

刘宝琛 编著

# 矿山岩体力学概论

湖南科学技术出版社

TD31

9

3

# 矿山岩体力学概论

刘宝琛编著

303/03

湖南科学技术出版社

**矿山岩体力学概论**

刘宝琛 编著

责任编辑：刘孝纯

\*

湖南科学技术出版社出版

(长沙市展览馆路14号)

湖南省新华书店发行 湖南省新华印刷二厂印刷

\*

1982年9月第1版第1次印刷

开本：850×1168毫米 1/32 印张：10.125 字数：280,000

印数：1—1,400

统一书号：13204·63 定价：1.30元

## 前 言

为了开发地下深处的有用矿藏，就必须在岩体中开挖竖井、斜井、平巷、峒室，以及地下采矿场等地下工程。这些地下工程的施工，挖出了一部分岩体，从而打破了地下岩体原来的平衡状态，使岩体由原来的平衡状态向新的平衡状态转化。在这个转化过程中，引起一系列的所谓矿山压力现象。矿山压力现象的表现形式和发展过程，一方面取决于矿区自然条件本身，另一方面也取决于人们的开采活动。因而矿山压力必将贯穿矿山建设和生产过程的始终。

最主要的自然条件是矿床的赋存深度。很明显，在100米深度下的地下巷道所表现出的矿山压力现象与在1000米深度下巷道所表现出的矿山压力现象会有很大的差异。因为后者上覆岩体的重量比前者要大10倍。第二个主要的自然因素是巷道周围岩体的性质，其中又以岩石的强度最为重要，其次为岩石的脆性、塑性及弹性性质。可以认为，在强度很大的岩体中的开挖条件总是比较好的。但是实践经验又告诉我们：最突然的、危害性最大的、往往造成严重事故的地压现象，即所谓冲击地压或岩爆，又往往出现在开采坚硬岩矿的过程中。岩层的产状、成层性及厚度，对矿山压力也有很大的影响。第三个主要的自然条件是构造地质和工程地质因素。对于一个矿区，断层性质及分布、向斜、背斜、褶曲、断裂等等，都对矿山压力有很大影响。往往可以从地质构造的角度，把一个矿区从平面上和空间上划分成许多特点不同的区段，而各区段中的矿山压力的表现形式具有与地质构造条件相适应的特点。

矿山的开拓方式及采矿方法与矿山压力有密切关系。某些自然条件是难以改变或不能改变的，例如矿床的深度。因此，开拓方式和采矿方法的选择，必须尽可能地适应矿山的自然条件，才有可能在有利

的条件下，获得最大的安全和最小的开采成本。

以前，当开采深度不大，开采面积较小时，矿山压力现象或者根本不出现，或者不甚显著。因此，当时就没有研究矿山压力现象的迫切需要。目前，开采深度日益增加。我国唐山、抚顺等煤矿的开采深度已近1000米，已经结束生产的石咀子铜矿的开采深度曾达950米。在这样大深度下的岩体中掘进和采矿，矿山压力现象就十分突出，它给生产和安全带来较大的危害。

我国江西盘古山钨矿已有50多年的开采历史。到1967年，累积形成了190万立方米的开采空区未作处理，导致1967年9月24日爆发了大规模破坏性的地压活动，给国家资源和生产工艺系统造成重大损失。这是一次严重的教训。

大约从20世纪10年代开始，随着采矿工业的发展，一些工程技术人员逐步开展了矿山压力现象的观察和研究。随着弹性力学、构造地质学、地球物理学、材料试验技术和应力应变测量技术的发展及其在研究矿山压力问题中的应用，以及在生产实践中对矿山压力现象的观测和与矿山压力作斗争经验的不断积累，到了20世纪50年代初期，就已形成了一门新的科学——矿山岩体力学。矿山岩体力学是研究人类采矿活动所影响的那一部分地壳内的一切力学现象和后果的科学。研究矿山岩体力学的目的，是为了探讨矿山压力的机制，总结控制矿山压力的经验，认识它的客观规律，从而提出可供采用的技术措施，以防止或消除矿山压力对生产和安全的危害，并进而利用矿山压力为矿床开采服务。

总的来说，矿山岩体力学包括矿山压力现象的现场观测研究、实验室各种类型的模拟实验，以及矿山压力规律的理论探讨等几个大的方面。这里提出“矿山岩体力学”一词，是有意与一般岩体力学或岩石力学相区别，即矿山岩体力学的内容仅仅涉及与矿山建设和生产过程有关的岩体力学问题。矿山工程与土建工程、水电工程及铁道工程相比，有它自己的特点。首先，矿床的天然赋存条件不能改变，地质情况及水文情况可能十分恶劣，但矿产又必须开发。其次，矿山工程的服务年限是有限的，不是千年大计的工程，与水电及铁道工程不同。

目前所见的岩石力学书籍，多与水利水电工程、土建工程及铁道工程有关，其讨论重点往往不在矿山工程方面。

根据不同的对象，可以把矿山岩体力学的研究内容归纳为以下几个方面：

1. 矿山岩体力学的总的研究对象是岩体。因此，岩石及岩体的物理性质和力学性质及其测定方法是研究其他矿山岩体力学问题的基础。矿山岩体的性质十分复杂，影响因素极多，尽管已经进行了多年的试验研究工作，但目前还不能说已经研究得很充分。岩体的强度理论和力学模型就是研究很多而尚未彻底解决的问题。

2. 为了保证竖井、平巷和各种地下峒室的稳定，使之在矿山服务年限内保证人员安全和运输畅通，要求研究井巷周围岩体中的应力及变形规律，从而确定是否需要支护和采用何种形式的支护，并为设计支护提供依据。

3. 在开采过程中，为了保证生产安全和最大限度地回收国家资源，使回采工作适应于岩体应力的特征和规律，需要研究岩体的原始地应力状态、开挖引起的应力异常，以及应力的观测方法。必要时，还要求确定合理的矿柱尺寸和布置方案，以及为设计采场支护提供依据。

4. 采空区处理及大面积地压控制，是确保矿山长期高产稳产的一个重要环节。矿山岩体力学的研究，把采空区的处理作为一项重要内容。根据矿山岩体力学的研究结果，采取合理的空区处理方案，就可以达到控制大面积地压活动的目的，又能尽量节省空区处理费用。

5. 各种建筑物、结构物、河流水体、铁路公路下部的矿床开采问题，已保留的各种保安矿柱（竖井、平巷、地面建筑物的保安矿柱）的开采，也是矿山岩体力学的研究内容。在这方面，主要是研究地下开采所引起的地表移动和变形规律，并在此基础上提出各种合理的开采方案和开采顺序，以确保减小开采对地表被保护对象的影响和多回收国家的地下资源。

6. 在充填采矿方法中，各种充填体的作用和性能的研究、胶结充填体合理标号和合理尺寸的研究，都具有重大的现实意义。它的目的是在确保安全和多回收国家资源的前提下，减小充填范围和降低充填

体的标号，以利于提高回采效率和降低生产费用。

7. 地下开采及露天开采所造成的其他有害后果，即所谓“开采损害”的研究也应归属于矿山岩体力学的范围之内，例如：

(1) 采用崩落采矿方法，地表陷落成巨大的陷坑，地表水和泥大量流入井下，给生产和安全带来很大危害。

(2) 采用崩落采矿方法，在地表地形很陡的条件下，往往造成大范围岩体滑坡或大小岩块和泥水突然滚落造成危害。

(3) 采用大爆破崩矿或处理空区，一次爆破药量达几十吨至几百吨。大爆破对井巷及地表建筑物的有害影响，以及天然地震对地下矿山的危害等问题。

(4) 地下开采对地表农田及森林的有害影响，例如，地下水位下降，农田倾斜，土壤微变形破坏植物根部引起生长不良和病虫害等。

(5) 露天开采，引起露天矿区附近地下水位下降，岩体及地表移动和变形，从而造成建筑物损害。

8. 露天矿山开采形成高大露天边坡的稳定问题。其中包括：合理经济的最终边坡角及边坡形态的确定、边坡岩体移动监测、边坡滑坡预报、爆破震动及水对边坡稳定的影响，以及危险边坡的加固措施等，是露天矿山岩体力学的主要内容。

9. 海底开采及海下开采有关的岩体力学问题。近年来，在大陆架及深海海底发现了大量含锰、镍、铜和其他金属的矿瘤和矿床。在近陆海底之下发现了大量煤层(英国及日本沿海)和其他金属矿体(我国辽宁及广东等地沿海)。开发这类矿床所可能遇到的复杂岩体力学问题到目前为止几乎还没有开始研究。

露天矿山的边坡稳定问题属于矿山岩体力学的一个组成部分。但考虑到边坡问题与地下矿山的矿山压力问题相比有许多不同的特点，而其本身又有明显的相对独立性，成为矿山岩体力学的一个分支，即“边坡岩体力学”，因此，本书将不作讨论。

目前，岩体力学方面的生产实践和科学研究发展异常迅速。据估计，在这一领域内，每年约发表9万篇文章和出版10万册书，其中有一部分是与矿山岩体力学有关的。

我国矿山事业30年来得到飞跃的发展。相应的矿山岩体力学科研工作也有了长足的进步。本书以作者25年来所从事的矿山岩体力学研究为基础，利用本单位近年的试验和实测结果，力求结合我国矿山的生产实践，比较系统地探索矿山岩体力学的几个基本问题。囿于作者的工作性质，在某些方面更侧重于理论分析，特别是岩体流变学分析。对于国内外矿山岩体力学的发展动向，仅作极为简要的介绍。凡其他有关岩石力学或岩体力学著作中的有关资料，本书中一概不予引用，仅列出必要的参考文献。

矿山岩体力学是在固体力学与采矿工程学相结合的基础上发展起来的。因此它与固体力学有密切联系。引用固体力学的基本原理和方法来研究矿山岩体力学问题，势必带来与实际的某些近似。这种近似程度的大小，主要取决于所选取的理想化的岩体介质的力学模型与岩体客观实际的差异。矿山岩体介质是一种十分复杂的地质介质，目前尚难以找出完全适应于矿山岩体的物态方程(本构方程)。因此，矿山岩体力学理论分析的结果，仍具有某些定性的性质。因而，在矿山生产实践中应用矿山岩体力学的理论结果时，应持十分慎重的态度，并要十分重视现场实践的丰富经验，才有可能卓有成效地解决生产实践中提出的矿山岩体力学问题。

刘宝琛

1982年于长沙



# 目 录

第一章 固体力学基础 .....	( 1 )
1—1 固体的性质 .....	( 1 )
1—2 简支梁及弹性基础梁 .....	( 2 )
1—3 弹性力学基本方程的组合 .....	( 9 )
1—4 无限弹性体中长圆柱状孔周的应力变形分析(Kirsh问题) .....	( 12 )
1—5 轴对称变形厚壁圆筒或圆环的应力变形分析(Lame问题) .....	( 15 )
1—6 作用于半无限板直边上一点的集中力引起板内应力变形分析 (Boussinesq问题) .....	( 16 )
1—7 圆形薄板受两个对径集中力作用的应力应变分析 .....	( 21 )
1—8 塑性理论的概念 .....	( 23 )
1—9 松散介质极限平衡 .....	( 26 )
第二章 岩石的物理力学性质及力学模型 .....	( 30 )
2—1 岩石的组成 .....	( 30 )
2—2 岩石和岩体的结构 .....	( 31 )
2—3 岩石的基本物理性质 .....	( 32 )
2—4 岩石力学性质的主要内容 .....	( 37 )
2—5 岩石及岩体力学性质实验研究动态 .....	( 44 )
2—6 岩石抗拉强度实验方法的研究 .....	( 47 )
2—7 岩石单轴抗压强度及变形模量与试件尺寸关系的研究 .....	( 52 )
2—8 岩石抗压强度及变形模量的现场试验结果与室内实验结果关系 的探讨 .....	( 55 )
2—9 岩石双向压缩试验研究 .....	( 57 )
2—10 岩石三向应力压缩试验研究 .....	( 59 )
2—11 岩石多向应力状态下弹性参数测定计算问题的探讨 .....	( 72 )
2—12 岩石强度理论的探讨 .....	( 81 )

2—13	岩石的力学模型	(85)
<b>第三章 岩体初始应力场及岩体应力测量</b> (105)		
3—1	研究岩体初始应力场的意义	(105)
3—2	岩体自重重力应力场	(106)
3—3	地质构造应力场	(109)
3—4	岩体温度应力场	(112)
3—5	岩体初始应力场及实例	(113)
3—6	应力解除岩体应力测量	(124)
3—7	应力解除试验中岩石流变问题的讨论	(145)
3—8	岩体应力变化测量	(147)
3—9	声发射岩体应力测量	(148)
3—10	超声波岩体应力状态观测探讨	(154)
<b>第四章 井巷围岩应力分布和支护原理</b> (160)		
4—1	一般概念	(160)
4—2	弹性岩体中圆形断面井巷围岩的应力及变形	(162)
4—3	粘弹性岩体中圆形断面井巷围岩的应力及变形特征	(170)
4—4	弹粘性岩体中圆形断面井巷围岩的应力及变形特征	(188)
4—5	井巷围岩的强度状态	(193)
4—6	井巷围岩与支护的互相作用	(201)
4—7	井巷支护设计原理	(218)
4—8	平巷喷射混凝土支护分析	(221)
<b>第五章 采场围岩应力分布及充填的作用</b> (228)		
5—1	采场围岩应力分布的一般概念	(228)
5—2	缓倾斜壁式工作面崩落采矿法地压问题	(229)
5—3	缓倾斜壁式工作面充填法开采地压问题	(240)
5—4	留矿壁对采矿场地压分布的影响	(249)
<b>第六章 采矿地表移动及变形计算</b> (255)		
6—1	开采对地表影响的一般概念	(255)

6—2	壁式开采工作面上方地表移动及变形·····	(256)
6—3	有限开采宽度地表移动及变形·····	(267)
6—4	开采宽度较大情况下等速推进壁式开采工作面上方地表移动及变形·····	(281)
6—5	地表移动有关参数的确定·····	(296)
6—6	地表点下沉时间过程的理论计算结果与矿山现场实测资料的对比·····	(301)
6—7	地表点移动轨迹的理论计算与矿山实测资料的对比·····	(306)

# 第一章 固体力学基础

这章所要叙述的内容，将为理解本书以下各章打下一个基础。矿山岩体力学是固体力学的一个分支，它广泛地应用材料力学、弹性力学、塑性力学、散体力学、土力学和流变学的基本原理和方法。为此，本章用一定的篇幅简要地介绍与矿山岩体力学有关的固体力学基础。凡在《岩体力学的力学基础》一书中叙述过的内容，本章将不再重述<sup>[6]</sup>。

## 1—1 固体的性质

### 1. 固体的变形性

固体的物理性质是多方面的，但从力学角度来看，固体的重要性质之一是它的可变形性。一定形状的固体在外力作用下，其形状和体积都随着外力大小和性质而发生变化，称为固体的变形性。这种变形，视固体性质、外力作用方式和大小，而可以是弹性变形、塑性变形和流变变形。如果作用于固体的外力消除之后，固体能够即刻完全恢复到外力作用之前的初始形状和体积，即变形是可逆的，则这种变形称为弹性变形。若作用于固体的外力消除之后，固体不能即刻完全恢复到外力作用之前的初始形状和体积，即有一部分变形是不可逆的，则这部分不可逆的变形称为塑性变形或永久变形。也有这种情况，当外力作用于固体时，它即刻发生一定的变形，但在外力不变的条件下，其变形随时间的增长而增长，在外力消除之后，随着时间的增长而逐渐恢复到外力作用之前的初始形状和体积。这种随时间而变化的变形称为流变变形。实际上，固体三种形式的变形往往难以截然分开，上述的区分只是为了研究方便和便于理解。

### 2. 固体的强度

固体的另外一个性质是它的强度。当作用于固体的外力逐渐增大

而达到某一极限时，固体就断裂、破碎或变形不止，即固体的结构遭到破坏。使固体遭到破坏的单位面积上的力的大小称为该固体的强度。

### 3. 均质及各向同性的固体

在固体力学中，我们假设被研究的物体整个空间连续充满着该种固体介质。固体力学主要是研究均质的各向同性的介质。所谓均质介质，就是在物体各部分单位体积内的质量是相等的，即物体各点的密度相等，即

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} = \frac{dM}{dV} = \text{常数} \quad (1-1)$$

式中： $\rho$ ——固体的密度；

$M$ ——固体的质量；

$V$ ——质量为 $M$ 的固体的体积。

所谓各向同性是指固体的物理性和力学性不因方向不同而变化。相反，则称为各向异性。实践证明，某些岩石（例如沉积岩类）仅在不很大的程度上满足均质和各向同性的基本假设。因此，近年来各向异性弹性介质的力学问题也引起很大的重视。

## 1—2 简支梁及弹性基础梁

### 1. 纯弯

设有一断面形状对称的梁，其两端作用相同的力矩 $M$ 。在外力矩 $M$ 的作用之下梁发生弯曲称为纯弯（图1—1）。梁的上部分纵向缩短横向伸长，梁的下部分则纵向伸长而横向缩短。

通过大量的实践和观查，对纯弯可以作出以下几点基本假设和结论：

(1) 没有横向力，这使我们可以认为任何断面内都没有剪应力出现，即 $\tau_{xy} = 0$ ， $\tau_{xz} = 0$ 。

(2) 若梁的宽度比高度小，可以假设在梁的水平纵断面及垂直纵断面的正应力为零。

(3) 为使横断面上的正应力 $\sigma$ 与外加弯矩平衡，则正应力必须在

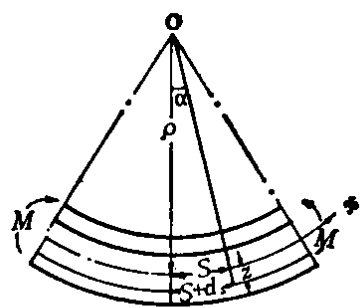


图1—1 梁的弯曲

断面的一部分为拉伸应力而在另一部分为压缩应力。

(4) 在横断面上，梁的纵向变形按线性分布。

(5) 梁的横断面在弯曲以后仍为平面。

梁内横断面上的正应力由拉伸向压缩变化而必然存在应力为零的轴，此轴称为弯曲中性轴。各个横断面的中性轴都落在同一平面内，此平面称为中性层。

取位于梁的中性层的对称轴为 $x$ 轴(图1—1)。设两相邻断面距离为 $s$ ，其中性层的曲率半径为 $\rho$ ，则

$$s = \rho\alpha$$

$$s + ds = (\rho + z)\alpha$$

两式相除并求解后得

$$\varepsilon = \frac{ds}{s} = \frac{z}{\rho}$$

由虎克定律可以求出正应力 $\sigma$ 为

$$\sigma = E\varepsilon = E\frac{z}{\rho} \quad (1-2)$$

横断面上的正应力必须形成弯矩 $M$ ，所以，

$$\int_{(F)} \sigma dF = \int_{(F)} E\frac{z}{\rho} dF = \frac{E}{\rho} \int_{(F)} z dF = 0$$

即横断面对 $y$ 轴的静矩为零，因此中性轴必需通过横断面的重心。弯矩 $M$ 为

$$\int_{(F)} \sigma z dF = \int_{(F)} \frac{E}{\rho} z^2 dF = \frac{E}{\rho} \int_{(F)} z^2 dF = M$$

上式中的积分为横断面对中性轴( $y$ 轴)的惯性矩 $J$ ，故可写成

$$\frac{JE}{\rho} = M$$

或 
$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{JE}$$

上式代入公式(1—2)，可得出重要公式：

$$\sigma = \frac{Mz}{J} \quad (1-3)$$

## 2. 简支梁

设一矩形断面直梁的两端放置在滑动支座上（图1—2）。梁受均布载荷 $q$ 及集中载荷 $p$ 作用。为了求出距左端支座任意距离 $x$ 处横断面 $mn$ 内的应力分布，我们取掉梁的断面 $mn$ 以右的部分，代之以剪力 $T_{mn}$ 及弯矩 $M_{mn}$ ，其值可以由力及力矩平衡求出：

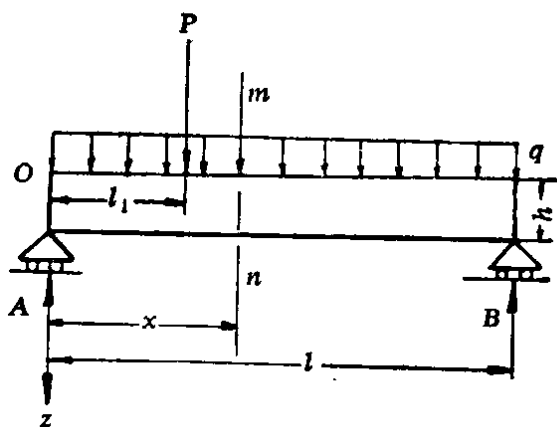


图1—2 简支梁受均布及集中载荷

$$T_{mn} = A - P - qx$$

$$M_{mn} = Ax - P(x - l_1) - q \frac{x^2}{2}$$

上式中的第二式对 $x$ 微分得出：

$$\left. \begin{aligned} \frac{dM}{dx} &= A - P - qx \\ \frac{d^2M}{dx^2} &= -q \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

由此得出任意断面的弯矩与剪力之间的重要关系式：

$$T = \frac{dM}{dx} \quad (1-5)$$

支座反力 $A$ 及 $B$ 可以由 $M_A = 0$ 及 $\Sigma P_z = 0$ 求出。

弯矩 $M$ 在横断面内产生的正应力为（图1—3）

$$\sigma = \frac{Mz}{J_y} \quad (1-6)$$

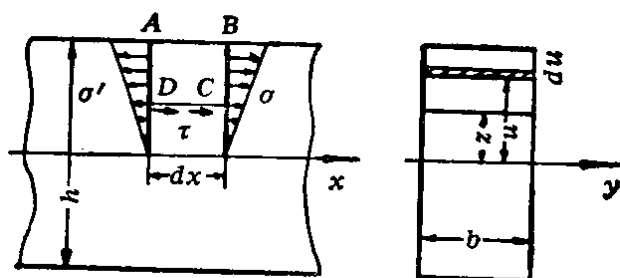


图1—3 梁内的正应力及剪应力

式中： $J_y$ ——横断面对 $y$ 轴的惯性矩；

$Z$ ——点距 $y$ 轴的距离。

弯矩最大的断面称为危险断面。最大正应力出现在危险断面的边缘层，此层距中性轴的距离为梁的高度的一半( $0.5h$ )。最大正应力为

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}h}{2J_y} \quad (1-7)$$

下面求算剪应力 $\tau$ 。由单元体 ABCD 在  $x$  轴方向的力的平衡得出(图1-3)：

$$\tau b dx + \int_z^{0.5h} \sigma dF - \int_z^{0.5h} \sigma' dF = 0$$

考虑到

$$\sigma' - \sigma = \frac{M'u}{J_y} - \frac{Mu}{J_y}$$

而  $M' = M + dM$

则  $\tau b dx = \frac{dM}{J_y} \int_z^{0.5h} u dF$

所以  $\tau = \frac{dM}{dx} \cdot \frac{1}{bJ_y} \int_z^{0.5h} u dF = \frac{T}{bJ_y} \int_z^{0.5h} u b du$

$$= \frac{3T}{2F} \left[ 1 - 4 \left( \frac{z}{h} \right)^2 \right] \quad (1-8)$$

可见，剪应力沿横断面按抛物线分布，并在最大剪力  $T_{\max}$  作用断面的中性层 ( $z=0$ ) 处最大，即

$$\tau_{\max} = \frac{3T_{\max}}{2F} \quad (1-9)$$

### 3. 梁的挠曲线

在载荷作用下，梁的直线轴发生弯曲而成为一条曲线。取变形前

梁的长轴为  $x$  轴， $z$  轴垂直向下(图1-4)，则梁轴弯曲后的方程式可写成

$$z = f(x)$$

一般情况下，横向力对梁的弯曲影响很小而可以忽略不计。

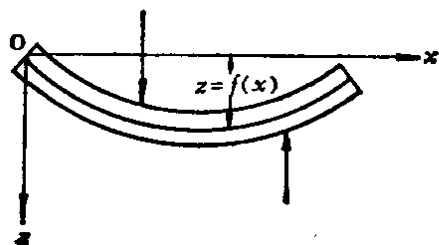


图1-4 梁的挠曲线方程



由解析几何及公式(1—2)、(1—3)可得

$$\frac{1}{\rho} = \pm \frac{\frac{d^2 z}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2\right]^{3/2}} = \frac{M}{EJ}$$

因为梁的弹性弯曲很小，其一阶导数的平方比1小很多，所以可以忽略不计，故

$$EJ \frac{d^2 z}{dx^2} = \pm M$$

正负号的选取决定于坐标 $z$ 轴的方向及弯矩 $M$ 正负号如何确定。若弯矩的作用使梁的左半部依顺时针方向转动，而坐标 $z$ 轴正向向下，则上式应取负号，即

$$EJ \frac{d^2 z}{dx^2} = -M \quad (1-10)$$

上式称为梁的挠曲线的微分方程。

将式(1—10)对 $x$ 微分两次，并考虑式(1—4)，可得出梁挠曲线微分方程表示式的另一形式：

$$EJ \frac{d^4 z}{dx^4} = q \quad (1-11)$$

挠曲线的微分方程式(1—11)，既适用于静定梁，也适用于静不定梁。分布载荷 $q$ 可以为常数，也可以是 $x$ 的函数。式(1—11)对 $x$ 积分4次，可以获得梁挠曲线的方程式为

$$EJz = \frac{qx^4}{24} + \frac{c_1 x^3}{6} + \frac{c_2 x^2}{2} + c_3 x + c_4 \quad (1-12)$$

待定常数 $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$ 、 $c_4$ 可以用梁的端部边界条件，支座边界条件，以及以集中力为分界的接界条件来确定。

#### 4. 弹性基础梁

设有一受均布载荷 $P$ 作用的半无限长的悬臂弹性基础梁。梁的右部分放置在连续的弹性基础上，梁的左部没有支承，如图1—5所示。

所谓弹性基础，就是梁弯曲时使基础产生变形，从而形成基础对