

材料力学

〔英〕E. J. 赫恩 著
孙立谔 译 奚绍中 校

人民教育出版社

内 容 简 介

本书系根据英国 E. J. Hearn 所著 *Mechanics of Materials* 一书(1977 年第一版)译出,原书书名的副题为“固体与结构构件弹性及塑性变形力学的引论”。书中除讲述《材料力学》的基本内容外,还包括如下各章:厚壁圆筒,超过弹性极限的应变,旋转及承受热梯度的圆环、圆盘和圆筒,实验应力分析,圆板与圆隔板,高等弹性理论引论。全书共有113个例题及400多个附有答案的习题,并采用国际单位制。所有习题均按难易程度分为 A、A/B、B、C 四类,部分习题取自英国一些考试委员会、大学和学院的试题。

本书可供我国高等工科院校师生作为教学参考书,亦可供机械、土建方面工程技术人员参考。

材 料 力 学

[英] E. J. 赫恩著

孙立谔译 奚绍中校

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

咸宁地区印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张33.25 字数700,000

1981 年 7 月第 1 版 1982 年 7 月湖北第 1 次印刷

印数 00,001—16,600

书号 15012·0347 定价 3.50 元

原 序

近年来在教育观点、教学方法和单科训练等方面均有重大的变化。特别是材料强度 (Strength of Materials) 这门学科以多种名称出现, 其中包括固体力学、工程科学、机械工艺学、应力分析, 以及现在用得较多的材料力学 (Mechanics of Materials) 这一名称。仔细分析以这些名称提出的教学大纲 (尤其是在英国的工艺学校、大学和学院中), 就会发现在任何一学年的工程课程中或综合学习的课程中课题都有许多重复; 而课程分散处理的出现也必然使得以任何给定的水平提出的课题产生变化。因此, 虽然本书主要是要包罗一般程度的材料力学课程中至少头两年的内容, 但也考虑了上面所指出的重复, 并对最后学年的学习提供重要的线索。事实上, 根据对多种课程的调查表明, 本书所论述的内容对于最后一学年的学习, 特别是对于不分学位的选科是完全适合的。本书对于修读高等国家证书或专家教育委员会 (Technician Education Council) 证书和毕业证书的课程之学生, 以及修读为导致工程学会委员会 (Council of Engineering Institutions) 免试的任何课程之学生也是有价值的。

材料力学所研究的是固体在载荷作用下的性能。在这门学科中对于物体抵抗外力的方式、所产生的位移和在物体内部产生的应力与应变都加以研究, 以力图提供足够的知识使得所设计的任何构件在使用期限内不致失效。在本书中详细研究的一些典型构件包括梁、轴、圆筒、压杆、隔板和弹簧, 并导出了在最简单的载荷情况下涉及这些构件之力学性能的理论表达式。当然, 这些理论表达式不可避免地要依赖于某些基本假定, 而这些假定又并非总是能完全达得到的, 因而如果不考虑实验测试技术的重要性, 那末这本教材是不完整的。本书的第二十一章对于当前应用的大部分实验应力和应变测量技术专门作了简略的介绍, 并且设想这应该通过进一步阅读该章末所附参考文献目录中指出的专著而得以充实。同样地, 也应该参阅关于详细研究其它有关课程的专著, 例如材料试验 (包括蠕变、疲劳和断裂力学) 与应力及应变分析的有限单元法等课程方面的专著, 这些课题被认为已超出本书的范围。

本书的每一章 (第二十一章除外) 都包含有在各该章中推导出来的主要公式的摘要, 以及大量解出了的例题。这些例题都已经过挑选, 以按照问题的难易程度作出安排, 并说明解难题时可以参照的思想。对于图解法在适当的处所也作了介绍。为了使分析透彻, 例题中对解题的每个步骤作出了比试题的标准解答要详细很多的说明。

各章末 (第二十一章仍然除外) 还列出了大量有待学生求解的习题并附有答案。这些习题是由不同的来源搜集起来的, 其中包括一部分原系按英制单位而在本书中已换算为国际单位的过去的试题。每个习题均按照其难易程度分为下列几个等级:

A: 入门性质的比较容易的习题;

A/B: 一般地适合于第一学年学习的习题;

B: 一般地适合于第二学年学习的习题;

C: 较难的习题。

作者感谢下列一些考试委员会、大学和学院,他们允许引用其习题:

都市大学;

东中部教育联合会;

工程学会考试委员会;

机械工程师学会;

结构工程师学会;

教育学会联合会;

兰开夏和赤夏学会联合会;

伯明翰大学;

伦敦大学。

全书包括 113 个解出了的例题和 400 多个待解的习题,虽然作者希望这些例题和习题中没有错误,但某些错误仍所难免。在此情况下欢迎提出任何意见、批评和指正。

全书所用的字符和缩写,都是根据 BS1991 和 PD5686 的最新规定。

如上所述,在书中适当的处所介绍了解题的图解方法,因为根据作者的经验,这一方法较之某些更复杂的分析法易于被学生接受和理解,而且可以节省很多时间。全书也广泛应用了图示,因为用一句老的成语来说,“一个图胜过一千个字”。

最后,作者对于在本书的出版方面给予了帮助的全体人员表示感谢,特别要感谢主编 H. G. 霍布金斯教授,他给予了有价值的指导和帮助,感谢 R. 布莱特尔先生和 R. J. 菲尔普斯先生,他们对本书进行了核对、编辑和校读,感谢 J. 贝尔德女士,她为本书手稿打字。作者也对出版者表示感谢,感谢他们提出了建议和帮助,特别是在图的制备以及编辑方面。

E. J. 赫恩

1975 年 8 月

目 录

原序	1
----	---

第一章 简单应力与应变

§ 1-1 载荷	1
§ 1-2 正应力(σ)	1
§ 1-3 线应变(ϵ)	2
§ 1-4 正应力和线应变的符号规则	2
§ 1-5 弹性材料-虎克定律	2
§ 1-6 弹性模量-杨氏模数	2
§ 1-7 拉伸试验	3
§ 1-8 延性材料	5
§ 1-9 脆性材料	5
§ 1-10 泊松比	5
§ 1-11 剪应力	6
§ 1-12 剪应变	7
§ 1-13 刚度模量	7
§ 1-14 双剪	7
§ 1-15 许用工作应力-安全系数	7
§ 1-16 载荷系数	8
§ 1-17 温度应力	8
§ 1-18 应力集中-应力集中系数	9
§ 1-19 韧性	9
§ 1-20 蠕变与疲劳	10
例题	11
习题	17
参考文献	18

第二章 组合杆

摘要	19
§ 2-1 外载荷作用下的组合杆	19
§ 2-2 组合杆-“等效”模量或“组合”模量	21
§ 2-3 承受温度变化的组合杆	21
§ 2-4 组合杆(管子与螺栓的组合)	23
§ 2-5 承受外载荷和温度效应	
共同作用的组合杆	25
§ 2-6 承受温度变化的组合厚壁圆筒	25
例题	25

习题	30
----	----

第三章 剪力图和弯矩图

摘要	31
§ 3-1 剪力和弯矩	31
§ 3-1-1 剪力的符号规定	32
§ 3-1-2 弯矩的符号规定	32
§ 3-2 梁只承受集中载荷时的 剪力图 and 弯矩图	33
§ 3-3 匀布载荷作用下的剪力图和弯矩图	35
§ 3-4 集中载荷和匀布载荷 共同作用下的剪力图和弯矩图	35
§ 3-5 反弯点	36
§ 3-6 剪力 Q 、弯矩 M 和载荷集度 w 间的关系	37
§ 3-7 在力偶或力矩作用下的 剪力图 and 弯矩图	38
§ 3-8 斜向载荷作用下的剪力图和弯矩图	40
§ 3-9 用图解法作剪力图与弯矩图	40
§ 3-10 梁受任意分布载荷作用时的 剪力图 and 弯矩图	42
§ 3-11 集中载荷作用点处的剪力	42
例题	42
习题	45

第四章 弯曲

摘要	47
引言	48
§ 4-1 简单的弯曲理论	49
§ 4-2 中性轴	50
§ 4-3 截面模量	51
§ 4-4 截面的面积二次矩	52
§ 4-5 组合梁或组合板梁的弯曲	53
§ 4-6 钢筋混凝土梁-简单拉伸筋	54
§ 4-7 斜向加载	56
§ 4-8 弯曲与拉压的组合-偏心加载	56
§ 4-9 “中间四分之一”和 “中间三分之一”法则	58
§ 4-10 由于弯曲产生的剪应力	59

§ 4-11 弯曲应变能	59
例题	59
习题	66

第五章 梁的斜率与挠度

摘要	69
引言	70
§ 5-1 载荷、剪力、弯矩、斜率和 挠度间的关系	71
§ 5-2 直接积分法	73
§ 5-3 麦考莱法	76
§ 5-4 对于匀布载荷的麦考莱法	79
§ 5-5 梁在一段上受匀布载荷 作用时的麦考莱法	79
§ 5-6 对于集中力偶的麦考莱法	80
§ 5-7 莫尔“面积-力矩”法	81
§ 5-8 叠加原理	84
§ 5-9 能量法	84
§ 5-10 马克斯威尔位移互等定理	84
§ 5-11 连续梁-克拉贝隆“三弯矩”方程式	86
例题	88
习题	98

第六章 固端梁

摘要	101
引言	101
§ 6-1 中点受集中载荷作用的固端梁	102
§ 6-2 全梁受匀布载荷作用的固端梁	102
§ 6-3 受偏离中点的集中载荷作用的固端梁	103
§ 6-4 受非均匀分布载荷作用的固端梁	104
§ 6-5 固端梁的优缺点	105
§ 6-6 支座移动的影响	105
例题	106
习题	110

第七章 剪应力分布

摘要	111
引言	112
§ 7-1 弯曲剪应力的分布	112
§ 7-2 矩形截面梁的剪应力分布	114
§ 7-3 工字形截面梁的剪应力分布	114
§ 7-3-1 腹板上的铅垂剪应力	115
§ 7-3-2 翼缘上的铅垂剪应力	115
§ 7-3-3 翼缘上的水平剪应力	116

§ 7-4 圆形截面梁的剪应力分布	116
§ 7-5 剪切中心	118
例题	119
习题	123

第八章 扭转

摘要	126
§ 8-1 简单扭转理论	127
§ 8-2 面积的极二次矩	128
§ 8-3 轴内的剪应力和剪应变	129
§ 8-4 截面模量	130
§ 8-5 扭转刚度	130
§ 8-6 空心轴的扭转	130
§ 8-7 薄壁管的扭转	131
§ 8-8 组合轴-串联连结	131
§ 8-9 组合轴-并联连结	131
§ 8-10 主应力	132
§ 8-11 扭转应变能	133
§ 8-12 数据沿轴长变化-锥形轴的扭转	133
§ 8-13 弯曲与扭转的组合-等效弯矩	134
§ 8-14 弯曲与扭转的组合-等效扭矩	135
§ 8-15 弯曲、扭转和轴向推力的组合作用	135
例题	136
习题	140

第九章 薄壁圆筒与薄壳

摘要	143
§ 9-1 内压力作用下的薄壁圆筒	143
§ 9-1-1 环向应力或周向应力	143
§ 9-1-2 纵向应力	144
§ 9-1-3 圆筒尺寸的改变	144
§ 9-2 内压力作用下的薄壁球壳	146
§ 9-2-1 内部体积的改变	146
§ 9-3 承受流体压力的容器	146
§ 9-4 两端为半球的圆筒容器	147
§ 9-5 端板和接合的影响	148
§ 9-6 绕线薄壁圆筒	148
例题	150
习题	154

第十章 厚壁圆筒

摘要	156
§ 10-1 薄壁圆筒与厚壁圆筒在分析处理 上的不同-基本假定	157

§ 10-2	拉梅理论的导出	158
§ 10-3	只受内压力作用的厚壁圆筒	159
§ 10-4	纵向应力	160
§ 10-5	最大剪应力	160
§ 10-6	圆筒尺寸的改变	160
§ 10-7	与薄壁圆筒理论的比较	161
§ 10-8	图解分析-拉梅直线	162
§ 10-9	组合圆筒	163
§ 10-10	组合圆筒的图解分析	164
§ 10-11	收缩裕量	165
§ 10-12	实心轴上的轮毂	167
§ 10-13	压装	167
§ 10-14	不同材料的组合圆筒	168
§ 10-15	不同材料组合圆筒的均匀受热	169
§ 10-16	塑性屈服-“自锁”	170
§ 10-17	失效理论-屈服准则	171
§ 10-18	塑性理论-毁坏压力	171
§ 10-19	绕线厚壁圆筒	173
	例题	174
	习题	187

第十一章 应变能

摘要	190
引言	192
§ 11-1 拉伸或压缩时的应变能	193
§ 11-2 剪切应变能	194
§ 11-3 弯曲应变能	195
§ 11-4 扭转应变能	195
§ 11-5 三向主应力系统下的应变能	196
§ 11-6 体积应变能或膨胀应变能	196
§ 11-7 剪切应变能或畸变应变能	196
§ 11-8 骤加载荷	196
§ 11-9 沿轴向作用的冲击载荷	197
§ 11-10 引起弯曲的冲击载荷	198
§ 11-11 求位移的卡氏第一定理	199
§ 11-12 应用卡氏定理求角位移	201
§ 11-13 “单位载荷”法	201
§ 11-14 剪切挠度	201
例题	205
习题	218

第十二章 弹簧

摘要	221
----	-----

引言	222
§ 12-1 受轴向载荷 W 作用的密圈螺旋弹簧	223
§ 12-2 受绕弹簧轴线的扭矩 T 作用的密圈螺旋弹簧	223
§ 12-3 受轴向载荷 W 作用的松圈螺旋弹簧	224
§ 12-4 受绕弹簧轴线的扭矩 T 作用的松圈螺旋弹簧	226
§ 12-5 串联弹簧	227
§ 12-6 并联弹簧	227
§ 12-7 片弹簧或叠板弹簧: 半椭圆型	228
§ 12-8 片弹簧或叠板弹簧: 四分之一椭圆型	230
§ 12-9 蜗弹簧	231
例题	233
习题	237

第十三章 复杂应力

§ 摘要	240
§ 13-1 斜平面上的应力	241
§ 13-2 材料受纯剪切	241
§ 13-3 材料受两个互相垂直的正应力作用	242
§ 13-4 材料受正应力和剪应力的组合作用	243
§ 13-5 以相关的主应力表示主平面的倾角	244
§ 13-6 图解法-莫尔应力圆	245
§ 13-7 三向应力状态-图解表示法	247
例题	248
习题	261

第十四章 复杂应变与弹性常数

摘要	264
§ 14-1 三向应力状态下的线应变	264
§ 14-2 用主应力表示主应变	265
§ 14-3 用主应变表示主应力-二向应力系统	265
§ 14-4 体积模数 K	265
§ 14-5 体积应变	266
§ 14-6 非三向等值应力下的体积应变	266
§ 14-7 圆杆体积的改变	267
§ 14-8 侧向约束的影响	267
§ 14-9 弹性常数 E 、 G 、 K 、 ν 间的关系	268
§ 14-10 斜平面上的应变	270
§ 14-11 主应变-莫尔应变圆	272
§ 14-12 莫尔应变圆-根据一般的 应力方程所作的另一种推导	273
§ 14-13 莫尔应力圆和应变圆间的关系	275

§ 14-14 由三个已知应变画应变圆 (麦克林托克法)-应变片丛分析	277
§ 14-15 根据应变片丛读数 求主应变的分析解法	278
§ 14-16 三向应力状态下的应变能	280
例题	282
习题	290

第十五章 弹性失效理论

摘要	295
引言	295
§ 15-1 最大主应力理论	296
§ 15-2 最大剪应力理论	296
§ 15-3 最大主应变理论	296
§ 15-4 单位体积最大总应变能理论	297
§ 15-5 单位体积最大剪切应变能 (或称畸变能量)理论	297
§ 15-6 对于脆性材料的莫尔修正剪应力理论 (有时称为内摩擦理论)	298
§ 15-7 二向应力状态下(一个主应力为零) 失效理论的图示	299
§ 15-8 失效问题按二向理论的图解法	302
§ 15-9 三向应力状态下失效理论的图示	303
§ 15-9-1 塑性材料	303
§ 15-9-2 脆性材料	304
§ 15-10 结论	304
例题	305
习题	312

第十六章 非对称弯曲

摘要	315
引言	316
§ 16-1 面积的二次矩	317
§ 16-2 面积的主二次矩	318
§ 16-3 面积二次矩的莫尔圆	319
§ 16-4 面积二次矩的兰德圆	320
§ 16-5 轴的旋转: 用主值表示面积矩	320
§ 16-6 面积二次矩的椭圆	322
§ 16-7 力矩椭圆	322
§ 16-8 应力的确定	323
§ 16-9 确定应力的另一种方法	323
§ 16-10 利用力矩椭圆的另一方法	324
§ 16-11 挠度	326

例题	326
习题	333

第十七章 压杆

摘要	335
引言	337
§ 17-1 欧拉理论	337
§ 17-2 压杆的等效长度	342
§ 17-3 欧拉理论与实验结果的比较	342
§ 17-4 欧拉“有效极限”	342
§ 17-5 兰金或兰金-戈登公式	343
§ 17-6 佩里-罗伯逊公式	344
§ 17-7 英国标准中的方法(BS449)	346
§ 17-8 有初始弯曲的压杆	347
§ 17-9 偏心载荷作用下的压杆	347
§ 17-10 有横向载荷作用的压杆	350
§ 17-11 对于任何承载情况 的压杆之另一解法	352
§ 17-12 横截面不对称的压杆	353
例题	354
习题	359

第十八章 超过弹性极限的应变

摘要	363
引言	364
§ 18-1 矩形截面梁的塑性弯曲	365
§ 18-2 形状系数-对称截面	366
§ 18-3 对于工字形截面梁的应用	368
§ 18-4 非对称截面梁的部分塑性弯曲	368
§ 18-5 形状系数-非对称截面	369
§ 18-6 部分塑性梁的挠度	369
§ 18-7 梁内屈服区的长度	370
§ 18-8 毁坏载荷-塑性极限设计	371
§ 18-9 屈服后的残余应力: 弹性完全塑性的材料	372
§ 18-10 超过弹性极限时 轴的扭转-塑性扭转	374
§ 18-11 应变超过弹性限度时轴的扭转角	376
§ 18-12 空心管的塑性扭转	376
§ 18-13 表面硬化轴的塑性扭转	377
§ 18-14 扭转屈服后的残余应力	378
§ 18-15 应变硬化材料的塑性弯曲与扭转	379

§ 18-16 残余应力-应变硬化材料	379
§ 18-17 残余应力对弯曲和扭转强度的影响	380
§ 18-18 矩形截面杆偏心加载时的塑性屈服	380
§ 18-19 有应力集中时轴向载荷作用下的塑性屈服及残余应力	381
§ 18-20 轴对称构件的塑性屈服	382
例题	384
习题	394

第十九章 旋转及承受热梯度的圆环、圆盘和圆筒

摘要	400
§ 19-1 薄壁旋转圆环或圆筒	401
§ 19-2 旋转实心圆盘	401
§ 19-3 中心有圆孔的旋转圆盘	404
§ 19-4 旋转的厚壁圆筒或实心轴	406
§ 19-5 等强度旋转圆盘	407
§ 19-6 等厚圆盘和厚壁圆筒中旋转应力和热应力的组合	408
例题	410
习题	416

第二十章 非圆形截面和薄壁截面的扭转

摘要	421
§ 20-1 矩形截面	421
§ 20-2 狭长的矩形截面	422
§ 20-3 薄壁开口截面	423
§ 20-4 薄壁有缝圆管	424
§ 20-5 其它实心的(非管状的)轴	424
§ 20-6 非圆截面的薄壁闭口管(布雷特-巴索理论)	425
§ 20-7 薄壁格状截面	427
§ 20-8 薄膜比拟	428
§ 20-9 开口截面翘曲的影响	428
例题	429
习题	434

第二十一章 实验应力分析

引言	438
§ 21-1 脆性漆法	439
§ 21-2 应变计法	442
§ 21-3 不平衡桥路	443

§ 21-4 零点平衡或平衡桥路	443
§ 21-5 应变计的构造	443
§ 21-6 应变计的选择	444
§ 21-7 温度补偿	444
§ 21-8 安置程序	445
§ 21-9 基本量测系统	446
§ 21-10 直流系统和交流系统	448
§ 21-11 其它类型的应变计	448
§ 21-12 光弹性法	448
§ 21-13 平面偏振光-基本的偏振镜装置	449
§ 21-14 暂时双折射现象	450
§ 21-15 条纹图的形成	450
§ 21-16 条纹图的判读	452
§ 21-17 标定	452
§ 21-18 非整数条纹序数的确定-补偿法	453
§ 21-19 等倾线-圆偏振	454
§ 21-20 应力的分解方法	456
§ 21-21 三向光弹性	456
§ 21-22 光贴片法	456
§ 21-23 量测应变的其它方法	457
参考文献	458

第二十二章 圆板与圆隔板

摘要	459
A. 圆板	460
§ 22-1 应力	460
§ 22-2 弯矩	461
§ 22-3 斜率和挠度的一般方程	462
§ 22-4 受匀布载荷 q (压强) 和中心集中载荷 F 联合作用的圆板或圆隔板的一般情况	464
§ 22-5 边缘固定而受匀布载荷作用的圆板	464
§ 22-6 边缘自由支承而受匀布载荷作用的圆板	466
§ 22-7 边缘固定而受中心集中载荷 F 作用的圆板	467
§ 22-8 边缘自由支承而受中心集中载荷 F 作用的圆板	468
§ 22-9 沿一周作用有载荷 F 的圆板	469
§ 22-10 用于圆环承载的情况	471
§ 22-11 圆板和圆隔板受横向压力作用时的应力分布	472

§ 22-12 结果的讨论-理论的局限性	473
§ 22-13 其它几种实用上重要的载荷情况	474

B. 矩形板的弯曲

§ 22-14 边缘简支受匀布载荷的矩形板	475
§ 22-15 边缘固定受匀布载荷的矩形板	476
例题	476
习题	479

第二十三章 高等弹性理论引论

§ 23-1 应力的类型	481
§ 23-2 笛卡儿应力分量-符号及正负号规则	481
§ 23-2-1 正负号规则	482
§ 23-3 一点处的应力状态	482
§ 23-4 三向系统中的主应力 和主应变-莫尔圆图示	484
§ 23-5 三向应力和应变系 统的组合莫尔图解	485
§ 23-6 组合莫尔圆在二向 应力系统中的应用	487
§ 23-7 关于一点处应力状态的作图法	488

§ 23-8 关于一般应变平面 上应变状态的作图法	489
§ 23-9 以应力表示的平衡方程	489
§ 23-10 三向笛卡儿应力系统中的主应力	494
§ 23-10-1 三次方程的解法	494
§ 23-11 八面体平面和八面体应力	495
§ 23-12 偏应力	496
§ 23-13 偏应变	498
§ 23-14 平面应力和平面应变	498
§ 23-14-1 平面应力	499
§ 23-14-2 平面应变	500
§ 23-15 应力-应变关系	500
§ 23-16 应变-位移关系	501
§ 23-17 应变的变换方程	503
§ 23-18 相容性	503
例题	505
习题	510

符号	517
附录 工程材料典型的力学和物理性质	519

第一章 简单应力与应变

§ 1-1 载 荷

在任何工程结构或机械装置中,各个构件将承受外力,而这些外力是由构件所在工作的服役条件或环境引起的。若构件和杆件处于平衡状态,虽然外力的合力将为零,但这些外力还是在杆件上施加了载荷,后者使杆件变形,并且必然受到材料内部产生的内力的抵抗。

若一圆柱形杆如图 1-1 所示,沿它的轴线承受一个轴向拉拽或推顶,则称此杆承受拉伸或压缩。出现于牵引索或升降机吊索中的力是拉伸的典型实例,而在椅子腿中(当你坐在椅子上时)或建筑物的支柱中则出现压缩。

在国际标准单位制(SI)中,载荷系以牛顿来度量,尽管一个牛顿就工程上来说是个非常小的载荷。因此,在大多数工程应用中,载荷系按 SI 的倍数出现,即千牛顿(kN)或兆牛顿(MN)。

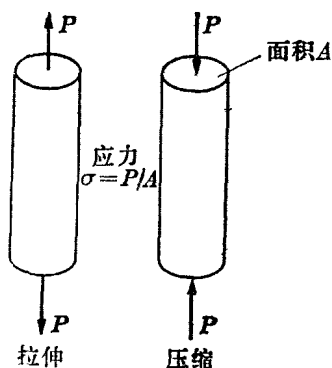


图 1-1 正应力的类型

载荷可以按若干不同的方式作用于杆件上。典型的加载类型有:

- (a) 静载荷或死载荷,即不变动的载荷,一般系由重力效应所引起。
- (b) 活载荷,就像例如卡车通过桥梁所产生的载荷。
- (c) 冲击或冲撞载荷,由急骤的撞击产生的载荷。
- (d) 疲劳、波动或交变的载荷,载荷的大小及符号系随时间变化。

§ 1-2 正 应 力 (σ)

在上节中已经注意到,作用在一个处于平衡的物体上的外力受到材料内部产生的内力的抵抗。因此,如果一根杆受到均匀拉伸或压缩,即受到沿横截面均匀地或等值地施加的轴向力,那么,杆中产生的内力也是均匀分布的,而我们就说此杆承受均匀的正应力,该应力被定义为:

$$\text{应力}(\sigma) = \frac{\text{载荷}}{\text{面积}} = \frac{P}{A}$$

应力 σ 从而根据载荷的特征可以是拉应力或压应力,并将以牛顿/平方米(N/m^2)或其倍数为单位来度量。

在某些情况下,加载状况使得应力在任一给定横截面范围内将是变化的,此时,任意一点处的应力系由 $\delta P/\delta A$ 当 δA 趋于零时的极限值所给定。

§ 1-3 线 应 变 (ϵ)

如果一根杆承受轴向载荷,从而承受应力,则杆长将发生改变。若杆的原长为 L , 而长度的改变量为 δL , 则所产生的应变定义为:

$$\text{应变}(\epsilon) = \frac{\text{长度的改变}}{\text{原长}} = \frac{\delta L}{L}$$

因此, 应变是材料变形的一个度量, 并且是个无量纲的量, 即应变没有单位; 它仅仅是具有同样单位的两个量的比值(图 1-2)。

由于实际上材料在载荷作用下的变形十分微小, 因此, 按应变 $\times 10^{-6}$ 的方式, 亦即以微应变(其符号为 $\mu\epsilon$) 来度量应变常常是方便的。

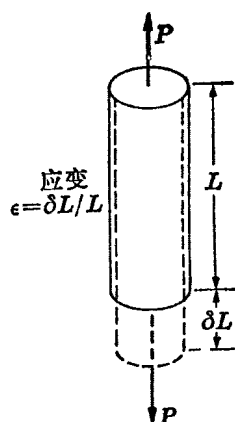


图 1-2

§ 1-4 正应力和线应变的符号规则

拉应力和拉应变按其意义被认为是正值。

压应力和压应变按其意义被认为是负值。

因此, 一个负的应变导致长度的减小。

§ 1-5 弹性材料-虎克定律

一种材料, 如果当卸去载荷时恢复到它原来的、未加载时的尺寸, 那么被称之为弹性的。适用于大部分工程材料的, 至少适用于它们的部分承载范围的一种特定形式的弹性使得变形与产生它的载荷成正比。因为载荷正比于它们所引起的应力, 而变形与应变成正比, 这也就意味着当材料为弹性时, 应力与应变成正比。因此, 虎克定律陈述:

$$\text{应力}(\sigma) \propto \text{应变}(\epsilon)$$

即

$$\frac{\text{应力}}{\text{应变}} = \text{常数}$$

在以后各节中将看到, 大多数铁合金在某个极限以内遵循这个定律, 并且甚至可以假设虎克定律适用于其它一些工程材料, 如混凝土、木材和非铁合金, 而有足够的精度。

当材料为弹性时, 由任何载荷产生的变形在载荷移去时将完全消失; 没有永久变形。

§ 1-6 弹性模量-杨氏模数

在材料的弹性极限以内, 也即在虎克定律适用的范围以内, 前已表明:

$$\frac{\text{应力}}{\text{应变}} = \text{常数}$$

此常数用符号 E 表示, 并称为弹性模量或杨氏模数。于是

$$E = \frac{\text{应力}}{\text{应变}} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1-1)$$

$$= \frac{P}{A} \div \frac{\delta L}{L} = \frac{PL}{A\delta L} \quad (1-2)$$

杨氏模数 E 一般认为在拉伸或压缩中是一样的, 对于大多数工程材料, 此模数 E 具有大的数值。典型的是, 对于钢来说 $E = 200 \times 10^9 \text{N/m}^2$, 从而由公式(1-1)可以看出, 由于

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (1-3)$$

因而一般应变非常小。

在大多数一般的工程实际中应变很少超过 0.001 或 0.1%, 因此本书中以后所用的关于变形与初始尺寸相比很小的假定一般地说是有足够根据的。

任何材料的杨氏模数之真实的值通常是由如下所述用材料的试件作标准拉伸试验来确定的。

§ 1-7 拉 伸 试 验

为了比较不同材料的强度, 必须作出某种标准方式的试验以建立它们的相对性质。一个这样的试验是标准拉伸试验, 在此试验中使一个等截面的圆杆承受逐渐增加的拉伸载荷直到发生破坏。在整个加载过程中利用引伸仪 (§ 21-11) 记录下试件所选标距长度变化的量测, 而得出如图 1-3 中所示的载荷对伸长或应力对应变的图线; 此图线示出用软钢(低碳钢)杆所作拉伸试验的典型结果; 其它材料将呈现出不同的曲线, 但具有相似的一般型式。

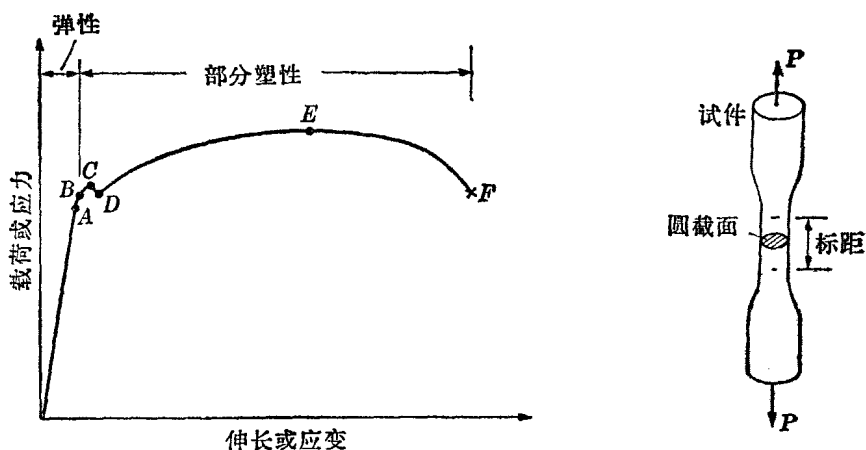


图 1-3 软钢的典型拉伸试验曲线

在试验的第一阶段将要看到, 材料遵循虎克定律, 即材料弹性地工作, 并且应力与应变成比例, 给出所指示的直线图线。然而, 当图线的线性性质中止时, 最终达到某一点 A , 这一个点称之为比例极限。

在超过比例极限的一个小范围内, 就载荷移去时变形完全消失(即应变回到零)这个意义上

来说,材料可能仍然是弹性的,但不适用虎克定律。此种情况的极限点 B 称为弹性极限。就大多数实用的目的而言,常可以为 A 点与 B 点是重合在一起的。

超过弹性极限后,材料发生塑性变形,而应变是不能全部消失的了。因此,载荷移去时将有些永久变形或永久形变。在称为上屈服点的点 C 和称为下屈服点的点 D 之后,应变出现相对地急速的增长,而荷载或应力并没有相应的大得多的增长。图线因而变得平缓得多,并且此材料的弹性阶段要覆盖应变轴的大得多的部分。材料容忍这些巨大塑性变形的能力乃是材料的所谓延性的一个度量,这将在下面较详细地加以论述。

对于某些材料,不可能觉察出上屈服点和下屈服点之间的任何差别,而在某些情况下根本就不存在屈服点。在这样一些情况下,常使用一个检验应力来指示开始发生塑性应变,或者把检验应力作为与另一类似材料相关性质的一种比较。

例如,0.1%检验应力就是那样的应力,当其移去时产生原标距长度的0.1%的永久应变或永久形变。

超过屈服点后,为使应变达到图线上的点 E ,需要荷载有某种增长。在图线的点 D 和点 E 之间材料被说成处于弹塑性状态,此时有的截面仍然是弹性的,并因而使得倘若移去荷载能够恢复初始尺寸,至于其余的截面则是塑性的。超过 E 点后,杆的横截面积开始在一段相对地小的长度范围内急骤收缩,我们称杆产生颈缩。这种颈缩发生于载荷下降之时,而在 F 点处杆终于产生断裂。

断裂时的标称应力,亦即称为最大拉应力或极限拉应力的那个应力,是由 E 点处的载荷除以杆的初始横截面积给出的。(这也称为杆的材料的拉伸强度。)由于颈缩过程使得横截面积大大减小,因而断裂时的实际应力往往比上述的值要来得大。然而,由于设计人员感兴趣的是杆的整个横截面所能承担的最大载荷,因此断裂时的实际应力很少有任何实用价值。

如果在已经超过屈服点 C 之后,例如达到某一位置 S 时(图1-4)移去载荷,卸载线 ST 就大多数实用目的而言可取为直线。这样,尽管在加载到 S 点的过程中包含有弹性部分(OC)和部分塑性的部分(CS),卸载过程却全是弹性的。从与应变 OT 关联的永久伸长开始的第二个载荷循环于是将遵循直线 TS 并沿着原来的曲线继续下去直到在 F 点处破坏。可见,此重复载荷循环具有增大材料弹性范围,亦即把有效屈服点由 C 提高到 S 的效应,而材料的拉伸强度则并不改变。这种过程可以沿直线 PQ 等等加以重复,而材料被称为已经加工硬化。

事实上,仔细的观察表明,此时材料将不再呈现真正的弹性,因为卸载和再加载图线将构成一个微小的滞留圈,无论哪一根图线都不是真正的。重复的加载和卸载将使屈服点趋近于极限应力值,但断裂前的伸长或应变将大大地减少。

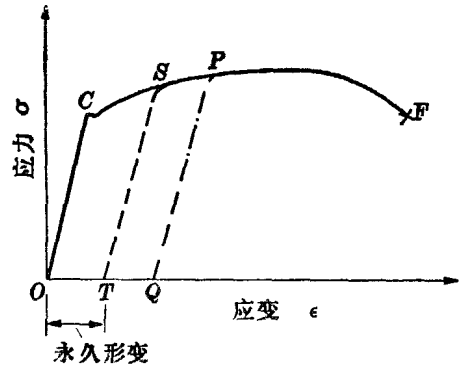


图 1-4 应变超过屈服点后的永久变形

§ 1-8 延 性 材 料

在上面已经看到, 图 1.3 中图线上所示的部分地塑性的范围比之弹性范围覆盖了应变轴的宽得多的部分。因此, 材料在这个部分地塑性的范围内其伸长要比弹性范围内的伸长大得多。材料容忍这些巨大伸长变形的能力, 亦即能够塑性伸长的能力, 称为材料的延性。具有大的延性的材料称为延性材料, 延性的量值是通过量测延伸率或面积收缩率而得到的, 两者被定义如下。

$$\text{延伸率} = \frac{\text{断裂前标距范围内的伸长量}}{\text{标距原长}} \times 100$$

$$\text{面积收缩率} = \frac{\text{颈缩处横截面积的收缩量}}{\text{原横截面积}} \times 100$$

后一个值不因选择的标距而受影响, 因而一般被取作延性的更为有效的度量以供参考之用。

§ 1-9 脆 性 材 料

脆性材料是一种在断裂前呈现相对地小的伸长从而拉伸试验图线上部分地塑性的区域大大收缩了的材料(图 1-5)。如果说图 1-3 是对于低碳钢的, 那么图 1-5 就是对于含碳量较高的强度要高得多的一种钢的。对于脆性材料, 断裂时只有很小的甚或没有颈缩。

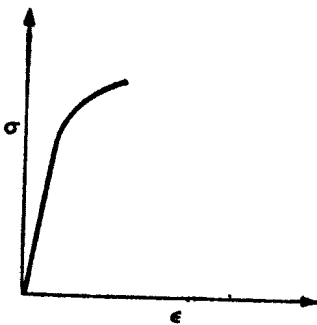


图 1-5 脆性材料的典型拉伸试验曲线

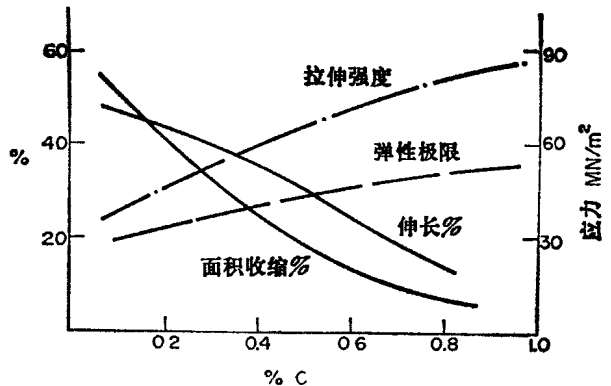


图 1-6 钢的机械性质随含碳量的变化

钢的力学性质随含碳量的典型变化示于图 1-6。

§ 1-10 泊 松 比

研究一个承受拉伸载荷作用如图 1-7 所示的矩形截面杆。在此载荷作用下, 杆将伸长一个量 δL , 使杆产生纵向应变

$$\epsilon_L = \frac{\delta L}{L}$$

同时, 杆还将在横向呈现尺寸的收缩, 亦即杆的宽度和厚度都将减小。相伴的横向应变两者相等, 与纵向应变反号, 其表达式为:

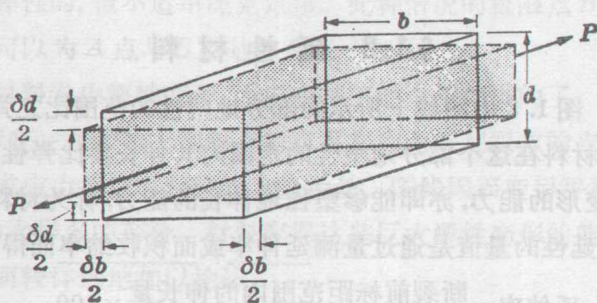


图 1-7

$$\epsilon_{\text{横向}} = -\frac{\delta b}{b} = -\frac{\delta d}{d}$$

只要材料的受力保持在弹性范围内，则横向应变与纵向应变的比值将总是常量。此比值称为泊松比，横向应变的负号通常予以省略而只留下应变大小的一个比值，即

$$\text{泊松比}(\nu) = \frac{\text{横向应变}}{\text{纵向应变}} = \frac{\delta d/d}{\delta L/L} \quad (1-4)$$

对于大多数工程材料， ν 的值在 0.25~0.33 之间。

由于

$$\text{纵向应变} = \frac{\text{纵向应力}}{\text{杨氏模数}} = \frac{\sigma}{E} \quad (1-4a)$$

因此

$$\text{横向应变} = \nu \frac{\sigma}{E} \quad (1-4b)$$

§ 1-11 剪 应 力

我们来考虑如图 1-8a 所示材料的一个块体或者一个部分，它受到一对等值而反向的力 Q 作用(这样一个系统可以在自行车制动闸块中当其与车轮接触时加以实现)。于是就有材料的一个层次在另一层次上滑动以产生如图 1. 8b 所示破坏形式的趋势。如果这一破坏受到限制，那就产生剪应力 τ ，其定义如下：

$$\text{剪应力}(\tau) = \frac{\text{剪切载荷}}{\text{抗剪面积}} = \frac{Q}{A}$$

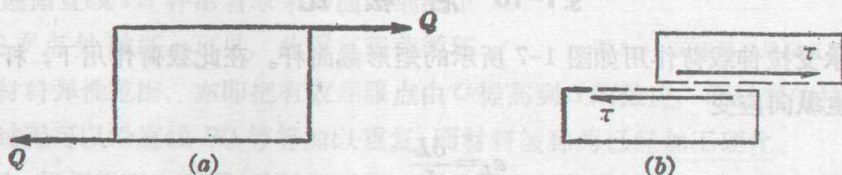
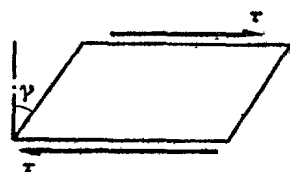


图 1-8 剪力及其导致的剪应力系统，显示了由于两个平面相对滑移产生的典型破坏形式

这种剪应力总是与它的作用面相切；而正应力则总是与它们的作用面正交。

§ 1-12 剪 应 变

如果再一次把图 1-8a 中的块体当作是自行车的制动闸块, 那么很清楚, 当施闸并产生剪力时闸块将不再保持为矩形。闸块事实上将变形为或“应变”成图 1-9 所示的形状。变形的角度 γ 于是称之为剪应变。



剪应变以弧度来度量, 因而是无量纲的量, 亦即它没有单位。 图 1-9 剪应力产生的变形(剪应变)

§ 1-13 刚 度 模 量

材料在弹性范围内, 剪应变与引起它的剪应力成正比, 即

$$\frac{\text{剪应力}}{\text{剪应变}} = \frac{\tau}{\gamma} = \text{常数} = G \quad (1-5)$$

常数 G 称为刚度模量或剪切模量, 并且与作用有正应力时所用的弹性模量直接相当。模量这个词就是如此意味着在每一情况下应力与应变的比值。

§ 1-14 双 剪

我们来考虑图 1-10a 中所示简单的搭接铆钉联结。当载荷施加于板上时, 铆钉承受剪力, 该剪力趋向于如图中所示出的那样在一个平面上剪切铆钉。然而, 在图 1-10b 所示具有两块盖板的对接联结中,

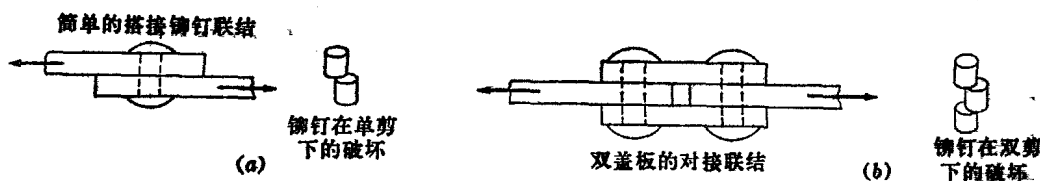


图 1-10 (a) 单剪 (b) 双剪

的对接联结中, 每个铆钉在两个面上受到可能的剪切, 亦即双剪。在这样的情况下, 抵抗所施加的力的是铆钉的两倍横截面面积, 因而产生的剪应力由下式给出:

$$\text{剪应力 } \tau (\text{双剪时}) = \frac{P}{2A} \quad (1-6)$$

§ 1-15 许用工作应力-安全系数

对于任何结构构件或杆件, 最合适的强度或者刚度准则通常是某一个不得超过的最大应力或最大变形。就应力而言, 这个值一般称为最大许用工作应力。

由于载荷条件、设计程序、制造方法等等不精确, 设计人员在其设计中常常引入一个安全系数, 其定义如下:

$$\text{安全系数} = \frac{\text{最大应力}}{\text{许用工作应力}} \quad (1-7)$$

然而, 鉴于很少允许产生塑性变形, 这个定义有时被修正为