

压力容器设计的力学基础 及其标准应用

李建国 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



压力容器设计的力学基础 及其标准应用

李建国 编著



机械工业出版社

本书从压力容器设计需要出发,深入浅出地介绍了与容器设计相关的力学基础知识及标准应用。重点是讲述基本概念,澄清模糊认识,避免大量数学推演。同时,本书还系统地介绍了压力容器分析设计的概念与方法以及相关的力学知识。本书是压力容器设计与审核人员必备的技术资料;同时,本书对从业人员考取执业资格证书也有直接帮助。

图书在版编目(CIP)数据

压力容器设计的力学基础及其标准应用/李建国编著. —北京:机械工业出版社, 2004.1

ISBN 7-111-13191-6

I. 压... II. 李... III. 压力容器—设计—断裂力学 IV. TH490.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 091799 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:沈红 版式设计:冉晓华 责任校对:李秋荣

封面设计:陈沛 责任印制:路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·8 印张·310 千字

0 001—4 000 册

定价:28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前言

压力容器能否安全运行是至关重要的，在压力容器设计中强度分析与计算占有很大比重；而在分析与计算中又涉及到许多力学知识，如材料力学、弹性力学、塑性力学、板壳理论、实验应力分析以及有限元法等数值计算。如果让设计人员掌握这么多内容是不现实的。有的设计与审核人员曾提出：能否出一本与压力容器设计相关的力学书籍，把与压力容器设计有关的力学概念、解题方法及标准应用集中起来系统讲述一下，需要时拿来参考，不必再去从众多的力学书中翻阅查寻。笔者多年来从事压力容器的科研工作、标准编制及人员培训、考核工作，对设计人员在力学方面有哪些不足、需要了解什么、掌握什么有所了解。感到比较普遍存在的问题是力学概念不清楚，似懂非懂，例如：应力是指某点的还是某地区的？凸形封头怎么会在内压下发生失稳？应力为什么还要分类？静应力在疲劳分析时要不要考虑？……对标准中的设计公式也是不知来龙去脉及力学意义，有时发生不顾使用前提的盲目套用。也有的过多地依赖计算机软件，对分析结果及出现的问题作不出确切的解释。本书就是从压力容器设计人员、审核人员及检测人员的实际需要出发，对设计中涉及到的力学基础知识、基本概念、分析方法以及标准应用结合示例作了深入浅出的论述，其中包括材料力学、弹性力学、塑性力学、板壳理论等相关内容，这些内容紧紧围绕压力容器设计这个主题，没有过多考虑力学本身的系统性与完备性。如果读者想进一步了解相关内容，本书也列出了参考文献供读者查阅。

力学与数学联系最为紧密，许多力学概念只有通过数学语言才能确切地表达出来，比如应力的概念。但许多设计人员对力学中的大量公式与符号有些望而生畏，不愿触及，停留在感性认识的层面上，对压力容器的许多力学现象和出现的某些问题喜欢采用直观直觉的自圆其说来分析，也不管在力学上有无依据，这是不科学的、也是不可靠的。实际上，容器中所涉及的数学问题对设计人员来说应没有原则上的困难，但本书在涉及到数学内容较多的问题时，如板壳问题的求解，尽量采取最简捷的方法给出结果或给出解决问题的方法与思路，把数学推演降到最低限度。笔者也不愿意让大量的数学推演冲淡了读者对概念的理解。

压力容器的设计观念不断变化与更新，分析设计已成为国际上压力容器设计的趋势，压力容器分析设计在国内外的使用越来越广泛。分析设计比常规设计涉及了更多的力学知识、更多的新概念，如：极限分析、棘轮现象、安定性、等效线性化处理等等，诸如此类的概念如果搞不清，使用起相应的标准就比较困难，甚至看不懂某些条文在说什么。本书系统地介绍了压力容器分析设计（包括疲劳设计）的基础知识。许多内容是笔者主编 JB4732 分析设计标准过程中的心得，也有的内容是对多年来在宣贯标准、培训与考核工作中大家所提次数较多问题的解释。因此，希望通过本书能对读者在使用分析设计标准时有所帮助。

为适应形势需要和提高从业人员的水平，我国对压力容器设计人员与审核人员的执业资格认证工作也进行了改革，无论是取常规设计或是分析设计人资格、审核人资格都要参加国家质量技术监督部门的统一考试。力学基础知识也是统考内容的一部分，因此，不掌握一定深度与广度的力学知识也是很难在统考中胜出的。本书每章后面都给出了思考题，用以帮助读者检验自己的力学知识掌握的程度，答案都在本书正文之中。

本书在论述过程中，举出许多示例，这些例子是作为说明概念和展示解决问题的方法所用，不能作为设计依据或替代标准中的相关内容。

限于时间和水平，不当之处敬希读者不吝指正。

作者

2003 年 7 月北京

目 录

前言

第 1 章 绪论 1

- 1.1 变形固体与变形固体力学的
基本假定 1
- 1.2 外力与内力、截面法 3
- 1.3 应力的概念 5
- 1.4 位移与变形 6

思考题 8

第 2 章 拉伸与压缩 9

- 2.1 轴力与截面上的应力 9
- 2.2 本构关系与弹性模量、
泊松比 10
- 2.3 圆形薄壁压力容器中的应力 11
- 2.4 变形位能与虚位移原理 11
 - 2.4.1 变形位能 11
 - 2.4.2 虚位移原理 12
- 2.5 静定与静不定的概念 14
- 2.6 材料的力学性质 16
 - 2.6.1 应力—应变关系曲线 16
 - 2.6.2 断后伸长率与断面收
缩率 17
 - 2.6.3 冷作硬化 18
- 2.7 压力容器中的蠕变与应力
松弛 18
- 2.8 许用应力法与极限载荷法 19
 - 2.8.1 许用应力与安全系数 19
 - 2.8.2 极限载荷设计法 20

思考题 21

第 3 章 剪切与扭转 22

- 3.1 剪切 22
 - 3.1.1 基本概念 22
 - 3.1.2 铆接计算 23
 - 3.1.3 剪应力互等定理 23

3.2 扭转及圆截面轴在扭转时的 应力与变形 24

- 3.2.1 扭转的概念 24
- 3.2.2 圆轴扭转时的应力
与变形 24
- 3.2.3 圆轴扭转时的强度
与刚度 26
- 3.2.4 示例 27

思考题 28

第 4 章 弯曲 29

- 4.1 弯曲时的内力与应力 29
 - 4.1.1 梁的支座与反力 29
 - 4.1.2 弯矩与剪力 30
 - 4.1.3 弯矩、剪力与分布载荷
集度间的关系 31
 - 4.1.4 弯曲时的正应力 32
 - 4.1.5 弯曲时的剪应力 34
 - 4.1.6 强度条件 34
- 4.2 弯曲时的变形 35
 - 4.2.1 梁的挠曲线 35
 - 4.2.2 梁的挠度与转角 36

4.3 弹性基础梁	39	器中的应用	90
4.4 梁弯曲在容器设计中的应用 ...	40	6.5.1 解决塑性问题的两种 途径	90
4.4.1 波形膨胀节	40	6.5.2 极限分析的基本假设 与特点	91
4.4.2 卧式容器	42	6.5.3 塑性铰	92
4.5 叠加原理的应用	44	6.5.4 求极限载荷的一般方法	94
思考题	45	6.5.5 极限载荷的实验测定	97
第5章 应力状态与强度理论	46	6.5.6 极限分析在压力容器设计中 的应用	99
5.1 一点的应力状态	46	思考题	101
5.1.1 应力状态的确定	46	第7章 板壳理论基础	103
5.1.2 应力张量的分解与 不变量	49	7.1 板和壳的特点与基本假定	103
5.2 主应力与应力强度	51	7.2 轴对称载荷下的圆平板	104
5.2.1 主应力与主方向	51	7.2.1 平衡方程	105
5.2.2 应力强度	52	7.2.2 几何关系	106
5.3 强度理论	53	7.2.3 挠度与应力、弯矩 的关系	106
5.3.1 强度理论的概念	53	7.2.4 轴对称载荷下圆板的微分 方程	107
5.3.2 四个强度理论	54	7.2.5 轴对称载荷下圆板的解 ...	107
思考题	56	7.3 压力容器可拆卸平封头的 计算	109
第6章 弹性力学与塑性力学 基础	58	7.4 受轴对称载荷的环板	111
6.1 弹性力学概论	58	7.5 旋转壳体的薄膜理论	113
6.1.1 极坐标下的平面问题	59	7.5.1 壳体与平板受力比较	113
6.1.2 弹性力学的基本方程 与解法	62	7.5.2 曲面的几何知识	113
6.1.3 弹性力学在容器中的 应用	66	7.5.3 壳体中的内力	114
6.1.4 轴对称问题	73	7.5.4 无矩应力状态及其存 在条件	115
6.2 塑性力学基础	80	7.5.5 压力容器封头的薄膜 应力	118
6.2.1 塑性力学的特点	80	7.5.6 球形容器的薄膜应力	122
6.2.2 增量理论与全量理论	81	7.6 旋转壳的弯曲理论与边缘 效应问题	123
6.2.3 屈服条件	83	7.6.1 边缘效应的概念	123
6.2.4 加载与卸载	84	7.6.2 轴对称载荷下的圆柱壳	
6.3 塑性失效准则的容器筒体 设计公式	85		
6.4 厚壁压力容器的自增强	88		
6.5 极限分析原理及在压力容			

的弯曲	124
7.6.3 圆筒体与平封头连接时 的边缘应力	128
7.6.4 圆筒体与其他封头相连 时的边缘应力	132
7.6.5 球壳开孔接管问题	133
思考题	136

第 8 章 稳定性问题 138

8.1 基本概念	138
8.2 压杆的稳定性与临界载荷 计算	140
8.2.1 压杆的稳定性与欧拉 公式	140
8.2.2 出现塑性变形的情况	141
8.2.3 欧拉公式适用范围	142
8.2.4 稳定性条件	143
8.3 外压作用下圆筒的稳定性	144
8.4 外压容器设计	147
8.4.1 $D_0/\delta_e \geq 20$ 的圆筒与 管子	147
8.4.2 $D_0/\delta_e < 20$ 的圆筒与 管子	150
思考题	151

第 9 章 应力分析方法 153

9.1 解析方法	153
9.1.1 精确解	153
9.1.2 近似解	155
9.2 数值方法	156
9.2.1 差分法	156
9.2.2 有限元法	156
9.3 实验应力分析	164
9.3.1 电测法原理	164
9.3.2 现场测试的一些问题	165
思考题	169

第 10 章 压力容器的分析设

计 170

10.1 常规设计与分析设计	170
10.2 分析设计的基本方法	174
10.2.1 塑性理论在分析设计中的 应用	175
10.2.2 安定性问题	175
10.2.3 低周疲劳与棘轮现象	180
10.3 应力分类	184
10.3.1 概述	184
10.3.2 分类依据	185
10.3.3 一次应力 (primary stress)	186
10.3.4 二次应力 (secondary stress)	188
10.3.5 峰值应力 (peak stress)	189
10.3.6 示例	194
10.4 各类应力的确定	195
10.4.1 等效线性化方法	195
10.4.2 一次结构法	197
10.5 应力强度评定	200
10.5.1 应力强度计算	201
10.5.2 各类应力强度的评定	202
10.6 分析设计中需要说明的 几个问题	204
10.6.1 分析设计的计算公式与 曲线	204
10.6.2 应力分析的免除	205
10.6.3 塑性分析的应用	206
10.6.4 分析设计过程的提示	206
10.7 示例	207
思考题	210

第 11 章 压力容器的疲劳分

析 212

11.1 概述	212
---------------	-----

11.2 循环的基本特性	213	11.5.1 容器是否要进行疲劳	
11.3 高周疲劳与低周疲劳	214	分析的规定	227
11.3.1 高周疲劳	215	11.5.2 疲劳分析	229
11.3.2 低周疲劳	215	11.6 容器接管对疲劳的影响	232
11.3.3 平均应力的影响	217	11.7 提高疲劳寿命的一些措施	234
11.3.4 应力集中的影响	220	11.8 综合例题	234
11.3.5 应力指数	222	思考题	244
11.4 累积损伤	224	参考文献	246
11.5 压力容器的疲劳设计	226		

第 1 章

绪 论

1.1 变形固体与变形固体力学的基本假定

力学分为三大门类，即流体力学、一般力学和固体力学。流体力学研究的对象是流体，一般力学研究的是刚体。所谓刚体是指在外力作用下，固体的几何形状与尺寸绝对不变，而固体力学则是研究变形固体的。一切固体都是变形固体，在外力作用下固体中微粒间的相对位置发生变化，因此便产生了变形。如压力容器的筒体与封头在压力或温度作用下都会产生变形。不产生变形的绝对刚体实际上是不存在的，因此刚体也只是一个相对的概念。一般力学在研究物体整体运动与平衡的问题时，由于物体变形十分微小或对所研究的问题不产生什么影响，这时便把研究对象视为刚体。例如：人造卫星，我们只关心如何发射及发射到太空沿什么轨道运行而它本身变形如何则处于极次要的地位。

对于变形固体，在外力作用下都会产生变形，但当外力增大到某一数值之后就可能导致变形体的失效、破坏。在工程结构中是不允许出现这种情况的，尤其是压力容器这样的承压结构一旦出现问题就会造成巨大损失。例如：在 20 世纪 40 年代，美国俄亥俄煤气公司天然气储存基地，容器发生事故致使 128 人死亡，财产损失达 680 万美元。20 世纪 70 年代西班牙马德里一台 5000m^3 的球形煤气储罐，在水压试验时发生破坏，造成 15 人死亡。其他事例还有不少。因此，必须要考虑设备在外载荷作用下它的强度与刚度，进行合理设计，确保设备安全可靠地运行。这也是研究固体力学的主要目的。

变形固体力学的范畴包括材料力学、弹性力学、塑性力学、结构力学等，它们都是研究结构强度与刚度的科学，运用各自的理论与方法进行分析、计算，最终确定出结构所需要的安全尺寸。

变形固体力学与一般力学也有共同之处，那就是均建立在静力学定律的基础之上，但对于变形固体力学来说，整个物体的运动规律就变得十分次要了。

材料力学是变形固体力学的一个分支，与其他固体力学分支的不同就在于它

所研究的对象基本上是杆状结构,研究它们在拉伸、压缩、剪切、扭转和弯曲状态下的变形与应力,研究方法也相对简单。对于非杆状结构,如厚壁筒体、板壳及其他实体结构就需要采用弹性力学进行分析计算了。板壳理论属于实用弹性力学的范畴,是在弹性理论的基础上,根据所研究对象的特点又作了一些假设,建立起一套解决板与壳问题的理论与方法。

变形固体力学有几个基本假设,作这些假设的目的就是把那些与问题无关或影响不大的次要因素加以忽略,保留主要因素,用理想情况代替物体的真实情况,达到问题可以求解的目的,并给出工程上允许的结果。

这些基本假设是:

(1) 材料均质性 所谓材料均质性就是指材料的性质与由物体中切取出的体积大小无关,即不同的点具有相同的力学性质。这里,忽略了材料的微观特征,因为结构尺寸远远大于晶粒尺寸。有了这个假设就可以从结构中任取一个微元体进行分析,然后把结果用于整体。

(2) 连续性 构成物体的物质连续地充满着它占有的体积没有间断,如压力容器就是被钢铁材料所充满。有了这个假设,我们就可以对连续介质取微小单元进行无穷小量分析,导出各种方程。这样,所求得的应力、应变和位移等力学量也是连续的,可以用坐标的连续函数描述它们的变化规律。

(3) 完全弹性 在外力作用下结构的形状与尺寸会发生改变,但结构都具有抵抗外力作用的能力,当外力卸掉以后,它又会恢复原有的形状与尺寸,变形固体的这种性质称为弹性。对于塑性材料在未达到弹性极限前都处于完全弹性状态,这时,虎克定律可以采用。

实际上完全弹性体也是没有的,一般情况是:有一部分是随着外力的去除而变形消失,这种变形称为弹性变形;另一部分是外力消除后变形保留下来,这种变形称为塑性变形或残余变形。如果材料在外力作用下能产生较大的塑性变形,这种性质就称为塑性。弹性与塑性也是辩证的、有条件的。例如在受同样作用力的情况下,金属在常温时表现为弹性的,但在高温时却表现为塑性的。

(4) 各向同性 这个假设是指物体上同一个点不同的方向都具有相同的力学性质,也即与它在介质中的原始方位角无关,弹性常数不随方向而改变。

符合以上4个假设的物体就称为理想弹性体。除此之外,还有一个很重要的假设,那就是小变形假设。

(5) 小变形假设 物体受力后,整个物体所有各点的位移远远小于物体变形前的尺寸,应变与转角远远小于1。这样,我们在建立静力平衡方程或做其他分析时可以不考虑外力作用点在物体变形时所产生的位移,用变形前的尺寸代替变形后的尺寸而不会引起显著误差。有了这个假定,弹性力学中的微分方程都成为线性的,在数学上得以大大简化;有了这个假定,在处理问题时也可以采用叠加

原理。

以上 5 个基本假定对于变形固体力学都适用。但具体到材料力学、塑性力学、板壳理论则根据自身的特点又增加了一些适合于自己的假定，使问题可进一步简化。比如在材料力学中，在对梁进行横向弯曲计算时引入了“平截面”假定，这样算出截面上的弯曲应力沿厚度方向是线性分布的。如果不采用这个假定，用弹性力学精确计算，应力沿截面就不再是线性分布而是曲线分布的。可弹性力学计算要比材料力学的计算繁琐得多。

总之，解决变形固体力学问题，要根据所研究问题的特点，区分出本质与非本质的东西。抓住主要因素忽略次要或极次要因素，做必要的假设与近似，使问题得以简化达到可解的程度，并由此给出工程上所需的结果。

1.2 外力与内力、截面法

力是衡量各物体之间相互机械作用的尺度。如果把结构看成是与周围各物体分离的，那就可以用力来代替周围各个物体对于该结构的作用，这样的力称为外力。为了研究结构的强度或刚度，就应首先搞清外力。

若按分布情况来分，外力可分为体积力和表面力。外力的作用虽然多数是直接和物体相接触，但也可以有不接触物体而使它变形，如重力，磁力等。把接触物体时作用的外力称为表面力，不接触物体作用的外力称为体积力。体积力分布在物体的整个体积内，作用在物体的每个质点上。而表面力只作用在物体的表面部分。表面力又分为集中力和分布力两种，分布力又可分为均匀分布力和非均匀分布力。如设备上等厚的雪载荷属于均匀分布力，储罐内的静水压力就属于非均匀分布力。若外力只作用在物体的一个点上，这个力就称为集中力。显然这是一种抽象的近似说法，实际外力不可能仅作用在一个“点”上，因为“点”是没有大小的。

若按载荷作用性质分类，外力又可分为静载荷与动载荷。例如：球罐中介质压力、雪载荷、自重等都属于静载荷。反应器中介质的波动则属于动载荷。我们把随时间而做周期性变化并且多次重复地作用在物体上的载荷称为交变载荷。压力容器的疲劳失效就是由交变载荷引起的。

外力不仅包括给定的力，还包括约束反力，给定力是物体可能产生破坏的原因，而约束力是使力系达到平衡所不可缺少的，如图 1-1 中的卧式容

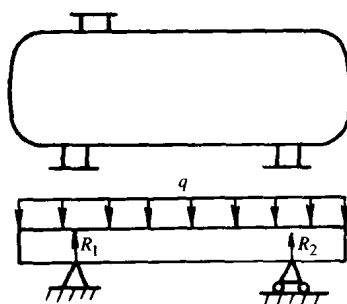


图 1-1 约束反力

器, 介质压力、自重属于外力而支座的约束反力 R_1 、 R_2 也属于外力。我们把给定的外力与约束反力构成的平衡力系称为“载荷”。

物体内部某一部分与其他部分之间相互作用的力则称为内力。内力不是指物体内分子之间的那种相互作用力, 而是指外力使物体发生变形时在物体内部引起的“附加”内力, “附加”内力不仅抵抗外力所引起的变形, 还能消除这种变形, 它与外力紧密相关。以后将“附加”内力就简称为内力, 不再要“附加”二字。

内力随外力的增加而加大, 但是这种加大也是有限度的, 超过这个限度结构就会破坏。不同的材料有不同的限度, 这个限度就定义为“材料强度”。

当整个物体平衡时, 物体的内力相互抵消, 那么, 当外力给定以后, 内力如何确定呢? 现研究如图 1-2 的一杆型物体, 其上作用有满足平衡条件的外力系 P_1 、 P_2 、 $\cdots$ 、 P_n , 此时在杆内部便产生内力。只有将杆用假想的截面将其切开分成两个部分, 内力才能显示出来。这时某一部分的内力对被分开的另一部分来说是起着外力的作用, 这种显示内力的方法就称为“截面法”。假定将物体分为 A 、 B 两部分, 但分开以后仅有外力本身不能使 A 、 B 各自平衡, 消除了两部分之间的约束, 就必须在截面上用力系来代替右边对左边或左边对右边的约束作用, 也即在截面引入“内力系”才能保持原有的平衡状态。若外力处于平衡状态, 则对切开的部分来说, 平衡也必定成立。

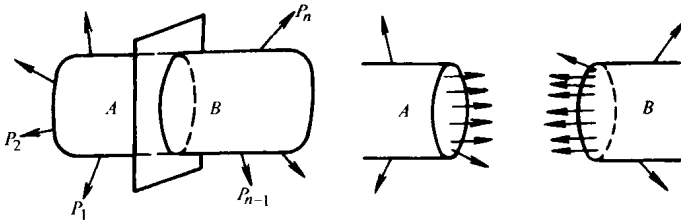


图 1-2 截面法

考虑分离体 B , 利用静力学原理, 将截面上的内力系对截面重心进行简化, 得到主矢 $\bar{R}$ 与主矩 $\bar{M}$, 选定坐标系 xyz 。 z 轴沿着截面外法线方向, x 、 y 轴在截面平面内。将主矢 $\bar{R}$ 与主矩 $\bar{M}$ 投影到 x 、 y 、 z 轴上, 可以得到 6 个分量: 3 个力和 3 个力矩, 这些分量称为“内力素”。这些内力素在板壳的计算中起着重要作用 (见图 1-3)。

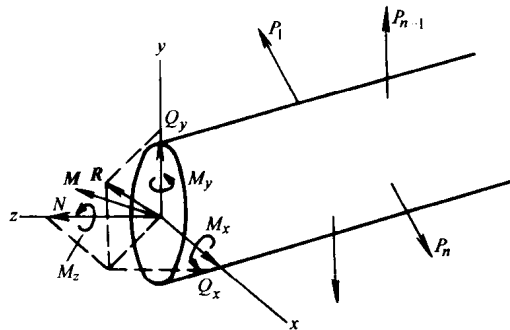


图 1-3 内力

沿截面法线方向的内力分量 N 称为截面上的轴力或纵向力，主矢在 x 轴与 y 轴上的分量 Q_x 与 Q_y 称为剪力。主矩在 z 轴方向的分量 M_z 称为扭矩，而在 x 轴与 y 轴方向的分量 M_x 与 M_y 分别称为对 x 轴与对 y 轴的弯矩。

根据上述规定，即可对杆受载形式予以定义：①横截面上仅有轴力 N ，而无其他内力素，则此杆为受拉伸（ N 为正时）或压缩（ N 为负时）；②如果横截面上只有扭矩 M_z ，那么杆在此截面上受扭转；③如果外力在杆上的作用使横截面里只有弯矩 M_x （或 M_y ），那就在 yz 平面（或 xz 平面）内发生纯弯曲。若除了有弯矩之外，还同时有剪力作用，这种受载情况称为横弯曲。有时在截面上有几种内力素存在，这时就会出现“组合变形”情况。

截面上的内力分布应使截面两侧物体在发生变形后其左右两边仍能处处吻合，没有重叠也没有裂缝，即满足“变形连续条件”。可以证明：满足平衡条件和变形连续条件的内力系是存在的并且是唯一的。

最后要指出，在应用截面法前不允许把力沿作用线移动，也不允许用静力等效力系来代替某些外力。这样做虽然对于结构整体平衡可能没影响，但却完全改变了物体的内力与变形。如图 1-4 所示，一端固定杆件下端受集中力 P 作用，此时全杆受拉伸；若 P 沿作用线上移到固定端处，此时杆件便不再有拉伸，约束反力虽然没改变，但对整个杆件来说，变形与内力与原来的情况完全不同了。

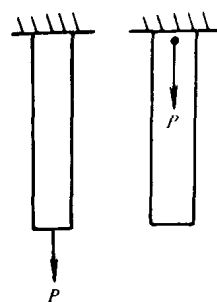


图 1-4 力不能沿作用线移动

1.3 应力的概念

为了描述内力在截面上的分布规律，必须引入衡量内力的数字上的尺度，作为这种尺度的就是应力。

研究某一受力物体上的 A 截面，如图 1-5 所示，在截面上某点 K 的邻域取微面积 ΔA ，其上有内力 ΔR ，平均应力定义为： $P_{\text{平均}} = \frac{\Delta R}{\Delta A}$ ；由于截面上内力分布一般是不均匀的，因此，平均应力就与所取的面积 ΔA 的大小有关，为了消除这种影响以获得 K 点处内力分布的集度，将面积 ΔA 趋向 K 点而缩小，根据连续介质的假设可将平均应力取极限：

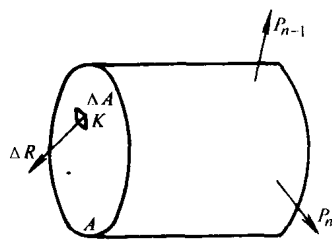


图 1-5 平均应力

$$P = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta R}{\Delta A}$$

把矢量 $\mathbf{P}$ 定义为 A 截面上 K 点的“全应力”。

将 $\mathbf{P}$ 沿截面法线方向与截面平面内的两个坐标方向分解，在法线上的投影用 σ 表示，称为正应力。在截面平面内的两个分量称为剪应力用 τ 表示（见图 1-6）。在弹性力学中为表明正应力和剪应力与坐标位置的关系还将在 σ 与 τ 右下角加注角标，这在以后的章节中将加以论述。

应力的单位是 MPa。应力与压力二者不同的是：压力是外力，给定的；压力方向确定，垂直于作用面；而应力是内力集度，需要通过计算确定。在压力容器中压力一般是均匀的，而应力则是变化的。

特别注意，从上面的定义可知，应力是某点处内力集度的大小，是“点”的概念，有人常说：封头应力多大？拐角处应力多大？这些说法是很不确切的，在概念上是不对的。

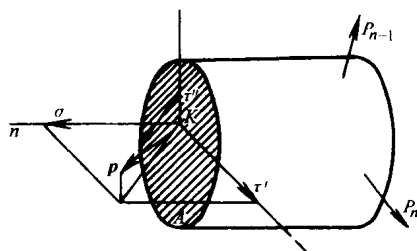


图 1-6 正应力与剪应力

如果通过 K 点截取另外一个截面，一般来说在该点的应力 $\mathbf{P}$ 也将发生改变，即：“同一截面不同点上的应力不同，而过同一个点不同截面上的应力也不相同。”我们把受力物体内某一点的各个截面上的应力情况，称为一点的应力状态。我们将在第 5 章详细讨论。

求解出应力的目的就是让它与极限应力进行比较，根据比较的结果对结构的强度做出结论进而得到可以安全可靠运行的结构。在压力容器的设计中，强度设计是极其重要的，在这个过程中要对各种不同载荷引起的应力进行分析与计算，最后对容器强度做全面校核。因此，我们必须对“应力”这个概念有深刻而准确的认识与理解。

1.4 位移与变形

在外力作用下，物体上各点在空间的位置将发生改变，虽然这种改变并不大，需要用仪器才能测定出来，但是变形对内力的分布规律却有很大影响。

以未变形前物体某点 A 为起点，以变形后物体的同一点 A' 为终点的矢量称为点的全位移矢量（见图 1-7）。这个矢量在坐标上的投影称为沿坐标轴方向的位移；对于直角坐标系 $oxyz$ ，沿各轴方向的位移用 u 、 v 、 w 表示。

除线位移外，物体内某一线段或平面，在位置改变时所旋转的角度称为该线或该平面的角位移。

需要注意，线位移和角位移并不足以完全表示变形特征，因为物体做刚体运动时它的各部分也会有位移。为了描述物体形状与尺寸改变的程度，考察未变形物

体上距离为 S 的 A 、 B 两点，若物体变形后成为 $A'B'$ ，使两点间的距离增加了 ΔS ，线段长度的增量 ΔS 与初始长度的比值称为在线段 S 上的平均伸长（图 1-8）：

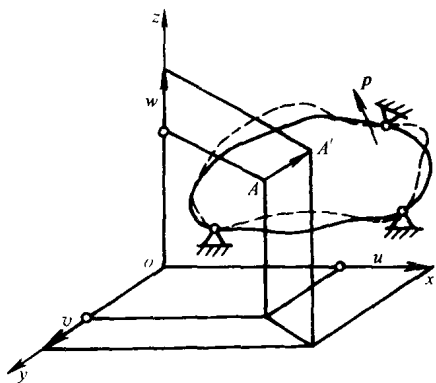


图 1-7 一点的位移

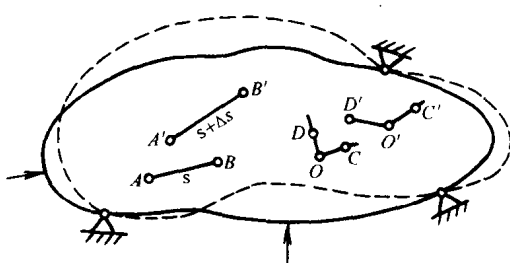


图 1-8 线应变与角应变

$$\epsilon_{\text{平均}} = \frac{\Delta S}{S}$$

将线段 S 取短，使点 B 趋于点 A ，取极限，便得到 A 点沿 AB 方向的线应变：

$$\epsilon_{AB} = \lim_{S \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{S}$$

一般来说，在同一点，如果方向不同，应变也将不同。把线应变在坐标系 xyz 各方向的分量记作： ϵ_x 、 ϵ_y 、 ϵ_z 。

若在变形前，在物体上取相互垂直其长度分别 dx 及 dy 的两根极短线段（图 1-9）在物体变形后这两线段所夹角度将有所改变，所改变的数值 γ 就称为角应变。在坐标平面内剪应变用 γ_{xy} 、 γ_{yz} 、 γ_{zx} 来表示。

可以看出：线应变 ϵ 是对某一方向而言的，角应变 γ 是对某一对垂直方向而言的。无论物体变形多么复杂，但都是由线应变与角应变组合而成。 ϵ 和 γ 都是一个比值，而 γ 是用辅助单位 rad（弧度）来表示。应变的数值比较小，通常在千分之几的范围内变化。

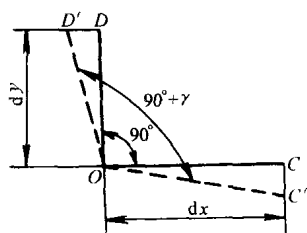


图 1-9 角应变

变形固体力学中各点位移已减去了作为刚体运动^①的位移部分，而留下来的就是变形固体特有的那部分位移。因此，任一点位移都会大大小于物体的几何尺寸，可以采用“初始尺寸原理”，即在列平衡方程时可以认为物体变形前后几何尺寸没有发生变化。这也是小变形假设的依据。

① 这里指的不是物体动态的平动与转动，而是静态的。

思 考 题

1. 固体力学有哪几个基本假设？有何意义？
2. 什么叫“弹性”、“弹性变形”？
3. 什么是“载荷”？什么是“交变载荷”？
4. 试举出作用在压力容器上的表面力与体积力。约束反力是否是外力？
5. 内力与应力有什么区别？求解应力的目的是什么？
6. 什么是全应力、正应力和剪应力？给出确切的定义，并以图示之。
7. “截面法”的含义与用途是什么？
8. 在用截面法之前是否可以把外力沿力的作用线移动？试举例说明。
9. 仅有位移是否能够描述物体某点的变形状态？为什么？
10. 角位移与角应变有什么不同？
11. 通过截面内力素情况，定义杆件受载形式。
12. 内力系存在并且是唯一的条件是什么？