

刚性路面设计

Gangxing Lumian Sheji

邓学钧 陈荣生 编著
方福森 审校

人民交通出版社

由于水平所限，书中肯定有不全面和不正确的地方，敬请读者或使用单位批评指正。

方 福 森

1988年10月

刚性路面设计

邓学钧 陈荣生 编著
方福森 审校

责任编辑 武崇理

封面设计 袁毅

插图设计 袁琳

正文设计 孔伟

人民交通出版社出版发行
(北京和平里东街10号)

各地新华书店经销

人民交通出版社印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 19 字数: 493千

1990年8月 第1版

1990年8月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—2100册 定价: 12.95元

内 容 提 要

本书为介绍当代国内外刚性路面设计理论及设计方法专著。其内容包括：荷载、温度应力分析，有限元在刚性路面应力分析中的应用，土基与基层设计，接缝构造及设计，国内外刚性路面主要设计方法述评等。此外，还简要介绍了几种特殊混凝土路面（如钢纤维混凝土路面等）的设计方法。

本书可供道路（公路，城市、林业、厂矿道路）及机场道面工程技术人员使用参考，也可作为上述专业研究生教材。

出版说明

该书系统地介绍了当代世界各国普遍使用的刚性路面设计理论和设计方法，并加以综合评论。着重介绍了我国近十年来在刚性路面设计理论、设计方法、设计参数方面所获得的科研成果。如有限元法的应用，多板多功能体系，异形厚板有限元半分析法，以及地基模量与多层地基设计与分析等。并对我国新颁布的《公路水泥混凝土路面设计规范 JTJ012—84》的理论基础与实用方法作了系统的介绍。

此外，该书还以一定篇幅介绍了几种特殊混凝土路面的设计方法，如连续配筋混凝土路面、预应力混凝土路面，钢纤维混凝土路面等。

该书中介绍的我国刚性路面科研成果已通过部级鉴定。其中理论研究成果已接近同类项目的国际先进水平，设计参数的研究成果也有创见，1987年获交通部科技进步奖。有些科研成果还在国内外报刊中发表过。

该书系反映当代国内外刚性路面设计理论和设计方法水平、学术价值较高的专著，它填补了我国在这方面书籍的空白。又因为该书理论联系实际，可满足不同层次的道路及机场道面工程技术人员需要，也可作为道路工程研究生教材，故也是一本很好的实用科技图书。

该书不仅对我国道路和机场道面工程技术人员有所裨益，且对国际刚性路面设计理论、设计方法的研究和技术交流将起促进作用。这也就是我社组织编写出版该书的目的。

序 言

刚性路面是指水泥混凝土路面。研究表明，对于中等的交通量，水泥混凝土路面的初期建筑投资虽较沥青路面要多，但由于水泥混凝土路面的使用寿命长，维修保养费用少，故它在使用期限内的总费用要比沥青路面为少；对于较繁重的交通量，水泥混凝土路面的初期建筑投资和使用期限内的总费用均较沥青混凝土路面要少。另外，水泥混凝土路面具有抗磨损能力强、能见度好和能源消耗少等优点，所以它在高等级的公路和城市道路、机场道面和厂矿道路上都越来越多地被采用。

自从本世纪20年代以来，世界各国都开展了刚性路面设计理论和设计方法的研究工作，使得设计理论日趋完善，设计方法日趋合理。水泥混凝土路面承受着车轮动力荷载的重复作用，同时还经受着大自然气温和湿度周期性变化的影响。因此，混凝土路面是处于复杂而多变的工作环境之中，几十年来，人们在混凝土路面的科学研究和完善设计方法工作中，极其重视荷载的重复作用和温度变化的影响。

刚性路面设计内容包括结构组合，混凝土板厚度计算，接缝布置和构造设计，混凝土混合料配合比设计，基层、垫层和土基的设计，等等。目前，刚性路面设计理论和设计方法仍在不断更新和发展，诸如一些学者正致力于研究从混凝土路面的使用功能和综合经济效益出发，建立新的系统设计体系；研究评价现有路面和预估路面使用寿命的方法；研究进一步完善特种类型混凝土路面的设计理论和设计方法，等等。这些都将随着科学研究的进展而不断成熟。

本书对国内外有关刚性路面设计理论和设计方法的发展过程、现状及发展趋势，进行了系统的、较全面的介绍。由于道路

刚性路面和机场刚性道面都要承受车轮或机轮荷载重复作用所产生的应力，以及由于温度坡差所产生的翘曲应力，所以本书第一、二两章分别阐述了这两种应力的计算理论。随着近30年来大型电子计算机技术的发展，70年代初期，美国、法国和比利时都研究用有限元法来分析有限尺寸的混凝土路面板在多轮荷载和温度翘曲作用下的应力和应变，并编制多种程序，能分析各种接缝构造的传荷能力，且能考虑各类基层和板翘曲时对板脱空失去支撑的影响，这对于刚性路面设计来说，是一个重大突破，本书第三章对这一问题进行了专门的论述。

由于要适应混凝土路面板的热胀冷缩，不得不在面板上设置很多接缝，而面层对基层、垫层和土基又有其特殊要求，这些都是混凝土路面设计的重要内容，本书第四、五两章分别对这两方面进行介绍。水泥混凝土路面对混凝土的性能和配合比的设计都有特殊的要求，和一般使用混凝土不同，第六章对这方面进行了较详细的阐述。第七章对国内外几种有名的刚性路面设计方法和设计规范进行综合评述，并重点介绍了列入我国现行规范的刚性路面设计方法和国内规模较大的混凝土路面试验路的修筑和试验成果。至于发达国家流行的和正在试验研究中的特种类型混凝土路面，包括连续配筋混凝土路面、预应力混凝土路面和钢纤维混凝土路面的设计方法，则在第八章予以概略的介绍。

本书是我国第一部关于刚性路面设计的专门书籍。本书可供公路与城市道路工程和机场工程科研、教学和设计生产技术人员使用和参考，也可作为有关专业的研究生教材。

本书第一、二、三、四、八各章由东南大学●邓学钧编写，第五、六两章由东南大学陈荣生编写，第七章由邓学钧和陈荣生合作编写。全书由东南大学方福森审校。

本书采用国家法定计量单位。进行公制与国际单位制换算时，为计算简便，重力加速度取为 10m/s^2 。少数引用美国的资料仍保留原有英制计量单位。

目 录

第一章 刚性路面荷载应力	1
第一节 早期的荷载应力计算方法	1
第二节 弹性薄板与地基假定	3
第三节 温克勒地基的刚性路面荷载应力分析	14
第四节 弹性半空间地基的刚性路面荷载应力分析	67
第五节 用影响图计算刚性路面板的弯矩及挠度	112
第六节 刚性路面的极限承载力	119
第二章 刚性路面温度应力	132
第一节 混凝土路面的热物理特性	133
第二节 混凝土路面的温度分布	139
第三节 温度变形与温度应力	159
第三章 刚性路面应力分析有限元法	216
第一节 有限元法的一般原理	218
第二节 弹性薄板刚性路面有限元分析	229
第三节 弹性中厚板刚性路面有限元分析	276
第四节 弹性厚板刚性路面的有限元半分析法	293
第四章 刚性路面接缝构造与设计	314
第一节 刚性路面的平面分块与接缝形式	315
第二节 传力杆设计与应力验算	324
第三节 刚性路面接缝的传荷能力	337
第五章 土基与基层	349
第一节 土 基	349
第二节 基 层	366
第六章 混凝土材料与配合比设计	384
第一节 对路面混凝土的基本要求	384

第二节	路面混凝土材料的性能·····	384
第三节	路面混凝土的主要技术性质·····	396
第四节	混凝土的配合比设计·····	403
第七章	刚性路面设计方法·····	417
第一节	我国刚性路面设计方法·····	417
第二节	苏联刚性路面设计方法·····	443
第三节	美国刚性路面设计方法·····	466
第四节	日本刚性路面设计方法·····	489
第五节	我国台州试验路介绍·····	514
第八章	其它混凝土路面简介·····	541
第一节	连续配筋混凝土路面·····	541
第二节	预应力混凝土路面·····	571
第三节	钢纤维混凝土路面·····	585

第一章 刚性路面荷载应力

道路和机场刚性道面经受着各种复杂的应力作用，其中包括车轮荷载引起的荷载应力，温度变化引起的温度应力以及由于湿度变化所引起的应力等。假如各种应力的综合作用超过了混凝土的容许应力范围，路面将产生裂缝，破坏，直至最后完全丧失承载能力。自从本世纪初，水泥混凝土路面开始广泛使用以来，刚性路面的荷载应力一直是人们十分关注的重要研究课题。1925年，威斯特卡德 (H.M. Westergaard) [1]，1938年，霍格 (A. H. A. Hogg) [2]，1939年，舍赫捷尔 (O. Я. Шехтер) [3]，1943年，波米斯特 (D. M. Burmister) [4]，1953年，柯岗 (Б. И. Коран) [5] 等人，在刚性路面荷载应力研究方面所作的贡献为刚性路面应力分析和设计方法奠定了基础。60年代以来，随着快速电子计算机的广泛使用，各种有限元分析方法用于刚性路面应力分析，使荷载应力的研究达到了一个新的阶段。本章将尽可能详尽地介绍各个阶段的主要研究成果，以此作为应力计算和设计方法的理论基础。有关运用各种有限元法分析刚性路面应力的内容，将在第三章作介绍。

第一节 早期的荷载应力计算方法

1920年，欧尔德 (C. Older) [1] 和哥尔德贝克 (A. T. Goldbeck) [6] 根据材料力学原理，提出了最早的刚性路面荷载应力计算方法。由于当时所用的水泥混凝土路面板较薄，路面破坏的主要形式为角隅断裂，所以欧尔德等人认为主要应该验算角隅应力。并且认为角隅断裂主要是因为板下地基层部下陷，使得板角端部呈现局部脱空现象所致。当然，除了地基层部下陷之

外，面板因温度、湿度不均匀变化产生角顶向上翘曲，也会引起面板与地基层局部脱开。反映这种状况的计算图式，如图1-1所示。

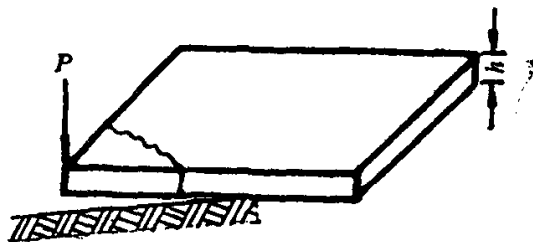


图1-1 路面板与地基脱开

由图1-1可见，当车轮荷载 P 作用在角顶处，混凝土板形成一种悬臂的形式；板的一端是固定的，与板内侧相联；板的另一端为自由端。由荷载 P 引起的角隅断裂线 AB 与边缘成 45° 角，离顶点的距离为 a （见图1-2a）。

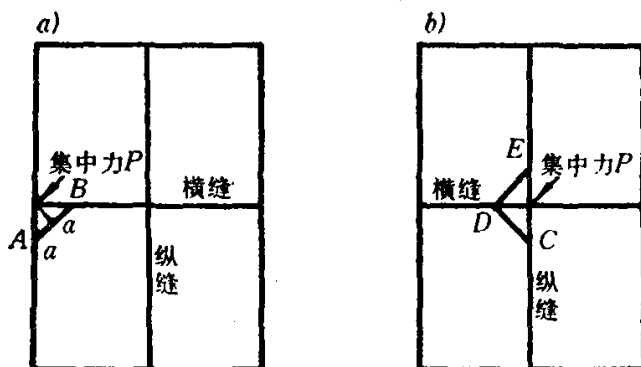


图1-2 荷载位置图

a) 荷载在外侧角隅，无传力杆连接；b) 荷载在内侧角隅，横缝有传力杆连接

由集中荷载 P 所造成的断裂面上的弯矩为：

$$M = Pa$$

或

$$Pa = \frac{\sigma I}{y} = \frac{\sigma \frac{2a \cdot h^3}{12}}{h/2} = \frac{\sigma ah^2}{3}$$

因此

$$\sigma = \frac{3P}{h^2} \quad (1-1a)$$

式中： P ——车轮荷载 (MN)；

σ ——混凝土板顶面的拉应力 (MPa)；

I ——以中性轴为准的沿 AB 线的垂直断面惯性矩 (m^4)；

y ——自中性轴至最外纤维的距离 (m)；

h ——混凝土板厚度 (m)。

当荷载作用在内侧角隅处，横缝有传力杆连接，如图 1-2b) 所示，假定有一半的荷载传到邻板，路面沿着 CD 、 DE 发生破坏，则破裂面上最大的弯矩应力为：

$$\sigma = \frac{1.5P}{h^2} \quad (1-1b)$$

当荷载作用在内侧角隅，纵横缝都设有传力杆时，则荷载的传布情况很复杂，可以认为有 $1/3$ 荷载通过横缝传给邻板，另有 $1/3$ 荷载通过纵缝传给邻板，则破裂面上的最大弯拉应力为：

$$\sigma = \frac{P}{h^2} \quad (1-1c)$$

式(1-1b)也适用于板边受荷时的应力计算，式(1-1c)也适用于板中受荷时的应力计算。欧尔德公式 (1-1a、b、c) 是最早的刚性路面应力计算公式，它是非常近似和粗糙的，而且角隅应力公式(1-1a)极其保守。但它的相对定性概念促使人们设法加强路面板边、板角部位的结构强度，如采用厚边式路面，或加强边缘钢筋与角隅加强钢筋等。

第二节 弹性薄板与地基假定

目前的刚性路面应力分析，大多是以弹性地基上的薄板为模式的。弹性地基包括温克勒 (Winkler) 地基，弹性均质半空间地基与弹性层状半空间地基。本节着重介绍弹性薄板与各种弹性地基的基本特性与数学模式。

一、弹性薄板的定义与假定

两个平行面和垂直于这两个平行面的柱面或棱柱面所围成的物体称为板，如图1-3所示。平分厚度 h 的平面称为板的中间平面，简称中面。如果板的厚度 h 远小于板面的最小尺寸 b ，它就称为薄板。薄板受到垂直于板面的荷载，就会弯曲，中面所弯成的曲面称为弹性曲面，而中面内各点沿 z 方向的位移称为薄板的挠度 w 。假如挠度 w 远小于板的厚度 h ，称为薄板小挠度理论。通常所用的水泥混凝土路面或机场道面，它的平面尺寸比它的厚度大得多，同时，由于混凝土的脆性，面板不允许产生很大的挠度，因此，刚性路面的构造和工作状态完全符合薄板小挠度理论的基本假定。

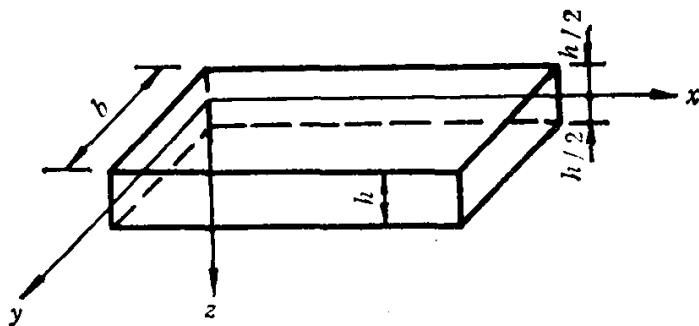


图 1-3

薄板弯曲问题的解是以下列三个基本假定为依据的。

1. 应力分量 τ_{zx} ， τ_{zy} 和 σ_z 远小于其它应力分量，因而它们对形变的影响可以不计。由于不计 τ_{zx} 和 τ_{zy} 对形变的影响，所以有

$$\gamma_{zx} = 0, \quad \gamma_{yz} = 0 \quad (1-2)$$

也就是说所有垂直于中面 xy 的直线，在薄板弯曲以后，仍保持直线，并且垂直于弹性曲面。由于不计 σ_z 对形变的影响，所以有

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} (\sigma_x - \mu \sigma_y) \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} (\sigma_y - \mu \sigma_x) \\ \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xy} \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

2. 形变分量 ε_z 极其微小, 可以不计, 即 $\varepsilon_z = 0$, 由弹性力学中的几何方程得知, $\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} = 0$, 所以有

$$w = w(x, y) \quad (1-4)$$

也就是说薄板内任意一根垂直于中面的直线上, 各点的位移 w 均相等。即挠度 w 只与平面位置 x, y 有关, 与垂直坐标 z 无关。

3. 薄板受有垂直于板面的荷载时, 中间平面内各点都没有平行于板面的位移。也就是

$$(u)_{z=0} = 0, \quad (v)_{z=0} = 0 \quad (1-5)$$

因为 $\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$, $\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$, $\gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$ 由式(1-5)

可得

$$(\varepsilon_x)_{z=0} = 0, \quad (\varepsilon_y)_{z=0} = 0, \quad (\gamma_{xy})_{z=0} = 0$$

也就是说, 中面的任意一部分, 在弯曲成弹性曲面前后, 在 xy 面上的投影形状保持不变。在上述基本假定中:

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ——分别为 x, y, z 方向的正应力分量;

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ ——分别为 x, y, z 方向的正应变分量;

u, v, w ——分别为 x, y, z 方向的位移分量;

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ ——分别为三个方向的剪应力分量;

$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ ——分别为三个方向的剪应变分量;

E, μ ——分别为材料的弹性模量与泊松比。

二、弹性曲面的微分方程

在薄板弯曲问题中，取薄板的挠度 w 作为基本未知函数。因此，其它分量都要用 w 来表示。由方程(1-2)得知

$$\gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = 0, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0$$

因此有
$$\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial w}{\partial x}, \quad \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial w}{\partial y} \quad (1-6)$$

由方程(1-2)可见， $\frac{\partial w}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial w}{\partial y}$ 只是 x 和 y 的函数，与 z 无关，于是由式(1-6)积分得到：

$$u = -z \frac{\partial w}{\partial x} + f_1(x, y),$$

$$v = -z \frac{\partial w}{\partial y} + f_2(x, y)$$

根据方程(1-5)，当 $z = 0$ 时， $u = v = 0$ ，于是

$$f_1(x, y) = 0, \quad f_2(x, y) = 0$$

因此得到
$$u = -z \frac{\partial w}{\partial x}, \quad v = -z \frac{\partial w}{\partial y}$$

于是形变分量可以用 w 来表示如下：

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

应力分量也可以用 w 表示，由方程(1-3)得：

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_x &= \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_x + \mu \varepsilon_y) = \frac{-EZ}{1-\mu^2} \\
 &\quad \times \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\
 \sigma_y &= \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_y + \mu \varepsilon_x) = \frac{-EZ}{1-\mu^2} \\
 &\quad \times \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \\
 \tau_{xy} = \tau_{yx} &= \frac{E}{2(1+\mu)} \gamma_{xy} = \frac{-EZ}{1+\mu} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}
 \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

为了用 w 表示应力分量 τ_{xz} 、 τ_{yz} 和 σ_z ，运用弹性力学中的平衡微分方程：

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} &= -\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \\
 \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} &= -\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} \\
 \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= -\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y}
 \end{aligned}$$

将公式(1-8)代入，并且对 z 进行积分。由于薄板表面有如下边界条件

$$(\tau_{zx})_{z=\pm h/2} = 0, \quad (\tau_{zy})_{z=\pm h/2} = 0, \quad (\sigma_z)_{z=\pm h/2} = 0$$

于是有：

$$\left. \begin{aligned}
 \tau_{zx} = \tau_{xz} &= -\frac{E}{2(1-\mu^2)} \left(\frac{h^2}{4} - z^2 \right) \frac{\partial}{\partial x} \nabla^2 w \\
 \tau_{zy} = \tau_{yz} &= -\frac{E}{2(1-\mu^2)} \left(\frac{h^2}{4} - z^2 \right) \frac{\partial}{\partial y} \nabla^2 w \\
 \sigma_z &= -\frac{Eh^3}{6(1-\mu^2)} \left(-\frac{1}{2} - \frac{z}{h} \right)^2 \left(1 + \frac{z}{h} \right) \\
 &\quad \times \nabla^2 \nabla^2 w
 \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

式中: $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ ——拉普拉斯算子。对于圆柱坐标

$$\text{为: } \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}。$$

为了求出挠度与荷载之间的关系, 假定薄板顶面作用有向下的荷载 q , 则在薄板的顶面, 有边界条件

$$(\sigma_z)_{z=-h/2} = -q$$

利用这一条件代入式(1-9)中的正应力公式, 得出:

$$\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \nabla^2 \nabla^2 w = q$$

$$\text{或} \quad D \nabla^2 \nabla^2 w = q \quad (1-10)$$

式中: $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ ——板的圆柱刚度或弯曲刚度。

方程(1-10)为薄板的弹性曲面微分方程。一切以弹性薄板假定为模式的刚性路面应力分析的课题, 归根到底就是根据薄板侧面的各种不同的边界条件和约束条件, 求解未知函数 w 。然后再由方程(1-8)和(1-9)解出各项应力分量。

三、薄板截面上的弯矩、扭矩和剪力

从薄板内割取一个无穷小的平行六面体, 尺寸为 dx 、 dy 和 h , 如图1-4所示。在垂直于 x 轴的面上, 作用着 σ_x 、 τ_{xy} 和 τ_{xz} 。在垂直于 y 轴的面上, 作用着 σ_y 、 τ_{yx} 和 τ_{yz} 。由公式(1-8)、(1-9)可以看出, 所有这些应力分量都是 z 的奇函数, 假如在 $-h/2$ 到 $+h/2$ 整个厚度范围内积分, 其总值分别

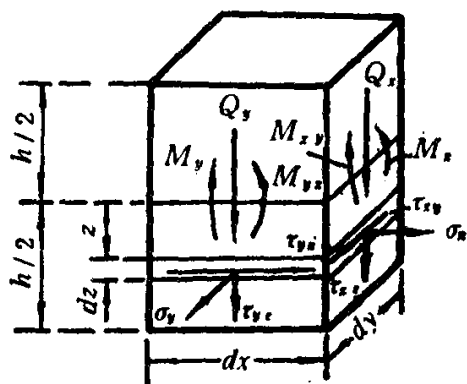


图 1-4