

材料力学

CAILIAO LIXUE

〔苏〕 H. M. 别辽耶夫 著

王光远 干光瑜 顾震隆 译



高等教育出版社

材 料 力 学

〔苏联〕H. M. 别辽耶夫 著

王光远 干光瑜 顾震隆 译

高等教育出版社

本书简介

本书是根据苏联别辽耶夫所著《材料力学》1976年俄文第十五版并对照其1979年英文版翻译而成。它是世界上最著名的材料力学教科书之一，其特点是内容丰富，概念清晰，阐述清楚，结合实际，解释和例证更为详尽。各次新版都不断有所修改和补充新的内容。本版全书共分为九篇三十二章。其内容除基本包括我国目前工科专业多学时教学基本要求外，各部分还都有所扩展和深入。本书原著未附习题，要求配合某些习题集进行学习和教学。本书除可作教材外，还可作为有关教师、研究生及科技工作者的参考书。

(京) 112号

材料力学

〔苏〕H.M. 别辽耶夫 著

王光远 干光瑜 顾震隆 译

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北省涞水县印刷厂印装

*

开本787×1092 1/16 印张28.5 字数650 000

1992年7月第1版 1992年7月第1次印刷

印数0001—2 312

ISBN7-04-002554-X/TB·152

定价14.45元

译者序言

在应用力学领域里，H. M. 别辽耶夫是国际有名的科学家和教育家。他长期进行的卓有成效的研究工作和教学工作，使得他所著的《材料力学》一书具有显著的特点和很高的水平。他的这本著作自第一版于1932年问世以来，迄今已修订到第十五版，在苏联被广泛用为教材达50余年而不衰，堪称教材史上的奇迹。

我们在50年代初期，曾翻译(王光远，干光瑜，顾震隆，黎绍敏，杨文鹄，张宇鑫合译)和由高等教育出版社出版了这本有名的苏联教材，长期被全国工科院校广泛采用，对我国这门课程的教学改革和教材建设曾起过重要的作用。

这次重新翻译，是按照该书最新的俄文版和英文版对照进行的。在细节上和用词上，英文版与俄文版常常有些细微差异。对此，我们总是选其优者，或综合考虑，并注意有利于中文的表达来进行翻译。全部符号均按英文本。

值此四化建设和振兴中华而勤奋工作和学习之际，为更好地吸取国外的成就，我们重译此书，以飨读者。译者的分工如下：王光远译第一篇至第三篇，干光瑜译第四篇至第六篇、第七篇的第20~23章，顾震隆译第七篇的第24~26章至第九篇。翻译不妥之处，敬请读者指正，以便重印时修正。

译者

1985年底

尼可莱·米哈依洛维奇·别辽耶夫(1890—1944)

在把弹性力学、材料力学和结构力学理论应用于工程实际方面,尼可莱·米哈依洛维奇·别辽耶夫(Николай Михайлович Беляев)在苏联知名的科学家中占有显著的地位。

尼可莱·米哈依洛维奇·别辽耶夫于1916年在圣·彼得堡铁道工程学院毕业后,就留在该校材料力学教研室,在С. П. 铁木辛柯(Тимошенко, Timoshenko)指导下工作。

尼可莱·米哈依洛维奇·别辽耶夫终生在这个学院(现为列宁格勒铁道工程学院)工作。在这个学院他讲授了很多课程,如工程结构、桥梁工程、理论力学、材料力学和弹性力学等。从1924年开始直到逝世他担任材料力学教研室主任。

尼可莱·米哈依洛维奇·别辽耶夫终生都是一个真正的先进的工程师和科学家。他首先提出并解决了在可变轴向载荷作用下等直杆的稳定问题,这是一个具有理论意义的问题,而且从应用观点看也是一个重要的问题。同时,尼可莱·米哈依洛维奇·别辽耶夫还研究挤压接触处物体的局部应力问题。这里他显著地发展了赫芝(Hertz)的工作。尼可莱·米哈依洛维奇·别辽耶夫在1924年首次发表的著作,到目前仍然保留着它们的全部价值。

在苏联,别辽耶夫是首先研究塑性变形理论的学者之一,并且对这个领域的发展作出了很多贡献。

尼可莱·米哈依洛维奇·别辽耶夫在他的晚年,对高温下金属的松弛和蠕变进行了很有成效的研究工作。

尼可莱·米哈依洛维奇·别辽耶夫在成功地把理论和试验研究结合起来方面是一个少有的天才。在1924年他承担了列宁格勒铁道工程学院工程力学实验室的领导工作,并且在他16年的指导下该实验室变成了巨大的先进的科学研究中心。

在尼可莱·米哈依洛维奇·别辽耶夫的指导和直接参与下,根据在该实验室进行的大量研究工作的结果,制定了新的技术规程以保证铁轨经久可靠的工作。这些规程,在作了不大的补充之后,直到今天仍在应用。

尼可莱·米哈依洛维奇·别辽耶夫在混凝土技术领域里的研究工作,获得了全苏联的赞扬。

尼可莱·米哈依洛维奇·别辽耶夫的教学活动并不限于列宁格勒铁道工程学院。他曾在列宁格勒技术学院(1919—1926)和列宁格勒航空土木工程学院(1931—1934)工作,并且从1934年以后一直是全国最大的学院——列宁格勒工业学院材料力学教研室主任。

在1939年尼可莱·米哈依洛维奇·别辽耶夫被选为苏联科学院通讯院士,并且从1942年开始担任苏联科学院力学研究所副所长的职务。

他的著作《材料力学》在苏联获得了广泛的赞许。

俄文第十五版前言

在时隔 11 年之后, H. M. 别辽耶夫的《材料力学》的新版出版了。从别辽耶夫在 1932 年出版第一版到 1965 年出版第十四版这 33 年中, 共发行了 67.5 万册, 这说明了它的广泛的声望。在此期间此书得到不断的补充和修订。先是由别辽耶夫亲自进行, 在他 1944 年逝世后, 由他的四个学生和同事组成的一个小组继续进行此项工作。这个小组整理出版了第五版至第十四版, 但并未对别辽耶夫的原著进行实质性的修改。只是在标准和技术规范改变和出现新的研究成果这类非常必要的情况下, 才偶尔作出一些修改和补充。

在此小组所准备的这个新版本中, 删去了一些内容, 这或是由于它们与材料力学无直接关系, 或是因为它们工科院校的主要课程中很少讲授。被删去的内容包括接触应力、铆接梁、钢筋混凝土梁、梁挠度的近似计算法、弹性地基梁、薄壁杆的计算、所有图解法以及稳定性分析中的部分复杂问题, 而被保留的部分则写成简明的形式。如果读者需要这些内容的有关知识, 可以参阅本书以前的版本或专门的著作。

由于市面上已经出现大量的习题集(例如 B. K. 卡秋林主编的《材料力学习题集》), 本版删去了大部分例题。只是保留了那些对阐明理论较为重要的例子。

按许可载荷设计的有关问题过去分散在本书的五个地方, 在本版中为了更紧凑一些, 合并第二十六章。本书首次引入有关极限状态设计理论的一章。它虽然超出了材料力学基本教程的范围, 但由于十分重要, 即使在这个教学阶段也有必要介绍其基本概念。

过去各版本将强度问题分为两章, 在本版中合并为一章。关于真实应力部分都纳入第二章, 并予以较详细的阐述。

本版删去了有关材料数据表格的附录。部分有关资料已纳入相应的章节。用新的规格代替了旧的热轧型钢截面的规格。

和以前各版本一样, 我们力求保留别辽耶夫的风格和阐述问题的方法。所以基本上保留了作者的原文。如果 H. M. 别辽耶夫今天仍然活着, 他可能对很多问题采用不同的写法。虽然如此, 由于正是别辽耶夫所写的这本书获得了广泛的声望, 我们尽可能保留原文的阐述。

在准备这个第十五版的工作中, 我们小组分工如下: Л. А. 别辽耶夫斯基负责第十三章、第十四章 § 80、第十五至十九章、第二十四和二十五章; Я. И. 基普尼斯负责第六章、第八至十二章、第二十七和二十八章; Н. Ю. 库舍列夫负责第一至五章、第二十六章及附录; А. К. 希尼茨基负责第七章、第十四章 § 79、第二十至二十三章, 第二十九至三十二章。

A. K. 希尼茨基

1976 年 3 月

目 录

第一篇 绪论·拉伸和压缩

第一章 绪论1	
§ 1 材料力学的任务.....1	
§ 2 作用于结构构件的力的分类.....2	
§ 3 变形和应力.....3	
§ 4 材料力学基本问题的解法.....5	
§ 5 变形的类型.....7	
第二章 弹性范围内拉伸和压缩的应力和变形·截面选择8	
§ 6 横截面上应力的计算.....8	
§ 7 许用应力·截面选择.....9	
§ 8 拉伸和压缩情况下的变形·虎克定律...11	
§ 9 横向变形系数·泊松比.....14	
第三章 各种材料的拉伸和压缩实验研究及选择许用应力的基础18	
§ 10 拉伸图·材料的力学性质.....18	
§ 11 应力-应变图.....22	
§ 12 真实应力-应变图.....23	
§ 13 塑性材料和脆性材料的应力-应变图...26	
§ 14 塑性材料和脆性材料的压缩破坏·压缩图.....27	
§ 15 塑性材料和脆性材料力学性质的比较...30	
§ 16 选择强度安全系数的基础.....31	
§ 17 各种材料的拉伸和压缩许用应力.....34	

第二篇 拉伸和压缩的复杂情况

第四章 按许用应力计算超静定体系36	
§ 18 超静定体系.....36	
§ 19 制造不准确对超静定结构构件内力的影响.....41	
§ 20 由不同材料组成的杆件的拉压计算.....43	
§ 21 温度改变引起的应力.....45	
§ 22 同时考虑各种因素.....47	
§ 23 超静定结构更复杂的情况.....49	
第五章 考虑自重时的拉伸和压缩·柔索计算50	
§ 24 考虑自重时的截面选择(拉伸和压缩)...50	
§ 25 由自重引起的变形.....53	

§ 26 柔索.....54	
第六章 复杂应力状态·应力和应变59	
§ 27 轴向拉伸或压缩(单向应力状态)下倾斜截面上的应力.....59	
§ 28 主应力的概念·材料应力状态的类型...61	
§ 29 平面和空间应力状态的例子·筒形容器的计算.....62	
§ 30 平面应力状态的应力.....64	
§ 31 计算应力的图解法(莫尔圆).....66	
§ 32 利用应力圆求主应力.....69	
§ 33 空间应力状态的应力.....72	
§ 34 复杂应力状态的变形.....74	
§ 35 复杂应力状态的弹性变形势能.....76	
§ 36 纯剪切·应力和应变·虎克定律·势能...78	
第七章 复杂应力状态下材料的强度校核 ...83	
§ 37 对破坏的抗力·断裂与剪断.....83	
§ 38 强度理论的概念.....85	
§ 39 脆性破坏理论(断裂理论).....87	
§ 40 延性破坏理论(剪断理论).....88	
§ 41 各种强度理论的折算应力.....93	
§ 42 纯剪切时的许用应力.....94	

第三篇 剪切和扭转

第八章 剪切的实用计算方法97	
§ 43 铆钉和螺栓联接的计算.....97	
§ 44 焊接联接的计算.....101	
第九章 扭转·受扭杆件的强度和刚度校核106	
§ 45 扭矩的概念.....106	
§ 46 传给圆轴的力矩之计算.....108	
§ 47 圆轴扭转时应力的计算.....109	
§ 48 圆轴截面的极惯性矩和截面系数的计算.....112	
§ 49 扭转时的强度条件.....114	
§ 50 扭转变形·刚度条件.....114	
§ 51 扭转时斜截面上的应力.....116	
§ 52 扭转势能.....117	
§ 53 密圈螺旋弹簧的应力和应变.....117	
§ 54 非圆截面杆的扭转.....122	

第四篇 弯曲·梁的强度

第十章 弯曲内力 剪力图和弯矩图128

- § 55 弯曲变形的一般概念·梁支座的构造128
- § 56 梁内应力的性质·弯矩和剪力131
- § 57 连续载荷集度、剪力及弯矩之间的微分关系134
- § 58 作弯矩图和剪力图136
- § 59 复杂载荷引起的 M 图和 Q 图141
- § 60 Q 图和 M 图的校核146
- § 61 用叠加法作图147

第十一章 弯曲正应力的计算和梁的强度校核149

- § 62 材料受纯弯曲时的实验研究149
- § 63 弯曲正应力的计算·弯曲的虎克定律和势能151
- § 64 梁的强度校核155

第十二章 平面图形的惯性矩158

- § 65 简单截面的惯性矩和截面系数158
- § 66 计算复杂截面惯性矩的一般方法162
- § 67 对两根平行的轴的惯性矩之间的关系, 其中一根是形心轴163
- § 68 坐标轴转动时各惯性矩之间的关系164
- § 69 主惯性轴和主惯性矩166
- § 70 形心惯性矩的最大值和最小值168
- § 71 计算正应力的公式在非对称截面梁上的推广169
- § 72 惯性半径·惯性椭圆的概念170
- § 73 校核强度, 选择截面及确定弯曲许可载荷171

第十三章 梁的剪应力和主应力175

- § 74 矩形截面梁的剪应力175
- § 75 工字形截面梁的剪应力179
- § 76 圆截面和环形截面梁的剪应力181
- § 77 主应力的强度校核183
- § 78 主应力方向187

第十四章 弯曲中心·组合梁190

- § 79 平行中性轴的剪应力·弯曲中心的概念190
- § 80 铆接梁和焊接梁194

第五篇 梁的弯曲位移

第十五章 解析法求位移197

- § 81 梁的挠度和截面转角197
- § 82 挠曲轴的微分方程198
- § 83 悬臂梁的挠曲轴微分方程的积分200
- § 84 简支梁的挠曲轴微分方程的积分202
- § 85 梁具有若干载荷段时, 解其微分方程的积分常量等同法204
- § 86 求梁的位移的初参数法206
- § 87 受非对称力作用的简支梁206
- § 88 带有中间铰的梁的微分方程的积分208
- § 89 力作用的叠加209
- § 90 弯曲微分关系211

第十六章 图解解析法计算弯曲位移212

- § 91 图解解析法212
- § 92 图解解析法求位移的例题214
- § 93 弯矩图呈曲线时的图解解析法217

第十七章 变截面梁220

- § 94 等强度梁的截面选择220
- § 95 等强度梁的实例221
- § 96 变截面梁的位移计算222

第六篇 势能·超静定梁

第十八章 应用势能求位移的概念226

- § 97 问题的提法226
- § 98 最简单的载荷情况的势能227
- § 99 多个力作用时的势能228
- § 100 弯曲时用内力计算势能229
- § 101 卡斯蒂里安诺定理230
- § 102 应用卡氏定理的例题233
- § 103 引用附加力的方法235
- § 104 功的互等定理236
- § 105 马克斯威尔-莫尔定理237
- § 106 维力沙金法238
- § 107 刚架位移的计算240
- § 108 梁由剪力引起的挠度241

第十九章 超静定梁245

- § 109 一般概念245
- § 110 应用挠曲轴微分方程解超静定问题245

§ 111	多余未知数和基本梁的概念	246
§ 112	位移比较法	247
§ 113	应用卡氏定理、莫尔定理及维力沙金法 解题	249
§ 114	计算简单超静定刚架的例题	250
§ 115	连续梁	252
§ 116	三弯矩定理	253
§ 117	应用三弯矩定理的例题	256
§ 118	带有外伸臂的连续梁·具有固定端的 梁	258

第七篇 复杂抗力

第二十章	斜弯曲	261
§ 119	基本概念	261
§ 120	斜弯曲·应力计算	261
§ 121	斜弯曲的位移计算	266

第二十一章	弯曲和拉伸或压缩的组合作用	269
-------	---------------	-----

§ 122	梁在纵向力和横向力共同作用下的弯 曲	269
§ 123	偏心压缩或拉伸	271
§ 124	截面核心	274

第二十二章	扭转和弯曲的组合作用	278
-------	------------	-----

§ 125	弯矩和扭矩的确定	278
§ 126	弯曲和扭转共同作用时的应力计算和 强度校核	279

第二十三章	复杂抗力的一般情况	283
-------	-----------	-----

§ 127	杆在普遍受力情况下的内力素	283
§ 128	正应力计算	285
§ 129	剪应力计算	287
§ 130	位移计算	287
§ 131	简单曲柄杆的计算	289

第二十四章	曲杆	294
-------	----	-----

§ 132	一般概念	294
§ 133	弯矩、轴向力和剪力的计算	294
§ 134	计算剪力和轴向力所引起的应力	296
§ 135	计算弯矩所引起的应力	297
§ 136	矩形截面的中性层曲率半径的计算	300
§ 137	圆形截面和梯形截面的中性层曲率半 径的计算	301
§ 138	按表来确定中性层位置	302

§ 139	曲杆正应力公式的分析	304
§ 140	对正应力公式的补充说明	305
§ 141	曲杆应力的计算例题	306
§ 142	曲杆位移的确定	307
§ 143	圆环的计算	309

第二十五章	厚壁容器和薄壁容器	310
-------	-----------	-----

§ 144	厚壁筒的计算	310
§ 145	球形厚壁容器的应力	315
§ 146	薄壁容器的计算	315

第二十六章	按许可载荷的计算·按极限状 态计算的概念	318
-------	-------------------------	-----

§ 147	按许可载荷计算的概念·在静定系统上 的应用	318
§ 148	用许可载荷法计算受拉伸和压缩的超 静定系统	319
§ 149	受扭杆的极限承载能力的计算	322
§ 150	按许可载荷法选择梁的截面	323
§ 151	按许可载荷计算超静定梁·一般概念· 双跨梁的计算	325
§ 152	三跨梁的计算	328
§ 153	按极限状态方法计算的概念	330

第八篇 构件的稳定

第二十七章	压杆稳定校核	332
-------	--------	-----

§ 154	绪言·压杆形式稳定的概念	332
§ 155	临界力的欧拉公式	334
§ 156	杆件两端约束方式的影响	337
§ 157	欧拉公式的使用范围和临界应力总图 的绘制	339
§ 158	对压杆稳定的校核	343
§ 159	截面形状和材料的选择	346
§ 160	稳定校核的实际意义	349

第二十八章	结构构件的更加复杂的稳定校 核问题	351
-------	----------------------	-----

§ 161	梁平面弯曲形式的稳定性	351
§ 162	纵横弯曲杆件的计算	356
§ 163	偏心压力和杆初曲率的影响	360

第九篇 载荷的动荷作用

第二十九章	惯性力的影响·振动时的应
-------	--------------

力	363	§ 181 交变应力对材料强度影响的基本概念	398
§ 164 绪言	363	§ 182 循环应力	399
§ 165 物体等加速度运动时的应力计算	364	§ 183 交变应力下的强度条件	400
§ 166 旋转环(飞轮轮毂)的应力计算	365	§ 184 对称循环持久极限的确定	401
§ 167 连杆内的应力	366	§ 185 非对称循环的持久极限	403
§ 168 等厚度旋转圆盘	368	§ 186 局部应力	406
§ 169 等强度圆盘	372	§ 187 零件尺寸和其他因素对持久极限值的影响	411
§ 170 共振对应力值的影响	373	§ 188 交变载荷下的破坏实例·疲劳裂纹出现和扩展的机理	413
§ 171 受振动的构件中的应力计算	374	§ 189 许用应力的选择	415
§ 172 弹性系统的质量对振动的影响	377	§ 190 交变应力和复杂应力状态作用下的强度校核	418
第三十章 冲击载荷下的应力	382	§ 191 避免疲劳破坏的实际措施	419
§ 173 基本概念	382	第三十二章 蠕变分析基础	422
§ 174 冲击时计算应力的一般方法	383	§ 192 高温对金属力学性质的影响	422
§ 175 应力计算和冲击强度校核的具体情况	386	§ 193 蠕变和松弛现象	423
§ 176 变截面杆件在冲击时的应力	389	§ 194 蠕变和松弛曲线	424
§ 177 从所得结果中推出的实用结论	390	§ 195 蠕变的计算基础	428
§ 178 弹性系统的质量对冲击的影响	391	§ 196 蠕变计算例题	431
§ 179 冲击破坏实验	393	附录 热轧型钢规格表	439
§ 180 不同因素对冲击试验结果的影响	395		
第三十一章 在交变应力作用下的材料强度校核	398		

第一篇

绪论·拉伸和压缩

第一章 绪 论

§ 1. 材料力学的任务

在设计结构和机器时,工程师必须为结构和机器的每一个构件选择材料和截面尺寸,使该构件具有足够的强度以抵抗结构的相邻构件传给它的外力,避免强度破坏或形状有大的改变,也就是说该构件应该具有正常的功能。材料力学使工程师具备正确解决这一问题的基础。

材料力学研究各种材料在外力作用下的性能,并指明如何为结构的每个构件选择适当的材料和截面尺寸,以保证具有充分可靠的功能和得出最经济的设计。

有时,材料力学需要研究另一种形式的问题——校核已建成的或已设计的结构的尺寸。

设计中的最大经济性和结构功能的可靠性之间存在矛盾。前者要求尽量减少材料的用量,而后者导致材料用量的增加。这种矛盾是形成科学技术基础的重要因素,它促进了材料力学的发展。

现有的材料和校核强度的方法,常常不能满足解决新问题的实践的需要(例如,工程中,特别是在航空中达到的高速度、大跨度的结构,动力问题等)。这就促使人们研究新材料和它们的性质,改进和创立新的计算和设计方法。材料力学的发展必须与工程和技术的一般发展相一致。

有时,除了最大可靠性和经济的主要要求之外,工程师还必须满足另外一些条件,例如快速建成(修复毁坏的建筑物)、重量最小(飞行器设计)等等。这些条件影响到组成结构的各种构件的尺寸、形状和材料的选择。

材料力学作为一个独立学科的起源可追溯到1638年,并和意大利著名科学家伽利略的工作密切相关。伽利略是帕达(Padua)地方的一位数学教授。他生活的时期正是封建社会解体、商业资本发展、国际海运贸易以及采矿和冶炼工业诞生的年代。

这个时期经济的迅速发展要求迅速解决一系列新的技术问题。国际海运贸易的活跃提出建造大吨位船舶的需要,这就转而引起它们的构造和设计的改变;同时需要重建现有的和建造新的国内水运设施,包括运河和水闸等。这些新的技术问题不能靠简单地套用已有的船舶和结构的构造和设计来解决;必须研究出新的计算方法,考虑结构的大小和作用于它们的外力,来判断构

件的强度。

伽利略的相当大一部分工作，用于研究梁和杆件的尺寸和它们所能承担的载荷之间的依赖关系。他指出，他的试验结果可以“对建造大吨位船舶，特别是对加强甲板和顶盖带来很大的好处，因为对这种类型的结构减轻重量是非常重要的”。伽利略的研究成果发表于他的专著《Discorsie Dimostrazioni Matematiche》(《关于两种新科学的对话》，1638, Leiden, Holland)。

材料力学进一步的发展与机械和土木工程的进步是同步的，并与很多有名的科学家、数学家、物理学家和工程师的大量研究工作紧密相连。在他们之中，俄国和苏联的科学家占有重要的地位。在本书的相应各章中将扼要地介绍这些科学家个人在发展材料力学某些问题中所起的作用。

§ 2. 作用于结构构件的力的分类

在结构和机器使用期间，它们的构件承受外部载荷，并将其相互传递。一个水坝承受它的自重和它所支持的水的压力，并将这些力传给基础。桥梁的钢桁架通过铁轨和车轮接受火车的重量，并将它传到石头支墩上，而后者又转而将此载荷传给地基。蒸汽机气缸中的汽压传给活塞杆。机车的拉力通过连接煤水车和车厢的连接器的力传给火车。因而，结构构件受到体积力或相互作用力①。体积力作用在结构的每一个构件上(自身重量)。相互作用力作用于该构件和与其相连的各杆件之间，或者作用于构件和周围介质(水、蒸汽或空气)之间。将来在我们谈到一个外力作用于结构的一个构件时，应理解为从相连接构件或从周围介质传给该构件的力(运动)。

力可以按照几种不同的准则分类。

我们可将力分为集中力和分布力。

一个集中力可定义为通过一个很小的面积(与整个杆件的尺寸相比)传给结构构件的一个压力，例如一辆运行中的火车，其车轮对铁轨的压力。

由于传递压力的面积很小，在计算中认为集中力作用在一个点上。我们必须牢记，这是为了简化计算而引入的一个近似假定；实际上，任何压力都不可能通过一个点来传递。然而，这个近似假定带来的误差很小，一般在实践中可以忽略不计。

一个分布力可定义为连续地作用于结构某一长度或面积之上的力。分布在桥梁人行道上的一层等厚度的砂子就是一个均匀分布在某一面积上的力；如果砂层的厚度不均匀，我们将得到一个非均匀载荷。天花板内的梁的自身重量就是一个分布于其全长的载荷。

集中载荷以力的单位度量(吨力 tf、公斤力 kgf、牛顿 N^②)；分布在一个面积上的载荷以单位面积上的力作为度量单位(tf/m², kgf/cm², N/m²等)；沿构件长度分布的载荷以单位长度上的力作为度量单位(kgf/m, N/m, 等)。

载荷还可以分为永久载荷和临时载荷两类。在结构全部使用期间都受到永久载荷的作用，例

① 严格说来，物体的重量是该物体和地球之间的相互作用力。

② 按目前广泛采用和推荐的 SI 制，力的度量单位为牛顿(1N ≈ 0.102 kgf)。

如结构自重。临时载荷只是在某一段时间内作用于结构上，例如沿桥梁运动的火车的重量就可以作为一个例子。

按照作用的性质，载荷可以分为静载荷和动载荷。

静载荷逐渐地作用到结构上，作用于结构以后，它们或者完全不再改变，或者改变不大；土木工程和水利工程结构所受到的载荷大多具有这种性质。在静载荷作用下，结构的所有构件都保持平衡，结构构件的加速度或者完全不存在，或者小得可以忽略不计。

然而，如果有相当的加速度，且机器或结构的速度在短时间内发生变化，这时受到的就是动载荷。

动载荷的例子如突加载荷、冲击载荷和重复变化载荷。

突加载荷就是立即将其全部分量加于结构的载荷。当火车进入一个桥梁时火车轮子的压力就是这种类型载荷的一个例子。

当与结构相连接的构件的速度发生突然变化时，就出现冲击载荷。打桩时落锤的冲击就是一个例子。

重复变化载荷多次重复地作用于结构构件，例如多次重复的蒸汽压力，不断地拉、压蒸汽机的活塞杆和连杆。在很多情况下，载荷是具有不同性质的几种动载荷的组合。

我们将首先研究材料对静载荷的抗力；在此情况下为结构的每一个构件选择材料和截面尺寸没有太多的困难。

在第二十九到三十一章中，我们将讨论若干情况下动载荷的作用，这些情况像静载荷那样经常发生。需要特殊研究这些问题，因为这些动载荷对结构构件的作用不同于静载荷，同时材料对它们的抗力也不相同。

在结束讨论对结构构件所受外力的分类之时，让我们来考虑支承这些构件的部件的作用。作用在这些支座上的力称为支反力，计算开始时它们是未知量，可以利用结构的每个构件在所有外力和支反力作用下处于平衡的条件求出。

§ 3. 变形和应力

在理论力学(静力学)中，我们研究绝对刚体的平衡；静力学中关于材料的这一概念，足可用来确定外力作用下物体保持平衡的条件。然而，关于材料性质的这种粗糙和近似的概念已不适用于材料力学；这里我们必须考虑到自然界不存在绝对刚体这一事实。

在外力作用下，结构的构件及其整体都要在某种程度上改变他们的大小和形状，直至最后可能完全破坏为止。这种尺寸和形状的改变统称为变形。

变形的大小和性质依赖于所用材料的结构。所有材料可分为两类：晶体的和非晶体的。

晶体材料由非常大量的极小的晶粒所组成。每个晶粒都是一个相互间排列成很紧密的规则行列的原子体系。这些原子行列形成所谓晶格(或称晶体点阵)。在非晶体材料中，原子的排列没有特殊的秩序。它们由互作用力维持平衡。物体的变形就是由于这些原子位置的改变，也就是

说由于这些原子靠拢或离开而形成的。

变形又分为弹性的和塑性的两种。在引起变形的力去掉后，弹性变形即行消失；在此情况下物体完全恢复其原来的形状和尺寸。这种变形是由于晶格的弹性扭曲引起的。试验证明，弹性变形可继续到所加的外力不超过某一限度为止。

如果外力超过此一限度，在外力去掉后物体将不能完全恢复它原来的形状和尺寸。这样保留下来的尺寸上的差别称为塑性变形或残余变形。在晶体材料中，这种变形是由晶格中各层之间的不可逆位移形成的。去掉外力时，已变位的各原子层保留位置不变。

在变形时，外力作用下原子间的位移伴随着原子间相互作用力（即吸引力和排斥力）的改变。

在外力作用下结构构件内伴随着变形而出现附加的内力。这些内力抵抗外力，防止外力破坏构件、改变构件的形状或使一部分与其他部分脱离。这些内力试图使结构变形的部分恢复原来的形状和尺寸。为了用数字来评定外力对变形了的构件的效应，我们必须知道如何测量和计算由外力作用引起的变形所带来的原子间的力。



图 1

在材料力学中利用截面法达到这个目的。我们将试用下面的例子来说明这个方法。让我们考察图 1 所示受到两个相等相反的力 P 作用的杆件，我们想像此杆被一平面 mn 切开为两个部分 I 和 II。在两个力 P 作用下，杆的两部分趋于分离，但由于平面 mn 两侧的原子间的相互作用力而保留在一起。相互作用力的分力就是从杆件一部分通过截面 mn 传给另一部分的内力。截面 mn 上任一点附近单位面积上的相互作用内力称为该截面上在该点的应力。根据作用与反作用定律，从部分 II 作用于部分 I 的应力和从部分 I 作用于部分 II 的应力大小相等。

通过杆件的同一个点可以用一系列的平面以不同的途径将杆件切割成两个部分。通过这个点从杆件的一部分传给另一部分的应力的方向和大小决定于平面以何种方式将杆件切开。

这样，只谈应力而不谈它们所作用的平面是错误的。因此，我们应该说“作用在一个指定平面的指定面积上的应力”。由于应力是作用在单位面积上的力，其度量单位为 kgf/cm^2 , kgf/mm^2 , tf/cm^2 , tf/m^2 , N/m^2 , 等等。

我们将采用字母 p , q 和 τ 代表应力；字母 p 用来代表某面积上的具有任意倾角的应力； q 代表垂直于该平面的应力，称为正应力； τ 代表与该平面相切的应力，称为剪应力。

任意点处的应力是对由于外力作用产生变形而在材料中引起的内力的度量。从杆件的部分 I 传给部分 II（见图 1）的力使部分 II 保持平衡，也就是说去平衡作用在部分 II 上的外力系。此力可以用待求的应力表示出来：如果我们考虑切割平面上的一个面积元 dA ，则作用在此面积元上的单元力将是 $p dA$ ，其中 p 就是该面积元所在点附近的应力。这些力元的和就是通过该平面传递的总力。

这样，为了求出应力，需要把杆件想像地切成二部分，并写出作用在切出部分之一上的力系的平衡条件；这个力系包括作用于该切出部分的外力和通过该平面传递过来的力，并将后者用待求的应力表示出来。这就是截面法，今后我们将经常使用这个方法。

应当指出，在材料力学中“应力”一词常常用来代替术语“杆件各部分间的相互作用内力”；因

此,将来当我们谈到“截面上应力的均匀分布和不均匀分布”,以及“作为应力之和的力”时,我们必须牢记这些说法在一定程度上是习惯性的。例如,在求内力时,不能把作用于不同点处的应力加起来;如前所述,需要求出截面每一个点处通过面积元 dA 传递的力元,然后把它们的值加起来。综上所述,可得出结论:外力作用于结构构件的结果是,构件中出现变形,同时出现应力。

材料力学一方面研究各外力之间的关系,另一方面研究由于外力而引起的变形和应力。这就使工程师能解决为杆件选择适当的尺寸和合适的材料以抵抗外力这一重要课题。下节我们将给出解决这个问题的方法的梗概。

§ 4. 材料力学基本问题的解法

在为结构构件选择尺寸和材料时,我们必须保留一定的安全贮备以防止构件破坏和出现残余变形。应该这样来设计构件:使构件在使用过程中出现的最大应力,总是小于使材料破坏或出现残余变形的应力。

使材料破坏的应力称为强度极限或暂时抗力;我们将用与应力相同的字母来表示它,但加一个下标 u 。材料的弹性极限是这样一个应力值,当应力超过此值时材料将得到预先约定的很小的残余变形。强度极限和弹性极限是材料抵抗破坏和残余变形的力学性能^①。

为了保证结构免除破坏的危险,我们应该允许在构件中出现的应力只能是小于材料的强度极限。

许用应力也用与应力相同的字母来表示,但加一方括号;它与强度极限 p_u 之间的关系为

$$[p] = \frac{p_u}{k}$$

式中 k 即所谓强度安全系数,用以表示我们允许在结构中出现的应力为材料强度极限的 k 分之一。今后我们把系数 k 简称为安全系数。在实践中,此系数的值可从 1.7~1.8 变化到 8~10,决定于结构的工作条件。在 §§ 16 和 17 中将较详细地讨论这个问题。

以 $p_{\max}$ 表示在外力作用下被设计构件中出现的最大应力,我们可以写出构件的尺寸和材料必须满足的基本条件如下:

$$p_{\max} \leq [p] \quad (1.1)$$

这就是强度条件,它说明实际的应力必须不大于许用应力。

现在我们可以给出解决材料力学问题的过程如下:

- (1) 搞清所有外力的大小和性质,包括作用于该构件的反力。
- (2) 选择最适合于该构件(结构)工作条件和载荷性质的材料,决定其许用应力。
- (3) 以数字形式或代数形式给出构件的横截面尺寸,并求出构件中的最大应力 $p_{\max}$ 。
- (4) 写出强度条件 $p_{\max} \leq [p]$,并藉以算出构件横截面的尺寸,或校核所给尺寸是否够用。

解决材料力学基本问题的过程在下述情况下将会改变:对某些结构,结构整体的安全储备

^① 将在 § 10 中给出“强度极限”和“弹性极限”的准确概念。

大于最大应力所在点材料的安全储备;在该点材料承载能力的用尽,这时并不导致结构整体承载能力的用尽。在此情况下,应以结构整体的强度条件

$$P \leq P_{\text{per}} = \frac{P_u}{k}$$

来代替材料的强度条件 $p_{\text{max}} \leq [p]$; 式中 P 代表结构所受载荷, P_{per} 代表其许用值, 而 P_u 是使结构整体破坏的极限载荷。这样, 按许用应力的设计应代以按许用载荷的设计:

- (1) 搞清作用在结构上的所有外力的大小和性质。
- (2) 选择最适合于该结构的工作条件和载荷性质的材料, 决定安全系数。
- (3) 以数字形式或代数形式给出结构各构件的尺寸, 并求出最大许用载荷 P_{per} 。
- (4) 写出强度条件 $P \leq P_{\text{per}}$, 并藉以算出结构各构件的横截面尺寸, 或校核所给尺寸是否够用。

在 § 150 中我们将会看到, 在很多情况下, 两种方法将得出相似的结果。

一般说来, 我们将采用传统的按许用应力设计的方法; 但与此同时, 也将说明按许用载荷设计的方法, 特别是在两种方法得到不同结果的时候。

在大多数情况下, 强度条件还需补充以稳定和刚度的校核。稳定校核应能保证结构构件不会改变其预定的平衡形式, 刚度校核给构件的变形以一定的限制。

在解决材料力学问题时, 我们必须求助于理论力学方法以及试验技术。在计算支反力时必须利用静力平衡方程; 正如 § 18 将予说明, 对超静定结构, 还必须会计算材料的变形, 这只有在具有关于变形与力或应力之间关系的可靠试验数据时才成为可能。

在估定许用应力时, 我们必须知道材料的强度极限和其他力学性质。这种信息可从专门的材料实验室的材料性质研究中得到。最后, 为了求出真正的应力, 我们除藉助于数学分析和力学方法外, 还需要利用试验数据。这样, 材料力学本身包括两个部分: 其一是基于力学和数学的分析部分, 另一是实验部分。这两部分互相密切相关。

材料力学不能看作只是某些匀质弹性体应力的理论分析的学科分支。材料力学中所研究的问题只有对真实材料的力学性质具有足够的试验数据才能解决, 这些力学性质与材料的结构及其生产和加工的方法有关。因此, 在本书中对这方面给予了足够的重视。实验室工作对理解研究对象起重要的作用, 学生在学习理论的同时必须进行试验。这些需要利用材料强度实验室的仪器设备来进行的试验, 将在另一本专门的试验指导书中给出①。

虽然在最初阶段, 材料力学是为解决一些纯应用性的问题的需要而产生的, 但它的进一步发展却更多地偏向理论方面, 有时就会引起理论研究结果与它们的实际应用之间的脱节。试验研究沿着特有的道路发展, 主要是为各种类型的材料建立可以接受的规范标准。目前材料力学从材料在结构中的工作性质的观点研究真实的材料, 进行广泛的试验和理论研究, 这就为解决一系列日新月异的应用问题创造了可能性。例如, 这些问题包括研究新材料的强度, 它们破坏的条件, 不仅在弹性范围内而且在其范围外测定应力, 等等。

① H. M. 别辽耶夫: 《材料力学实验》, 1951(有中译本, 王光远等译, 高等教育出版社, 1956)。

§ 5. 变形的类型

在讲过了解决材料力学问题的一般方法之后, 现在我们可以转来研究各种个别问题。这些问题可以根据变形的类型分为若干类。

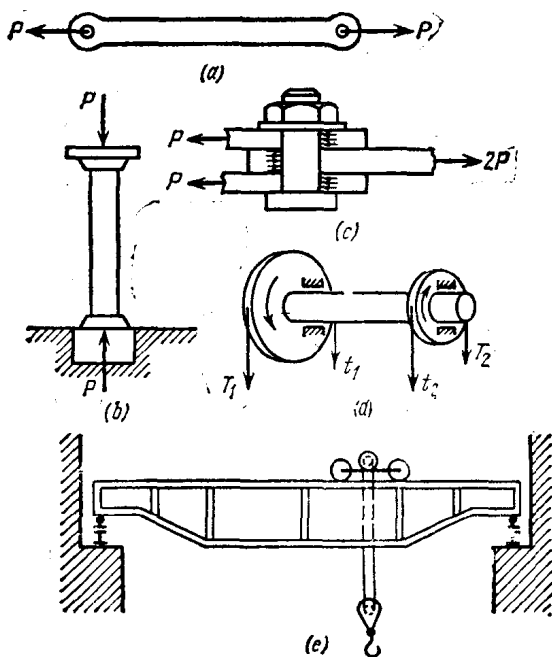


图 2

变形的基本类型可分为(参阅图 2):

- (1) 拉伸或压缩(图 a, b) 例子: 链条、绳、索、桁架受拉或受压的杆件、柱等。
- (2) 剪切(图 c) 例子: 螺钉和铆钉。
- (3) 扭转(图 d) 例子: 转轴。
- (4) 弯曲(图 e) 例子: 各种类型的梁。

这四种变形称为简单变形。

在结构中也有工作比较复杂的构件, 它们可能同时受到两种或更多种变形, 例如: 拉伸(压缩)和弯曲、弯曲和扭转、等等。这些情况都是所谓复合变形。对于上述的每一种变形, 我们将找出确定应力, 为构件选择材料和横截面尺寸, 以及确定变形大小的方法。

为了便于读者理解, 最初我们只考虑结构和机器构件中那些等截面直杆。沿全部杆长截面积均匀不变的杆即等截面直杆, 简称等直杆。该杆件所有截面的形心都位于一条直线上, 该直线称为杆轴。后面我们还要考虑具有非均匀截面积和弯曲杆轴的杆件。