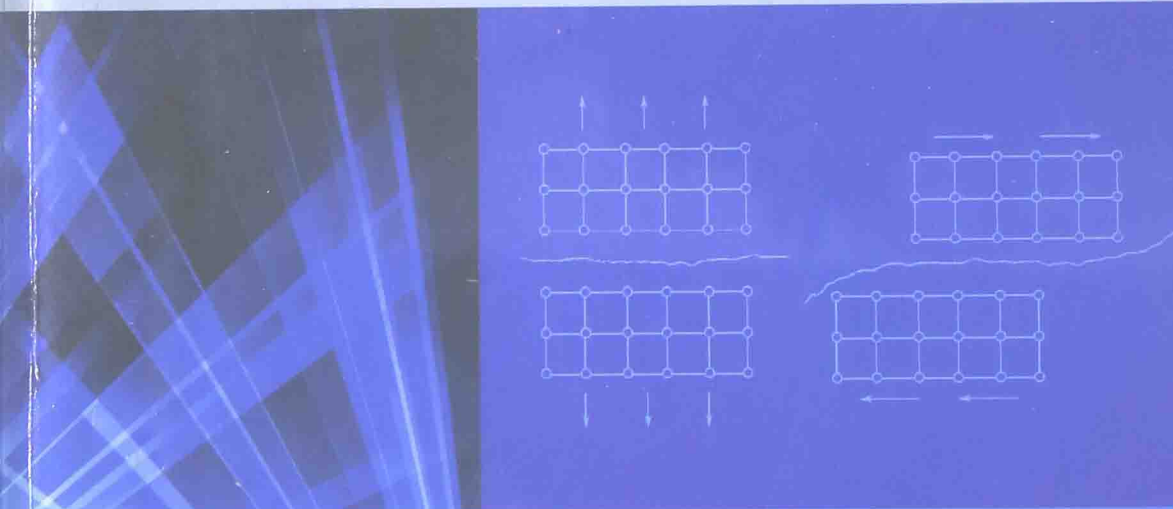


# 固体与软物质缺陷与 断裂理论基础

(上册)

范天佑 著



科学出版社

# 固体与软物质缺陷与 断裂理论基础

(上 册)

范天佑 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书是原《断裂理论基础》一书的修正与扩充版,着眼于缺陷的演化而不仅仅局限于裂纹问题,材料则从固体扩充到软物质.原第1章内容得到很大的扩充.原第2-6章被保存下来.这6章构成现在的上册,以传统材料(结构材料)的缺陷与断裂理论为主.非传统材料的缺陷与断裂研究,构成现在下册的主要内容,其中把理论(凝聚态)物理学中著名的 Landau 理论引入这一领域是一个初步的尝试.另外,书中的金属泡沫材料,液晶,固体准晶和软物质准晶的缺陷与断裂理论及计算结果为著者和他的学生们所发展和发现,其中包括对势论,(多重调和与多重准调和)高阶偏微分方程,应用复分析等数学方法的发展.上述内容也是第一次在同类专著中报导.下册还包含了复杂的偏微分方程(组)边值问题求解的数学推导和精确解析解的确定的丰富翔实的补充细节.理论在科学和工程中实际应用的若干实例也在下册中进行了详细介绍.

读者对象:高等学校的材料物理、力学、应用数学与计算数学、地震研究和相关工程技术专业的大学生、研究生、大学教员、研究人员和工程技术人员.

图书在版编目(CIP)数据

固体与软物质缺陷与断裂理论基础.上册/范天佑著. —北京:科学出版社, 2014

ISBN 978-7-03-042392-4

I. ①固… II. ①范… III. ①材料科学-物理学 IV. ①TB303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014) 第 257041 号

责任编辑:陈玉琢/责任校对:彭 涛

责任印制:赵德静/封面设计:陈 静

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014年11月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014年11月第一次印刷 印张:21 3/4

字数:420 000

定价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

本书可以看作著者《断裂力学基础》的第三版,或扩充与修正版,其第二版已更名为《断裂理论基础》,不局限于讨论力学.每次扩充与修正,都与所讨论的内容扩充有关,一方面反映了其研究对象——材料的范围的扩充,另一方面也反映了其研究方法的扩充.现在包括把软物质材料扩充进来,当然这仅仅是一个尝试,所指的修正是讨论不拘泥于断裂,而是从缺陷及其演化的视角出发,把断裂看作演化过程的一个片段或阶段去处理.为生产实践服务,也就是断裂理论中实践性最强的分支——断裂力学及应用的讨论,仍然是书中讨论的一个重点,因为有实际应用,它才有发展的动力.国内工作者在应用上有很好的成绩<sup>①</sup>.

物理学家 A.A.Griffith 1920 年开创的经典理论,最初就是固体内部缺陷演化的理论,他从能量的转化的观点考虑裂纹的演化及其对固体物理性质的影响,还用了当时的分子理论去解释.1934 年和 1935 年, Orowan, Taylor 等提出位错假说,1956 年电子显微镜研制出来,观察到位错,证实了位错的存在,是固体缺陷演化理论和实践的一大发展.1948 年,位错理论的创始人之一 Orowan,发展了 Griffith 的理论,使其从仅仅适合于玻璃、陶瓷等绝对脆性体破坏现象扩充到适合金属与合金.同年 Mott(1977 年 Nobel 物理奖获得者)把 Griffith 的理论扩充到动力学情形.同年, Irwin 从另一种角度修正了 Griffith 的理论,使其从仅仅适合于玻璃、陶瓷等绝对脆性体破坏现象扩充到适合金属与合金, Irwin 的方法更简单,适合于工程应用,在工程领域产生了指导性的影响.与 Irwin 的工作几乎同时,理论物理学家 Eshelby 发展了连续位错理论,弹性能量—动量张量和路径守恒积分理论,是大家公认的缺陷演化理论的又一大发展.以上进展引起了理论物理学家 Landau(1962 年 Nobel 物理奖获得者)及其学派的重视,在他与 Lifshitz 合作的《理论物理学》的第七卷《弹性理论》的 1964 年版中就增加了位错与裂纹的一章. Landau 及其学派从研究液氦(氦的一种同位素)的低温超流开始,创立了一系列重要理论,后来发展起来微观的量子液体物理学、统计物理学 II (凝聚态理论)和“粗粒化”的(或唯象的)广义流体动力学.此广义流体动力学结合他们创立的凝聚态物理学的 Poisson 括号,可以讨论普通流体、超流体、弹性、位错、向错、晶体、液晶、准晶、铁磁体、自旋玻璃体和某些软物质,建立这些复杂体系运动方程.这对发展有关新型连续统动力学的分支学科会有意义.正是出于这种考虑,本书新版不拘泥于断裂的讨论,把研究范

<sup>①</sup> 航空工业部科学技术委员会.飞机结构损伤容限设计指南.航空工业部情报研究所,北京,1985.

围加以扩充。

软物质早就存在,例如,液晶、聚合物等,只是 1991 年 de Gennes(当年 Nobel 物理奖获得者)提出软物质名称和概念,有关学科才迅速发展起来。软物质包括液晶、聚合物、胶体、泡沫、表面活性剂、乳状液、生物大分子、某些颗粒体、软物质准晶等。它们既不属于液体,也不属于固体,而是兼有液体与固体两者的特征。这一特征使软物质态与气态、液态、固态并列,称为物质第四态。软物质态不仅与它们的物质结构有关,也与环境有关,例如,某些颗粒,在一定条件下为固体,但是在另外一些条件下(例如,泥石流运动时)同时具有流体性质,就成了软物质。由于软物质及其缺陷的重要性,这次把它包含进来,前面提到,这仅仅是一个尝试,可能会成功,也可能会失败。早在软物质名称和概念提出之前,有些软物质,如聚合物,其宏观理论(包括其缺陷与断裂理论)已经发展得比较完整,而它的软物质观的新理论的建立目前还有很大困难,这里我们进行的介绍,尚未充分揭示其软物质的属性。即使液晶和软物质准晶的缺陷和断裂问题,讨论也很初步。我们希望抛砖引玉,得到读者的响应,以便出现更深入的研究工作。

各种体系的缺陷及其演化得以定量描述,不得不涉及应用数学,甚至群论这样的抽象数学(纯数学)。与本书的前两版一样,对复杂的数学计算不回避,对新问题,涌现出许多新的偏微分方程,而 Fourier 分析、复分析和积分方程对它们同处理传统问题一样,非常有效。这些高阶偏微分方程的解,初学习者会不熟悉,所以我们进行详细介绍,加强了数学附录的写作工作,尽可能把补充计算写进去,供读者参考。这次把涉及的群论知识,也在附录中进行初步介绍。

读者不难发现,缺陷及其演化问题吸引了数学、自然科学和技术科学的诸多分支学科的共同攻关,取得了一定进展,但是留下许多疑难问题,目前比较成熟的仅仅是固体缺陷和断裂的奇异性理论(尤其是其线性理论),并且在工程中得到成功的应用,除此之外的其他课题(尤其是软物质的缺陷与断裂研究)仍然处在探索中。

最后,对我国在缺陷(包括裂纹和断裂)理论研究、应用和教育方面做出重要贡献的前辈专家李四光、李薰、钱临照、张兴铃、董铁宝、刘淑仪、赖祖涵、陈箴等老师表示深深的敬意!他们当中不乏具有传奇色彩的英雄人物,例如,李四光教授、张兴铃教授就冲破国民党反动势力和帝国主义的阻挠和扣押,历经艰险回国报效,领导科学研究(包括成油理论、资源勘探和地震预测),或在大西北戈壁沙漠参加“两弹一星”工程数十年,他们不仅为我国最早应用 Griffith 理论于地球科学和材料科学的科学工作者,还出版了介绍有关方面理论和实践的最早的著作。陈箴老师是一位才华出众的青年理论物理学家,当年被誉为清华大学的四大才子之一,为了国家的需要,放弃原专业和著名理论物理学家王竹溪教授助手的优越学术岗位,而去条件艰苦的鞍山钢铁厂做材料检测工作。同样由于国家的需要,1971 年临危受命组建金属材料断裂韧性测量实验室,到 1978 年积劳成疾,英年早逝,短短七年

时间内,该实验室的业绩从空白达到国外先进实验室二十年才达到的水平。在他生命最后的三年,身患癌症,面对死神,毫无惧色,坚持实验、理论和计算工作,与合作者一起整理出版了我国最早的两本专门讨论断裂理论著作,直至以身殉职,被称为科技战线上的铁人。令人振奋的是,他的工作被后来人继承和发展<sup>①</sup>。上面提到的老师中,有些直接教过、指导过和帮助过著者,谨对他们表示最衷心的感谢!教过、指导过和帮助过著者的老师远远不只在缺陷与断裂领域工作的前辈,例如,革命前辈苏谦益、陈信等领导同志的关心、支持和帮助,王仁老师是最早引导著者学习位错的前辈,闵嗣鹤老师把他私人藏书*Introduction to the Theory of Fourier Integrals*(Titchmarsh, 1937),孙树本老师把他的私人藏书*A Treatise of the Theory of Bessel Functions*(Watson, 1922)长期借给著者阅读使用,闻国椿老师和沈燮昌老师在复分析方面的教育等,不仅极大地帮助了著者对缺陷和断裂的工作,也使著者终身受益。同时衷心感谢我的学生们特别是李庆同志和李显方同志的合作,热情的读者们的兴趣和激励,给了著者巨大的动力,把扩充与修正版的工作继续做下去。

感谢国家自然科学基金委员会和德国洪堡基金会 (Alexander von Humboldt Stiftung) 多年的资助,以及德国 Profs H G Hahn(University of Kaiserslautern), J Kalthoff (Fraunhofer Institut fuer Werkstoff, Freiburg; University of Bochum, Ruhr), U Messerschmidt (Max-Planck Institut fuer Mikrostruktur Physik, Halle) 帮助和讨论。

范天佑

2014年4月20日

<sup>①</sup> 马德林主编. 常用金属材料断裂韧性测试. 北京: 兵器工业出版社, 1994.

# 目 录

## (上 册)

### 前言

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 绪论                          | 1  |
| 第 1 章 缺陷的应力分析基础             | 23 |
| 1.1 受拉伸或内压的平面孔洞或裂纹问题        | 24 |
| 1.1.1 远处受拉伸的椭圆孔             | 24 |
| 1.1.2 椭圆孔边受均匀内压             | 30 |
| 1.1.3 椭圆孔边一段上受均布压力或受集中力作用   | 31 |
| 1.1.4 受拉伸或内压的 Griffith 裂纹   | 33 |
| 1.1.5 半无限裂纹                 | 40 |
| 1.1.6 曲边多角形缺陷               | 41 |
| 1.2 平面孔洞或裂纹的面内剪切            | 43 |
| 1.2.1 远处受均匀剪切应力作用的椭圆孔       | 43 |
| 1.2.2 椭圆孔边均匀剪切应力作用          | 44 |
| 1.2.3 受面内剪切的 Griffith 裂纹    | 44 |
| 1.2.4 半无限裂纹其一段表面上受剪切        | 44 |
| 1.3 反平面或纵向剪切的孔洞或裂纹          | 45 |
| 1.3.1 Griffith 裂纹问题         | 46 |
| 1.3.2 半无限裂纹                 | 47 |
| 1.4 复势法的若干发展                | 48 |
| 1.4.1 超越函数保角映射和有限尺寸裂纹体的精确解  | 48 |
| 1.4.2 有限高狭长体中的半无限裂纹         | 48 |
| 1.4.3 有限高度狭长体中的双裂纹          | 50 |
| 1.4.4 有限宽度狭长体中的裂纹           | 52 |
| 1.4.5 四重调和方程和二维准晶裂纹问题的复分析   | 53 |
| 1.4.6 六重调和方程和三维准晶裂纹问题的复分析   | 54 |
| 1.5 基于 Westergaard 方法的裂纹解   | 54 |
| 1.6 化成 Riemann-Hilbert 问题求解 | 58 |
| 1.6.1 复势的结构                 | 58 |

|                                                   |     |
|---------------------------------------------------|-----|
| 1.6.2 例 .....                                     | 60  |
| 1.7 裂纹面的位移 .....                                  | 64  |
| 1.8 平面裂纹解的一般结构 ——Williams 特征展开 .....              | 66  |
| 1.9 缺陷问题的积分变换解 .....                              | 70  |
| 1.9.1 受内压作用的 Griffith 裂纹 .....                    | 70  |
| 1.9.2 受剪切作用的 Griffith 裂纹 .....                    | 74  |
| 1.9.3 半无限平面的边界裂纹 .....                            | 77  |
| 1.10 Fourier 方法的若干发展 .....                        | 79  |
| 1.10.1 二维准晶的裂纹 .....                              | 79  |
| 1.10.2 三维准晶的裂纹 .....                              | 81  |
| 1.11 位错的应力分析 .....                                | 82  |
| 1.11.1 普通晶体刃型位错的应力分析 .....                        | 82  |
| 1.11.2 螺型位错的应力分析 .....                            | 84  |
| 1.11.3 二维准晶的位错 .....                              | 84  |
| 1.11.4 三维准晶的位错 .....                              | 87  |
| 1.12 小结 .....                                     | 90  |
| <b>第 2 章 线性弹性断裂力学</b> .....                       | 91  |
| 2.1 断裂模式和裂纹的渐近应力与位移场 .....                        | 91  |
| 2.1.1 I 型 Griffith 裂纹的渐近应力场 .....                 | 92  |
| 2.1.2 II 型 Griffith 裂纹的渐近应力场 .....                | 93  |
| 2.1.3 III 型 Griffith 裂纹的渐近应力场 .....               | 93  |
| 2.1.4 渐近位移场 .....                                 | 94  |
| 2.2 应力强度因子和断裂判据 .....                             | 95  |
| 2.3 应力强度因子 —— 定义与实例 .....                         | 98  |
| 2.3.1 定义和基本应力强度因子 .....                           | 98  |
| 2.3.2 由复势确定应力强度因子 .....                           | 99  |
| 2.3.3 实例 .....                                    | 100 |
| 2.4 有限尺寸裂纹体的应力强度因子 .....                          | 106 |
| 2.4.1 有限高狭长体中的裂纹, 在其一段裂纹面上受内压 .....               | 106 |
| 2.4.2 有限高狭长体中的裂纹, 裂纹面的一段上受剪切 .....                | 106 |
| 2.4.3 有限高狭长体中的双裂纹, 裂纹面上一段受均匀压应力或均匀剪应力<br>作用 ..... | 107 |
| 2.4.4 有限宽板单边裂纹 .....                              | 107 |
| 2.5 确定应力强度因子的其他方法 .....                           | 107 |
| 2.5.1 Westergaard 方法 .....                        | 108 |

|       |                                          |     |
|-------|------------------------------------------|-----|
| 2.5.2 | 叠加法和 Green 函数法                           | 109 |
| 2.5.3 | 由应力集中系数法确定应力强度因子                         | 112 |
| 2.5.4 | 近似方法与数值方法                                | 117 |
| 2.5.5 | 实验方法                                     | 118 |
| 2.6   | 进一步讨论 $K$ 判据                             | 118 |
| 2.7   | 能量释放率, $G$ 判据                            | 120 |
| 2.8   | 裂纹顶端的塑性区和小范围屈服修正                         | 123 |
| 2.8.1 | 塑性区的估计                                   | 123 |
| 2.8.2 | 应力松弛对塑性区尺寸的影响                            | 126 |
| 2.8.3 | 应力强度因子修正                                 | 128 |
| 2.9   | 平面应力裂纹扩展阻力曲线法                            | 129 |
| 第 3 章 | 三维裂纹问题和线性弹性断裂力学的应用                       | 132 |
| 3.1   | 轴对称三维问题弹性静力学基本方程组                        | 132 |
| 3.2   | Hankel 积分变换                              | 135 |
| 3.2.1 | Hankel 变换的基本定理                           | 136 |
| 3.2.2 | 导数的 Hankel 变换                            | 137 |
| 3.3   | 用 Hankel 变换求解轴对称问题                       | 139 |
| 3.4   | 带圆盘状裂纹的物体在轴对称受力时的解, $K_I, K_{II}$ 的计算    | 143 |
| 3.4.1 | 裂纹表面作用正应力情形下的解, $K_I$ 的计算                | 143 |
| 3.4.2 | 裂纹表面作用剪应力情形下的解, $K_{II}$ 的计算             | 150 |
| 3.5   | 非轴对称问题、Muki 解法                           | 153 |
| 3.6   | 带圆盘状裂纹的物体在剪切作用下的解, $K_{II}, K_{III}$ 的计算 | 157 |
| 3.7   | 带圆盘状裂纹的物体受弯曲作用或弯曲与拉伸联合作用下的解, $K_I$ 的计算   | 165 |
| 3.7.1 | 受拉伸与弯曲联合作用的圆盘状裂纹问题                       | 171 |
| 3.7.2 | 偏裂纹的纯弯曲问题                                | 171 |
| 3.8   | 带圆盘状裂纹的物体受扭转作用下的解, $K_{III}$ 的计算         | 172 |
| 3.8.1 | 均匀周向剪应力作用下的情形                            | 172 |
| 3.8.2 | 在扭矩作用下的情形                                | 175 |
| 3.9   | 带圆盘状裂纹的有限直径柱体受均匀拉伸作用时 $K_I$ 的近似解         | 177 |
| 3.10  | 三维问题的一般解, Boussinesq-Папкович-Neuber 方法  | 187 |
| 3.11  | 受均匀拉伸的椭圆盘状裂纹问题, Green-Sneddon 解          | 188 |
| 3.12  | 半椭圆表面裂纹问题                                | 195 |
| 3.13  | 有限尺寸物体中的三维裂纹问题                           | 199 |

|                                                                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.13.1 圆柱体表面裂纹 .....                                                                                                                                        | 199 |
| 3.13.2 方形柱体中的角裂纹 .....                                                                                                                                      | 202 |
| 3.14 线性弹性断裂力学应用简介 .....                                                                                                                                     | 203 |
| 第 4 章 结构材料非线性断裂力学 —— 材料非线性效应的处理 .....                                                                                                                       | 206 |
| 4.1 裂纹顶端张开位移 .....                                                                                                                                          | 207 |
| 4.2 Dugdale 模型 .....                                                                                                                                        | 208 |
| 4.3 大范围和全面屈服情形 —— 半经验公式 .....                                                                                                                               | 214 |
| 4.4 $J$ 积分的定义和路径守恒性 .....                                                                                                                                   | 215 |
| 4.5 线性弹性材料 $J$ 与 $G$ 和 $K$ 的关系 .....                                                                                                                        | 218 |
| 4.6 $J$ 与裂纹试样变形能之间的关系的讨论 .....                                                                                                                              | 220 |
| 4.7 全量塑性理论的裂纹顶端应力分析的渐近解 —— HRR 解 .....                                                                                                                      | 223 |
| 4.8 $J$ 积分与裂纹顶端应力场和应变场的奇异性 .....                                                                                                                            | 231 |
| 4.9 HRR 场的解析解研究 .....                                                                                                                                       | 236 |
| 4.9.1 平面应变情形下 H 方程 (4.7.11) 和 RR 方程 (4.9.3) (或 (4.9.4)) 等价,<br>边界条件 (4.7.12), (4.7.13) 与 (4.9.5), (4.9.6), 归一化条件 (4.7.14) 与<br>(4.9.7) 等价 (但相差一个常数因子) ..... | 238 |
| 4.9.2 HRR 解的分析解 .....                                                                                                                                       | 239 |
| 4.9.3 线性材料极限 .....                                                                                                                                          | 239 |
| 4.9.4 理想塑性材料极限 .....                                                                                                                                        | 240 |
| 4.9.5 某些数值例子 .....                                                                                                                                          | 242 |
| 4.10 $J$ 积分与张开位移的关系 .....                                                                                                                                   | 243 |
| 4.10.1 基于 Dugdale 模型 —— 理想塑性模型 .....                                                                                                                        | 243 |
| 4.10.2 基于 HRR 解 —— 硬化材料情形 .....                                                                                                                             | 244 |
| 4.11 平面应力裂纹缓慢扩展 .....                                                                                                                                       | 244 |
| 4.12 结论与讨论 .....                                                                                                                                            | 252 |
| 4.13 附录: 赖祖涵对 HRR 解的简化推导 .....                                                                                                                              | 252 |
| 第 5 章 断裂动力学 —— 惯性效应的处理 .....                                                                                                                                | 254 |
| 5.1 动态效应 .....                                                                                                                                              | 254 |
| 5.1.1 加载速率与裂纹运动速率 .....                                                                                                                                     | 254 |
| 5.1.2 加载速率与裂纹速率对断裂韧性的影响 .....                                                                                                                               | 255 |
| 5.2 裂纹的动态起始扩展 .....                                                                                                                                         | 258 |
| 5.2.1 半无限裂纹 .....                                                                                                                                           | 258 |
| 5.2.2 有限尺寸裂纹 .....                                                                                                                                          | 265 |
| 5.3 裂纹与弹性波的相互作用 .....                                                                                                                                       | 270 |
| 5.3.1 半无限裂纹对 SH 波的散射 .....                                                                                                                                  | 271 |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 5.3.2 有限尺寸裂纹对弹性波的散射 .....             | 273 |
| 5.4 裂纹的快速传播 .....                     | 274 |
| 5.4.1 运动 Griffith 裂纹 .....            | 274 |
| 5.4.2 狭长体中快速传播裂纹 .....                | 278 |
| 5.4.3 原始长度为零的裂纹生成后以等速向两端扩展 .....      | 282 |
| 5.5 动态断裂判据与止裂 .....                   | 284 |
| 5.6 三维动态断裂研究 .....                    | 287 |
| 5.6.1 受冲击三维椭圆盘状裂纹 .....               | 288 |
| 5.6.2 半椭圆盘状表面裂纹问题 .....               | 292 |
| 第 6 章 数值方法及其应用 .....                  | 293 |
| 6.1 边界配置法和常用试样的应力强度因子 .....           | 293 |
| 6.1.1 原理 .....                        | 293 |
| 6.1.2 紧凑拉伸试样的 $K_I$ .....             | 297 |
| 6.1.3 三点弯曲试样的 $K_I$ .....             | 300 |
| 6.1.4 单边裂纹拉伸试样的 $K_I$ .....           | 302 |
| 6.1.5 四点剪切试样的 $K_I$ .....             | 303 |
| 6.1.6 偏裂纹三点弯曲试样的 $K_I, K_{II}$ .....  | 307 |
| 6.2 二维静态边界积分方程-边界元方法及其在断裂力学中的应用 ..... | 308 |
| 6.2.1 原理 .....                        | 308 |
| 6.2.2 离散化与数值解 .....                   | 310 |
| 6.2.3 应力强度因子 .....                    | 314 |
| 6.2.4 计算框图 .....                      | 315 |
| 6.2.5 计算实例与结果 .....                   | 315 |
| 6.3 三维静态边界积分方程-边界元方法及其在断裂力学中的应用 ..... | 317 |
| 6.3.1 边界离散化和边界上未知量的插值 .....           | 317 |
| 6.3.2 奇异积分及角点和面力不连续问题处理 .....         | 319 |
| 6.3.3 裂纹前缘应力奇异性处理和应力强度因子的计算 .....     | 321 |
| 6.3.4 计算实例 .....                      | 325 |
| 6.4 弹性与断裂动力学中的边界积分方程-边界元方法 .....      | 326 |
| 6.4.1 原理 .....                        | 326 |
| 6.4.2 Laplace 变换的数值反演 .....           | 328 |
| 6.4.3 动态应力强度因子的计算 .....               | 329 |
| 6.4.4 计算实例 .....                      | 330 |
| 6.4.5 其他类型的动态边界积分方程 .....             | 331 |
| 6.5 结论与讨论 .....                       | 332 |

(下 册)

- 第 7 章 若干非传统材料理论的预备知识
- 第 8 章 多胞/泡沫金属材料的缺陷与断裂理论
- 第 9 章 液晶的缺陷与断裂理论探索
- 第 10 章 固体准晶材料缺陷与断裂理论
- 第 11 章 软物质准晶缺陷与断裂理论
- 第 12 章 聚合物的缺陷与断裂研究简介
- 第 13 章 材料分离机制的多层次、多尺度研究
- 第 14 章 应用实例详细讨论
- 附录一 固体与软物质弹性、塑性和流体动力学基本关系
- 名词索引

# 绪 论

材料或结构物在外力或其他因素作用下发生破裂,这是日常生活、工程与自然世界中的一个普通现象.看起来如此简单的一个现象,其物理本质迄今并未完全认识透彻.由于材料的发展,这一问题对人们的吸引力正在进一步加大.

从物理和力学的角度去分析这一现象已进行将近一个世纪的努力.物理学家思考为什么晶体的理论强度与实际强度差别几个数量级?而固体力学则从宏观的角度,观察分析工程材料与结构的失效,以便提供理论与判据为工程服务.工程师关心材料或结构在什么部位、在多大的外力下会发生断裂?在较早阶段,人们由于不了解工程材料与结构失效的真正原因,认为循环外应力作用使材料与结构破坏是“疲劳”所造成的,从而积累了一些经验去估计在什么时候(即循环多少次)会发生断裂.在断裂力学诞生之前,由于经验的积累和力学与材料科学工作者的努力,提出了四个强度理论.根据这些理论,在分析结构安全性时,不仅要计算结构内的应力和变形,还要测定相应的材料性能的常数.这些常数包括屈服极限(又称屈服强度) $\sigma_s$ 、断裂极限(又称为断裂强度) $\sigma_b$ 、延伸率 $\delta$ 和冲击韧性 $\alpha_k$ .有时还需要截面收缩率 $\psi$ ,在循环加载下需要疲劳极限 $\sigma_r$ .在这4个参数中, $\sigma_s$ 与 $\sigma_b$ 为强度指标, $\delta$ 与 $\alpha_k$ 为韧性指标.经验表明,材料必须是强度与韧性都适当时,才能避免由它制作成的结构发生断裂.

基于这4个或5个力学性能参数的设计方法,称为常规设计方法.这代表了人类对强度(包括断裂)问题认识的一个阶段.在当时人们认为材料内部是连续的,参数 $\sigma_s$ 、 $\sigma_b$ 、 $\delta$ 与 $\psi$ 的获取由完整试样去测定.

随着生产的发展和科学的进步,人类对强度(包括断裂)现象的认识也在深化.下面对这一认识过程的某些方面作一简短回顾.

## 0.1 断裂的晶体学分类 —— 解理断裂与滑移断裂

人类不满足于对断裂现象的粗浅的认识,力图从更深的层次去揭示这一现象的本质,其中之一是从晶体学的层次去认识.当然这主要是针对固体材料中最简单的一种材料——金属进行讨论的,因为并不是任何材料都是结晶体.

纯金属是一种结晶体.完整晶体是由原子(或离子、分子)规则排列形成的,如图1(a)所示.

金属在一定条件下,例如,在低温条件下,当应力达到一定的数值时,便以极快的速度沿一定的结晶学平面发生断裂,断裂面平滑而光亮,这种断裂称为解理断

裂, 这个一定的结晶学平面称为解理面. 同一种金属在不同的条件下, 沿不同的晶面形成解理面. 解理断裂是典型的脆性断裂. 脆性金属材料多半以这种形式断裂. 解理断裂一般在没有显著塑性变形下发生, 但也可以在发生相当大的塑性变形下出现<sup>①</sup>.

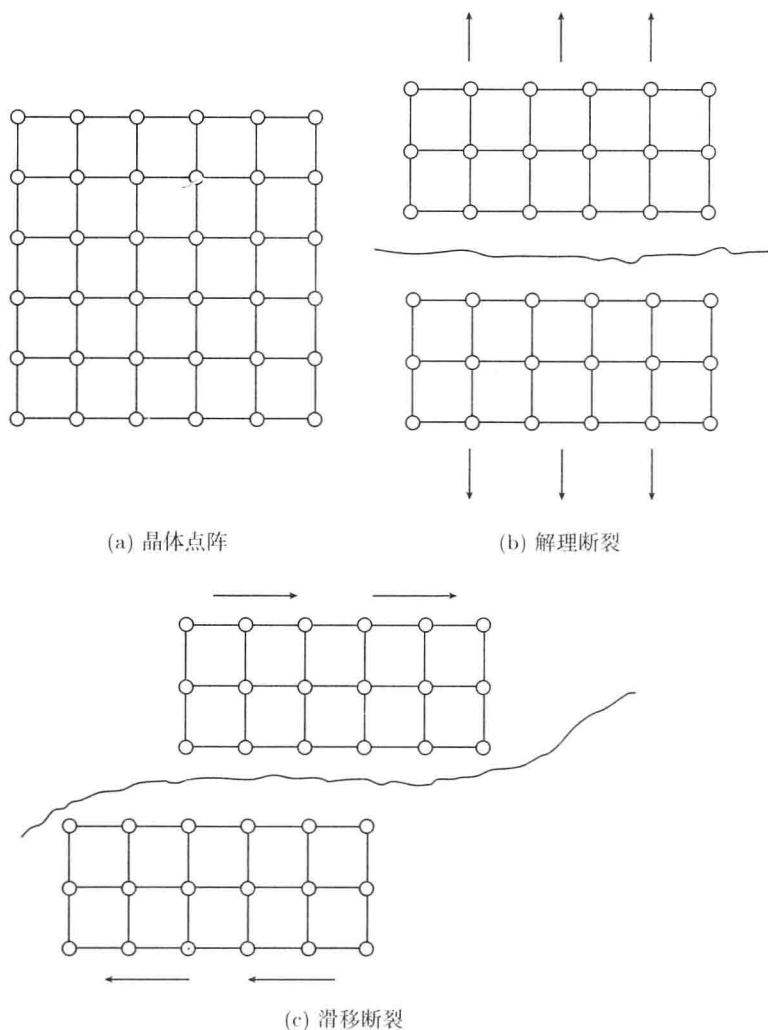


图 1 固体断裂机理的晶体学层次分析示意图

有些金属, 例如 Te, Bi, Sb 等在常温下也会发生解理断裂.

在低温下, 那些在单晶体状态下发生解理断裂的金属, 在多晶体状态下也会发生解理断裂. 甚至有些合金, 例如, 低碳钢 (铁-碳合金) 也会发生解理断裂, 解理面

<sup>①</sup> 张兴铃等. 金属与合金的力学性质. 北京: 中国工业出版社, 1961.

沿着铁素体的  $[100]$  平面, 并且有光亮的断口. 自然, 多晶体的解理断裂比单晶体的要复杂, 至于合金则更复杂.

解理断裂通常是由于垂直于解理面的正应力的作用破坏了晶体原子间的结合力而引起的, 如图 1(b) 所示.

金属在另外一些条件下, 由于受剪应力的作用破坏了晶体原子间的结合力而引起断裂, 称为滑移断裂. 因为断裂之前, 晶格发生显著的滑移, 断口是灰暗的, 鹅毛状的和纤维状形貌, 断裂面与拉伸轴成一定的倾斜角. 这种断裂机理示意图如图 1(c) 所示.

滑移断裂发生前, 材料经历了显著的塑性变形.

塑性较好的金属 (Cu, Al 等) 多晶体与合金 (低碳钢等) 其断裂机制可以用滑移断裂去解释.

从更深层次上去定量分析这些断裂机制将在第 13 章中讨论.

## 0.2 断裂的工程学分类 —— 脆性断裂与韧性断裂

固体力学以工程材料或结构材料为主要研究对象, 它以完整试样的拉伸试验把材料分成脆性与韧性两大类. 这种分类很简单, 以延伸率  $\delta < 5\%$  或  $> 5\%$  作为划分的标准. 例如, 灰口铸铁和玻璃钢等, 由于其  $\delta < 5\%$  被划定为脆性材料, 它的典型的拉伸曲线和试样断口由图 2 给出, 而低碳钢由于其  $\delta > 5\%$  而被划定为韧性材料 (它的典型的拉伸曲线和断口由图 3、图 4 给出). 由图 4 可见, 许多韧性材料并不存在明显的屈服极限, 工程上则以  $\sigma_{0.2}$  作为名义屈服极限, 由图 5 所示. 但在三轴拉伸下  $\sigma_Y = 2^{3/4} \sigma_s$ .

脆性断裂与韧性断裂同解理断裂与滑移断裂有某种联系, 但不存在简单的关系. 例如, 张兴铃教授 (1961) 的著作第 121 页指出的单晶体锌, 在  $-185^\circ\text{C}$  下进行拉伸试验, 可以在应变  $\varepsilon = 2$  后发生解理断裂, 而按照工程分类, 这应该属于韧性断裂. 这表明晶体学上的断裂机制同工程学上的断裂分类并不存在简单的关系. 尤其, 工程材料未必是晶体, 晶体所特有的性质, 在一般工程材料中未必都具有. 所以如果提什么宏观模式与微观机制或者它们之间有什么联系必须要谨慎. “微观”一词在物理上有很严格的规定, 如果不加区分地使用这一名词, 会带来许多混淆. 为了明确起见, 一些专家建议, 最好说明在什么层次上和多大尺度上进行讨论, 进而去寻找不同层次间的关联和不同尺度间的关联.

## 0.3 影响材料脆性与韧性的因素

上面把材料划分成脆性与韧性的试验是在室温和缓慢加载下进行的, 这表明材料的脆性与韧性不是无条件的、绝对的.

刻画材料脆性或韧性的力学性能参数  $\alpha_k$  是由带切口的试样 (称为 Charpy 试

样) 在冲击加载下, 以试样冲断时所需的能量  $W_{\text{impact}}$  除试样切口所在截面的面积  $A$  去计算, 即

$$\alpha_k = \frac{W_{\text{impact}}}{A} \quad (1)$$

数值 (1) 称为材料的冲击韧性. 冲击加载由一落重施加到试样上, 加载速率限制在  $\text{m/s}$  量级 (即不能太高).

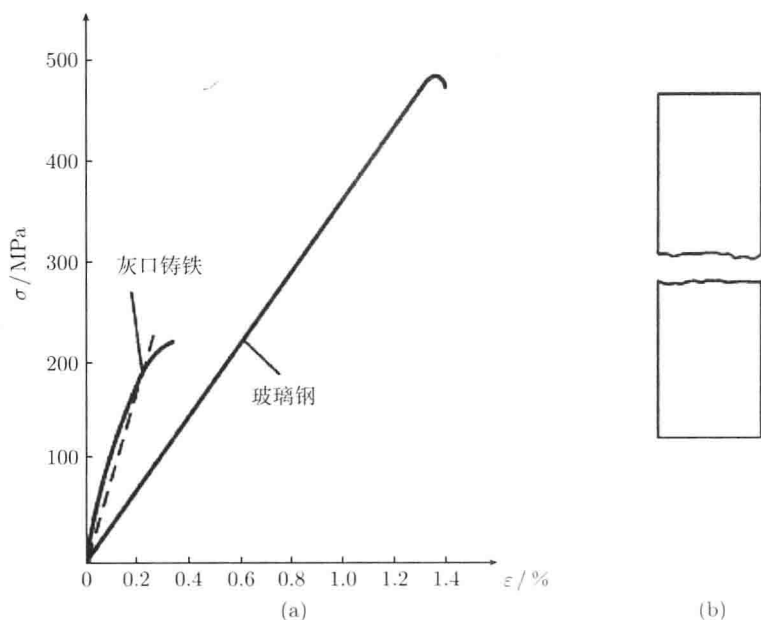


图 2 典型脆性材料的拉伸曲线与试样断口

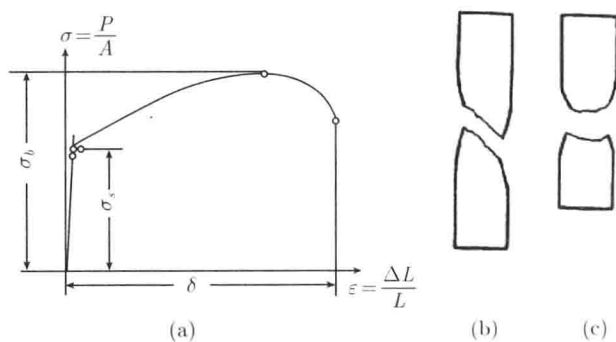


图 3 低碳钢的拉伸曲线与试样断口

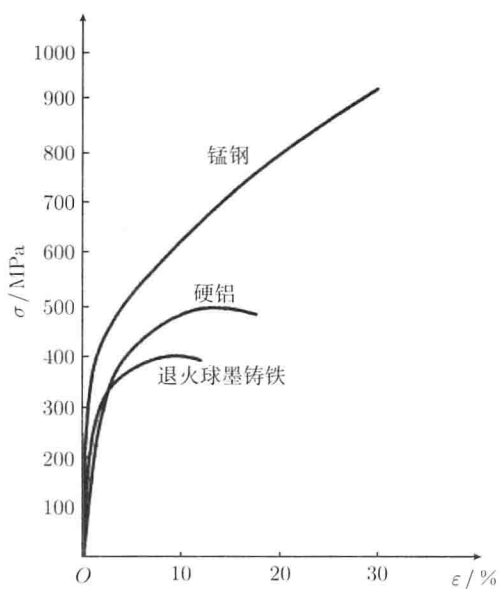
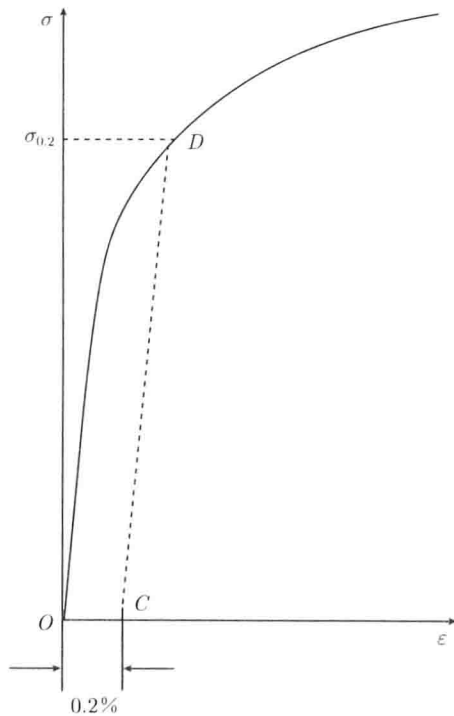


图 4 其他典型韧性材料的拉伸曲线

图 5 名义屈服极限  $\sigma_{0.2}$