



华夏英才基金学术文库

断裂理论基础

范天佑 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍了裂纹应力分析,线性断裂力学,非线性断裂力学,断裂动力学,数值方法,非奇异断裂理论探索,新材料断裂理论和材料分离机制的多层次、跨尺度研究,三维问题以及某些应用实例等.并对断裂理论及其数学方法作了系统阐述.

本书可供力学专业及相关专业高年级学生、研究生、大学教师、科研人员以及有关工程技术人员阅读.

图书在版编目(CIP)数据

断裂理论基础/范天佑著.—北京:科学出版社,2003

(华夏英才基金学术文库)

ISBN 7-03-010994-5

I. 断… II. 范… III. 断裂-理论 IV. O346.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 096648 号

责任编辑:毕 颖/责任校对:包志虹

责任印制:钱玉芬/封面设计:黄华斌 陈 敬

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>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003年5月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2006年1月第二次印刷 印张:33 1/4

印数:2 001—3 000 字数:633 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

著者编写的《断裂力学基础》于 1978 年由江苏科学技术出版社出版. 应读者的要求, 著者将《断裂力学基础》进行适当修改与补充, 以《断裂理论基础》题名出版.

这次将原版本改写之前做了两件事. 第一件是广泛征求读者的意见. 大部分读者希望保持与加强原版本推导详尽的特点, 增加附录的内容, 同时尽可能多地增加有关图表, 以便在了解数学计算的同时有助于了解其物理意义. 第二件事是调研. 1992 年北京大学庆祝力学专业创建 40 周年, 会后有的老师建议著者写一篇纪念董铁宝教授的短文, 为此不得不进行一点调研. 虽然当时调研很仓促、很不全面, 但使人兴奋地认识到我国老一辈科学家对断裂理论早有研究.

我国老一辈科学家是极其卓越的, 他们不仅在各自的领域为祖国、为人类作出了重大贡献, 其中有些老科学家在断裂研究方面很有建树. 从现在查到的资料看, 地质学家李四光教授是我国最早研究断裂理论的科学家, 在他 1943 年出版的名著《地质力学原理及方法》一书中, 引用了 A. A. Griffith 1920 年与 1924 年两篇经典性论文, 并且用于探索地质力学问题, 直至他去世前所著《论地震》一书, 仍在探求岩石与地壳构造断裂判据问题. 冶金学家李薰教授在金属材料氢脆和氢脆断裂方面有许多研究并且作出贡献. 物理学家刘淑仪教授在上世纪 50 年代初在断裂理论方面发表许多研究成果. 材料科学家张兴铃教授 1956 年回国前, 在美国 MIT 与 Grant 教授合作, 对金属与合金的高温蠕变断裂作出重要贡献, 他们的研究成果被国际学术界称为张-Grant 模型. 张兴铃教授回国后于 1961 年出版《金属与合金的力学性质》, 该书是我国第一本材料力学性能的著作, 其中介绍了固体断裂理论与实验的许多成果, 这是我国最系统、最全面讨论金属与合金断裂及其影响因素的最早的著作, 其中阐明的思想同今天新发展的主导思想都很一致, 因而这一著作在我国断裂科学发展史上具有重要地位. 1960 年由中国科学院金属研究所、物理研究所和吉林大学等单位共同主办的全国性晶体缺陷与金属强度的学术研讨会, 会议文集《晶体缺陷与金属强度》1962 年出版, 其中有些内容也涉及断裂问题. 以上情况是见诸文字记载的. 另外一些虽无文字记载, 却也十分重要, 这里作一点记述. 例如葛庭燧教授、钱临照教授等分别在金属研究所和物理研究所培养固体强度和缺陷(涉及断裂)的研究人才, 张兴铃教授在原北京钢铁学院培养蠕变断裂的研究人才, 董铁宝教授在北京大学组织讨论班和培养位错连续统理论、疲劳和断裂等领域的学生, 他们都对我国的断裂理论与应用的发展作出了重要贡献.

现在大家比较一致的认识是, 现代断裂理论大约是在 1948—1957 年间形成,

它是在当时生产实践问题的强烈推动下,在经典 Griffith 理论的基础上发展起来的.上世纪 60 年代是其大发展时期.从 1965 年下半年开始国内出现特殊的形势,上面提到的我国老一辈学者开创的断裂学科的较好势头也就丧失了,因而同国外的差距进一步拉大.在 20 世纪 70 年代初,受我国航空工业部门的委托,冶金部钢铁研究总院物理研究室陈箴同志领导的小组从材料断裂韧性测试开始,在十分困难的条件下,率先在我国开展了断裂力学的工作.显然,我国断裂力学工作起步至少比国外大约晚了 20 多年.1972 年,在敬爱的周恩来总理关怀下,包括力学在内的自然科学各基础学科举行了赶超世界先进水平的规划座谈会.当时力学学科的规划座谈会的预备会的纪要就引用了恩格斯的一句名言:“一个民族要想站在世界的高峰,就一刻也不能停止理论思维.”同时指出断裂力学是一门新学科,在理论上和实践上具有重要意义,建议尽快在我国开展该领域的工作.在冶金部钢铁研究总院物理研究室陈箴同志等工作和力学学科规划座谈会预备会纪要的激励下,尤其是众多实际问题需要的推动下,我国一些单位和科技工作者逐步开展了断裂力学的研究和应用工作.著者当时是作为一名业余爱好者参加到这项工作中去的.著者在当学生时,受到董铁宝教授的指导,读过一点经典断裂理论的文献,当时也得到王仁教授、张兴铃教授和钱临照教授的指教.在经过将近 10 年中断并重新回到教学工作岗位时,获悉经典断裂理论已经发展成断裂力学这门新学科时,很振奋,但深感已经落后得太远了.《断裂力学基础》是著者学习断裂力学笔记整理出来的.当时著者对断裂力学的认识还很初步.该书出版至今已经超过了 20 年,探索断裂现象规律的工作已从力学扩充到更广泛和深入的领域.考虑到这些情况的变化,需要对该书加以改写.

本书把《断裂力学基础》中的第一章大大压缩之后收入为附录一.原书的第二到第六章中的大部分内容经过改写而保留下来,成为现在的第一、二、三、四及第六章,第七章经删减和补充之后形成现在的第十章,讨论若干应用问题.根据读者和同行的建议,第一章专门讨论二维裂纹问题解析解研究.从某种意义上讲,它是后面讨论的一个引论和基础,重点介绍原苏联 Мухелишвили 学派所发展的复变函数论方法以及由该方法所得到的结果.三维裂纹问题的分析解放在现在的第三章,同原书第五章内容一致并且有所增补.它们同曲线坐标、积分变换与积分方程关系密切.这些成就由英国力学与应用数学的 Sneddon 学派所开创.现在的第二章较全面地讨论了线性弹性断裂力学,并且以一定篇幅介绍了德国 Neuber 与原苏联 Савин 的应力集中学派的成就.以上三个学派是在断裂力学出现之前形成的,他们以自己独特的研究方式与风格所作出的原创性贡献为断裂力学的诞生作出准备. Irwin 作为现代断裂力学的创始人,其学说无疑是在 Griffith 经典断裂理论基础上发展起来的,但是若没有以上三个学派以及美国的 Westergaard 等学者的工作基础,以应力强度因子为最重要的物理量的线性弹性断裂力学是难以在 20 世纪 60

年代的短短时间内得到那么迅猛的发展的. 在这个发展过程中, 以美籍华裔学者薛昌明及 Paris, Erdogan 等教授为代表的小组(美国 Lehigh 大学)曾起过重要的促进作用. 他们把以上三个学派创立的方法加以发展, 由原有的裂纹解和新发现的裂纹解得到数量众多的应力强度因子. 美国的材料与试验协会 (ASTM) 在断裂韧性 K_{Ic} 的测试方面起了中心的作用, 使这一工作系统化、规范化. 由于有了 K_I (K_{II} , K_{III}) 的大量数据, 以及材料常数 K_{Ic} 的大量数据, 线性断裂力学才有基础, 才有可能用到生产实际中去. 美国的 Rice, Hutchinson 与前苏联的 Черепанов 等对材料非线性效应的研究, 进一步促进了断裂力学的发展. 国内近年出版了多种实验断裂力学与断裂力学工程应用的著作, 尤其是由原兵器工业部第 52 研究所组织和实施的对国产多种金属与合金 K_{Ic} 的 10 多年系统的测定, 测定结果也已用手册形式公布^①, 上述工作对断裂力学在我国生产实践中的应用起到重要推动作用. 原航空工业部所属研究所与院校所编《飞机结构损伤容限设计指南》是国内断裂力学实际应用的另一成功范例^②.

非线性断裂力学与动态断裂力学发展相对地比较晚一些, 而且远远不如线性弹性静态断裂力学成熟. 本书在第四章与第五章中对它们作了概要介绍, 包括对其中出现的矛盾以及认识上的反复. 国内也已出版了这些方面的著作, 本书不去较多地涉及有关内容.

现在的第六章对原书中的数值方法作了一些补充, 而三维边界积分方程-边界元方法的若干结果在第三章中介绍.

本书的第五章以及第七至第九章是原书中所没有的内容, 在其他断裂理论的著作中也很少涉及这些内容, 它们是探索性的, 有的已经超出了普通断裂力学的理论体系的框架. 正因为如此, 只得把书名改更为《断裂理论基础》. 当然写作这些探索性的内容, 主要目的在于提出问题.

附录也作了一些调整与补充, 少数内容与正文部分有点重复.

上面已提到, 本书不可能也没有必要涉及断裂理论的方方面面, 相反, 它讨论的只是最基础而且是著者比较熟悉的那部分内容. 其他的领域, 不少中国学者在那些方面很有建树, 也很有意义, 但由于著者不熟悉, 或者在其他著作中已经详细讨论过了, 这里均未涉及, 但在正文与附录中作了简短的介绍. 读者不难见到, 为了介绍他人的一个成果, 附录中必须给出补充推导. 由于能力和篇幅的原因, 这种介绍受到相当大的局限, 这一点会得到同行的谅解.

著者感谢北京大学董铁宝教授、王仁院士和中国科学院物理所钱临照院士在

① 第 52 研究所等, 常用金属材料断裂韧性测试, 兵器工业出版社, 北京(1996).

② 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出版, 北京(1985).

著者当学生时的指引,感谢原北京钢铁学院、现国防科工委九院张兴钤院士的指引和鼓励,本书引用了他早期著作中的观点,并采用了他著作中的若干图表.著者重新开始断裂问题研究之后,得到冶金部钢铁研究总院陈篪老师的指教与帮助,也得到蔡其巩院士等老师与同志的帮助与鼓励.本书第九章第五节(即裂纹发射位错和无位错区)的写作得到东北大学赖祖涵教授的亲自指教和具体帮助.钢铁研究总院潘灏教授校对了第四章与第七章,并且提出了宝贵意见.这些年来著者之所以能坚持在断裂问题方面做点工作,同原北京工业学院的领导苏谦益和陈信同志的关怀与支持是分不开的,在当时困难的条件下,这些关怀与支持给了著者以巨大的帮助.对本书原版工作给予帮助的还有中国科学院张跃科教授、北京农业大学黄文彬教授和我校数学系臧尔彬、刘颖等教授.对以上领导、老师和同志们的大力支持、指导和帮助表示衷心的感谢.

从1987年起至今,著者共得到国家自然科学基金七次资助和国家教委博士点基金的资助,同时也得到德国洪堡基金会(Alexander von Humboldt Stiftung)的多次资助.上述资助使著者的研究工作有所开拓,对断裂现象的规律的认识较当初有所深入,对新版本的写作有很大帮助.由于洪堡基金会的资助,著者才能学习德文,因而能阅读一些德文文献,例如H. Neuber与H. G. Hahn的著作.H. G. Hahn的Bruch Mechanik的写作方式对本书新版本的改写就很有启发,本书还采用了他这本书以及另一本书Elastizitätstheorie中的许多附图.

本书由王仁院士以及冶金部钢铁研究总院和清华大学王崇愚院士推荐而得到华夏英才出版基金的资助,著者表示衷心的感谢.对华夏英才出版基金的支持也表示衷心的感谢.

对曾在和正在我组学习与工作的李庆、申大维、孙竹风、郭瑞平、刘官厅和周旺民等同志在本书的准备中所给予的帮助与所付出的辛劳表示感谢.

尽管本书书稿已准备了较长时间,但工作时断时续,加上水平有限,书中缺点与错误在所难免,欢迎大家批评指正.

著 者

2002.2.8

目 录

前言

绪论	(1)
1. 断裂的晶体学分类——解理断裂与滑移断裂	(1)
2. 断裂的工程学分类——脆性断裂与韧性断裂	(3)
3. 影响材料脆性与韧性的因素	(4)
4. 裂纹的成核与扩展	(9)
5. Inglis 解与 Griffith 理论	(11)
6. Orowan 与 Irwin 对 Griffith 理论的解释与发展	(14)
7. 低应力脆性破坏与线性弹性断裂力学	(16)
8. 对裂纹顶端较大范围塑性变形的处理——非线性断裂力学	(18)
9. 对惯性效应的处理——断裂动力学	(18)
10. 断裂力学的应用	(19)
第一章 二维裂纹的应力分析基础	(20)
第一节 受拉伸或内压的平面孔洞或裂纹问题	(20)
第二节 平面孔洞或裂纹的面内剪切	(39)
第三节 反平面或纵向剪切的孔洞或裂纹	(41)
第四节 复势法的某些发展	(44)
第五节 基于 Westergaard 方法的裂纹解	(48)
第六节 无限平面中的多条裂纹问题的解	(51)
第七节 裂纹面的位移	(57)
第八节 平面裂纹解的一般结构——Williams 特征展开	(59)
第九节 二维裂纹问题的积分变换解	(63)
第二章 线性弹性断裂力学	(73)
第一节 断裂模式和裂纹的渐近应力与位移场	(73)
第二节 应力强度因子和断裂判据	(77)
第三节 应力强度因子——定义与实例	(80)
第四节 有限尺寸裂纹体的应力强度因子	(88)
第五节 确定应力强度因子的其他方法	(90)

第六节	进一步讨论 K 判据	(100)
第七节	能量释放率, G 判据	(102)
第八节	裂纹顶端的塑性区和小范围屈服修正	(105)
第九节	平面应力裂纹扩展阻力曲线法	(111)
第三章	三维裂纹问题和线性弹性断裂力学的应用	(113)
第一节	轴对称三维问题弹性静力学基本方程组	(114)
第二节	Hankel 积分变换	(116)
第三节	用 Hankel 变换求解轴对称问题	(120)
第四节	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 ..	(123)
第五节	非轴对称问题, Muki 解法	(134)
第六节	带圆盘状裂纹的物体在剪切作用下的解, K_{II}, K_{III} 的计算	(138)
第七节	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	(147)
第八节	带圆盘状裂纹的物体受扭转作用下的解, K_{III} 的计算	(154)
第九节	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	(158)
第十节	三维问题的一般解, Boussinesq-Папкович-Neuber 方法	(168)
第十一节	受均匀拉伸的椭圆盘状裂纹问题, Green-Sneddon 解	(170)
第十二节	半椭圆表面裂纹问题	(177)
第十三节	有限尺寸物体中的三维裂纹问题	(181)
第十四节	线性弹性断裂力学应用简介	(186)
第四章	非线性断裂力学——材料非线性效应的处理	(189)
第一节	裂纹顶端张开位移	(190)
第二节	Dugdale 模型	(191)
第三节	大范围 and 全面屈服情形——半经验公式	(197)
第四节	J 积分的定义和路径守恒性	(198)
第五节	线性弹性材料 J 与 G 和 K 的关系	(200)
第六节	J 与裂纹试样变形能之间的关系的讨论	(203)
第七节	全量塑性理论的裂纹顶端应力分析的渐近解——HRR 解	(205)
第八节	J 积分与裂纹顶端应力场和应变场的奇异性	(213)
第九节	HRR 场的解析解研究	(218)
第十节	J 积分与张开位移的关系	(225)
第十一节	平面应力裂纹缓慢扩展	(226)
第十二节	结论与讨论	(233)

第五章 断裂动力学——惯性效应的处理	(235)
第一节 动态效应.....	(235)
第二节 裂纹的动态起始扩展.....	(239)
第三节 裂纹与弹性波的相互作用.....	(250)
第四节 裂纹的快速传播.....	(253)
第五节 动态断裂判据与止裂.....	(263)
第六节 三维动态断裂研究.....	(266)
第六章 数值方法及其应用	(272)
第一节 边界配置法和常用试样的应力强度因子.....	(272)
第二节 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	(288)
第三节 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	(295)
第四节 弹性与断裂动力学中的边界积分方程-边界元方法	(304)
第五节 结论与讨论.....	(311)
第七章 非奇异断裂理论探索	(312)
第一节 一点说明.....	(313)
第二节 奇异性断裂力学评价.....	(313)
第三节 真实裂纹模型的求解探讨.....	(316)
第四节 可能的裂纹扩展判据.....	(319)
第五节 结论与讨论.....	(320)
第八章 新材料断裂理论	(321)
第一节 晶体与准晶体.....	(322)
第二节 准晶弹性理论框架.....	(324)
第三节 准晶的二维裂纹问题.....	(326)
第四节 准晶的三维裂纹问题.....	(330)
第五节 准晶裂纹动力学问题.....	(335)
第六节 准晶线性弹性断裂理论.....	(337)
第七节 多胞材料及其性质.....	(337)
第八节 多胞材料的连续本构模型.....	(340)
第九节 多胞材料的裂纹解——基于内聚力模型.....	(343)
第十节 多胞材料平面应力裂纹扩展问题.....	(347)
第十一节 结论与讨论.....	(351)
第九章 材料分离机制的多层次、多尺度研究	(352)
第一节 晶体原子间相互作用力.....	(352)

第二节	解理断裂的半定量分析——理想晶体的强度	(355)
第三节	离子晶体断裂的半定量近似分析	(358)
第四节	体心立方铁(bcc-Fe) I 型裂纹的分子动力学模拟	(360)
第五节	裂纹与位错的相互作用	(366)
第六节	微裂纹演化成一条主裂纹的非平衡统计力学分析	(371)
第七节	基于一维链模型的键断裂的量子力学分析	(372)
第八节	结论与讨论	(375)
第十章	断裂理论的应用实例详细讨论	(376)
第一节	工程中结构断裂强度分析的主要步骤	(376)
第二节	电站大型锻件的断裂分析	(377)
第三节	铣床主轴断裂分析	(381)
第四节	长江葛洲坝 2 号船闸人字门拉杆断裂分析	(387)
第五节	唐山大地震的主震与强余震破裂形态的断裂力学分析	(392)
第六节	断层不稳定性以及低应力降现象的断裂理论分析	(395)
第七节	结论与讨论	(400)
附录一	弹性理论与塑性理论基本关系	(401)
A1.1	弹性体变形	(401)
A1.2	弹性体的应力分析	(402)
A1.3	曲线坐标系	(403)
A1.4	应变与应力张量的坐标变换	(403)
A1.5	应力与应变之间的关系	(404)
A1.6	弹性力学问题求解途径	(405)
A1.7	全量塑性力学本构关系	(406)
A1.8	增量塑性本构关系	(408)
A1.9	固体变形的几种特殊情形	(409)
A1.10	弹性动力学与波动	(411)
附录二	函数论方法及其在二维弹性与裂纹问题中的应用及补充推导	(413)
A2.1	复变函数基本公式	(413)
A2.2	平面问题的函数论方法基础	(417)
A2.3	化边值问题为函数方程	(427)
A2.4	无限大平面中的孔洞与裂纹的解	(435)
A2.5	无限平面中构型稍复杂的裂纹	(443)
A2.6	反平面裂纹问题	(448)
A2.7	有限尺寸裂纹体和超越函数保角映射	(448)
A2.8	化裂纹问题为 Riemann-Hilbert 问题	(452)

A2.9	动态裂纹问题的函数论方法	(457)
A2.10	准晶裂纹问题的函数论方法	(459)
附录三	解的积分表示与相关的积分方程及补充推导	(463)
A3.1	Fourier 变换及其应用	(463)
A3.2	Laplace 变换及其应用	(469)
A3.3	Mellin 变换及其卷积	(473)
A3.4	Hankel 变换及其应用	(474)
A3.5	Abel 积分方程	(477)
A3.6	对偶积分方程——Titchmarsh 方法	(478)
A3.7	对偶积分方程——Copson 解法	(486)
A3.8	Wiener-Hopf 方法及其在求解一类对偶积分方程中的应用	(488)
A3.9	联立对偶积分方程组及其应用	(493)
A3.10	半平面中边界裂纹解的补充推导	(500)
A3.11	第二类 Fredholm 积分方程的数值解	(503)
附录四	有关特殊函数的初步资料以及对正文的某些补充计算	(505)
A4.1	Bessel 函数	(505)
A4.2	修正 Bessel 函数	(509)
A4.3	Γ -函数	(510)
A4.4	超几何级数	(511)
A4.5	椭圆积分与椭圆函数	(511)
A4.6	椭圆盘状裂纹问题的补充计算	(514)

绪 论

一个固体在外力作用下断成两半或更多块,这是日常生活、工程与自然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.

从固体力学的角度去分析这一现象仍然是一个基本的工作.固体力学的任务之一在于为工程材料与结构的失效分析提供理论与判据.它回答材料或结构在什么部位、在多大的外力下会发生断裂,同疲劳理论相结合,还可以估计在什么时候会发生断裂.在断裂力学诞生之前,由于经验的积累和固体力学工作者的努力,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) σ_s ,断裂极限(又称为断裂强度) σ_b ,延伸率 δ 和冲击韧性 α_k .有时还需要截面收缩率 ψ .在这4个参数中, σ_s 与 σ_b 为强度指标, δ 与 α_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 σ_s , σ_b , δ 与 ψ 的获取由光滑试样去测定.

随着生产的发展和科学的进步,人类对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.

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.当然这主要是针对一类比较简单的材料——金属进行讨论的.

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,见图1(a).

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劈断裂,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

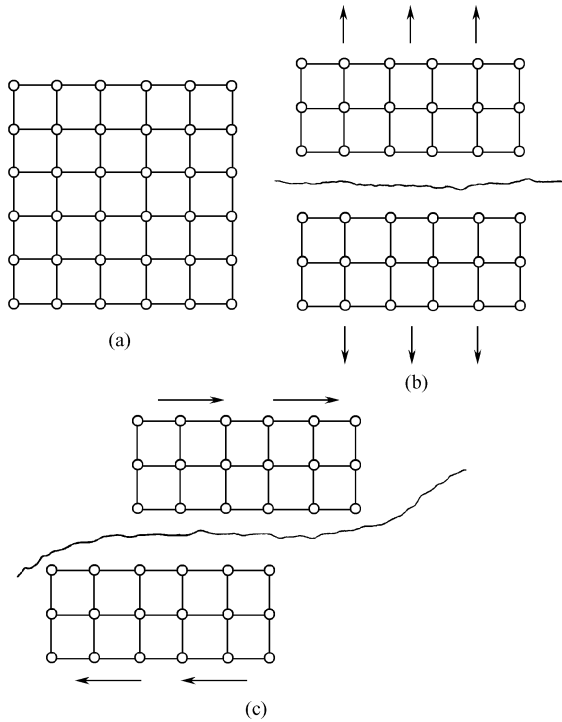


图 1 固体断裂机理的晶体学层次分析示意图
(a)晶体点阵;(b)解理断裂;(c)滑移断裂

出现^①。

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,见图 1(b)。

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见图 1(c)。

① 张兴铃等,金属与合金的力学性质,中国工业出版社,北京(1961)。

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九章中讨论。

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,它以光滑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,见图 5 所示.但在三轴拉伸下 $\sigma_Y = 2^{3/4} \sigma_s$.

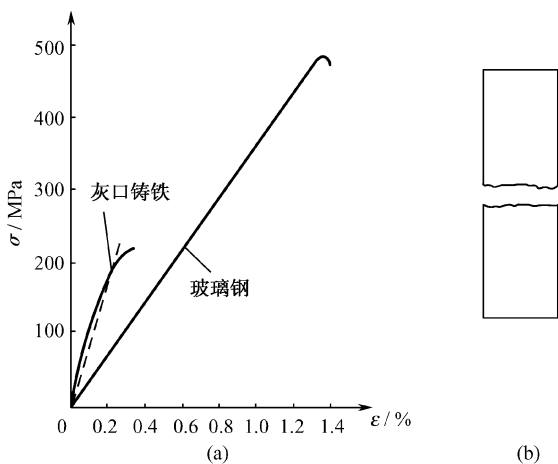


图 2 典型脆性材料的拉伸曲线与试样断口

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.例如上页脚注①所列著作第 121 页指出的单晶体锌,在 -185°C 下进行拉伸试验,可以在应变 $\epsilon = 2$ 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

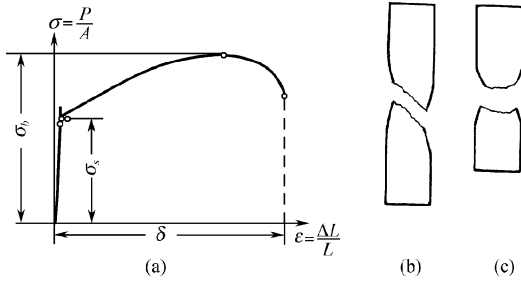


图 3 低碳钢的拉伸曲线与试样断口

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。

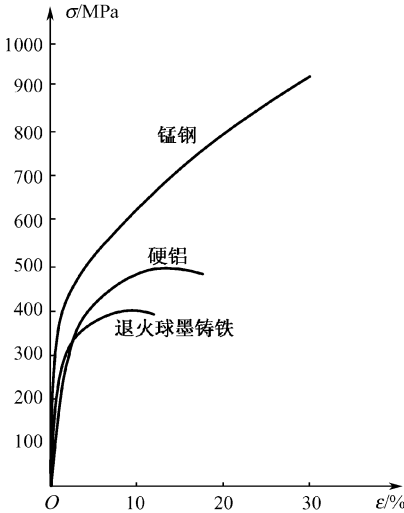


图 4 其他典型韧性材料的拉伸曲线

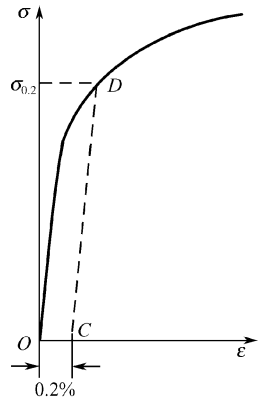


图 5 名义屈服极限 $\sigma_{0.2}$

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 α_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_{impact} 除试样切口所在截面的面积 A 去计算,即

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

此数值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 m/s 量级(即不能太高).

脆性材料 α_k 值小, 韧性材料 α_k 值大. 然而 α_k 值是温度敏感的. 过去一些教科书上绘制的 $\alpha_k - T$ 曲线, 往往给人一个假象, 似乎存在一个温度 T_c , 当 $T = T_c$ 时, α_k 有一突变, 这样 $\alpha_k(T_c)$ 将是一个常数, 而 T_c 称为转变温度(韧性-脆性转变温度), 简称为冷脆转变温度. 其实许多典型的工程材料, 实验测得 $\alpha_k - T$ 曲线是连续变化的.

虽然 T_c 的确定存在困难, α_k 随温度发生明显变化的事实表明, 材料的脆性与韧性不仅同材质有关, 也同工作条件有关.

下面对影响材料的脆性与韧性的内因与外因作一些定性讨论.

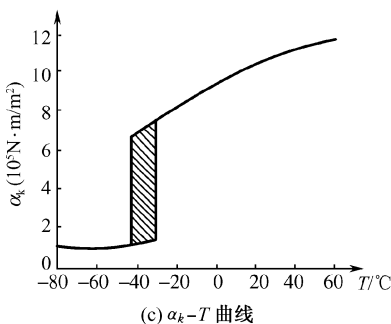
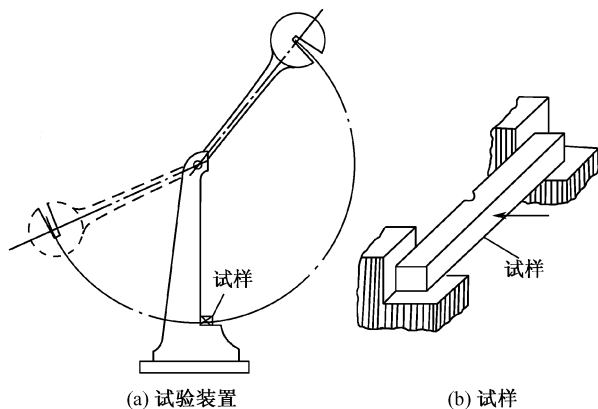


图6 测定 α_k 值的试验装置及 $\alpha_k - T$ 曲线

A. 材料的微结构

内因决定事物的本质,外因是事物变化的条件.材料的微结构是材料的一种内在的因素,对材质有重要意义,因而是影响脆性与韧性的一个重要因素.例如 Zn, Mg 与其他六方密排结构的金属,在室温下有 3 个滑移系.在单晶体状态下,其应变硬化率(即材料应力-应变曲线的斜率)小,有利于变形过程,它们呈现良好的塑性.相反,在多晶体状态,它们具有较少的滑移系,因而难于变形.变形过程受到抑制,材料呈现明显的脆性.体心立方结构的金属 Fe, Cr, W 与 Mo 等也呈现为脆性,这将在第九章再作一些解释.

刚才所说结构对材料脆性与韧性的影响,是从晶体的晶格结构层次上分析的.更进一步还可以从原子结构层次去讨论.

原子是由原子核与外层电子组成的.按量子力学分析,外层电子的分布有 s, p, d, f 等状态(又简称壳层).Cr 是一种体心立方金属,上面已经提到它呈脆性,有的学者认为这种脆性与它的 3d 状态和 4s 状态的电子分布有关.用量子力学对材料力学性能进行分析的尝试将在第九章作初步介绍.

B. 晶粒大小

晶粒大小对材料力学性能有重要影响.研究表明,随着晶粒的细化,材料的强度与韧性两者都得到改善.晶粒细化的一个明显的效果是,材料的冷脆转变温度降低,因而材料的韧性提高.

晶粒细化提高材料韧性的事实可以解释为:在细晶粒材料中,缺陷(例如裂纹)的尺寸较小,因而断裂所需的应力较高(裂纹及其效应将在随后讨论).

C. 结构成分

材料的结构成分对其脆性与韧性的影响呈现十分复杂的现象,必须针对不同的情形分析其影响.例如钢中碳的含量和合金元素的含量对其韧-脆转变温度值的影响就很不一样.图 7 与图 8 给出了碳和合金元素含量对钢的冷脆转变温度影响的若干结果.

D. 应力状态

上述因素 A, B, C 为内因,内因还有很多种,这里不再一一列举.现在讨论外因.

应力状态对材料的力学性能(包括脆性与韧性)具有重大影响.与单轴和双轴拉伸不同,三轴拉伸应力状态能使材料变脆.众多实验表明,韧性材料在三轴拉伸呈现脆性破坏.相反,脆性材料在三轴压缩下呈现屈服后断裂.此问题将在第二章

中进一步讨论.

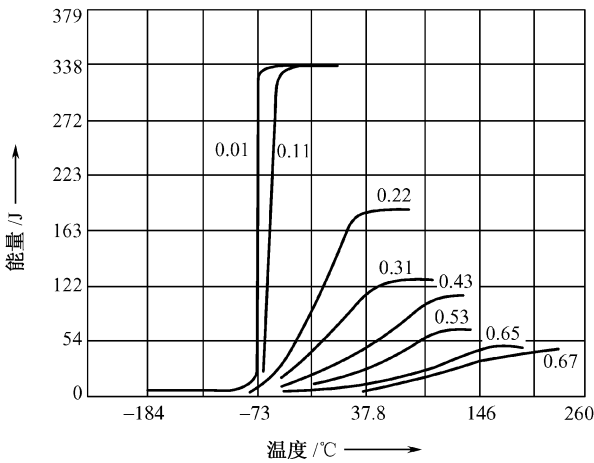


图7 碳的含量对钢的冷脆转变温度的影响^①

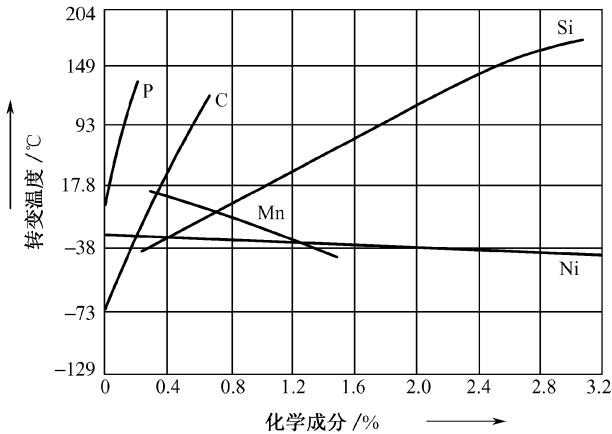


图8 合金元素含量对钢的冷脆转变温度的影响^①

E. 温度

较高的温度有利于晶体中位错的运动,因而有利于变形过程.温度的升高将使脆性材料变韧,增大其塑性,而温度降低将使材料变脆.前面的讨论已经从一个方面阐明了这一性质.

^① 张兴铃等,金属与合金的力学性质,中国工业出版社,北京(1961).

F. 试样与结构的尺寸

尺寸效应对材料的脆性与韧性是很重要的。

具有厚的横截面的试样(通常处于平面应变状态)往往使材料变脆,具有薄的横截面的试样(通常处于平面应力状态)趋向使材料变韧.尺寸效应同应力状态效应有联系,这一点将在第二、三、四章中详细讨论。

G. 加载速率

外力加到物体上,实际上有一个过程.这一过程往往是复杂的.为了简单起见,通常用加载速率这一参量去刻画这一过程的特点.通俗地讲,加载速率就是外力对时间的变化率.它对材料的脆性与韧性的影响是显著而复杂的.当加载速率从零增大到某一定值时,材料的韧性单调下降到其最小值,这表示材料变脆了.但是,当加载速率进一步上升时,韧性也上升。

另外,循环加载是一种常见的加载方式,许多材料在这种加载下都变脆。

有关加载速率的效应的进一步讨论将在本章的第 10 节和本书第五章中给出。

H. 机械处理和热处理

各种机械处理与热处理对材料的脆-韧转变产生重大影响.这些内容是“材料力学性能”这门学科的重要部分,为材料科学与工程专业的工作者所熟悉.相反,力

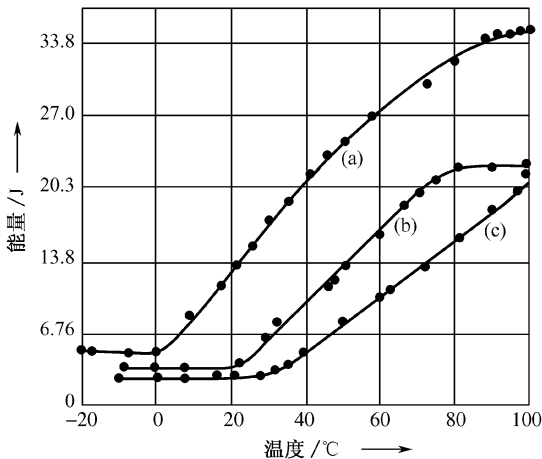


图 9 预变形和应变时效对 0.11% C 钢冷脆转变温度的影响
(a) 退火状态; (b) 经 10.0% 预应变; (c) 经 10% 预应变
后在 150 °C 时效^①

① 张兴铃等,金属与合金的力学性质,中国工业出版社,北京(1961)。

学专业的读者对这些知识不熟悉.这里仅用图 9 对预变形和应变时效处理对冷脆转变温度的影响作一介绍.详细讨论有关问题,建议力学专业的工作者去仔细研究材料力学性能的书藉.

I. 环境

众所周知,工作环境能改变材料的强度与韧性.例如当材料在水和其他具有腐蚀性的介质中,作为应力腐蚀的结果,其强度与韧性将降低.又例如,金属材料的表面从工作介质中吸收了氢,降低金属的强度从而将加速它的断裂.

J. 宏观缺陷

上面列举的事实表明,不仅脆性材料(玻璃,陶瓷,石材,铸铁等)会发生脆性破坏,甚至标准的韧性材料也会发生脆性破坏.除了上述因素外,裂纹或类裂纹缺陷也强烈地影响材料的力学性能.这种缺陷尺寸一般在 0.1mm 到 1cm 量级,但也可直至 m 的量级,比位错(在 10^{-8}cm 量级)大得多,所以它是一种宏观缺陷.这类宏观缺陷能使某些高强度韧性材料(例如高强度钢)发生低应力脆性破坏.然而具有不同性质的材料对宏观缺陷的敏感性是不同的.脆性材料比韧性材料对裂纹敏感.

影响材料脆性-韧性转变的因素,远远不止上面所列举的那些.对这些影响变形与断裂的因素的作用的深入探索具有重要的理论与实践意义,并且最终为断裂力学的建立与发展辅平了道路.

4. 裂纹的成核与扩展

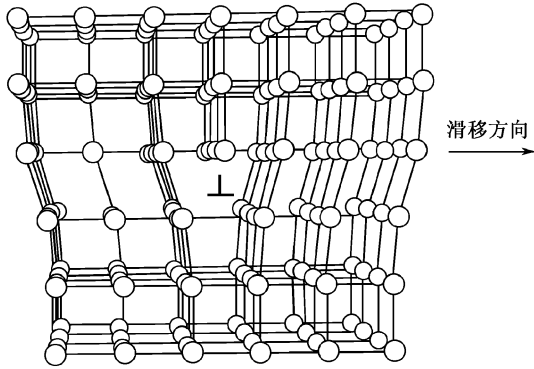
在上述简短介绍过的影响材料力学性能的诸多因素中,裂纹或类裂纹缺陷的存在与扩展,是一个极其重要的因素.

在断裂过程中,存在两个不同而相互联系阶段(也称为相),即裂纹的成核与扩展.

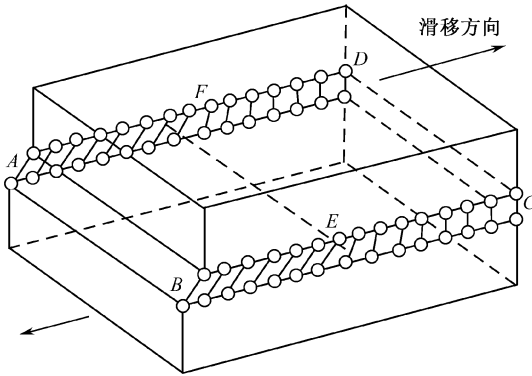
同塑性变形有关的断裂,裂纹的形成是滑移的直接结果.

就晶体材料而言,普遍接受的观点是,裂纹成核是塑性变形局部受阻的结果.对这一观点的进一步解释,提出了几种机制,其中有位错塞积机制和位错反应机制.位错是一种晶体缺陷.图 10 说明在一简单立方晶格中刃型位错的原子排列的基本概念.位错塞积形成微小裂纹由图 11 所示.

裂纹由位错塞积或位错反应成核,其尺寸较小(若由 100 个位错塞积而成,尺寸为 $100 \times 10^{-8}\text{cm}$.若由 10000 个位错塞积而成,尺寸为 $10000 \times 10^{-8}\text{cm}$),属于微裂纹,它们属于材料科学和物理学的研究范畴,本质上讲,超出了固体力学的研究范畴.



(a) 晶体点阵中出现多余半原子面，造成晶体上部受压，下部受拉



(b) ABCD 为滑移面，ABEF 为滑移区，EFCD 为未滑移区

图 10 刃型位错

这种微裂纹演化成宏观裂纹(尺寸在 0.1mm—1cm),是一个很复杂的过程,固体力学的方法很难处理这一过程.其可能的处理方法,将留在第九章中去讨论.

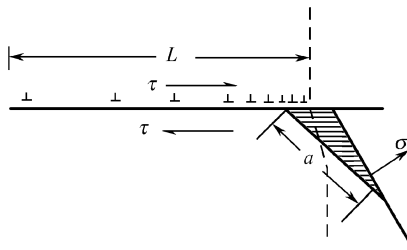


图 11 位错塞积模型

尺寸在 $0.1\text{mm}—1\text{cm}$ 的宏观裂纹已经对材料与结构的完整性和安全性构成威胁.在某些条件下(例如低温或循环加载或介质腐蚀等),它们进一步扩展,将导致物体的破坏.刚才提到,研究裂纹成核是极其困难的,已经超出了固体力学的范畴.研究宏观裂纹的扩展,它属于固体力学的范畴,但也很困难.在本章后面以及本书第二、三章会进一步讨论这一问题.

5. Inglis 解与 Griffith 理论

脆性断裂的第一个定量的理论由 A. A. Griffith 于 1920 年提出.

在 Griffith 之前,1913 年 Inglis 发表了无限大板中含有一个穿透板厚的椭圆孔的弹性力学精确分析解.这个解称为 Inglis 解.他是用椭圆坐标计算的,在形式上比较复杂.当椭圆孔的短半轴 b 趋近于零时,它退化成一个长度为 $2a$ 的穿透板厚的裂纹,这里的 a 即椭圆的长半轴.在计算中,裂纹的应力与位移均已给出.数年后,Griffith 在研究玻璃与陶瓷这类脆性材料断裂时,他认为裂纹的存在与传播是导致断裂的原因.他所指的裂纹,即 Inglis 解中当椭圆短半轴趋于零时退化成的割缝.这个被理想化了的缺陷称为 Griffith 裂纹,如图 12 所示.根据 Inglis 解,Grif-

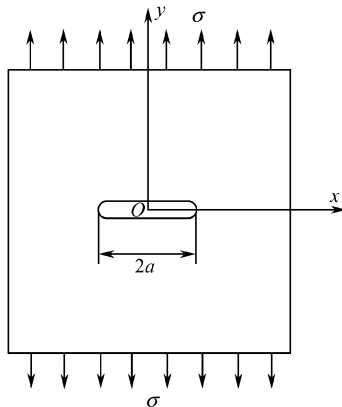


图 12 受拉伸的 Griffith 裂纹

fith 计算出由于裂纹的存在导致板的应变能的变化值 U 为

$$U = \frac{1-\nu^2}{E} \pi a^2 \sigma^2 \quad (2)$$

这是针对平面应变状态(即板为无限厚)计算的,若针对平面应力状态(即板为无限薄)计算,则 $U = \pi a^2 \sigma^2 / E$.平面应变与平面应力概念,将在附录一介绍弹性力学基本方程时详细讨论.顺便说一下,若 σ 不是外拉伸应力,而是作用在裂纹面上的内

压,仍有相同的结果.在上述公式中 E 与 ν 分别代表材料的弹性模量与 Poisson 比, a 为裂纹的半长, σ 代表垂直于裂纹面方向的拉伸应力.计算中板的厚度取为 1,所以 U 是单位厚度的能量.更确切地说,由于一个长度为 $2a$ 的穿透板厚的裂纹的应变能改变量为 U ,是这个弹性系统的应变能的减少值,也可以说它释放出了这么一个量值的应变能.

如图 12 所示,板的端部在外应力拉伸作用下发生了移动,因而外力对系统作了功.按照弹性力学的理论,这个外力功的变化值 W 等于应变能改变值 U 的两倍,即

$$W = 2U$$

这是外界对系统作的功,若减去系统释放出来的能量 U ,则有

$$W - U = U \tag{3}$$

这是系统所吸收的总能量.

由于有了 Inglis 的解,上述计算是初等的,但 Griffith 接着提出了一个大胆的创新的思想,即裂纹的出现使固体材料出现了一个新表面,此表面同液体的表面一样,具有表面能.系统所释放的能量 U 的一部分将转化成表面能.如果假设材料单位面积上的表面能为 γ ,也就是表面张力,则表面能为

$$S = 4a\gamma \tag{4}$$

因为裂纹有上、下两个表面,所以裂纹表面面积为 $A = 4a \cdot 1$.Griffith 建议,若上述能量交换保持关系

$$\frac{d}{dA}(W - U) = \frac{d}{dA}S \tag{5}$$

则裂纹处于临界平衡状态.上式可以改写成

$$\frac{d}{da}(W - U) = \gamma \tag{5'}$$

把(2),(3),(4)代入(5),得到 Griffith 所说的临界状态时应力值(若裂纹尺寸 a 已经给定)

$$\sigma_c = \begin{cases} \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi(1-\nu^2)a}} & \text{(平面应变状态)} \\ \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}} & \text{(平面应力状态)} \end{cases} \tag{6}$$

或临界状态时的裂纹尺寸(若外加应力 σ 已经给定)

$$a_c = \begin{cases} \frac{2E\gamma}{\pi(1-\nu^2)\sigma^2} & \text{(平面应变状态)} \\ \frac{2E\gamma}{\pi\sigma^2} & \text{(平面应力状态)} \end{cases} \tag{6'}$$

Griffith 预言,当外加应力值 σ 超过临界应力值 σ_c ,或裂纹尺寸 a 超过临界裂纹尺

寸 a_c , 则脆性物体, 例如玻璃或陶瓷将断裂. 这就是著名的 Griffith 判据.

公式(5')具有鲜明的物理意义; 式子的左端为系统提供用于驱动裂纹扩展的力, 而右端为材料阻挠裂纹扩展的力.

为了验证上述判据, Griffith 用玻璃作了一系列实验. 在玻璃制成的薄球壳或圆柱壳上开一表面裂纹, 此结构在内压下破裂. Griffith 测量在不同温度下的玻璃的表面能. 经熔化的玻璃呈现粘性流体的特性, 表面能数值随温度的降低而升高. 经过对实测值的外推, 得到室温下的玻璃的表面张力 $\gamma = 5.5 \times 10^{-4} \text{ kgf/cm} = 0.54 \text{ N/m}$. 此值作为这个量的下限是可靠的. 按照 Smekal^① 的研究, 对结晶固体而言, γ 的值在 10^{-4} 与 10^{-3} kgf/cm (或 0.1 与 1 N/m) 之间. 在 Griffith 的实验中, 裂纹尺寸从 0.38 到 2.26 cm 之间, 当时他是用光学仪器测量的. 从式(6)可知, $\sigma_c \sqrt{a} = \text{常数}$.

实测的结果与 Griffith 判据的理论预言完全吻合. 在 Griffith 之后, 其他研究者的实验结果也证实了 Griffith 判据. 此判据对于脆性金属也是适合的.

为了明确起见, 我们来计算一个具体例子. 设材料为玻璃, 有关材料常数为

$$\gamma = 2.1 \times 10^{-5} \text{ J/cm}^2, E = 6.2 \times 10^6 \text{ N/cm}^2, \nu = 0.33$$

而外加应力 $\sigma = 1.8 \times 10^3 \text{ N/cm}^2$. 把这些数据代入(6'), 得到

$$a_c = 0.28 \text{ cm}$$

不同材料的 γ 值和 E 值差别很明显, 即使在相同的应力 σ 作用下, a_c 值差别很大. 但 Griffith 理论是针对玻璃和陶瓷等理想脆性材料建立的, 在使用这一判据时, 要注意其适用的范围.

虽然 Griffith 理论适用范围有限, 但它在力学中引进了新思想、新概念, 即把缺陷的特征尺寸 a 引进到材料强度与韧性的计算中, 在科学史上是第一次. 同时他提出固体的表面能, 对于理想脆性体, 它就是材料抗断裂的阻力.

比 Griffith 稍晚些, 其他一些研究者提出另外一些断裂判据, 仔细分析便可以发现, 它们都与 Griffith 判据等价. 这说明 Griffith 的研究抓住了断裂现象的核心问题.

经过 Orowan 与 Irwin 等人的开拓, Griffith 判据的左端, 发展成裂纹能量释放率, 其右端发展成材料断裂韧性. 由 Irwin 的进一步发展, Griffith 判据的左端可以用更简单的应力强度因子代替, 而其右端可以用更具有普遍意义的断裂韧性代替, 为现代断裂力学的建立与发展开辟了道路, 它不仅适用于理想脆性材料, 也适用于金属材料的准脆性破坏.

对 Griffith 理论从更深层次上分析, 将在第九章中讨论.

我们看到, Griffith 理论是在 Inglis 解的基础上展开的, 这表明弹性力学仍然

① A. Smekal, Technische Festigkeit, Naturwissenschaft, Vol. 10, 799—804 (1932).

有效.

6. Orowan 与 Irwin 对 Griffith 理论的解释与发展

上一节提到 Griffith 的重大贡献,在于把宏观缺陷对材料强度与韧性的影响给予定量的揭示,在连续力学中引进了新思想、新概念. Griffith 理论的成功,在某种意义上表明,把宏观缺陷在几何上理想化之后,把它作为连续力学中的一种边界条件,则连续力学的方法在分析与缺陷有关的材料的强度与韧性问题上仍然有效. 所以 Griffith 是连续力学断裂理论的奠基人.

然而自从 1920 年 Griffith 理论提出之后,在相当长的时间里,它的影响仅局限在纯学术界而未得到工程应用. 究其原因,大概有两点. 首先,在那个时期,表现为纯脆性断裂的工程材料并不很多. 其次,对广泛使用的大多数金属材料而言,Griffith 判据不可能作出满意的预言,这点下面将详细讨论. 还有人,例如 Erdogan^① 解释为原因之一是 Griffith 判据只给出了断裂的必要条件,而并非充分条件. 其实 Griffith 判据(5)是充分的,因为

$$\frac{d}{dA} \left[\frac{d}{dA} (W - U) - \frac{dS}{dA} \right] > 0 \quad (7)$$

针对上述困难,1948 年 Orowan 指出,金属材料由于断裂前会发生显著的塑性变形,裂纹体释放出来的能量 $(W - U)$ 相当大一部分将转化成裂纹附近的塑性变形功 γ_p . 此物理量是耗散性的,同表面能一样,对裂纹扩展起阻止作用,但在金属材料, $\gamma_p \sim 2 \text{kgfcm/cm}^2 \approx 2 \times 10^{-1} \text{J/cm}^2 = 2 \times 10 \text{Ncm/cm}^2$. 在上一节,我们曾给出过结晶固体的表面能 γ 的具体数值. 将两者比较之后,我们发现 $\gamma_p \gg \gamma$ (同一材料的 γ_p 比 γ 至少大 3 个数量级). 对塑性较好的材料, γ 可以略去不计. 这一事实使人们认识到,对于金属材料而言,裂纹附近的塑性变形功是阻止裂纹扩展的实际抗力,而不是表面能. 因而 Orowan 建议对 Griffith 判据作如下修正:

$$\sigma_c = \begin{cases} \sqrt{\frac{2E(\gamma + \gamma_p)}{\pi(1 - \nu^2)a}} & \text{(平面应变状态)} \\ \sqrt{\frac{2E(\gamma + \gamma_p)}{\pi a}} & \text{(平面应力状态)} \end{cases} \quad (8)$$

$$a_c = \begin{cases} \frac{2E(\gamma + \gamma_p)}{\pi(1 - \nu^2)\sigma^2} & \text{(平面应变状态)} \\ \frac{2E(\gamma + \gamma_p)}{\pi\sigma^2} & \text{(平面应力状态)} \end{cases} \quad (8')$$

① F. Erdogan, Stress intensity factors, J. Appl. Mech., Vol. 50, 992-1002(1983).

几乎与 Orowan 同时, Irwin 在经过 10 年的艰苦探索之后, 也于 1948 年提出对 Griffith 理论的修正. 他引进一个新记号 G (针对不同试样, G 可取不同形式)

$$G = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \alpha} (W - U) \quad (9)$$

称为裂纹能量释放率, 或裂纹扩展力, 从形式上看, 它与 Griffith 判据(5)的左端一样, 进而 Irwin 建议

$$G = G_c \quad (10)$$

作为裂纹临界平衡状态的判据, 其中 G_c 代表 G 的临界值, 为一材料常数, 须由实验测定. 虽然怎样由实验测定 G_c , 包含了许多极其复杂问题, 从工程应用的角度上考虑, 判据(10)比判据(8)简单方便, 因为 γ_p 的测定会更困难. Irwin 判据的提出, 是线性弹性断裂力学诞生的一个标志. 因为 G_c 不仅仅局限在代表材料的表面能, Irwin 的理论适用于金属材料的准脆性破坏(破坏前, 在裂纹顶端附近有相当范围的塑性变形区), 因而发展了 Griffith 理论. 我国科学家赖祖涵教授指出, 这里的讨论应该用热力学第二定律, 才是严谨的.

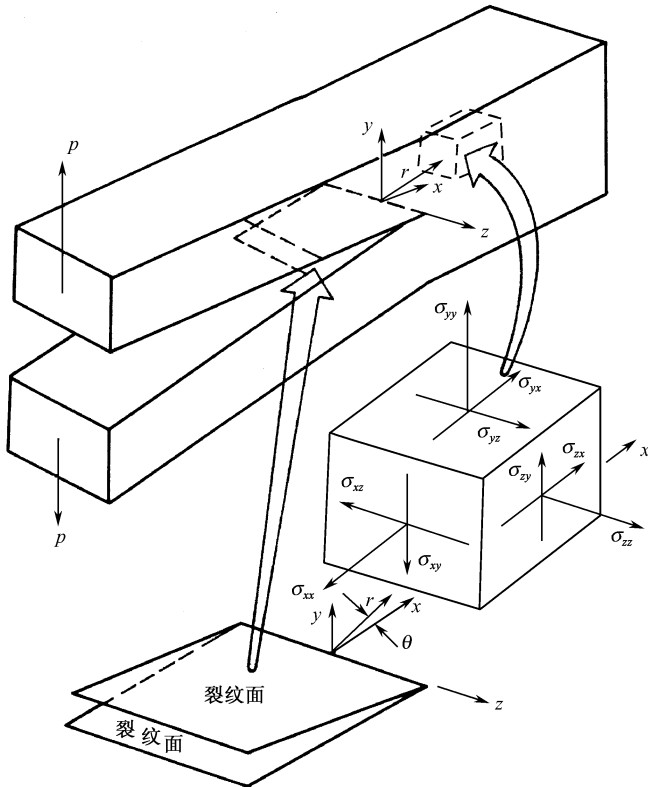


图 13 裂纹顶端附近结构

7. 低应力脆性破坏与线性弹性断裂力学

1948年 Irwin 对 Griffith 理论的重大发展,是线性弹性断裂力学诞生的一个标志.之所以称此分支学科为线性弹性断裂力学,是由于 G 的计算以线性弹性力学为基础,如果在裂纹顶端附近存在塑性变形区,则在此变形区范围比较小的前提下,由线性弹性力学计算得到的 G 仍然正确.此范围的大小,以它的特征尺寸 r 同裂纹尺寸 a 的比值作为一度量标准.

Irwin 判据(10)提出后的最初 10 年,未取得显著进展,原因有多种,其一是 G 的计算并不方便,尤其针对不同带裂纹结构的计算其能量改变值相当不便,因为能量是同整个结构有关的量.

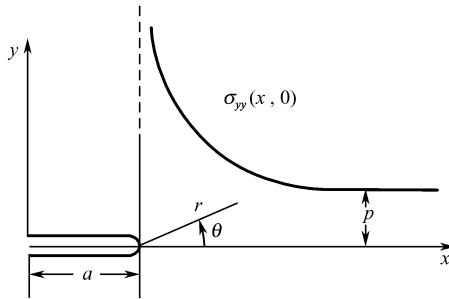


图 14 裂纹顶端附近应力分布

在 Irwin 之前,许多力学家和应用数学家相继发现了裂纹顶端附近应力的奇异性,即在裂纹顶端建立一个极坐标 (r, θ) 系,见图 13,应力具有渐近性质(见图 14)

$$\sigma_{ij}(r, 0) \propto \frac{1}{\sqrt{r}} \quad (r \rightarrow 0) \tag{11}$$

Irwin 分析了这种渐近性质,并且在 1957 年提出了一个新的物理量——应力强度因子 K ,即

$$K = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{yy}(r, 0) \tag{12}$$

可以看出, K 是一个仅与裂纹顶端局部相关联的量,它的确定比 G 的确定相对地要容易.根据当时已经知道的若干裂纹问题的精确分析解, Irwin 计算出第一批应力强度因子.大约在 1960 年前后, Irwin 用石墨作实验,测出裂纹开始扩展时的 K 值,记为 K_c ,后来称为断裂韧性,并且提出新的断裂判据:

$$K = K_c \tag{13}$$

例如受拉伸的 Griffith 裂纹,其应力强度因子

$$K = \sqrt{\pi a} \sigma \quad (14)$$

而

$$K_c = \sqrt{\pi a} \sigma_c \quad (\text{当 } a \text{ 给定时}) \quad (15)$$

或

$$K_c = \sqrt{\pi a_c} \sigma \quad (\text{当 } \sigma \text{ 给定时}) \quad (15')$$

这里 σ_c 是裂纹开始扩展时所对应的临界应力值, 而 a_c 是裂纹开始扩展时所对应的临界裂纹尺寸值。

由公式(9)、(2)与(14), 不难得到

$$G = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial a} (W - U) = \begin{cases} \frac{1 - \nu^2}{E} K^2 & (\text{平面应变状态}) \\ \frac{1}{E} K^2 & (\text{平面应力状态}) \end{cases} \quad (16)$$

这一结果不仅对 Griffith 裂纹成立, 对其他裂纹也成立, 具有普遍意义. 这一结果还表明判据(13)与判据(10)等价, 但是由于 K 的确定比 G 容易, 判据(13)更加有效(尤其在工程应用上)。

由于判据(13)的建立及其有效, 标志着线性弹性断裂力学最终建立起来. 从 1920 年经典 Griffith 理论提出, 到 1960 年左右线性弹性断裂力学的建立, 经历了大约 40 年艰苦的探索, 说明科学的进步是很不容易的。

前面已经提到, 在断裂力学出现之前在固体力学基础上已经发展了常规强度理论及其相应的设计方法. 例如结构中的最大应力必须小于许用应力 $[\sigma]$, 亦即

$$\sigma \leq [\sigma] = \begin{cases} \sigma_b / n_b, & \text{对脆性材料} \\ \sigma_s / n_s, & \text{对塑性材料} \\ \sigma_r / n_r, & \text{对循环加载} \end{cases} \quad (17)$$

其中 σ_b , σ_s 与 σ_r 分别代表断裂应力, 屈服应力和疲劳破坏应力, n_b , n_s 与 n_r 分别代表相应的安全系数. 针对具体的情况, 还须提出相应的韧性要求(例如延伸率 δ , 截面收缩率 ψ 和冲击韧性 α_k). 这种设计方法已积累了许多经验, 被实践证明是有效的。

然而在二次世界大战后, 发生了一系列严重的灾难性断裂事故. 这些事故中毁坏的结构是经过上述传统强度理论严格设计的, 为什么不断出现断裂呢?

这些结构大多是由高与超高强度材料制成(例如高强度钢屈服应力 $\sigma_s \geq 1400 \text{ MPa}$, 而普通钢材仅为 200 MPa), 不仅材料强度高, 材料韧性也很好($\delta \geq 5\%$), 这些结构尺寸也比较大, 它们多数为焊接结构。

对有关断裂事故的调查分析发现:

a. 断裂时的工作应力远远低于材料屈服强度;

- b. 有关结构的材料为韧性较好的材料；
- c. 在断口处呈现脆性断裂特征,并且存在 $0.1\text{mm}—1\text{cm}$ 大小的宏观缺陷。

这种现象称为高强度材料的低应力脆性破坏.结构的大型化,一则是缺陷尺寸也会增大,二则从应力状态看,容易处于平面应变状态.焊接工艺,使焊接部位裂纹易于发生,焊接中产生的氢渗入材料表面使材料变脆,使材料冷脆转变温度升高.这些因素都促使低应力脆性破坏的发生.

这些事实引起了人们对 Griffith 理论的再认识和对它的改造与发展,最终促进了线性弹性断裂力学的创立,它与传统强度理论的本质区别在于它把缺陷尺寸包含在强度与韧性条件中.断裂力学的诞生,并没有取代传统的强度设计方法,而是作为它的一个补充,它重点处理宏观缺陷扩展所引起的结构失效问题.

断裂力学的出现的事实表明生产实践的要求是促使其诞生的动力,新的物理思想(以 Griffith 和 Irwin 提出和若干新概念为代表)使人们对断裂现象规律的认识取得突破性进展,而弹性力学裂纹解是这门学科发展的基础,这三个要素缺一不可.

8. 对裂纹顶端较大范围塑性变形的处理——非线性断裂力学

断裂力学与传统固体力学的不同在于首先承认材料与结构中有一个宏观尺寸缺陷.现阶段的断裂力学只有在把缺陷从几何上理想化之后并且用连续介质力学的方法作分析的基础,才有可能得出定量的结果,也只有这样才能为工程实践服务.

这种理想化的缺陷即裂纹,它上、下表面平直、光滑,裂纹顶端曲率半径等于零,其周围材料处在弹性变形状态.不过 Orowan 与 Irwin 一开始就注意到了裂纹顶端附近由于应力集中,材料已经进入塑性阶段. Irwin 认为只要塑性变形的范围较小(其特征尺寸 r 与裂纹长度 a 相比较小),能量 U 或能量释率 G 的计算(以及后来提出的 K 的计算)仍有意义,只是在材料抗断裂阻力 G_c (或后来的 K_c)中计及塑性的效应即可.后来 Irwin 又进一步提出,考虑裂纹顶端小范围塑性变形的影响,对线性断裂判据(13)进行修正,将在第二章中讨论.不过在塑性范围进一步扩大时,这种修正就失效了.于是发展了考虑较大范围塑性变形效应的张开位移法和 J 积分方法.这些方法基于弹塑性力学,所以称为弹塑性断裂力学,又称为非线性断裂力学,此时变形几何关系仍用线性方程,仅应力-应变关系为非线性,即只考虑了物理非线性效应.这些内容将在第四章中讨论.

9. 对惯性效应的处理——断裂动力学

从几何上和变形状态上看,Griffith 提出的裂纹模型都是最简单的,或称为无

结构的裂纹模型。Orowan 与 Irwin 考虑裂纹顶端的小范围塑性变形,相当于在裂纹顶端赋予裂纹一种补充结构。但从运动状态上考虑,上述模型为静止的状态。而实际上,带裂纹的结构往往处在冲击载荷作用下,同时裂纹也可能发生快速传播,例如前面提到的解理断裂的裂纹以极快的速度传播(其速度达到该材料中声速的数量级)。在这种情形下,必须考虑材料的惯性效应。考虑惯性效应的断裂力学为断裂动力学。这时得到应力强度因子 K 往往是随时间而变化的,称为动态应力强度因子,相应的 K_c 往往是加载速率 $\dot{\sigma}$ 或裂纹速率 \dot{a} 的函数,称为动态断裂韧性。这些内容将在第五章讨论。

10. 断裂力学的应用

上面已经提到,断裂力学作为传统固体力学的发展与补充,在应用上可以作为常规强度(与韧性)设计的一个补充。断裂力学方法突出的特点是考虑材料与结构中宏观缺陷的效应,在方法论上,其优点是把强度与韧性结合在一起考虑。由它确定的临界应力 σ_c 或临界裂纹尺寸 a_c ,可以为工程结构的强度与韧性设计使用。它另一个重要应用是在疲劳问题上,这是工程界一个极其重要的领域。它可以帮助估计结构的存活寿命,作为传统疲劳理论与方法的一个重要补充。在航空工业部门,这一应用具有特别重大的意义。其次,在电力工业、核工业、化工部门都有重要应用。

在应力腐蚀问题,断裂力学方法也有重要应用,而应力腐蚀问题在不少工业部门都是一个重要问题。

以上所说的应用,是指涉及安全设计方面的问题。由于断裂力学而提出的材料断裂韧性,为设计的选材料提供了参考,也是它的应用之一。

在本章第 4 节中列举了影响材料脆性-韧性转变的多项因素,那些因素自然也影响材料断裂韧性。材料科学的方法在断裂力学中有许多应用,反过来,断裂力学方法在材料科学中也有若干应用。

断裂力学出现之后,地球科学家把地壳中的某些缺陷(例如断层)用裂纹去模拟,因而应力强度因子方法、张开位移方法在地学中得到应用,是十分有意义的探索。