支承的方法与形式;载荷计算图;在静不定结构中,如果材料发生松弛或具有弹性后效性能,还应考虑内力随时间的变化。

用图解法画出结构物各部分的几何尺寸和各种构件相互连接的方法,这就是结构计算图。恰当地选择计算图,是正确计算结构受力的基础。对于横向尺寸与长度相比很小的对称直杆,计算图可用与杆件纵轴一致且与端部支承条件(铰支、固支等)相同的线段来表示。对于某一尺寸比其他两种尺寸小的结构,计算图可用与结构物中面相一致的一个面表示,并应画出支承和连接的边界条件。

根据所要求的计算精度,结构计算图也可以有不同的精度。例如在一级近似中,直杆计算图可用一条直线段表示,二级近似的计算图(用于轴线不完全是直线的实际杆件),可用微弯的一段弧线或一段正弦曲线表示。