

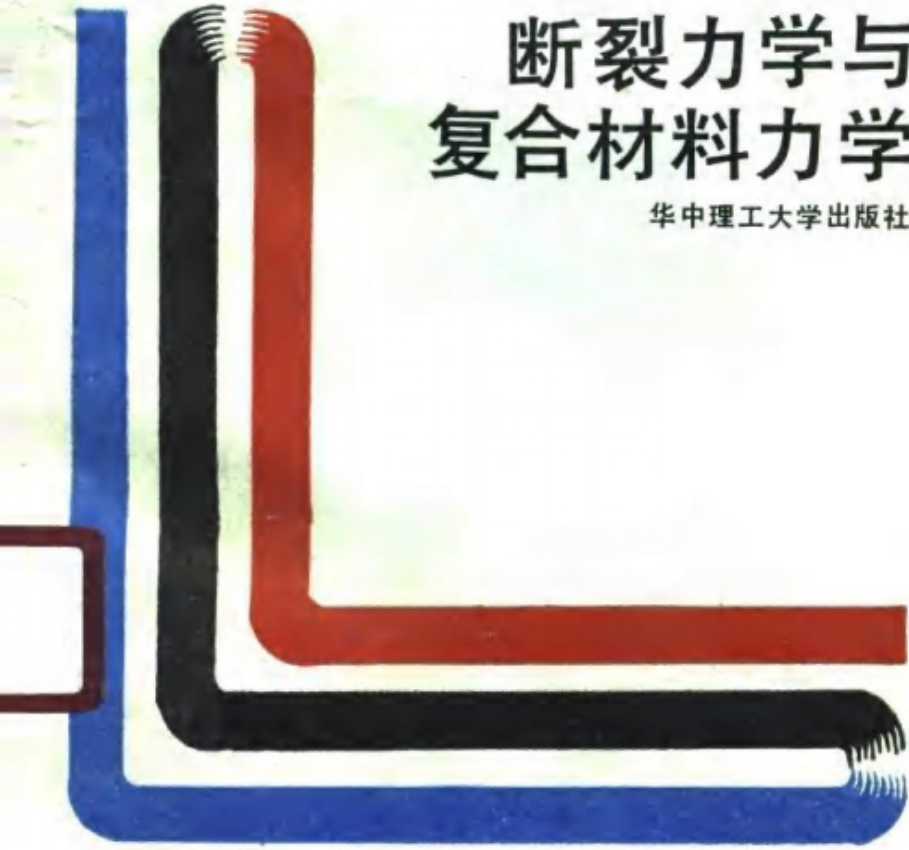


DUANLIE LIXUE YU FUHECAILIAO LIXUE

李 灏 陈树坚 郭碧坚

断裂力学与 复合材料力学

华中理工大学出版社



内 容 提 要

断裂力学与复合材料力学是固体力学中最活跃的分支。本书分上、下两篇。上篇内容包括断裂力学的基本概念、原理、计算方法与实验技术等。下篇内容包括复合材料的应用、复合材料的断裂力学、复合材料静载与动态破坏特性以及复合材料的强度分析与设计。书中并附有适量例题、习题，供读者参考。

本书可作理工科大学有关专业的教材。亦可供有关工程技术人员阅读。

断裂力学与复合材料力学

李 颢 陈树坚 郭碧坚

责任编辑 佟文珍

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 16.75 字数: 375 000

1989年12月第1版 1989年12月第1次印刷

印数: 1-1 000

ISBN 7-5609-0266-9/O·35

定价: 3.35元

前 言

《断裂力学与复合材料力学》的编写，旨在为理工科大学生及有关工程技术人员提供系统的教材或参考书。全书分上、下两篇。上篇为断裂力学部分；下篇为复合材料力学部分。

上篇内容包括断裂力学的基本概念、原理、计算方法与实验技术等。编者力图做到：

概念清楚：对通常出现的一些容易被误解的概念与提法，除在正文部分予以正确讲述外，还适当以脚注形式提出，以期引起注意。

内容完整：公式来源尽量交代清楚，便于读者阅读。各章习题常常是对正文中有意省略内容的补充，因此是上篇不可分割的部分。习题均给出详尽的答案或予以适当提示。

下篇内容包括复合材料的应用，复合材料的断裂力学，复合材料静态与动态强度特性以及复合材料的强度分析与设计。这部分内容基本上是根据藤井太一和座古胜合著的《複合材料の破壊と力学》（日本实教出版公司1979年第2版）一书编译的。

除阐述复合材料基本理论外，下篇的特点还在于它将复合材料与实际的破坏现象联系起来进行了理论上的探讨，因此，下篇是上篇断裂力学理论与方法在复合材料中的应用。同时，下篇所给数据与图表均颇具实用价值。

本书采用国际单位制（SI）。书后的参考文献对有志进一步钻研该学科的读者有一定参考价值。

本书上篇由李灏教授和陈树坚副教授编写，郭碧坚副教授参加了部分工作；下篇的编译由郭碧坚完成，经李灏教授审定。在下篇编译过程中，郭津远、李春植等同志曾给予许多帮助，特此致谢。

编者

一九八八年五月

目 录

前言

上篇 断裂力学

| | |
|----------------------------------|-------|
| 第一章 绪论 | (1) |
| § 1. 传统强度理论的局限性和断裂力学的提出 | (1) |
| § 2. 断裂力学发展的简单回顾 | (3) |
| 第二章 线弹性断裂力学 | (5) |
| § 1. 裂纹顶端近旁的应力场与位移场 | (5) |
| § 2. 应力强度因子 | (29) |
| § 3. 断裂韧度 | (50) |
| § 4. 线弹性断裂力学应用举例 | (54) |
| § 5. 能量释放率 | (58) |
| § 6. 平面应变断裂韧度 K_{Ic} 的测试 | (64) |
| § 7. 习题 | (85) |
| 第三章 非线性弹性与弹塑性断裂力学 | (96) |
| § 1. 裂纹顶端的塑性区 | (96) |
| § 2. 裂纹张开位移 | (115) |
| § 3. J 积分 | (124) |
| § 4. 非线性范围的断裂韧度 | (139) |
| § 5. 裂纹扩展阻力 | (145) |
| § 6. J_{Ic} 的测试 | (148) |
| § 7. 裂纹顶端临界张开位移 δ_c^c 的测试 | (158) |
| § 8. 习题 | (163) |

| | |
|------------------------------------|-------|
| 第四章 混合型裂纹的脆性断裂 | (167) |
| § 1. 最大拉应力理论 | (167) |
| § 2. 能量释放率理论 | (170) |
| § 3. 应变能密度理论 | (174) |
| § 4. 习题 | (196) |
| 第五章 断裂力学在工程中的应用 | (202) |
| § 1. 断裂——安全设计 | (202) |
| § 2. 交变载荷作用下构件的设计 | (212) |
| § 3. 应力腐蚀下构件的设计 | (224) |
| § 4. 压力容器断裂前的渗漏设计 | (230) |
| § 5. 习题 | (231) |
| 第六章 确定应力强度因子的有限单元法 | (236) |
| § 1. 概述 | (236) |
| § 2. 用通常单元的方法 | (242) |
| § 3. 用特殊单元的方法 | (252) |
| § 4. 习题 | (268) |
| 第七章 边界配置法 | (269) |
| § 1. 基本原理和计算公式 | (269) |
| § 2. 常见试样的应力强度因子计算 | (283) |
| § 3. 正交各向异性材料单边裂纹试样的应力强度因子计算 | (288) |
| § 4. 边界配置法的改进 | (303) |
| § 5. 习题 | (314) |

下篇 复合材料力学

| | |
|-------------------------|-------|
| 第八章 复合材料概论 | (324) |
| § 1. 古老又获新生的材料 | (324) |
| § 2. 复合材料的定义 | (325) |
| § 3. 复合材料的类型 | (327) |
| § 4. 复合材料的应用 | (333) |

| | |
|----------------------------------|-------|
| 第九章 复合材料力学 | (336) |
| § 1. 概述 | (336) |
| § 2. 复合材料的力学构成 | (336) |
| § 3. 混合律 | (339) |
| § 4. 网格理论 | (342) |
| § 5. 正交各向异性弹性理论 | (344) |
| § 6. 不连续纤维增强复合材料 | (347) |
| § 7. 用能量原理计算弹性模量的上、下限 | (351) |
| § 8. 层合板力学 | (356) |
| § 9. 复合材料的有限单元法解析 | (365) |
| 第十章 复合材料与断裂力学 | (382) |
| § 1. 断裂力学在复合材料中的应用 | (382) |
| § 2. 复合材料的断裂力学参数 | (382) |
| § 3. 断裂韧性试验 | (385) |
| § 4. 博蒙特法 | (401) |
| § 5. 薛氏法 | (404) |
| 第十一章 复合材料的静载破坏特性 | (411) |
| § 1. 复合材料的静载特性 | (411) |
| § 2. 复合材料的破坏理论 | (413) |
| § 3. 连续纤维增强复合材料的强度 | (418) |
| § 4. 不连续纤维增强复合材料的强度 | (424) |
| § 5. 粒子分散型复合材料的强度 | (433) |
| § 6. 复合材料的准静态变形与破坏特性 | (435) |
| 第十二章 复合材料的动态变形与破坏特性 | (450) |
| § 1. 复合材料的高速应变特性 | (450) |
| § 2. 复合材料的疲劳特性与破坏强度 | (476) |
| 第十三章 复合材料的强度设计 | (501) |
| § 1. 复合材料的强度设计 | (501) |
| § 2. 应力集中和缺口敏感性 | (502) |

| | |
|--------------------------|--------------|
| § 3. 环境强度特性 | (505) |
| § 4. 复合材料的特性变化和可靠性 | (510) |
| § 5. 层合板的强度 | (516) |
| § 6. 结构设计最优化 | (519) |
| 参考文献 | (523) |

上篇 断裂力学

第一章 绪论

断裂力学系研究材料和结构中裂纹的产生、扩展直至断裂破坏规律的一门新兴学科，是固体力学的一个新分支。

§1 传统强度理论的局限性和断裂力学的提出

工程中常用的结构材料，往往强度较低，韧度较高，设计时通常只注意超载引起的塑性破坏。至于防止破坏的研究则停留在用屈服极限 σ_s 、冲击韧度 α_k 等传统强度和韧度指标的控制基础上。近年来，高强度和超高强度（ $\sigma_s \geq 1373$ 兆帕）材料的应用日益广泛。材料强度提高了，而韧度往往却降低了（即脆性增加）。强度高韧度低的材料，常常在应力不高，甚至远低于屈服极限的情况下发生突然的脆性破坏，出现所谓低应力脆断现象。这种断裂容易在低温下发生。裂纹往往出现在应力集中处或在焊缝的热影响区内。这样的例子在工程中是屡见不鲜的。

第二次世界大战初期曾发生了几起货船焊接处严重断裂的事故。断裂都是突然发生的，断裂发生时的名义应力很低。这种突然的脆断，对于船体用钢这样的塑性材料似乎是不应该发生的。

1947年寒冬（温度低至 -43°C ），苏联一个容积为4500

米³的大型石油储罐，其底部和下部壳节连接处形成大量裂纹。原因是，在低温下钢材的塑性明显下降，焊接处应力比较集中和储罐存在很大的残余应力。

1965年英国一个厚壁氨球进行水压试验时爆炸。该厚壁容器直径1.7米，高16米，用厚14.9厘米的MnCrMoV钢板制成，重167吨。设计压力为35.2兆帕，试验压力为49.9兆帕。断裂后经检查发现，裂纹源在焊接的热影响区内，内有2~3条微细裂纹。

1965年英国一座海上采油用钻井平台（长75米、宽27.5米、高3.95米）在北海倾没。这是由于支柱上的拉杆脆断所致。拉杆脆断时气温为3℃，断裂时的名义应力低于屈服极限。事后对拉杆所用材料进行了冲击试验。发现在0℃时，冲击韧度只有31.4牛顿·米，低于标准要求。另外，光弹试验表明，脆断部位的应力集中系数 K 高达7。这表明材质及形状设计都存在问题。

大量低应力脆断的事故，使人们认识到，尽管材料的强度和韧度指标满足传统设计要求，却仍难免破坏；抵抗破坏的传统指标和传统的强度分析计算方法，并不能保证结构的安全，也不能适应新材料和新工艺发展的要求。

事故分析和实验研究表明：低应力脆断总是由宏观缺陷或裂纹的失稳扩展引起的。有时裂纹还会持续缓慢地作所谓亚临界扩展，最后达到临界状态，发生半脆性断裂。所谓宏观裂纹，可为加工过程产生的冶金缺陷，也可能在使用时，如加载、疲劳或应力腐蚀的过程中形成。因此材料和结构中存在缺陷或出现裂纹是难免的。传统的强度理论往往假设材料到处连续，毫无裂纹。这不符合实际情况。断裂力学抛弃了传统强度理论关于材料是纯粹连续体的假设，从实际材料和结构里存在

裂纹的客观事实出发，认为裂纹在连续体中造成间断，把实际材料和结构看成连续和间断的矛盾统一体，从而冲破了强度理论的局限性。

断裂力学的任务是：

(1) 应用弹塑性理论研究材料和构件在裂纹顶端近旁的应力、应变状况同载荷、环境等外在条件以及构件和裂纹的几何形状、尺寸之间的关系；研究裂纹扩展规律，建立断裂判据，考察裂纹对结构的强度和寿命的影响。

(2) 确定能反映材料抵抗脆性和半脆性断裂的断裂韧性指标及其测定方法。

(3) 恰当选择材料，建立新的强度设计概念和计算方法，探讨如何控制和防止结构的断裂破坏。

§ 2 断裂力学发展的简单回顾

材料结构的不连续性是材料强度降低的重要原因。这一点远在古代已被人意识到了。例如《列子》一书就载有：“发引千钧，势至等也。”意思是说，材料均匀且无缺陷，即使细如发丝也能吊起千钧重物。文艺复兴时期的意大利人达·芬奇(Da Vinci)是第一个进行断裂强度试验的人。但是，在这方面进行系统研究并进而发展成为一门新兴科学——断裂力学，却是近代的事。

本世纪20年代初，格里菲斯(Griffith)用能量原理对玻璃的断裂进行了探讨，建立了断裂应力、裂纹尺寸与材料性质三者间的关系，奠定了线弹性断裂力学的理论基础。然而，由于当时工业水平的限制，生产实践中并没有大量出现低应力脆断问题，因而格里菲斯的理论在很长一段时间内没有得到人们的重视和获得进一步发展。随着现代工业的迅速发展，出现了

大量低应力脆断事故，才推动了断裂力学的发展。50年代，欧文（Irwin）等提出了应力强度因子概念，为线弹性断裂力学建立了较完整的体系。60年代以来，弹塑性断裂力学受到许多断裂力学工作者的注意，出现了COD理论、 J 积分理论、非线性 \tilde{G} 概念、 R -曲线方法以及等价能量法等研究成果。近年来，断裂力学、复合材料断裂力学、概率断裂力学和微观断裂力学的研究都有许多进展。断裂力学的研究与应用方兴未艾。

断裂力学这一固体力学的新分支，在60年代末期引入我国。一些力学工作者和材料学工作者学习和运用断裂力学理论，成功地解决了一批工程结构和零件的裂纹问题：转子锻件、球墨铸铁曲柄、压力容器、高压钢管、发动机涡轮盘、锅炉大梁、混凝土坝、钻机吊环和工模具等的裂纹问题。另外，我国科学工作者陈箴等在裂纹顶端应力场分析、 J 积分、复合判据以及疲劳等方面也取得了许多研究成果。近年来，我国有上百所高等院校和研究所开展对断裂力学基本理论和基础实验的研究，并取得了一些进展。

第二章 线弹性断裂力学

除玻璃、陶瓷等脆性很强的材料外，断裂往往伴以显著的非弹性形变。这种形变的尺度有时很大，有时仅限于切口或裂纹等应力集中部位的近旁。前一种情况，对裂纹体进行弹性分析是不恰当的，但在非弹性形变区域同切口或裂纹以及其它特征尺度相比很小时，对高应力集中点开始的“低应力”断裂作初步研究，弹性分析还是颇有用途的。

研究裂纹扩展有两种观点：一种是能量平衡的观点，即认为裂纹扩展的动力是构件在裂纹扩展中所释出的弹性应变能，它弥补了产生新裂纹表面所消耗的能量；一种是应力场强度的观点，即认为裂纹扩展的临界状态可用裂纹顶端的应力场强度达到材料的临界值来表示。看来，无论采用哪一种观点分析，都必须了解裂纹顶端近旁的应力场和位移场。

§1 裂纹顶端近旁的应力场与位移场

根据裂纹面的位移方式，可将裂纹分为三种类型：I型或张开型（拉伸型）；II型或滑移型（面内剪切型）；III型或撕开型（反平面剪切型）。裂纹类型及其在坐标系中的对称性如图2.1和表2.1所示。欧文用威斯特噶尔德（H. M. Westergaard）方法分析了以上三种裂纹顶端的应力场和位移场。

一、弹性力学平面问题的回顾

平面应力和平面应变是平面问题中的两种基本情况，当应力分量 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 只是 x 、 y 的函数而应力分量 $\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0$ 时，称为平面应力状态；当位移分量 u 、 v 只是 x 、 y

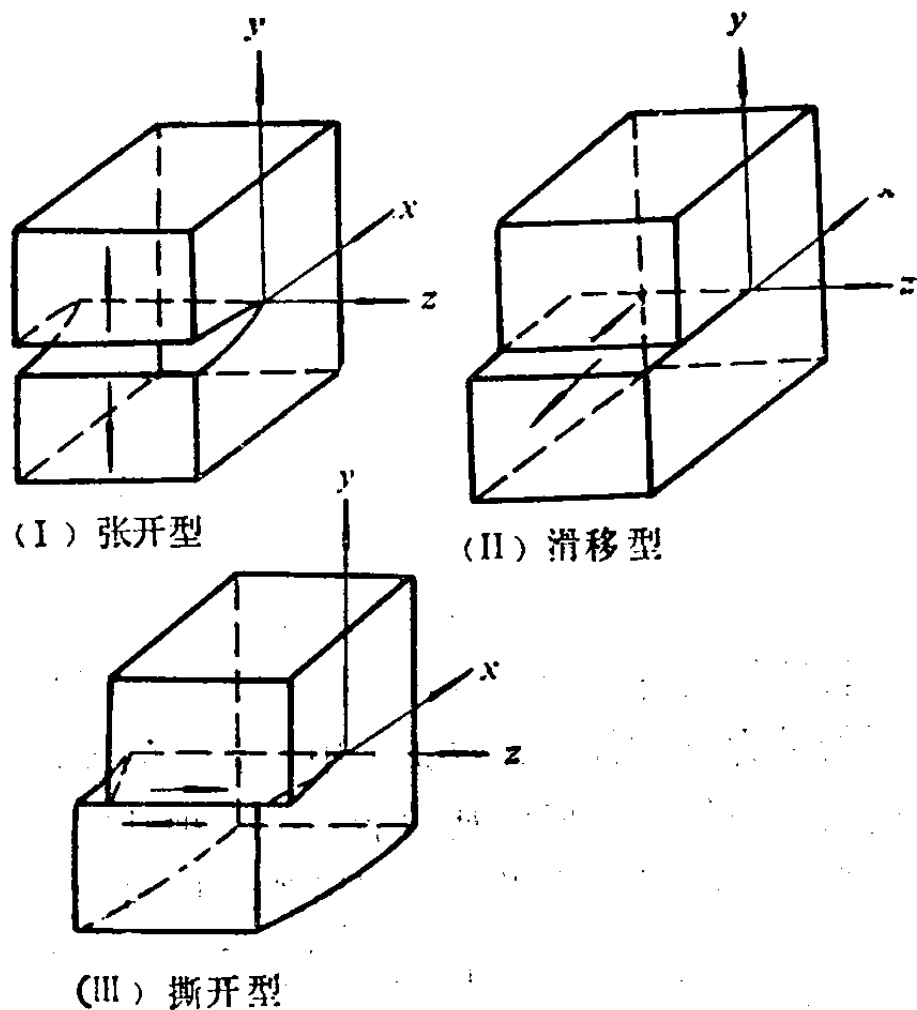


图2.1 裂纹的三种位移类型

表2.1 裂纹面位移的类型及其对称性

| 类型 | 名称 | 对称性 | |
|-----|-----|-------|-------|
| | | 左 右 | 上 下 |
| I | 张开型 | 对 称 | 对 称 |
| II | 滑移型 | 对 称 | 反 对 称 |
| III | 撕开型 | 反 对 称 | 反 对 称 |

的函数，而位移分量 $w=0$ 时，称为平面应变状态〔注〕。对平面应变状态，应变分量 $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ 都只是 x, y 的函数，而应变分量 $\epsilon_z = \gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0$ 。

〔注〕 实质上是平面位移状态，但习惯上称为平面应变状态。

1. 基本方程

弹性力学基本方程有八个，即三个几何方程、两个平衡方程和三个物理方程。

几何方程：应变分量 ε_x 、 ε_y 、 γ_{xy} 与位移分量 u 、 v 之间应满足

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

平衡方程：在不考虑体力时，应力分量 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 之间应满足

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

物理方程：应变分量 ε_x 、 ε_y 、 γ_{xy} 与应力分量 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 之间应满足

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y) \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x) \\ \gamma_{xy} &= \frac{1}{G}\tau_{xy} \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

(对平面应力状态)

或

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [(1-\nu^2)\sigma_x - \nu(1+\nu)\sigma_y] \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [(1-\nu^2)\sigma_y - \nu(1+\nu)\sigma_x] \\ \nu_{xy} &= \frac{1}{G} \tau_{xy} \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

(对平面应变状态)

其中, E 为弹性模量; G 为剪切弹性模量; ν 为横向变形系数或泊松比。 E 、 G 、 ν 之间的关系是

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.5)$$

在平面应力状态下,

$$\varepsilon_x = -\frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y) \quad (2.6)$$

在平面应变状态下,

$$\sigma_x = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (2.7)$$

令

$$E_1 = \frac{E}{1-\nu^2}, \quad \nu_1 = \frac{\nu}{1-\nu} \quad (2.8)$$

则可以把式(2.4)改写成

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E/(1-\nu^2)} \left(\sigma_x - \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_y \right) \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E/(1-\nu^2)} \left(\sigma_y - \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_x \right) \\ \nu_{xy} &= \frac{1}{G} \tau_{xy} \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

即

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E_1}(\sigma_x - \nu_1 \sigma_y) \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E_1}(\sigma_y - \nu_1 \sigma_x) \\ \gamma_{xy} &= \frac{1}{G} \tau_{xy} \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

其形式和式(2.3)相同。因此，利用表2.2可以通过 E 和 ν 的改变来互换平面应变和平面应力状态的公式(注意 G 保持不变)。

表2.2 平面问题里两种状态的公式互换

| 平面应力状态→平面应变状态 | 平面应变状态→平面应力状态 |
|-------------------------------------|--|
| $\nu \rightarrow \frac{\nu}{1-\nu}$ | $\nu \rightarrow \frac{\nu}{1+\nu}$ |
| $E \rightarrow \frac{E}{1-\nu^2}$ | $E \rightarrow E \frac{1+2\nu}{(1+\nu)^2}$ |

从几何方程(2.1)可见，三个应变分量可用两个位移分量表示；反之，式(2.1)亦可看作当应变分量为 x 、 y 、 z 的函数时，用来求位移分量 u 、 v 的偏微分方程。但因未知函数只有两个，而方程却有三个，因此，当应变分量任意指定时，一般不可能从这些方程求解。从几何上说，假想把物体在变形前分成若干小平行六面体，如果让这些六面体随意变形，则在变形后就不可能把它们拼成一个连续体。为保证物体始终连续，则应变分量间必须存在一定的关系。这个关系式称为相容方程，由微分式(2.1)并消去 u 和 v 后即得到

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} \quad (2.11)$$

把物理方程(2.3)或(2.10)代入，并利用平衡方程(2.2)，可得到用应力分量表示的相容方程〔注〕

〔注〕在平衡方程(2.2)中已假设彻体力不考虑，实际上相容方程(2.12)在常彻体力时仍成立。