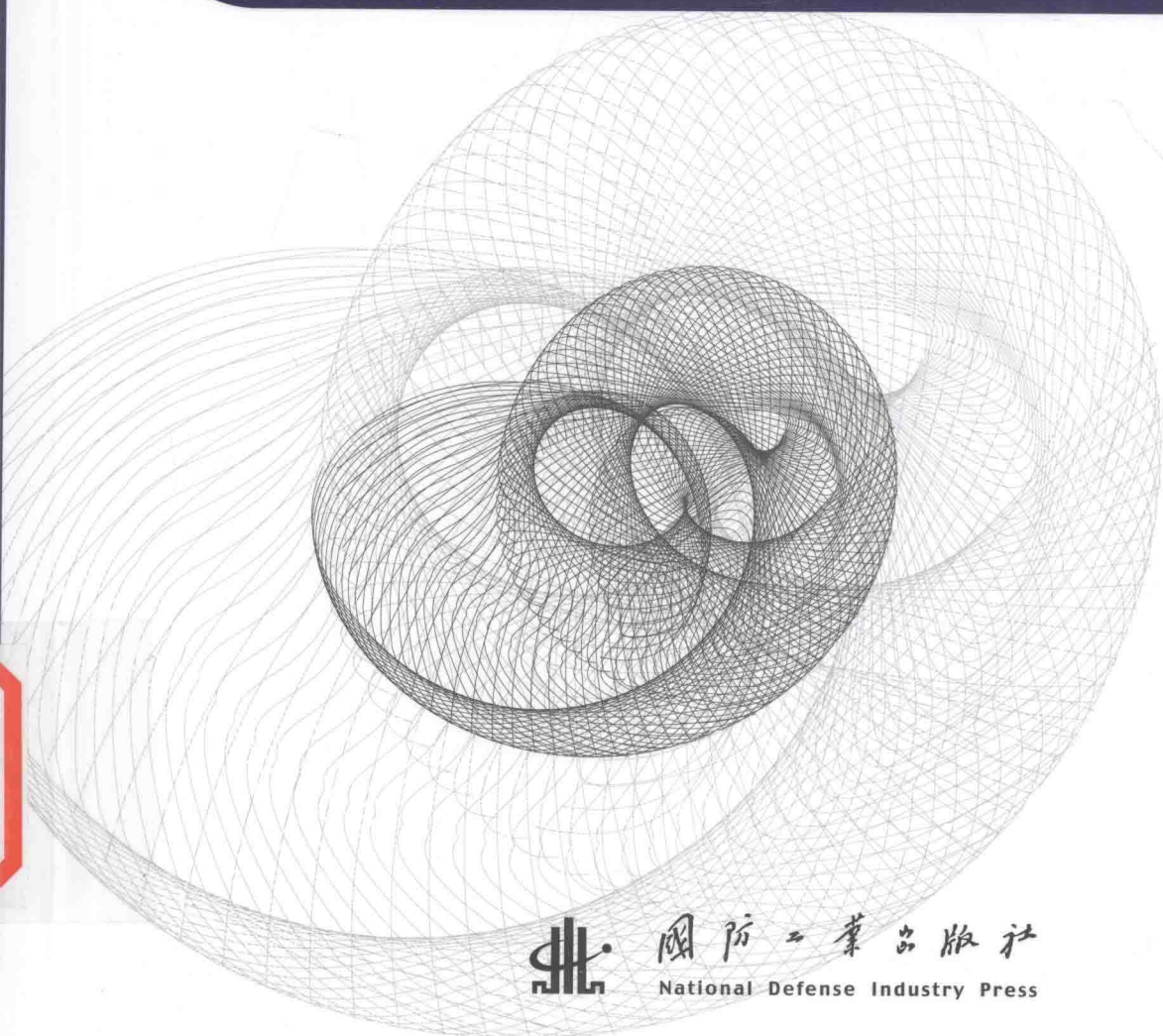


PRINCIPLES OF SOLID MECHANICS

固体力学原理

李海阳 申志彬 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

固体力学原理

李海阳 申志彬 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

固体力学是力学的重要分支,是一个既古老又活跃的科学领域。经过多年的发展,固体力学积累了大量的理论和方法,并通过学科交叉和工程实践不断纳入新的内容。本书为初学固体力学的研究生提供较系统的基础知识储备,以便开展基本的分析和解决问题的能力训练。本书作为国防科学技术大学空天力学系列教材之一,是在作者多年来为研究生开设的“固体力学原理”课程的基础上,经逐年积累后编写而成的。

本书全面系统地介绍了固体力学的基本原理和方法,内容涵盖了弹性力学、薄板理论、黏弹性力学和塑性力学等。本书第1章至第3章为基础理论部分,包括绪论、数学基础、应力和应变张量;第4章至第6章为弹性力学理论,包括线弹性、弹性平面问题和薄板弯曲;第7章为线黏弹性;第8章为塑性力学。为了便于学习,每章都编有习题,书后附有习题参考答案。

本书可作为高等学校力学及相关专业研究生教材或教学参考书,也可供有关学科和技术工程领域的科研与设计人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

固体力学原理/李海阳,申志彬编著. —北京:国防工业出版社,2016.9

ISBN 978-7-118-10947-4

I. ①固… II. ①李… ②申… III. ①固体力学
IV. ①O34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 164769 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 17¼ 字数 400 千字

2016 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 52.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776

发行业务:(010)88540717

前 言

作为力学的重要分支学科,固体力学是人类科学技术史上最先发展的少数学科之一,在人类文明进化过程中占有十分重要的地位。它主要研究固体介质及其结构系统在各种载荷作用下的应力、变形、损伤、失效等的一般规律及其工程应用。固体力学的基本原理和方法在力学的理论研究和工程计算中都有广泛的应用,目前,它已成为诸多工科专业的重要专业基础课。本书是在作者为国防科学技术大学相关专业研究生讲授“固体力学原理”学科核心课程十余年的基础上,汲取国内外优秀力学教材的精华,并充分学习和借鉴相关优秀教材的编写经验,编写而成。

全书主体采用张量记法,形式简洁,不仅具有一定的理论深度,也具有一定的专业宽度。本书既可以帮助本科阶段为非力学专业的研究生掌握固体力学的基本概念、理论和求解方法;又可以帮助本科阶段为力学专业的研究生加深理解,形成理论体系。

全书重点讲述各类固体力学问题的基本概念、理论体系、数学建模、分析简化、求解方法和结果分析等,内容涵盖弹性力学、复合材料力学、薄板理论、黏弹性力学和塑性力学等。第1章介绍了固体力学发展概况与趋势;第2章介绍了书中用到的相关数学基础知识,包括张量、变分法、积分变换等;第3章讲述应力张量和应变张量;第4章讲述线弹性本构理论、边值问题及其解法;第5章讲述弹性平面问题及其解法;第6章讲述弹性薄板弯曲问题及其解法;第7章讲述黏弹性相关理论及其定解问题;第8章介绍塑性力学相关理论及其定解问题;附录部分给出了弹性对称问题及其位移解法。各章附有习题,书后附有习题参考答案,以便于读者自学。阅读本书需要用到高等数学、线性代数、材料力学等课程的相关知识。

本书第1章至第6章以及第8章的部分内容由李海阳编写、第7章和第8章剩余内容由申志彬编写,最后由申志彬统稿。

感谢中南大学李显方教授,国防科学技术大学雷勇军教授、李道奎教授为本书修订所提出的宝贵意见。特别感谢国防科学技术大学李家文、唐海利、姜人伟、马浩在本书编写过程中所付出的辛勤劳动,感谢国防科学技术大学2012—2015级“固体力学原理”课程修课的学生以及力学专业其他研究生为本书内容的修订提出的大量宝贵的意见和建议。

本书由唐国金教授审阅,他为本书提出了许多宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢!

由于编者能力有限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正,可通过以下方式与我们联系:

邮箱:li_haiyang@263.net(李海阳)、zb_shen@yeah.net(申志彬)。

作者

2016年4月

于国防科学技术大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 力学学科概况	1
1.2 固体力学的发展概况	2
1.3 固体力学的发展趋势	4
1.4 固体力学在导弹与航天工程中的应用	7
1.5 内容概述	8
第 2 章 数学基础	10
2.1 张量的概念	10
2.1.1 张量和连续介质力学	10
2.1.2 标量和矢量	10
2.1.3 张量的记法	13
2.1.4 坐标变换矩阵	15
2.1.5 张量的变换法则	17
2.2 张量运算与张量场	18
2.2.1 笛卡儿张量代数运算	18
2.2.2 二阶对称张量的主值和主方向	20
2.2.3 张量场理论	22
2.3 变分法的基本概念	24
2.3.1 泛函与泛函的变分	25
2.3.2 泛函的极值	27
2.4 积分变换	28
2.4.1 脉冲函数和阶跃函数	28
2.4.2 拉普拉斯变换	30
2.4.3 傅里叶变换	32
习题	33
第 3 章 应力和应变张量	35
3.1 应力与平衡方程	35
3.1.1 载荷与内力	35
3.1.2 应力矢量和平衡方程	38
3.1.3 切应力互等定律	42
3.2 应力张量分析	44
3.2.1 应力张量	44
3.2.2 最大切应力	48

3.2.3	八面体切应力和应力偏量	51
3.2.4	相当应力	54
3.2.5	柯西应力二次型	55
3.2.6	应力莫尔圆	57
3.3	应变与几何方程	59
3.3.1	位移和变形	59
3.3.2	应变张量和几何方程	60
3.3.3	旋转张量与刚体位移	63
3.3.4	角变形	65
3.3.5	应变张量分析	66
3.4	变形协调条件	67
3.5	柱坐标和球坐标	71
	习题	75
第4章	线弹性	78
4.1	应变能密度函数与广义胡克定律	78
4.2	正交各向异性与各向同性弹性体	82
4.3	正交各向异性材料的杨氏模量和泊松比	90
4.4	线弹性边值问题	92
4.5	位移法和力法	96
4.5.1	位移法表示的边值问题	96
4.5.2	力法表示的边值问题	97
4.6	弹性问题的变分提法	99
4.6.1	可能状态、势能与余能	100
4.6.2	能量原理	102
4.7	弹性问题求解中的常用定理	103
4.7.1	叠加原理	103
4.7.2	圣维南原理	104
4.7.3	外功互等定理	106
	习题	107
第5章	弹性平面问题	108
5.1	平面应力和平面应变问题	108
5.2	Airy 应力函数	111
5.3	极坐标系下的平面问题	112
5.4	应力函数解法中的位移场	114
5.5	平面问题的求解	118
5.5.1	矩形简支梁	119
5.5.2	无限开孔平板问题	121
5.5.3	无限平板受局部力问题	125
5.6	正交各向异性板的平面应力问题	130

习题	132
第 6 章 薄板弯曲	140
6.1 直法线与位移应变场	140
6.2 薄板的应力场与平衡方程	142
6.3 薄板的边界条件	145
6.4 应力合力的物理含义	148
6.5 板问题的极坐标描述	150
6.6 矩形板的求解	151
6.6.1 无限长板	151
6.6.2 矩形板	153
6.7 圆板的求解	158
6.8 杂形板的求解	163
习题	166
第 7 章 线黏弹性	172
7.1 黏弹性现象	172
7.2 蠕变和松弛	173
7.2.1 蠕变	173
7.2.2 松弛	174
7.3 积分型黏弹性本构关系	175
7.3.1 蠕变型积分本构关系	175
7.3.2 松弛型积分本构关系	177
7.3.3 三维积分型本构关系	177
7.4 微分型黏弹性本构关系	179
7.4.1 微分型本构的一般形式	179
7.4.2 拉普拉斯像空间黏弹性本构	179
7.4.3 三维微分型本构关系	181
7.5 常见黏弹性模型	182
7.5.1 Maxwell 模型和 Kelvin 模型	182
7.5.2 标准线性固体模型和 Burgers 模型	184
7.5.3 广义 Maxwell 模型和广义 Kelvin 模型	187
7.6 时温等效原理	189
7.6.1 高聚物力学性能的温度依赖性	189
7.6.2 时温等效原理	190
7.6.3 WLF 方程	192
7.7 黏弹性材料的动态性能	192
7.7.1 复模量和复柔量	192
7.7.2 动态函数与频率的关系	196
7.7.3 黏弹性材料的能量耗散	197
7.8 线黏弹性定解问题及其求解方法	198

7.8.1	定解问题	198
7.8.2	特殊问题的求解	199
7.8.3	弹性-黏弹性对应原理	200
7.9	示例	202
7.9.1	黏弹性细杆的稳态简谐振动	202
7.9.2	均布载荷下黏弹性梁的弯曲	203
7.9.3	受内外压的黏弹性厚壁筒	204
	习题	206
第8章	塑性力学	210
8.1	塑性现象	210
8.1.1	材料拉伸试验结论	210
8.1.2	材料复杂应力状态试验结论	212
8.2	简单塑性模型	213
8.2.1	材料塑性行为的基本假设	213
8.2.2	几种塑性应力-应变关系的简化模型	215
8.2.3	简单塑性模型在材料力学问题中的直接应用	218
8.3	初始屈服函数	223
8.3.1	屈服条件的几何含义	223
8.3.2	两个经典屈服函数	227
8.4	硬化与流动法则	232
8.4.1	后继屈服条件概述	232
8.4.2	稳定材料的加工硬化条件	233
8.4.3	屈服面和塑性流动的一般性质	234
8.4.4	理想塑性材料流动法则	236
8.5	增量理论	238
8.5.1	理想塑性材料与 Mises 条件相关联的流动法则	238
8.5.2	各向同性硬化的增量形式	240
8.6	Hencky 全量理论	244
8.6.1	简单加载和单一曲线假设	244
8.6.2	简单加载定理	248
8.7	塑性力学边值问题及其简化求解	249
8.7.1	塑性力学边值问题	249
8.7.2	具有对称性的塑性问题求解	250
	习题	254
附录		256
附录 A	对称问题及其解法	256
附录 B	部分习题参考答案	262
参考文献		268

第 1 章 绪 论

1.1 力学学科概况

固体力学(Solid mechanics)是力学学科中的研究规模最大的分支。力学的分支学科在国际上并无统一的定义,在我国的力学一级学科下,设有一般力学与力学基础、固体力学、流体力学和工程力学四个二级学科。一般力学与力学基础主要研究牛顿力学的一般原理和宏观离散系统的力学现象,其研究对象一般为质点、质点系、刚体以及多刚体系统。固体力学研究可变形固体在载荷、温度、湿度等外界因素作用下,其内部质点的位移、运动、应力、应变和破坏等规律。流体力学主要研究在各种力作用下流体本身的静止状态、运动规律,以及流体和固体壁面、流体和流体之间、流体与其他运动形态之间的相互作用。工程力学主要利用已有力学理论、知识、方法解决工程中的力学问题,比如爆炸力学、岩石力学、土力学、流变学、生物力学、地震力学等。

力学是研究物质机械运动规律的科学。通常理解的力学以研究宏观对象为主,但由于学科的互相渗透,有时也涉及宇观(如宇宙体系)或细观(如颗粒、纤维、晶体)甚至微观(如原子、分子)各层次的对象。机械运动是物质在时间、空间中的位置变化,它是物质运动最基本的形式。物质运动的其他形式还有热运动、电磁运动、原子及其内部的运动和化学运动等。如果其他运动形式对机械运动有较大影响,或者考虑它们之间的相互作用,便会在力学同其他学科之间形成交叉学科或边缘学科。力是物质间的一种相互作用,是物质机械运动状态发生改变的原因。力学可以说是力和运动的科学。这就有了新的力学定义:“力学是关于力,运动及其关系的科学。”力学研究介质运动、变形、流动的宏观行为,揭示力学过程及其与物理、化学、生物等过程的相互作用规律。

力学建立在牛顿力学和经典热力学的基础上,力学的发展始终和人类的生产活动密切相关。3000 多年前,我国的《墨经》上就有简单的杠杆原理;古希腊的阿基米德也对静力学做出了一些系统的论述。17 世纪初,随着欧洲资本主义萌芽,科学逐渐挣脱神学的束缚,伽利略(G. Galileo)、开普勒(J. Kepler)、牛顿(I. Newton)等进行了力学的奠基工作。至牛顿时代,力学形成了一门学科,同时推动了微积分的发展。此后,随着工业化进程不断向前推进,逐渐出现了水力学、材料力学、结构力学、弹道学、流体力学、分析力学、弹性力学等分支。力学是伴随着第一次世界大战后航空工业的兴起而飞速发展的,航空工业对飞机设计提出的轻、快、安全的高难度要求,极大地推动了空气动力学、板壳理论、结构力学、塑性力学、疲劳理论的发展。力学学科的发展,为超声速飞机、火箭和导弹的研制奠定了基础。在对航天技术一系列问题的解决中,逐步形成了高温空气动力学、稀薄气体动力学、化学流体力学、物理力学、断裂力学、损伤力学等一大批新兴力学学科。这些学科所取得的成就又被广泛应用于其他工程领域,促进了化工、冶金、机械、交通、建筑等工业的

发展。此外,力学与水利、采矿、高层建筑、金属加工、造船等工业结合,促进了土力学、岩石力学、塑性力学、水动力学等的发展。20 世纪下半叶,航天任务基本实现后,力学家开始转向新的力学生长点:例如,结合天体研究,用磁流体力学研究太阳风,用流体力学结合恒星动力学研究星系螺旋结构等;向地球科学渗透,进行板块动力学、构造应力场、地震机制与预报等研究;建立生物力学,研究生物的形态和组织、人工器官设计和制造等问题。以上情况充分说明,力学与工程相结合的超前研究为力学新分支的建立和新产业的形成起着奠基和催生作用。

力学在整个科学体系中处于重要地位。力学原是物理学的一个分支,物理科学的建立是从力学开始的。在物理科学中,人们曾用纯粹力学理论解释机械运动以外的各种形式的运动,如热、电磁、光、分子和原子内部的运动等。当物理学逐步摆脱机械唯物主义的自然观时,力学则在工程技术的推动下按照自身逻辑进一步演化,逐步从物理学中独立出来。力学与物理学存在特殊的亲缘关系,许多概念、方法和理论都有相似之处。力学和数学的发展始终是相互推动和相互促进的,如力学理论和微分方程理论的同步发展,再如应用数学在很大程度上是力学和数学的交叉学科。非线性科学的兴起过程中,非线性力学的成就起到了先驱和核心的作用,如水中孤立波的研究催生了孤立子理论,气象中流体力学问题研究开创了混沌学等。计算科学的发展也受到力学计算需要的推动,大型计算机承担的重要科学和工程计算中,流体、结构等力学问题占了相当大的比例。力学相对于其他学科有一定的“超前性”,不少在力学中提出的规律、理论和方法,后来发现在其他领域同样有效。

力学的发展也受益于其他学科的成果。例如,现代航天技术中的高速高温气流往往伴有复杂的物理、化学过程,需要物理、化学方面的知识。近代力学的多种实验手段是建立在近代光学、电子学及计算机等学科的基础上而不断发展起来的。压电材料、磁流变材料等新型功能材料的力学性能研究需要用到电磁学等方面的知识。在很多交叉领域,力学与其他学科互相渗透,已经密不可分。

力学具有两重属性,它既是一门基础科学,又是一门技术科学。力学阐明的规律带有普遍的性质,同时也是许多工程技术的理论基础,并在广泛的应用过程中不断发展。力学的模型和理论总是源于实际现象,并在实践和应用中受到检验。实验对力学具有重要的意义,它是各种理论模型和工程准则的基本出发点,也是检验它们的准绳。实验力学不仅涉及力学,还涉及其他多种学科,特别是新技术领域。

1.2 固体力学的发展概况

固体力学中的固体一般指在一定的尺度内可有效承受剪力的连续介质(Continuous material media)。固体力学旨在认识与固体受力、变形、流动、断裂等有关的全部自然现象,并利用这些知识来改善人类的生存条件,实现人类发展的各种目标。也可以说,固体力学研究可变形固体在外界因素作用下,其内部质点所产生的位移、应力、应变以及破坏等的规律。

1. 固体力学的两重属性

与整个力学学科一样,固体力学兼具技术科学和基础科学的属性。它既为工程设计和发展生产力服务,也为发展自然科学服务。

固体力学在许多工程领域都发挥着重要的作用。这些领域包括航空航天工程、造船与海洋工程、核电工程、机械制造、动力机械工程、地质勘探、石油开采、土木工程、水利工程、岩土工程、材料科学与工程、微电子技术、医学工程等。固体力学研究的对象包括自然界中表现形式最丰富的物质形态和人类创造的绝大多数技术材料,它所研究的力学过程是宇宙间最基本的过程之一。它通过数学力学理论、物理力学、力化学、天体力学、地质力学、生物力学等交叉学科与其他所有基础科学门类相联系。

2. 固体力学的历史发展

固体力学是在牛顿力学的伟大成就下得到迅速发展的一门力学学科,但远在牛顿之前就有过很多重要的固体力学研究工作:如达·芬奇(L. da Vinci)关于线材拉伸强度的实验和伽利略关于受拉和受弯杆件破坏强度的研究。关于应力、应变和弹性的基本概念是在公元1660—公元1822年期间逐步形成的。胡克(R. Hooke)、伯努利(J. Bernoulli)、欧拉(L. Euler)、库仑(C. A. Coulomb)、柯西(A. Cauchy)等著名科学家为此做出了重要的历史贡献。在18世纪、19世纪和20世纪上半叶,借助于梁、柱、板、壳等简化理论,固体力学成为当时工业的两大支柱建筑业和机械制造业的主要技术分析手段。小变形弹性力学的一般理论在19世纪20年代由柯西总结形成,大变形弹性力学理论经过19世纪中叶格林(G. Green)、皮奥拉(G. Piola)和基尔霍夫(G. R. Kirchhoff)的奠基,于20世纪中期通过瑞夫林(R. S. Rivlin)的工作推至可供实用的阶段。

工程结构的轻型化和金属加工的迅速发展推动了固体力学中另一分支学科塑性力学的发展。塑性力学的若干基本概念起源于库仑、蓬斯莱(J. V. Poncelet)和兰金(W. J. M. Rankine)等关于延性材料屈服的研究,而近代宏观塑性理论奠基于特列斯加(H. Tresca)、胡伯(M. T. Huber)、米塞斯(Von Mises)、普朗特(L. Prandtl)和汉基(H. Hencky)等人的研究理论之上。在第二次世界大战后经依留申(A. A. Il'yushin)、希尔(R. Hill)、普拉格(W. Prager)和德鲁克(D. C. Drucker)等人的工作建立了塑性理论的数学框架。

航空航天工程的发展要求航空航天结构具有尽可能低但又确保可靠性的安全系数,从而使固体力学成为不可或缺的分析工具。除了塑性极限分析、弹塑性稳定性分析以外,应力集中、疲劳、振动、减噪方面的研究也得到了迅速的发展。在第二次世界大战期间,美国自由轮的大量低应力脆断解体事故促使格里菲斯(A. A. Griffith)首先提出但未受到普遍重视的断裂力学的基本思想迅速发展为固体力学的重要分支学科——断裂力学。由此产生的断裂分析方法迅速应用于航空、航天、核能的结构完整性分析,石油化工压力容器与管道的防爆分析,以及海洋结构的安全可靠性设计。

在21世纪固体力学发展的另一个特征在于从宏观和微观并行不悖的研究逐渐转向宏观相结合的研究,1905年弹性力学与数学家沃尔泰拉(V. Volterra)首先分析了位错固体的弹性静态应力和位移场。1934年泰勒(G. L. Taylor)、奥罗万(E. Orowan)和波拉尼(M. Polanyi)各自独立提出了位错的概念。上述数学和物理研究的结合为揭示固体塑性变形的一类基本规律奠定了基础。位错研究是理论超前于研究并指导人类认识的范例,它为近二三十年来固体力学与材料科学的结合打下了基础。我国固体力学研究从宏观层次向更精细层次的深入研究得益于钱学森倡导的物理力学,钱学森提出了“细观力学”的名称,专指对具有内禀材料微结构的固体连续介质的研究。

3. 当代固体力学的发展

第二次世界大战后,固体力学取得了一系列重大成就,形成了固体力学的近代理论基础。

(1) 宏观固体力学已经形成一个初步框架。理性力学在 20 世纪 50—70 年代的迅速发展使宏观力学的基本理论在表观上形成比较严谨的体系。

(2) 以有限元为代表的计算固体力学高速发展。有限元方法 1943 年由数学家柯朗 (R. Courant) 初步描述,20 世纪 50—60 年代提出的广义变分原理,完善了其物理基础,在 80 年代以来,有限元已经广泛应用于几乎所有工程技术领域,常规的固体力学计算已经基本解决。

(3) 断裂力学的建立扩展了固体破坏理论,断裂力学针对断裂、损伤、疲劳、磨损、腐蚀等破坏模式,发展了基于不同破坏特征量的缺陷评定体系。

(4) 固体的宏观本构理论在材料对称性描述和通常条件下的弹塑性大变形本构方面取得了重要进展。

(5) 固体力学测试技术更新换代。计算机控制试验机广泛使用;光测法精度已提高到微米乃至纳米量级;动态测试的应变率达到 $10^6 \sim 10^8/\text{s}$ 量级等。

(6) 细观力学于 20 世纪 70 年代兴起,至今已初具轮廓。

(7) 在工程结构的完整性和可靠性方面的研究取得重要成果。对航空航天结构、核动力结构、锅炉与压力容器、近海石油平台、管道等重要工程结构建立了损伤容限评定和结构完整性评定的第一代标准。

4. 我国固体力学的研究概况

我国是四大文明古国之一,古代文化在建筑、机械、工艺等方面都取得了辉煌的成就,东汉的郑玄(公元 127—公元 200 年)对《考工记·弓人》的注释中论述了力与变形的正比关系,比西方胡克的发现早 1500 年;我国在高层建筑(高塔)、拱桥、金属管射击火器(西夏铜炮)、火箭等方面都居于当时世界前列,都很巧妙地运用了力学原理。不过也应看到,我国古代重经验轻理论,很多先进的研究没有上升到一般理论层次。

新中国成立前和新中国成立初期,我国的力学教学和科研主要依附于工程学科,如几个著名大学的土木系、机械系、航空系,我国桥梁学家茅以升等在结构力学方面就有很深造诣。新中国成立后不久,我国在中国科学院数学研究所建立了力学研究室,在北京大学建立了数学力学系。1956 年成立中国科学院力学研究所,在我国的科学技术发展十二年远景规划中力学被正式列为一级学科,不久又设立了中国力学学会,并相继在高等院校中设立了数学力学系或工程力学系。在多数工业部门相继成立了以力学研究为主的研究所或研究室。从此我国力学学科有了较完备的学科体系,在国际上较早开展了物理力学、爆炸力学等方向的研究,理论上有了胡海昌的广义变分原理、钱伟长主导的板壳大变形摄动法等。1978 年开始的全国力学规划历时一年,完善了我国力学学科门类,开创了我国力学研究的新纪元。此时起,力学界的国际交流逐渐活跃,在泥沙运动、计算结构力学、断裂力学和爆炸力学等方面的研究都有自己的特色。

1.3 固体力学的发展趋势

2012 年 8 月在北京举行的第 23 届国际理论力学与应用力学大会在固体力学领域共

组织了生物力学与生物材料、接触与摩擦力学、损伤力学、弹性力学、断裂力学、地球物理与地质力学、冲击与波传播、多元材料和复合材料力学、相变力学、机电学、多体与载运工具动力学、纳米结构与微机电系统、塑性、黏塑性和蠕变、结构稳定性、结构优化、结构振动与控制、声学、计算固体力学方法、固体力学实验方法、流固耦合、智能材料、颗粒材料与颗粒流、材料加工力学、多孔介质、泡沫与多孔材料力学、力学教育等 29 个专题。这一划分,在一定程度上反映了固体力学的研究状况。

1. 尚未解决的基本问题

尽管固体力学理论体系高度完善,但仍有一批基本问题尚未得到解决,比如:

(1) 固体本构理论在宏观连续介质层次上未能实现封闭,破坏的发生和传播机制在宏观层次上并不清楚。材料在外界作用下经变形、损伤到失稳或破坏的过程是固体力学中最基本的难题。固体的破坏同缺陷和微结构形态紧密相关;该过程不仅对材料细观结构和损伤形态敏感,也对固态物质微观层次上的缺陷敏感。目前工程材料可实现的强度与其理论强度相差 1~2 个量级。纳米层次和巨型尺度的固体破坏行为与通常材料有很大不同,如许多纳米陶瓷具有比常规陶瓷高得多的韧性、北极巨大冰试件的断裂韧性是实验室试件的 10 倍。

(2) 固体疲劳行为的根本机制还远未得到阐明。目前尚缺乏理论模型来说明累积塑性变形与疲劳断裂行为的关系。在大循环数非规则应力应变加载下的循环塑性本构描述也一直未能取得突破性的进展。

(3) 现有结构完整性评定体系还不能完全描述实际的破坏行为。很多原来认为是材料常数的破坏特征量被实验证明与结构的几何形状有关。

(4) 地震预报是另一个与固体力学有关的重大疑难问题。断层在地应力作用下发生灾难性的裂纹扩展前,在地层表面会出现何种可观测的力学信号是一个与人类安全有关的重要课题。2008 年汶川大地震带来的灾难性后果,使这一问题更加受到世界关注。

(5) 如何构建有生命固体的本构关系问题,如人和动物的骨骼、肌肉、内脏,植物的根、茎、叶等。在本构关系中,应该嵌入记忆、学习、控制、条件反射、衰老、活性等特征。动物和植物在自然选择过程中,建立了在本身能力限制下的最佳结构响应特征,需要合理的理论对此支持。

(6) 其他问题,如薄壁结构的后屈曲、材料和结构在动载荷下的响应、固体材料的流变以及多孔介质中的流固耦合问题等。

2. 固体力学学科交叉前沿问题

固体力学内容广泛,分支众多,对前沿问题的没有统一的界定,除了前面提到的基本问题以外,固体力学与材料、计算机、微电子、物理学等交叉,形成许多前沿领域,这里仅列举代表性的前沿问题:

(1) 微纳米固体力学。该领域主要关注固体力学行为的“微观-细观-宏观”跨尺度关联和非线性非平衡行为。研究内容包括,纳米力学的基本理论框架与体系,固体材料性质的尺寸效应与多尺度模拟,微纳米尺度上的多场耦合问题,纳米材料的力学问题,微机电和纳机电系统的力学问题等。

(2) 多场耦合力学。该领域主要关注智能器件中使用的压电、铁磁、记忆合金等各种功能材料的各种新型力学问题。研究内容包括,力、电、磁、热、声多物理耦合场分析理论,

智能材料的本构关系,耦合环境下的破坏力学、失效机理与智能器件的可靠性,多物理场下信息结构实验方法与封装等相关的虚拟模拟技术,智能结构动力学与主被动控制,多尺度系统诊断与智能控制等。

(3) 计算固体力学。该领域是目前固体力学最活跃的领域之一,主要关注如何利用计算机技术处理各种固体力学问题。研究内容包括,计算力学的基本理论与方法,非线性力学问题计算方法,多尺度多场的计算固体力学方法,计算动力学与控制数值分析方法与建模,结构与多学科优化,计算力学软件技术等。

(4) 实验力学的新技术与新表征方法。该领域主要关注如何借助声、光、电、核、计算机等各学科最新成果,实现各种力学问题的实验测量与分析。研究内容包括,高灵敏度纳观测量方法与技术,“热-电-磁-力”耦合场加载与量测技术,水下、高空、太空等特殊环境下的力学参数测量,生命和仿生中的实验光电测量技术与表征方法,高速加载与测量技术,高精度、自动化图像信息提取等。

(5) 跨尺度关联与多尺度分析。该领域主要关注如何实现材料宏观性能及其微结构之间关系的定量计算(固体断裂尺度有高达 10^7 的差异)。研究内容包括,跨尺度计算、尺寸效应(如细观内禀结构的梯度型尺寸效应、固体自组织行为的尺寸效应、胞元自治体的内尺度效应)、跨尺度力学的理论框架研究等。

(6) 生物材料与仿生材料力学。该领域关注如何结合生物学和生物技术来设计材料和器件。研究内容包括,生物材料的微观机制,功能性仿生材料与器件的性能研究,原子、统计和连续介质相结合的杂交模型,纳米生物材料的实验、理论和计算,生物材料的力-电-磁耦合场行为与化学力之间的关系等。

(7) 材料固体力学。该领域主要关注材料科学飞速发展所带来的各种新问题。研究内容包括,非均匀材料力学,零维、一维、二维等低维材料力学,多孔材料力学,生物与仿生材料力学,材料设计方法如自组装设计、拓扑优化设计、多功能一体化设计、“工艺过程-材料微结构-特性-行为”的分级并行设计等。

3. 固体力学应用研究趋势

固体力学在国民经济和国防建设中发挥着举足轻重的作用。长期以来固体力学与土建、机械、航空航天、能源、交通、材料科学、信息与微电子、国防与武器装备等重大工程技术紧密结合。随着工业技术进入信息化时代,力学与各工业领域的结合将更加紧密,并将一些新兴领域如微电子微机械工程、精密制造工艺等形成新的结合点。

(1) 固体力学与材料科学相结合,推动了新型结构陶瓷、超级工程塑料、碳化硅晶须加强复合材料等新型强韧化材料的研究。

(2) 微电子技術中,大规模和超大规模电路的微型化是技术发展的一个主流,随之出现了微机械和微传感器,推动了薄膜力学、细观力学、实验力学等在此领域的发展。

(3) 精细加工需要考虑材料的细微观形态,以及加工历史的影响,推动了细观力学、非线性动力学等的发展。

(4) 能源需求推动了石油勘探、深层煤资源利用、大型水电站、潮汐能开发、快中子增殖反应堆等的发展,促进了减灾力学、高温蠕变损伤、液固耦合动力学、大型结构分析与设计等问题的研究。

(5) 高速铁路、高速公路的建设以及交通工具的发展,提出了诸如汽车耐撞性、路面

损伤监测、高速公路施工、高速列车振动、大型舰船制造等问题,促进了冲击力学、塑性动力学、损伤力学、结构力学等的发展。

(6) 工程中的结构很多都处于流体环境中,流体与固体共存时会带来的颤振、晃动、稳定性、空化、飞溅等流固耦合问题。完全非线性的流固耦合问题研究在工程和理论上都受到强烈关注。

(7) 老龄工程评估是航空、能源、建筑等工业都十分关注的问题。老龄飞机、老龄压力容器、老龄核电站等的评估直接关系到生命财产安全,对其研究需要断裂力学、损伤力学、热工流体力学等的实用化研究。

(8) 岩石力学的基础研究促进了岩土工程的发展,近年来该领域的研究重心逐渐从传统简单的理论分析、经验类比转向更复杂、更符合实际的理论分析和岩土工程数值模拟,较广泛地采用了诸如人工智能、专家系统、神经网络等手段;特殊及恶劣环境下的岩石力学问题受到极大的关注。

(9) 土力学的理论研究集中于土的本构关系问题,砂土的力学行为表现出不同于固体、流体和气体的特征;大型高土石坝、高层建筑、重型厂房和大型海洋钻井平台的建造给土力学的应用研究提出大量新问题;冲刷侵蚀、塌方、滑坡、泥石流的机制与防止同样是土力学关注的重要方向。

1.4 固体力学在导弹与航天工程中的应用

力学作为航空航天科学技术最重要的基础和支撑学科之一,在航空航天工程中发挥了举足轻重的作用。弹道导弹、运载火箭、卫星、飞船、空间站及相关地面设备的设计、生产、维护和运行的全过程都会涉及各种固体力学问题,并且为适应航天领域的特殊需求,固体力学发展了很多新的方向,航天已经成为固体力学发展的热点领域,例如:

(1) 轻质、强韧、抗撞击、防热结构及其材料一体化设计的理论和方法。以航天飞机为代表的可重复使用航天运载器(RLV),要求结构材料不仅要有尽量高的比强度,还要能承受超高速飞行过程中的高温、烧蚀、冲击等恶劣环境条件,这推动了一系列相关理论的发展,如轻质、高强度、高韧度和防热材料的设计、制备,结构和材料的一体化设计与制造,新型材料的本构理论和强度理论,材料的热真空效应,等等。

(2) 智能材料和智能结构、自修补技术、智能自主控制等技术。现代导弹和运载器的工作条件复杂、结构设计余量小,并且大量使用的复合材料易存在缺陷,这对结构的加工、使用、维护、评估提出很高的要求。智能材料和智能结构把材料和结构的设计、制造、测量、控制等相结合,通过内埋测量器件和控制器件的方法,实现对复合材料结构的监测和控制;自修补技术通过材料化学组分的设计,实现对材料缺陷、结构损伤的自动修复;结构的智能自主控制技术在结构振动控制与智能结构设计相结合的基础上,引入模式识别、逻辑判断、分析决策等智能化因素。

(3) 空间生物力学。在飞船、空间站等空间飞行器中的环境与地面相比最大的差异在于重力水平,空间飞行器中的微重力环境会带来体液转移、运动病、肌肉萎缩等人体生理现象。另外,空间辐射等因素,也会带来生物变异等效应。为适应人类长期轨道飞行以及太空育种等需求,需要深入研究微重力对细胞发育、生长、繁殖、分化及凋亡的影响,机

体微重力效应的力学规律,空间生物学的新概念、新技术和新方法等。另外人造重力的实施及相关生物效应,也会带来很多生物力学问题。

(4) 爆炸、冲击与空间防护问题。空间尤其是近地空间存在大量微流星及人造太空垃圾,这些碎片对空间飞行器产生很大的威胁。2009年2月11日,铱33卫星与俄罗斯Cosmos 2251卫星的碰撞使人们再次认识到,尽管航天器碰撞的概率很小,但是确实可能发生。对大碎片的防护主要采用主动规避的方法,而对微小碎片则需要采用防护屏的方法对关键舱段进行保护。空间的碎片撞击速度往往在 7km/s 以上,这对冲击动力学和防护技术等提出了很高的要求。

(5) 充气结构及轻质结构技术。随着新材料技术的发展,在空间、再入、着陆等任务中使用轻质材料构建的充气结构逐渐成为可能,充气结构具有轻质、易于变构型、缓冲性能好等优点,对于短时间性的任务具有特殊优势。航天任务中充气结构的材料和结构设计都有特殊要求,同时充气过程和工作过程中的大变形问题也为问题分析带来复杂性。

(6) 固体导弹的健康监测与贮存寿命问题。采用固体推进剂的导弹具有结构简单、维护方便、发射准备时间短等优点,已经成为现代导弹装备的主流。固体火箭发动机的推进剂药柱在成型后到发射使用可能会经过几年甚至十几年的贮存期,此期间由于环境温度、湿度、氧化、运输振动、重力等因素的作用,药柱的力学性能会发生改变,出现微损伤,最终会导致导弹性能下降甚至失效。这一问题需要黏弹性力学、损伤力学、结构力学等固体力学分支的深入研究。

(7) 大型空间结构的动力学与控制。以空间站为代表的大型空间结构具有振动频率低、模态密集、振动与控制耦合等特点,还存在变构型、接触、碰撞、连接非线性等问题,为结构动力学与控制研究提供了新的研究领域。

(8) 计算固体力学及相关软件开发。航天工程中对结构设计的高要求推动了计算固体力学的不断进步,比如现在具有很大影响的有限元分析软件NASTRAN最初就是在美国国家航空航天局(NASA)的支持下发展起来的。现在计算固体力学正和其他学科相结合,发展了CAD、CAE、CAM等技术,以及一体化设计、多学科优化等方向,开发了大量商业化、系列化的软件。

(9) 航天系统分析与仿真。固体力学与飞行器设计、轨道力学、仿真技术、控制技术、计算机技术等相结合,通过构建综合性的仿真系统可以对导弹和航天飞行任务的全过程进行仿真模拟,对飞行器的总体参数、轨道与姿态特性、控制性能、结构完整性等进行全面评估,在一定程度上可以起到替代飞行试验的作用。

固体力学在导弹和航天领域的应用范围很广,涉及的分支很难全面论述,通过以上介绍,读者可以对这些分支有较一般的了解。

1.5 内容概述

本书立足于介绍固体力学领域的一些基础性的内容,涉及弹性理论、薄板理论、黏弹性理论、塑性理论的一些初步知识,更深入的知识可以参阅相关专业教材。

本书内容普遍采用了连续性假设和小变形假设,其中连续性假设是一个基础性假设,适用于更复杂的理论,而小变形假设则是用于将问题简化为线性模型提出的,并不是相关

固体力学理论所必需的。

连续性假设(Continuity hypothesis)就是认为固体介质的质点连续分布于三维欧氏空间的某个区域内,并且在整个变形过程中保持其连续性。

真实物质都是由分子、原子组成的,是不连续的,连续性假设认为这种微观的不连续性不会影响介质的宏观力学性能,这样就可以不考虑实际工程材料的微观粒子结构,而采用宏观性能试验测定的材料统计物理性质(如质量、弹性常数等)来描述物体。连续介质假设有两层含义:

(1) 把物体抽象成一个形状和位置与其相同的、连续而密实的空间几何体,物体的统计物理性质以及位移、应变、应力、能量等物理量都作为空间点位的函数定义在这个几何体上,这种抽象的数学模型称为连续介质。

(2) 物体在整个变形过程中始终保持连续,原来相邻的两个任意点,变形后仍是相邻点,不会出现开裂或重叠现象。用数学描述即为,定义在该连续介质上的物理性质和物理量,除了在孤立的点、线、面上可能奇异或间断外,在变形过程中始终保持为空间点位的连续函数。基于这个假设就可利用高等数学中的微积分知识来处理连续介质问题。

连续介质是一个普遍概念,给它赋予不同的物理性质就可描述不同的物质,如弹性体、塑性体、黏弹性体、理想流体、黏性流体等。

小变形假设(Small deformation hypothesis)就是认为所研究可变形固体的位移、转动和变形与固体本身的几何参数相比都是小量。根据该假设,可以忽略变形对固体受力分布的影响;可以采用固体的原始几何构形来描述其变形后的应力场、应变场、位移场等物理量;可以对应力、应变、几何关系等采用线性数学模型来描述,忽略高阶小量。

如果不考虑小变形假设,需要引入有限变形理论,这时本书中的应力、应变、平衡方程、几何方程等都需要进行相应的调整,但基本力学思想有继承性,本书内容可以作为这类较深入理论的基础。