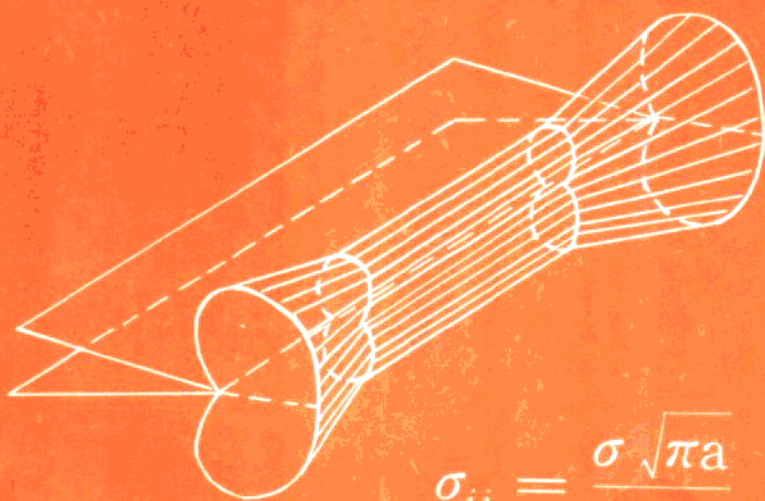


# 断裂力学教程

库贵华 张少雄 编著



$$\sigma_{ij} = \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta)$$

西北工业大学出版社

165942

0346.1  
0052

# 断裂力学教程

库贵华 张少雄 编著

西北工业大学出版社  
1994年9月 西安

(陕)新登字 009 号

断裂力学教程

库贵华 张少雄 编著

责任编辑 柴文强

责任校对 樊 力

\*

©1994 西北工业大学出版社出版发行

(710072 西安市友谊西路 127 号 电话 5269046)

全国各地 新华书店经销

西北工业大学出版社印刷厂印装

ISBN 7-5612-0748-4/O · 105

\*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 14.5 字数 339 千字

1994 年 9 月第 1 版

1994 年 9 月第 1 次印刷

印数:1—2 000 册

定价:9.20 元

## 序

近年来,断裂力学理论及其在工程中的应用日益受到人们的重视,不少高等院校均开设了这门课程。笔者将多年来从事断裂力学教学及科研的体会编成此书,目的是为有关专业(如焊接、金属材料及热处理、铸造、机械制造、航空、航天、船舶等)的学生提供一种简明实用的教材,使他们能够在较短的时间内掌握断裂力学的理论、测试方法,并运用它们去分析和解决有关的工程问题。同时,本书对于在职的工程技术人员和其他有兴趣的读者,也不失为一本适宜的自学参考书。

本书介绍断裂力学的基本理论、测试方法及其在工程实际中的应用。叙述中力求做到基本内容清楚,基本概念的物理意义明确,在不影响概念的完整性与公式的必要推导的前提下,尽量避免较深的弹塑性理论概念和数学方法。在内容的选取与安排下,尽量考虑到工科学生的基础及作为一个工程技术人员的实际需要,力图做到深入浅出。

本书分为三篇共十一章。绪论简单介绍了断裂力学的由来、传统的强度计算方法的局限性、断裂力学的研究内容等基本概念。第一篇为学习断裂力学的一些预备知识,简要介绍了金属材料的力学性能、传统的强度理论、复变函数理论、弹性力学的基本理论及数学弹性力学的方法;第二篇为线弹性断裂力学,比较系统地阐述了裂纹尖端应力场、小范围屈服条件下的线弹性修正、应力强度因子和能量释放率的概念、平面应变断裂韧性  $K_{Ic}$  的测试以及线弹性断裂力学在工程中的应用。这一部分是本书的主要内容;第三篇为弹塑性断裂力学简介,包括塑性力学的基础知识,弹塑性断裂力学中 COD 法和  $J$  积分的定义、物理意义、测试方法及工程应用等。另外,本书还设了四个附录,分别给出了常用的应力强度因子的公式、常用金属材料的平面应变断裂韧性  $K_{Ic}$  的数据资料、断裂力学中常用的单位及其换算和全塑性解汇篇,它们可以作为手册在学习和应用断裂力学时进行查阅。

本书的原稿《断裂力学基础》(油印教材)曾在南昌航空工业学院的本科生、研究生以及有关兄弟院校作为教材使用多次,他们在使用过程中对本书提出了许多有益的意见和建议,在此深表感谢。同时,谨向在本书的整理和出版过程中曾对我们提供宝贵意见和给予极大帮助各位专家、教授及有关同志致以深深的谢意!

限于我们的水平,书中难免仍然存在错误和不妥之处,诚恳欢迎批评指正!

库贵华 张少雄

一九九三年十二月于南昌

## 前 言

由库贵华、张少雄同志编著的《断裂力学教程》是一本为非工程力学专业学生使用的教材。书中编有预备知识包括弹性力学平面问题等，为工程力学知识不足的读者补充了所需的基础，在书中虽然运用一些数学及力学知识，如果掌握了这些内容就无难以消化书中的理论推导和有关概念。这本书不仅可作为教材，也可供工厂、研究所的技术人员学习断裂力学的入门书籍，对普及这方面的知识大有帮助。目前断裂力学书籍大多系统性很强，理论上及数学上都偏深，对于数学及力学知识掌握不充分的读者，消化并不容易，像本书这样的断裂力学教材还是不多的。

本教材循序渐进的逻辑思维对自学也颇为合适。对断裂力学的内容，作者用简化明确的方法进行阐述，将断裂力学的核心内容，深入浅出的予以介绍，同时对有些重点内容如  $K_{Ic}$  的概念又细致、严格、准确地介绍给读者，使他们在学后面的内容时不会造成概念上的混淆。同时教材对  $K_{Ic}$  的测试与方法也专门列章讲述，不仅强调  $K_{Ic}$  的判据中的地位，同时对实验方法也介绍的较详细，使学生既能了解实验的过程而且对  $K_{Ic}$  的理解也不感到抽象。书中对于断裂力学的基本内容如裂纹张开位移 (COD)、 $J$  积分也予以足够的重视。本书最后一章突出了断裂力学的工程应用，将理论密切联系实际，指导学生如何运用于实践，这也是作者将本书贡献给读者的主要目的。本书作者积累了丰富的教学经验，从教学实践中提炼出的“思考与练习”都附在每章末，这对读者深入理解本章内容，锻炼自己的思考能力大有好处。

从以上内容可看出，本书具有不少新颖处，是适合于非力学专业的学生和工程技术人员的一本为数不多的良好书籍，补充了断裂力学书籍中在这方面的空缺。

西北工业大学航空发动机强度振动教研室主任

吕文林教授

## 本书所用主要符号一览表

|                                         |                                    |
|-----------------------------------------|------------------------------------|
| $A$ 裂纹面面积                               | $Z$ 复变函数; Westergaard 应力函数         |
| $B$ 试件厚度                                | $a$ 裂纹长度                           |
| $D$ 直径                                  | $a_c$ 裂纹容限                         |
| $E$ 杨氏模量                                | $a_{cr}$ 临界裂纹长度                    |
| $F$ 断面面积; 自由能                           | $a_e$ 有效裂纹长度                       |
| $J$ $J$ 积分                              | $a_{ij}$ 弹性常数                      |
| $K$ 应力强度因子                              | $b_0$ 稳态原子间距                       |
| $K_I, K_{II}, K_{III}$ I、II、III 型应力强度因子 | $c$ 柔度; 积分回路                       |
| $K_{Ic}$ 平面应变断裂韧性                       | $d$ 裂纹深度                           |
| $K_{Iscv}$ 有腐蚀介质时的断裂韧性                  | $e$ 体积应变                           |
| $K_Q$ 应力强化系数                            | $k$ 安全系数                           |
| $K_f$ 疲劳缺口的应力集中系数                       | $l, m, n$ 方向余弦                     |
| $K_t$ 应力集中系数                            | $l$ 积分路径                           |
| $K_{th}$ 疲劳裂纹的强度因子门槛值                   | $n$ 安全系数; 应变硬化指数                   |
| $L$ 试件长度                                | $r$ 矢径; 复数的模                       |
| $M$ 力矩; 鼓胀因子                            | $r_0$ 塑性区尺寸                        |
| $M_p$ 塑性区修正因子                           | $t$ 厚度                             |
| $M_T$ 扭矩                                | $u$ 变形比能                           |
| $N$ 轴力; 疲劳寿命                            | $u_v$ 体积变形比能                       |
| $P$ 载荷; 压强                              | $u_f$ 形状改变比能                       |
| $P_q$ 条件载荷                              | $u, v, w$ 位移                       |
| $R$ 半径; 循环特征                            | $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ 已知边界位移 |
| $R_p$ 塑性区尺寸                             | $x, y, z$ 坐标                       |
| $S$ 跨距                                  | $z$ 复数                             |
| $S_{ij}$ 应力偏量分量                         | $\mathcal{G}$ 能量释放率                |
| $T$ 温度                                  | $\theta$ 转角; 幅角                    |
| $T$ 表面力矢量                               | $\Phi$ 应力函数                        |
| $U$ 变形能                                 | $\Gamma$ 应变能; 形成新裂纹表面所需的能量         |
| $V$ 体积                                  | $\alpha$ 软性系数                      |
| $W$ 试件宽度; 外力功                           | $\alpha_K (A_K)$ 冲击韧性              |
| $X, Y, Z$ 体积力                           | $\gamma$ 表面比能; 剪应变                 |
| $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ 已知边界表面力     | $\nu_8$ 八面体剪应变                     |
| $Y$ 裂纹形状因子                              | $\delta$ 延伸率; 裂尖张开位移(COD); 加载      |

## 点位移

$\varepsilon$  正应变

$\varepsilon_{ij}$  应变分量

$\varepsilon_i$  应变强度

$\eta_H$  疲劳缺口的敏感度

$\kappa$  体积弹性模量

$\lambda$  拉梅系数;波长

$\mu$  剪切模量

$\nu$  泊松比

$\rho$  曲率半径;塑性区尺寸

$\sigma$  正应力

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  主应力

$\sigma_{-1}$  疲劳极限

$\sigma_{0.2}$  屈服极限

$\sigma_a$  半应力幅

$\sigma_b$  强度极限

$\sigma_{cr}$  临界应力

$\sigma_s$  过负荷持久值

$\sigma_{s1}$  过负荷损害界

$\sigma_m$  平均应力

$\sigma_i$  应力强度

$\sigma_{ij}$  应力分量

$\sigma_f$  屈服极限

$\tau$  剪应力

$\tau_8$  八面体剪应力

$\tau_f$  屈服剪应力

$\psi$  断面收缩率

$\omega$  应变能密度

# 目 录

|                  |   |
|------------------|---|
| 绪 论              | 1 |
| 一、断裂力学的产生        | 1 |
| 二、传统的强度计算方法及其局限性 | 2 |
| 三、完整晶体的理想断裂强度    | 4 |
| 四、应力判据和裂纹扩展的基本类型 | 5 |
| 五、断裂力学研究的内容      | 7 |
| 六、断裂力学与无损检测技术    | 8 |
| 思考题              | 9 |
| 参考文献             | 9 |

## 第一篇 预备知识

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第一章 金属材料的机械性能和强度理论简介   | 11 |
| § 1.1 金属材料的强度和塑性、弹性和韧性 | 11 |
| § 1.2 应力状态及变形比能        | 16 |
| 一、应力状态的概念              | 16 |
| 二、双向应力状态               | 17 |
| 三、三向应力状态               | 20 |
| 四、变形比能                 | 21 |
| § 1.3 金属材料的脆性—韧性转变     | 22 |
| § 1.4 强度理论简介           | 24 |
| 一、基本概念                 | 24 |
| 二、关于断裂的强度理论            | 24 |
| 三、关于屈服(流动)的强度理论        | 25 |
| 四、强度理论的选用              | 27 |
| 五、莫尔强度理论               | 27 |
| 思考与练习                  | 29 |
| 第二章 复变函数方法             | 30 |
| § 2.1 复数和复变函数          | 30 |

|                                         |           |
|-----------------------------------------|-----------|
| § 2.2 解析函数和调和函数                         | 31        |
| 一、解析函数                                  | 31        |
| 二、调和函数                                  | 32        |
| 三、解析函数的线积分定理                            | 33        |
| 思考与练习                                   | 33        |
| <b>第三章 弹性力学基础</b>                       | <b>35</b> |
| § 3.1 应力分量和应变分量                         | 35        |
| 一、应力分量                                  | 35        |
| 二、应变分量                                  | 35        |
| 三、变形的连续性条件(协调方程)                        | 36        |
| § 3.2 应力和应变之间的关系(广义 Hooke 定律)           | 37        |
| 一、Hooke 定律                              | 37        |
| 二、广义 Hooke 定律                           | 37        |
| 三、各向异性体的广义 Hooke 定律                     | 38        |
| § 3.3 平衡方程及边界条件                         | 40        |
| 一、平衡微分方程                                | 40        |
| 二、边界条件                                  | 42        |
| § 3.4 弹性力学基本方程式及求解途径                    | 42        |
| 一、基本方程式                                 | 42        |
| 二、求解途径                                  | 44        |
| § 3.5 平面问题                              | 44        |
| 一、平面应力状态                                | 45        |
| 二、平面应变状态                                | 45        |
| 三、平面问题的基本方程式及求解途径                       | 45        |
| § 3.6 平面问题的复变函数解法                       | 47        |
| 一、用复变函数表示平面问题的应力函数(Muskhelishvili 应力函数) | 47        |
| 二、用 Muskhelishvili 应力函数表示的应力分量和位移分量     | 49        |
| 三、Westergaard 应力函数                      | 50        |
| 思考与练习                                   | 52        |
| 第一篇主要参考文献                               | 53        |

## 第二篇 线弹性断裂力学

|                                          |           |
|------------------------------------------|-----------|
| <b>第四章 裂纹尖端应力场和应力强度因子 <math>K</math></b> | <b>55</b> |
| § 4.1 I 型(张开型)经典裂纹问题                     | 55        |
| 一、边界条件                                   | 55        |
| 二、满足边界条件的 $Z_I(z)$ 函数                    | 55        |

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| 三、裂尖附近的应力应变场和位移分量 .....                              | 56 |
| § 4.2 单向拉伸的 I 型裂纹尖端的应力场 .....                        | 57 |
| 一、边界条件 .....                                         | 57 |
| 二、满足边界条件的函数 $Z(z)$ .....                             | 57 |
| 三、裂尖附近的应力场 .....                                     | 58 |
| § 4.3 I 型(滑开型)和 II 型(撕开型)经典裂纹问题 .....                | 59 |
| 一、I 型经典裂纹问题 .....                                    | 59 |
| 二、II 型经典裂纹问题 .....                                   | 60 |
| § 4.4 应力强度因子 .....                                   | 62 |
| 一、 $K$ 的物理意义 .....                                   | 62 |
| 二、 $K_I$ 的一般表达式 .....                                | 64 |
| 三、 $K$ 的计算方法 .....                                   | 64 |
| 四、应力强度因子的叠加原理 .....                                  | 65 |
| § 4.5 几种常见裂纹模型的应力强度因子 .....                          | 66 |
| 一、无限大板含中心穿透裂纹的应力强度因子 .....                           | 66 |
| 二、有限宽板裂纹模型的应力强度因子 .....                              | 68 |
| § 4.6 线弹性断裂力学的适用范围—— $K$ 主导区 .....                   | 70 |
| 思考与练习 .....                                          | 71 |
| <b>第五章 裂纹尖端塑性区及小范围屈服下的 <math>K_I</math> 修正</b> ..... | 73 |
| § 5.1 塑性区的形状和大小 .....                                | 73 |
| 一、屈服区主应力 .....                                       | 73 |
| 二、平面应力状态(薄板) .....                                   | 74 |
| 三、平面应变状态(厚板中心) .....                                 | 74 |
| 四、条件平面应变状态 .....                                     | 75 |
| 五、实验结果 .....                                         | 75 |
| § 5.2 应力松弛对塑性区尺度的影响 .....                            | 76 |
| 一、平面应力状态 .....                                       | 77 |
| 二、平面应变状态 .....                                       | 77 |
| 三、条件平面应变状态 .....                                     | 77 |
| § 5.3 有效裂纹长度及小范围屈服下的 $K_I$ 修正 .....                  | 77 |
| 思考与练习 .....                                          | 81 |
| <b>第六章 能量释放率及 <math>\mathcal{G}</math> 判据</b> .....  | 83 |
| § 6.1 Griffith 脆断理论 .....                            | 83 |
| § 6.2 能量释放率 $\mathcal{G}$ .....                      | 86 |
| § 6.3 关于 $\mathcal{G}_I$ 的讨论 .....                   | 87 |
| 一、固定载荷 .....                                         | 88 |
| 二、固定外边界 .....                                        | 88 |
| 三、载荷及外边界都变化 .....                                    | 89 |

|                                                        |     |
|--------------------------------------------------------|-----|
| § 6.4 $\mathcal{Q}$ 与 $K$ 之间的关系 .....                  | 89  |
| § 6.5 $\mathcal{Q}$ 、 $K$ 的柔度标定 .....                  | 91  |
| 思考与练习 .....                                            | 94  |
| <b>第七章 平面应变断裂韧性 <math>K_{Ic}</math> 的测试原理及方法</b> ..... | 95  |
| § 7.1 $K_{Ic}$ 的测试原理 .....                             | 95  |
| 一、意义 .....                                             | 95  |
| 二、影响断裂韧性的因素 .....                                      | 95  |
| 三、试样的类型 .....                                          | 96  |
| 四、试验装置 .....                                           | 99  |
| § 7.2 对试样尺寸的要求 .....                                   | 99  |
| 一、对裂纹尺寸的要求 .....                                       | 99  |
| 二、对试样厚度的要求 .....                                       | 100 |
| 三、对韧带尺寸( $W-a$ )的要求 .....                              | 100 |
| § 7.3 试验有效性的判断 .....                                   | 100 |
| 一、条件载荷 $P_0$ 的确定 .....                                 | 100 |
| 二、有效性判断 .....                                          | 102 |
| § 7.4 试验方法及步骤 .....                                    | 102 |
| 一、试样的制备 .....                                          | 102 |
| 二、试验的步骤及注意事项 .....                                     | 103 |
| § 7.5 试验结果分析和误差估计 .....                                | 104 |
| 一、试验结果分析 .....                                         | 104 |
| 二、判断 $K_0$ 是否就是要求的 $K_{Ic}$ .....                      | 104 |
| 三、误差分析 .....                                           | 105 |
| 思考与练习 .....                                            | 106 |
| <b>第八章 线弹性断裂力学在工程中的应用</b> .....                        | 107 |
| § 8.1 概 述 .....                                        | 107 |
| § 8.2 断裂力学用于工程抗断设计 .....                               | 108 |
| § 8.3 断裂力学用于疲劳分析 .....                                 | 111 |
| 一、过负荷持久值 $\sigma_s$ .....                              | 112 |
| 二、过负荷损害界 $\sigma_{gs}$ .....                           | 112 |
| 三、疲劳缺口的敏感度 .....                                       | 113 |
| 四、疲劳裂纹扩展速率 $da/dN$ .....                               | 114 |
| 五、疲劳裂纹扩展的强度因子门槛值 $K_{Is}$ 的估算 .....                    | 115 |
| § 8.4 断裂力学用于选材及指导工艺 .....                              | 118 |
| § 8.5 断裂力学用于应力腐蚀与腐蚀疲劳 .....                            | 119 |
| 思考与练习 .....                                            | 123 |
| 第二篇主要参考文献 .....                                        | 124 |

### 第三篇 弹塑性断裂力学简介

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 第九章 塑性力学的基本概念                  | 127 |
| § 9.1 应力应变关系与加载历程有关            | 127 |
| § 9.2 屈服条件                     | 129 |
| 一、Mises 屈服准则                   | 129 |
| 二、Tresca 屈服准则                  | 131 |
| 三、硬化律                          | 131 |
| § 9.3 塑性状态下的本构关系               | 132 |
| 一、增量理论                         | 132 |
| 二、形变理论(全量理论)                   | 133 |
| 思考与练习                          | 134 |
| 第十章 COD 法                      | 136 |
| § 10.1 COD 的定义和 COD 判据         | 136 |
| § 10.2 COD 的计算                 | 137 |
| 一、小范围屈服条件(线弹性)                 | 137 |
| 二、大范围屈服条件(DMG 模型)              | 139 |
| 三、全面屈服条件(COD 设计曲线)             | 142 |
| § 10.3 COD 判据的工程应用             | 144 |
| 一、膨胀因子 $M$                     | 144 |
| 二、断裂应力 $\sigma_f$              | 145 |
| 三、裂纹容限 $a_c$                   | 146 |
| § 10.4 临界 COD( $\delta_c$ )的测定 | 147 |
| 一、试件                           | 147 |
| 二、测试原理与方法                      | 147 |
| 小结                             | 149 |
| 思考与练习                          | 149 |
| 第十一章 $J$ 积分                    | 150 |
| § 11.1 $J$ 积分的定义               | 150 |
| § 11.2 $J$ 积分的能量考察             | 151 |
| § 11.3 $J$ 积分与积分路径无关性的证明       | 155 |
| § 11.4 $J$ 积分的物理意义             | 156 |
| 一、弹性情况                         | 156 |
| 二、弹塑性情况                        | 157 |
| § 11.5 $J$ 积分判据及其在工程中的应用       | 159 |
| 一、线弹性情况                        | 159 |
| 二、弹塑性情况(HRR 理论)                | 160 |

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| § 11.6 断裂参量 $K_I$ 、 $\mathcal{Q}_I$ 、 $\delta$ 、 $J$ 之间的关系小结 ..... | 161 |
| 一、 $\mathcal{Q}_I$ 与 $K_I$ 的关系 .....                               | 161 |
| 二、 $\delta$ 与 $\mathcal{Q}_I$ 、 $K_I$ 之间的关系 .....                  | 161 |
| 三、 $J$ 与 $\delta$ 、 $\mathcal{Q}_I$ 、 $K_I$ 之间的关系 .....            | 161 |
| § 11.7 $J$ 积分临界值 $J_{Ic}$ 的测试 .....                                | 163 |
| 一、多试件法 .....                                                       | 163 |
| 二、单试件法 .....                                                       | 164 |
| 三、 $J_R$ 阻力曲线法 .....                                               | 165 |
| 思考与练习 .....                                                        | 166 |
| 第三篇主要参考文献 .....                                                    | 167 |
| 附录 .....                                                           | 169 |
| 附录 I 常用的应力强度因子汇集 .....                                             | 169 |
| 附录 II 常用金属材料平面应变断裂韧性 $K_{Ic}$ 的数据资料 .....                          | 187 |
| 附录 III 断裂力学常用的单位及其换算 .....                                         | 202 |
| 附录 IV 常用试件的全塑性解 .....                                              | 204 |

# 绪 论

断裂力学是近 30 年来兴起的新学科。狭义地理解,断裂力学研究含有裂纹型缺陷的材料或构件,在外部作用下裂纹的扩展规律;广义地理解,断裂力学研究构件变形的最后过程直到破坏的规律。所以断裂力学是从宏观的连续介质力学的角度研究含有裂纹的构件和材料中裂纹扩展规律的学科(它也可称为“裂纹体力学”或“裂纹力学”)。

## 一、断裂力学的产生

长期以来,人们在使用各种材料,尤其是金属材料时,遇到了大量突然断裂的现象,它们往往是在远低于设计的承载能力时发生的。因为具有突然性,往往造成极为严重的后果。Anderson<sup>[1]</sup>收集了近 200 年来此类事故的实例,Biggs<sup>[2]</sup>也进行了详细的叙述。这些事故出现在工程结构的各个方面。现举例如下:

- 1938 年 3 月 14 日,架设在比利时阿尔伯特运河上的费库尔德大桥(桁架式结构)断成三截,坠入河中。随后,在 1940 年~1950 年间,比利时又发生了 16 起桥梁构件发生脆性断裂的破坏事故,多是在低温下发生的。事后分析指出,事故大都是由初始裂纹造成的。

- 加拿大的魁北克桥 1947 年底完工,27 个月后,发现东部桥梁的下弦有裂纹,将该处换成新构件并采取加强措施后,又在桥的西部下弦相应位置发现类似裂纹,同样也作了更换和处理。1951 年元月,负责该桥检查工作的地区桥梁机关对该桥作了 10 天的仔细检查,认定桥梁处于完好状态。但就在作出结论后两天,桥梁突然毁坏,断成三截坠入河中。

- 美国在第二次世界大战期间建造了 5 000 艘全焊接的自由轮,在使用中发生了一千多次脆性破坏事故,其中 238 艘完全报废,有的甚至成了两半,有的破坏还是在平静的海面上发生。破坏的地方没有明显的变形,说明是脆性破坏。

- 1947 年,前苏联的一批大型油罐(4 500 m<sup>3</sup>)的底部和下部的连接处出现了大量裂纹,这些油罐是用 CT3(相当于中国的 30 号钢)钢板焊成的。据报道它的破坏特点如下:

- ① 属脆性破坏,且总是从向风的一面起裂。

- ② 所有裂纹都出现储罐下部垂直壁与罐底接合的焊接处。

- ③ 破坏都是在有大量焊着金属聚集的地方(如盖板、焊缝交叉处等)。

- ④ 裂纹总是在各种接口或不连续处(如未焊满的弧坑、未焊透的箍边、角钢的对接口、明显的焊瘤及漏检的焊接裂缝等)传播,也在基体金属中传播。

- ⑤ 油罐是在 1942 年、1943 年开始使用的,而事故都是在 1947 年发生的,此前并未发现任何产生裂纹的记录。

当时所作的初步定性分析结论为:

- ① CT3 钢在温度降低时,韧性急剧下降。

- ② 在焊缝中存在严重的应力集中。

- ③ 焊接时不均匀加热和罐内外温度差引起的热应力造成很大的残余应力。

- 1954 年,英国大型喷气民航机慧星号坠毁在地中海中,事故的原因是气密座舱窗口角上机身表皮铆钉孔边出现裂纹。

• 1958年,美国北极星导弹固体燃料发动机壳体在发射时发生爆炸,其材料是用屈服应力 $\sigma_s=1.37\text{ GPa}$ 的高强度合金钢(D6AC),传统的强度和韧性指标完全合格,而爆炸时的工作应力远低于材料的许用应力。调查研究表明,这种低应力脆性破坏是由深度(0.1~1 mm)的裂纹引起的。

• 1969年11月,美国的F-111机在执行飞行训练,作投弹恢复动作时,左翼脱落招致飞机坠毁。据分析,当时的飞行速度、总重和过载等指标远低于设计水平,主要是由于飞机机翼大梁热处理不当出现缺陷而引起低应力脆断。

虽然,每一次重大的破坏事故都有各自的具体情况和特点,但从中也能找出一些共性,即:“低应力脆性断裂”的规律。

① 结构破坏时所承受的实际载荷与传统的设计和计算方法所给出的设计载荷相差甚大,前者只有后者的一半,甚至10%。

② 破坏方式与在实验室按传统的试验方法所得的破坏方式极为不同,甚至本来是塑性很好的材料,也变得纯属是脆性断裂了。

③ 很多事故是在气温降低,或高温且带腐蚀介质的条件下发生的,即构件的工作环境对破坏方式有很大影响。

④ 破坏处的材料常规机械性能一般是合格的,但冲击韧性 $\alpha_K$ 较低。

⑤ 高强度钢的脆断现象更为突出和严重。

⑥ 破坏几乎总是从应力集中处开始的,而应力集中常常发生在焊接缺陷处、材料缺陷处、构件形状突变处、加工过程中的划痕、凹坑、切口处以及使用过程中的疲劳或腐蚀裂纹处等。

⑦ 厚截面的大型结构易发生上述事故。

⑧ 低应力脆断事故更具有突发性。

分析许许多多灾难性事故的原因后,我们发现这种低应力脆性破坏主要是由宏观尺寸的裂纹源引起的,裂纹源的存在与构件的选材,设计,冷、热加工以及使用条件等等因素有关。尤其是现代高强度材料的大量使用,这些材料对裂纹非常敏感,使断裂事故不断发生,所以我们必须重视裂纹的存在。不承认裂纹存在的传统的材料力学和弹塑性力学的强度准则显然不够用了,必须研究裂纹体的种种力学行为。事实上,正是在生产实践中大量惨痛的破坏事故以及人们为战胜这些灾难性事故而付出的努力才使得断裂力学这门新型学科得以产生并不断地发展完善。

## 二、传统的强度计算方法及其局限性

为了进一步说明断裂力学所要研究和回答的问题,需要先回顾一下传统的强度计算方法,指出它们在分析和解决断裂事故问题中的局限性。

传统的强度问题是这样处理的:按构件的使用条件,选材时对材料塑性指标( $\delta, \psi$ )和冲击韧性指标( $\alpha_K$ )提出一定要求。在强度计算时,以材料强度指标(屈服极限 $\sigma_s$ 、强度极限 $\sigma_b$ 、疲劳强度极限和S-N曲线)为依据。在静力条件下,使最大的计算应力(最危险点)满足强度条件

$$\sigma_{\max} \leq \frac{\sigma_s}{n_s} \quad (0-1)$$

或

$$\sigma_{\max} \leq \frac{\sigma_b}{n_b} \quad (0-2)$$

其中:  $n_s$ —— 对应于屈服极限的安全系数

$n_b$ —— 对应于强度极限的安全系数

在交变载荷条件下, 计算应力幅值  $\Delta\sigma$ , 由  $S-N$  曲线求得疲劳寿命:

$$N_c = f(\Delta\sigma) \quad (0-3)$$

人们在传统的强度计算时, 致力于:

- ① 构件的应力分析, 求解  $\sigma$  或  $\Delta\sigma$ ;
- ② 建立材料的强度条件和强度理论。

该方法大致可示意如图 0-1。

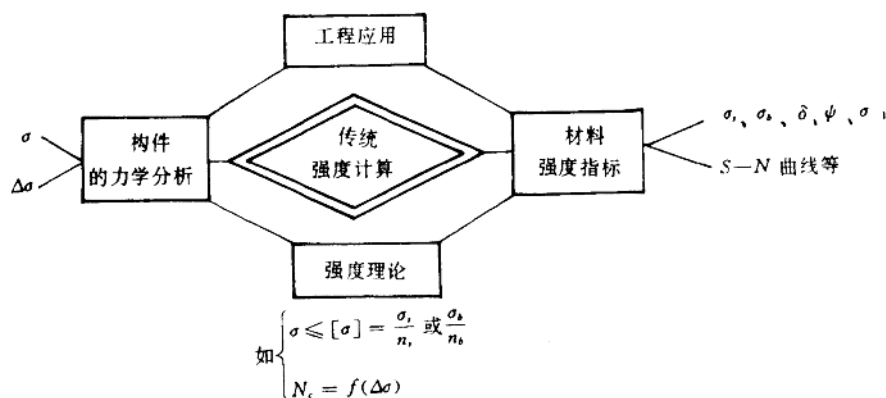


图 0-1 传统的强度问题

传统的强度计算方法, 确实在一定条件下反映了客观事实的规律, 并成功地设计了大量的工程结构, 但面对前面所述的严重的断裂事故, 它却是无能为力的。因为传统的强度理论和计算方法是建立在连续均匀介质的假定基础上的。近年来, 随着工业的发展, 在工程实际中提出了许多新问题。诸如:

- ① 结构的大型化, 焊接结构的大量使用。
- ② 高强度钢的使用。
- ③ 结构的工作环境更为恶劣, 例如中子辐射、腐蚀环境、高温、低温等等。

在这样的强度问题中, 不能再把材料理想化为无缺陷的连续介质。实际上, 在生产和加工过程中, 由于各种原因, 不可避免地会在构件中产生裂纹, 这种裂纹或许开始并没有被无损探伤所发现, 而在使用中, 它们逐渐扩展, 使构件的承载能力显著下降, 最终导致低应力脆性断裂。

所以断裂力学在考虑强度问题时, 不再把材料看作是毫无缺陷的连续均匀介质, 而是把它看作裂纹体, 设计计算结构的承载能力时, 要根据内部存在的裂纹并考虑裂纹周围的应力、应变状态以正确地判断构件的实际使用强度; 根据裂纹的扩展规律, 确定构件的安全使用寿命。

### 三、完整晶体的理想断裂强度

为了研究构件因有裂纹而损失的强度,我们应先对无裂纹弹性体的断裂强度有所了解。关于完整晶体的理想断裂强度,涉及到不少金属物理和金相学的知识,此处只作简要的定性说明和定量估算。

物体是由原子组成的,原子之间靠电磁力结合在一起。固体被拉断,显然是破坏了原子之间的结合。我们讨论结晶体固体,其内部原子按一定秩序排列,晶格的形状是多种多样的。以立方体晶格固体为例,此时晶格的八个原子排列在八个角点上,原子间有原子键相连接(如图 0-2)。

图中每个小圆点代表一个原子,在材料左右两侧沿原子键方向施以应力  $\sigma$ 。加载前原子间距为  $b_0$ ,假设  $\sigma$  足够大,克服了  $X-X$  平面两边原子间的吸引力,使晶体沿  $X-X$  断裂,这个过程叫解理断裂。断裂面两边的一对原子,例如  $C-C'$ ,除了它们之间的相互作用之外,其它原子对  $C$  和  $C'$  也有作用力,为了简单起见,只考虑  $C-C'$  原子对间的相互作用力。

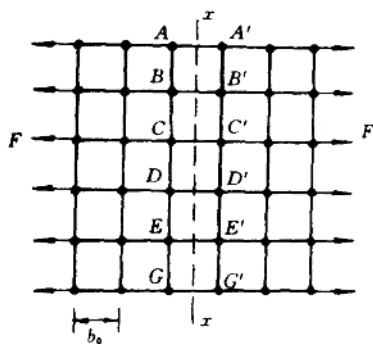


图 0-2 立方体晶格

由量子力学可以近似地得到一对孤立原子之间的结合力  $F$  与原子间距  $b$  之间的关系,如图 0-3(a)

所示。当原子处于平衡状态时,  $F(b_0) = 0$ 。当对固体施以外力时,原子就离开其正常的平衡位置,压应力使原子间距缩短,原子中的电子云重叠,排斥力增大,于是排斥力就成为原子间作用力的主导,表现为整个固体对压应力的抵抗;拉应力使原子间距增大,此时原子间的作用力变成了以吸引力为主导,抵抗拉应力。

为了探明理解断裂的机理,我们感兴趣的是受拉应力作用的情况,从图 0-3(a) 中可以看到,原子间距  $b$  增加到某一值时,相互作用力  $F$  达到一个极大值,  $b$  再增加时,  $F$  反而减小,  $F \sim b$  的这种变化特点主要是由原子中电子的运动决定的。显然,材料在破断之前之所以对拉应力表现出抗力,就是因为原子之间吸引力有一个增加的阶段( $AB$  段),换句话说,要使材料破断,就必须使施加的拉应力足以克服原子间最大引力所对应的抗断应力。

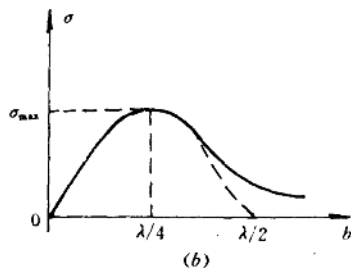
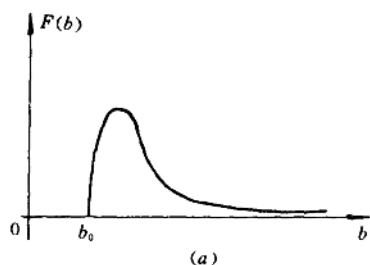


图 0-3 原子间的相互作用力