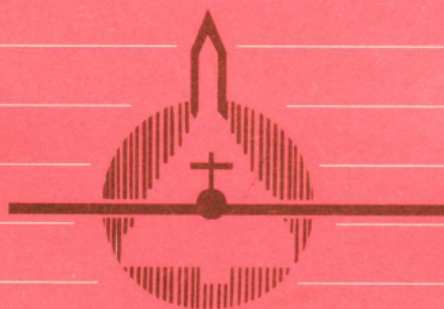


疲劳与断裂及其在 压力容器上的应用

作者：王 正



兵器工业出版社

TB 30 / 42

疲劳与断裂及其在压力容器上的应用

王 正 编著

兵器工业出版社

内容简介

本书对断裂力学原理，疲劳强度理论以及其在石油化工压力容器上的应用进行了比较系统地阐述，本书包括断裂力学、疲劳强度、疲劳与断裂及其在压力容器上的应用三部分内容。

本书注重理论在实际工程中应用，内容较系统全面，由浅入深，简明易懂。

本书可作为机械、动力、石油化工、宇航及力学等专业本科生、研究生的教材及工程技术人员参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

疲劳与断裂及其在压力容器上的应用/王正编著. —北京: 兵器工业出版社, 1996. 7
ISBN 7-80132-041-7

I. 疲… I. 王… III. ①金属疲劳②金属-断裂③压力容器-缺陷-金属分析
N. TH49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 11632 号

兵器工业出版社出版发行

(北京市海淀区车道沟 10 号)

各地新华书店经销

中国人民警官大学印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 17.5 字数: 417 千字

1997 年 2 月第 1 版 1997 年 2 月第 1 次印刷

印数: 1100 册 定价: 23.5 元

前 言

随着科学技术的高速发展, 机器、设备的操作条件和操作环境越加苛刻。如石化行业中的机器及设备正朝着高温、高压方向发展, 从而对机器及设备的要求越来越高。据统计在现代工业各个领域, 大约有 80 % 以上的破坏是由疲劳与断裂造成的。因此学习及研究断裂与疲劳理论解决工程实际问题具有重要意义。

本书在注重讲清基础理论的同时, 着重理论和工程实际的应用。作者力图为读者提供比较系统、完整而又简明的断裂力学与疲劳强度基本方法和理论, 同时, 在不影响概念的完整性与公式必要推导的条件下, 尽量避免引入较深的弹塑性理论概念和数学方法。

本书主要从宏观角度出发, 讲述的内容包括第一篇断裂力学, 其中包括第一章绪论, 介绍了断裂力学的产生、发展及内容, 第二章金属断裂的基本概念, 第三章线弹性断裂力学, 第四章弹塑性断裂力学, 第五章断裂韧性测试, 第六章应力腐蚀, 第七章裂纹的快速扩展和止裂。第二篇疲劳强度, 其中包括第八章绪论, 介绍了疲劳的产生及发展, 第九章材料的疲劳性能, 第十章疲劳裂纹的扩展, 第十一章疲劳短裂纹及其扩展, 第十二章高温低周疲劳, 第十三章热疲劳, 第十四章疲劳问题研究发展现状。第三篇疲劳与断裂在压力容器上的应用, 其中包括第十五章疲劳与断裂在压力容器上的应用, 第十六章压力容器的缺陷评定, 第十七章疲劳与断裂及其在压力容器上的应用举例。

本书在编写过程中得到了抚顺石油学院张振华教授的关怀和支持, 并担任本书的主审, 对本书提出了很多宝贵意见, 在此表示感谢。由于作者水平有限, 缺点和错误在所难免, 恳请读者批评指正。

抚顺石油学院 王 正

1996 年 11 月

目 录

第一篇 断裂力学	1
第一章 绪论	1
§ 1—1 断裂力学的产生	1
§ 1—2 断裂力学的发展	3
§ 1—3 断裂力学的内容及目的	5
第二章 金属断裂的基本概念	6
§ 2—1 金属断裂的类型	6
§ 2—2 断口的分析方法	8
第三章 线弹性断裂力学	11
§ 3—1 裂纹的类型	11
§ 3—2 裂纹尖端附近的应力场、位移场	12
§ 3—3 K 准则	22
§ 3—4 应力强度因子 K 的计算	24
§ 3—5 小范围屈服下 K_I 的修正	36
§ 3—6 裂纹扩展的能量释放率 G	45
§ 3—7 能量释放率 G 与应力强度因子 K 的关系	50
§ 3—8 复合型断裂准则	52
§ 3—9 裂纹扩展阻力曲线	60
§ 3—10 K 主导区、线弹性断裂力学的适用范围	64
第四章 弹塑性断裂力学	67
§ 4—1 增量理论和全量理论	68
§ 4—2 裂纹尖端张开位移 (COD) 方法	71
§ 4—3 J 积分理论和应用	86
第五章 断裂韧性测试	110
§ 5—1 平面应变断裂韧性 K_{IC} 的测试	110
§ 5—2 裂纹尖端张开位移 COD 测试	115
§ 5—3 临界 J 积分值 J_{IC} 的测试	119
第六章 应力腐蚀	123
§ 6—1 应力腐蚀	123
§ 6—2 应力腐蚀裂纹扩展	126
§ 6—3 应力腐蚀条件下 K_{ICSS} 及 da/dN 测试原理	130
第七章 裂纹的快速扩展和止裂	133

§ 7—1	裂纹的动态扩展	133
§ 7—2	裂纹在动态扩展中的分叉现象	140
§ 7—3	止裂原理	143
§ 7—4	实际结构中的止裂	144
第二篇 疲劳强度		146
第八章 绪论		146
§ 8—1	疲劳问题的重要性及发展历史	146
§ 8—2	疲劳破坏	149
§ 8—3	疲劳裂纹的萌生与扩展	150
§ 8—4	疲劳强度设计的安全准则	153
第九章 材料的疲劳性能		156
§ 9—1	疲劳应力和疲劳极限	156
§ 9—2	材料的 S—N 曲线及 $\Delta\varepsilon$ —N 曲线	157
§ 9—3	材料的循环特性	160
第十章 疲劳裂纹的扩展		164
§ 10—1	疲劳裂纹扩展速率	164
§ 10—2	疲劳裂纹门槛值 ΔK_{th}	168
§ 10—3	影响疲劳裂纹扩展的因素	171
§ 10—4	疲劳裂纹扩展寿命的计算	175
§ 10—5	应变疲劳	179
§ 10—6	腐蚀疲劳	181
§ 10—7	疲劳裂纹扩展速率测试	184
第十一章 疲劳短裂纹及其扩展		187
§ 11—1	研究短裂纹及其扩展的意义	187
§ 11—2	疲劳短裂纹的定义及其特性	188
§ 11—3	短裂纹的门槛条件	188
§ 11—4	短裂纹的疲劳扩展规律	190
第十二章 高温低周疲劳		193
§ 12—1	高温低周疲劳的特点及意义	193
§ 12—2	高温低周疲劳寿命的估算方法	194
§ 12—3	影响高温低周疲劳寿命的因素	201
§ 12—4	高温疲劳条件下的裂纹扩展	204
第十三章 热疲劳		214
§ 13—1	概述	214
§ 13—2	热疲劳的基本特性	215

§ 13—3 影响热疲劳的因素·····	221
第十四章 疲劳问题研究发展现·····	224
§ 14—1 单轴疲劳问题·····	224
§ 14—2 复杂应力状态下疲劳问题·····	225
第三篇 疲劳与断裂在压力容器上的应用·····	231
第十五章 疲劳与断裂在压力容器上的应用·····	231
§ 15—1 疲劳与断裂在压力容器中的应用的内容·····	231
§ 15—2 鼓胀系数·····	234
§ 15—3 缺陷的当量处理·····	235
第十六章 压力容器的缺陷评定·····	237
§ 16—1 国内外压力容器缺陷安全评定标准及发展趋势·····	237
§ 16—2 国内外压力容器缺陷评定标准内容简介·····	238
§ 16—3 国内外安全评定事例·····	245
第十七章 疲劳与断裂在压力容器上应用举例·····	256
§ 17—1 应力和应变分析·····	256
§ 17—2 计算举例·····	258
习题·····	265
参考文献·····	270

第一篇 断裂力学

第一章 绪论

§ 1—1 断裂力学的产生

断裂力学就是从材料或构件中存在宏观裂纹现象出发，应用弹性力学和塑性力学理论，研究材料或构件中裂纹产生和扩展条件及规律的科学。简言之，断裂力学是研究含裂纹材料或结构强度及裂纹扩展规律的科学。

断裂力学是近 30 年来发展起来的一门学科，它的产生和发展是与生产实践紧密相关的，研究工程结构重大破坏事故发生的原因，产生了断裂力学这门学科。

传统的强度设计方法，在工程中已经成功地应用了 100 多年。事实证明，在一般情况下传统设计是可行的。虽然材料破坏条件的研究不断发展以及结构的应力计算方法不断进步，但基本思想一直没有改变。这是因为直到 30 年代以前，广泛应用的低合金钢，韧性较好，破坏往往是强度不够，韧性有余。实际上，破坏以塑性失效为主，故传统的强度设计是合理的。以后的研究也证明，对中低强度钢制成的中小零件或设备，传统设计也是合适的。

自从二次世界大战以来，高强度钢已广泛应用于各种工程结构中，由于焊接技术的发展，建造了许多大型焊接结构物。结果是重大事故明显增加，尽管这些结构都满足传统的设计要求，满足各种设计规范的要求。这种破坏往往是在低应力水平下突然发生的脆性断裂，在断裂之前没有预兆，于是造成灾难性破坏。

1943~1947 年间，美国建造了 5000 艘全焊接船，在使用过程中发现有 1000 多艘有明显裂纹，进而破坏，其中 238 艘完全报废（有的甚至断为两截），有 7 艘在风平浪静的港湾中突然断裂。为了分析原因从 100 多个损坏处割下试件进行试验，结论是：断裂总是从焊接缺陷等应力集中处产生；断裂发生时的温度低；破坏处材料的冲击韧性值低于未破坏处的冲击韧性值。

1950 年美国北极星导弹固体燃料发动机壳体在试验时发生爆炸，材料用 $\sigma_s = 1400 \text{ MPa}$ 的高强度合金钢，传统强度和韧性指标全部合格，而且爆炸时的工作应力远低于材料的许用应力。事后研究表明：破坏由宏观裂纹（深为 0.1~1mm）引起的。

1965 年英国北海的海上钻井平台 " 海上宝石 " 号，支柱上的拉杆发生脆性断裂，导致平台沉没。

1965 年英国 John Thompson 公司制造了一台大型氨合成塔，在水压试验时发生爆炸。该容器直径 $D=1700\text{mm}$ ，壁厚 $S=149\text{mm}$ ，塔高 $H=19\text{m}$ ，材质为 MnCrMoV 钢，此种材料的屈服极限 $\sigma_s=460\text{MPa}$ ，强度极限 $\sigma_b=582\text{MPa}$ ，设计压力为 36MPa ，水压试验压力为 49MPa ，屈服压力为 74.1MPa ，爆破压力为 93.7MPa ，但在做水压试验时，当压力升到 35.2MPa 时发生突然爆炸，炸成两段，飞出四块碎片，其中最大的一块有 2t ，飞出约 45m 。经对断裂事故分析发现，在焊缝区内有一长为 10mm 的埋藏裂纹，裂纹扩展导致容器断裂。

1969 年美国 F-111 飞机在飞行训练途中做恢复动作时左翼脱落，招至飞机坠毁，当时的飞行速度，总重量等各项指标远低于设计指标，主要原因是制造时热处理不当，机翼枢轴出现裂纹，漏检后经疲劳载荷作用，裂纹继续扩展，最后造成低应力破坏。

在有关的文献报道中还专门收集了世界各国发生的大量严重破坏事故。这些重大破坏事故的发生使工程界感到震惊，因为这些结构物的破坏都是在满足传统设计要求的情况下发生的，人们感到，这再不是什么偶然因素的作用，一定是传统的设计思想忽略了什么，通过大量的调查研究，人们发现许多事故是发生在下面情况下：高强度钢或中低强度钢；低温条件下工作；焊接处或高度应力集中处；直接的破坏原因是结构物体中有裂纹存在，由于裂纹的扩展而引起结构的断裂。30 多年来，人们对含裂纹体的破坏进行了大量的理论和试验研究，产生了断裂力学这门学科，为结构物的安全设计提供了新的思想方法。

传统的设计方法，材料或结构在外力作用下，是以应力 (σ)、应变 (ε) 这两个物理量来描述其行为的；它可根据其结构类型、尺寸和外力预先确定出来，材料的物理性质可用屈服极限 σ_s ，强度极限 σ_b 表示。它们是由宏观的力学试验测定出来，（还要测出材料的拉伸伸长率 δ ，断面收缩率 Ψ 和冲击韧性 α_k 、 CVN 等物理量作为选材指标），通过建立 σ 与 σ_s 、 σ_b 之间的关系来满足安全设计的条件。具体的设计条件是：

$$\sigma_{eq} \leq [\sigma]$$

式中的 $[\sigma]$ 取

$$\left\{ \sigma_s / n_s, \sigma_b / n_b, \sigma_D / n_D, \sigma_n / n_n \right\}$$

之中的较小值。式中 n_s, n_b, n_D, n_n 分别对应于屈服极限、强度极限、持久极限和蠕变极限的安全系数。

这种传统设计思想的基础是建立在材料的连续性、均匀性、各向同性假设上的，认为材料中没有裂纹和缺陷存在。实际上，裂纹和缺陷是不可避免要存在的。这里所说的裂纹不是指分子、原子数量级或晶体数量级的微观裂纹，而是指用低倍数工具显微镜

或肉眼能够看到的宏观裂纹，它们可能产生于下列各过程中：冶金过程——存在夹杂、微孔洞；工艺过程——冷、热加工过程的轧制夹层、切割损伤；热处理会产生过高的内应力；焊接过程中产生的夹渣、未焊透、气孔等；使用过程——即使构件中原来无宏观裂纹，由于材料的微观结构原非均匀，也不是各向同性的，材料组织中不可避免地存在着微观裂纹，使用过程中在载荷（载荷会产生波动或交变）作用下及在腐蚀的介质条件下，微裂纹也会增大发展成为宏观裂纹。因此，裂纹总是存在的。另外，对存在的缺陷也不是都能被发现，这是因为漏检是难免的，以及因为现有的各种探伤方法（X射线探伤、超声波探伤和磁粉探伤等）都有一定的分辨率及灵敏度，对细小的裂纹无法探出，所以构件或材料是难以避免带有裂纹进行工作的。

在材料或构件中并不是说有裂纹存在就会发生断裂，只有在一定条件下裂纹才能扩展、断裂。是否会发生断裂，除了与裂纹长度、外力大小等因素有关外，还与材料对裂纹的敏感性有关，即和材料对断裂的抵抗能力的大小（通过引入新的物理量——断裂韧度来表征）有关。断裂发生的三个主要因素：裂纹长度、载荷应力和材料的断裂韧度。其他的诸因素如温度、加载速率、应力集中、残余应力等只是影响上述的主要因素。断裂力学给出了发生断裂时三个主要因素之间应满足的定量关系式。

断裂力学抛弃了物体的连续性假设，而从物体中含有裂纹这一前提出发，以弹性力学和塑性力学为理论工具，确定含裂纹体裂纹尖端的应力场、位移场分布，据此找出决定裂纹扩展的物理量。同时，通过试验测定出材料抵抗裂纹扩展的能力，并建立两者之间的关系，即建立断裂的准则。

可见，断裂力学是一门解决工程断裂问题而产生的新型学科，它对传统设计思想、方法的不足和不合理提供了补充，从而成为现代工程结构安全设计的有效工具。

§ 1—2 断裂力学的发展

早在 1920 年英国物理学家 A. A. Griffith 应用热力学第一定律及第二定律，从能量角度出发，通过对玻璃丝的实际研究，认识到玻璃丝的实际强度比理论强度低 2~3 个数量级的原因在于其内部存在许多极细的微裂纹，正是裂纹的存在削弱了玻璃丝的强度。Griffith 认为：裂纹扩展释放出来的弹性应变能供给形成新裂纹所需要的能量，即当裂纹扩展所释放出来的能量等于或大于裂纹形成新表面所需要的能量时，裂纹开始失稳扩展。由于 Griffith 在这一领域的研究成果，他被誉为断裂力学之祖。

Griffith 的这一研究当时并未引起人们的重视，虽然当时断裂事故也很多，如常发生车轴断裂，钢桥断裂等事故，但大多数是由于材料本身的质量问题以及设计不良引

起的，通过改进冶炼技术减少夹渣等缺陷和改进材料的性能，通过合理设计以避免严重的应力集中，就使得断裂事故的发生得到了有效的控制，传统的设计思想仍然有效地发挥着作用。在二次大战期间及其以后的一段时间，随着高强度钢的应用和全焊接技术设计的引进，开始了一个结构破坏事故的新时期，这就促进了断裂力学的发展。

1950年 E. Orowan 和 G. R. Irwin 研究了材料的塑性对裂纹扩展的影响，使 Griffith 理论得到了完善 (Griffith 理论只适用于玻璃、陶瓷等脆性材料)。

1957年 G. R. Irwin 从裂纹尖端应力场出发提出了应力强度因子 (Stress Intensity Factor) 理论，使断裂力学的研究开始了新阶段。Griffith 理论 (简称 G 理论或 G 准则) 和 Irwin 提出的应力强度因子理论 (简称 K 理论或 K 准则) 一起构成了线弹性断裂力学的基本理论。30 多年来许多学者在计算应用等方面作了大量工作，使线弹性力学日趋完善。美国材料试验学会 (ASTM) 和美国国家宇航局 (NASA) 于 1964 年出版了一本系统的断裂力学的文集。1970 年提出了关于平面应变断裂韧性 K_{IC} 测试试验标准 (ASTM E399-70)，经过试行，1972 年公布正式标准 (ASTM E399-72)，标志着线弹性断裂力学形成，我国于 1978 年制定了《金属材料平面应变断裂韧性 K_{IC} 试验方法》(YB947-78)。

一般说来线弹性断裂力学仅适用于材料的韧性低、长裂纹的情况，而对于韧性好的中、低强度钢，以及小裂纹的情况，裂纹尖端处的塑性区足够大，线弹性断裂力学不再适用，必须采用弹塑性断裂力学。

通过对弹塑性断裂力学的广泛研究，提出的理论有 COD 理论和 J 积分理论。

1961年 A. A. Wells 提出了 COD 概念 (或 CTOD) (Crack Opening Displacement 或 Crack Tip Opening Displacement)。即认为：在有显著变形发生处，断裂过程主要由裂纹尖端的强烈变形所控制。裂纹张开位移可作为衡量裂纹扩展的尺度。当裂纹尖端的张开位移达到某一临值时，裂纹开始扩展。1967年~1971年英国海军部作了一系列试验，得出经验公式，1972年，英国标准学会 (BSI) 制定 COD 测试方案 (草)，即 BSI: DD19: 1972，供工程应用；1979年，英国公布 COD 试验正式标准，即 BSI: 5762: 1979。标志 COD 工程应用成熟。1980年我国制定了 COD 测试标准，即 GB2358-80《裂纹张开位移 (COD) 试验方法》，正式在我国工程界应用。

1967年 G. P. Cherepyov 首先引入 J 积分概念，但未引起工程界重视，1968年 J. R. Rice 明确提出 J 积分。J 积分是人为构造的裂纹尖端的一个能量积分，通过这一积分来研究弹塑性条件下的起裂问题，在此之后人们进行了大量的研究工作。各国制定了相应的 J_{IC} 积分测试标准。我国于 1980 年制定了 GB2038-80《利用 J_R 阻力曲线确定金属材料延性断裂韧度的试验方法》，它标志着我国工程界已接受 J 积分并将它应用于解决工程实际问题。

断裂力学发展至今，相对地讲，线弹性断裂力学比较成熟，理论简单，基础较牢

固，已经在某些工程问题中得到应用，但由于计算测试难度较大，所以距成为工程师的有效而方便的工具尚有距离。对于弹塑性断裂力学来说，虽然已在工程问题中应用，我国及国外的许多国家都制定了标准，但离完善程度还相差甚远，还包含着许多未知和揣测的成分，许多问题还有待于更深一步的研究，包括基础理论研究及工程实际应用方面。之外，还有一些主要的专门问题需要进行深入的研究，包括断裂动力学，复合材料断裂力学，断裂的宏观、微观相结合等，可见，断裂力学是处于发展中的一门新型学科。

§ 1-3 断裂力学的内容及目的

断裂力学是一门理论性、实践性都很强的学科。从断裂力学所涉及的学科来说，包括固体物理学、金属学、冶金学、化学、力学等。尤其要求要具有良好的数学基础（如微积分、复变函数、张量分析等）和力学基础（如材料力学、弹性力学、塑性力学等）。断裂力学是建立在试验的基础上的，如果没有试验基础，断裂力学就不可能发展和应用，而断裂韧性测试就是通过实验获得的。学以致用是任何一门学科的目标和宗旨，因此我们学习断裂力学正是为了解决工程实际中容器与设备的断裂问题。

对断裂的研究从模型上可以分为微观模型和宏观模型。微观模型本身可分为离子、原子、分子等不层同次，现今仅对晶体层次的模型进行了若干研究，下面所说的微观研究就是指的这种研究。宏观模型是指传统力学中采用的“微块”模型，宏观断裂力学就是建立在这种模型基础上。迄今为止，对宏观、微观这两种模型进行各自研究所采用的方法、得出的结论还统一不起来。宏观模型的研究结果和实践联系密切，实用性强，微观模型的研究基本上还处于纯理论阶段。

断裂力学本身包括线弹性断裂力学和弹塑性断裂力学两大方面。当研究的裂纹体，裂纹扩展前裂纹尖端若无塑性区，或虽然有塑性区，但塑性区范围尺寸较裂纹长度小得多，这可用线弹性断裂力学来解决。当裂纹尖端塑性区尺寸增大到与裂纹长度同一数量级或增大到更大，这就必须应用弹塑性断裂力学来解决。

断裂力学通过引入新的物理量和由它建立的准则，给出了全新的设计概念——断裂控制设计（用于静载）和损伤极限设计（用于交变载荷），允许含裂纹的构件在保证安全的前提下继续工作，这是对传统的设计方法的补充和发展，为结构的安全设计作出了贡献。通过对断裂力学的学习不仅可以进一步认识传统强度理论的应用条件及范围，而且能够设计出更合理、更安全的工程结构，更深刻地认识材料和结构的安全性。断裂力学之所以具有强大的生命力，很大程度上在于它在工程上的广泛应用。同时，断裂力学所阐述的概念和理论，对结构的选材、改进工艺、制定检验标准、评定结构的可靠性，对机械及设备的制造等方面都有重要的指导意义。

第二章 金属断裂的基本概念

金属的完全破裂称为断裂。金属断口是金属构件断裂后，破坏部分外观形貌的通称。由于金属材料中的裂纹扩展方向总是沿着最小阻力路线，因此一般也是材料中性能最薄弱、应力最大的部位。断口的结构与外貌直接反映了材料从出厂时的供应状态，到以后经受各种加工处理和使用条件（应力、温度、介质等）以及记录着裂纹的产生、扩展和断裂的全过程，是断裂后留下的可贵资料。因此断口是断裂原因分析的主要对象和断裂形态分析的重要依据。

§ 2—1 金属断裂的类型

一、按裂纹扩展的形态分类

按断裂的宏观变形量可分为脆性断裂和韧性（延性）断裂。

1、脆性断裂

脆性断裂在断裂前从宏观上几乎不发生显著的变形。断裂时构件的几何尺寸不变，断口平齐，断裂后把断裂构件的两个断口对接时吻合良好。脆性断口与正应力垂直，它的一个形态是沿特定的晶界（解理面）劈裂而断裂的解理断裂，所以断口具有明亮的光泽。另一种脆性断裂是沿晶界的断裂，断口上常呈现出冰糖似的结晶颗粒。此外，断口上常有人字纹或放射花样。脆性断裂是一种突然发生的断裂，断前没有预兆，具有较大的危害性。脆性断裂具有以下特点：

(1) 破坏时承受的工作压力较低，通常低于材料的屈服强度，大多不超过按常规设计方法所确定的许用应力。所以此种断裂又称为低应力脆断。

(2) 脆性断裂总是从材料或构件内部存在的宏观裂纹开始的。由于材料或结构在各种制造工艺过程中不可避免的产生这样或那样的缺陷，以及产生各种应力集中，从而在缺陷或应力集中处产生裂纹。在一定条件下，裂纹会发展，最终导致突然断裂。

(3) 脆性断裂一般发生在高强度钢及厚的中低强度钢，脆断发生时的温度较低。

(4) 脆性断裂的断口平齐而光亮，且与正应力垂直。断口附近的截面在厚度方向上的收缩很小，一般不超过 3%。

2、韧性断裂

韧性断裂从宏观上看，断裂前发生显著的塑性变形，断裂构件的几何尺寸发生显著的变化，断口对接时不能很好的吻合，韧性断裂的断口分为垂直于正应力的断口和倾斜正应力的断口，前者是构件材料内部平面应变状态下的韧性断裂，用肉眼和低倍数显微镜观察时，断口上有细小的凹凸，呈暗灰色，纤维状；后者是在剪应力下或在平面应力状态下，沿剪切应力最大的方向（45度方向）的剪切断裂，断口是倾斜的。

韧性断裂和脆性断裂的显著区别在于裂纹扩展的行为不同。在脆性材料中，当达到临界应力时，则裂纹失稳扩展，直至完全破坏。在韧性材料中，随着应力的增加，裂纹不断缓慢扩展，直至达到临界应力时裂纹失稳扩展。

韧性断裂和脆性断裂只是相对的概念，因为在实际载荷下，同一种材料会由于温度、应力、环境的不同，表现为不同的断裂类型，如，高的应变速率、三维应力状态以及低温条件等因素都能使正常情况下的韧性材料处于脆性状态。

二、按裂纹扩展路径分类

按裂纹扩展所走的路径和显微组织的关系可分为穿晶断裂和沿晶断裂。

1、穿晶断裂

穿晶断裂是裂纹穿过组织的晶粒内部或相的内部所发生的断裂。穿晶断裂有的是以解理形式(原子键的简单拉断)穿过晶粒，有的则以滑移和空洞的方式穿过晶粒。穿晶断裂依其断裂方式又可分为解理和剪切。解理断裂是一种在正应力作用下所产生的穿晶断裂，通常沿一定严格的晶面，即解理面分离，但也可以沿滑移面或孪晶界分离。解理断裂多见于体心立方、密排立方金属及合金，特殊情况下，面心立方金属，如铝也能产生解理断裂。低温、应力集中、冲击有利于解理断裂。通常，解理断裂大多是脆性断裂。但有时在解理断裂前也呈现很大的延性，所以不能把解理与脆性断裂二者等同起来。穿晶断裂如图 2 - 1

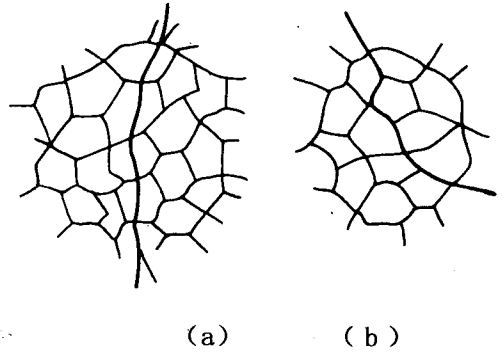


图 2 - 1 裂纹扩展路径

(a) 所示。

2、沿晶断裂

沿晶断裂(晶间断裂)是裂纹沿着组织的晶界或相界扩展所发生的断裂。沿晶断裂通常是由于晶界存在着脆性相、应力腐蚀、氢脆或回火脆性等原因引起的。沿晶断裂通常多属于脆性断裂，但也有属于韧性断裂的，如高温蠕变断裂等。沿晶断裂如图 2 - 1 (b) 所示。

除上述分类方法外金属的断裂还有剪切断裂，即在剪应力作用下，沿滑移面滑开而造成的断裂。它有两类，一类称为滑断或纯剪断，一般发生在纯单相金属中，特别是纯单晶体中，断裂滑移面与最大拉应力成 45 度角，另一类是微孔聚集性断裂，多见于钢铁等工程结构材料。在外力作用下，因强烈滑移、位错堆积在局部地区，产生许多微孔洞；或因为夹杂物破碎、夹杂物和基体金属界面的破碎而造成微孔洞。这种孔洞在切应力作用下不断长大、聚集，并产生更大的微孔洞，最终导致整个材料的破坏。

§ 2-2 断口的分析方法

金属断口分析分为宏观分析和微观分析两种。断口分析指的是用肉眼、放大镜来研究断口特征的方法，它是断口分析过程的第一步，是整个断口分析的基础。通过宏观断口分析，可以确定金属断裂的性质，即是脆性断裂、韧性断裂还是疲劳断裂；通过宏观断口分析还可以判断材质的质量，但断口宏观分析的结果还需要进一步深化，即需要采用断口微观分析。断口微观分析可以观测断口的细节、研究裂纹萌生和扩展的机理。因而断口分析的目的是：

- (1) 判断裂的性质，分析、找出破坏的原因；
- (2) 研究断裂的机理；
- (3) 提出防止断裂事故的措施。

断口宏观分析和断口微观分析是整个分析的两个阶段。断口微观分析是断口宏观分析的进一步深化，两者之间相辅相成。

一、断口的宏观分析

在实际断裂事故及断裂实验中，通过对断口的宏观分析发现，尽管材料不同，断裂方式不同，但从断裂方式来看，断口通常呈现三个区域，即纤维区、放射区及剪切唇，这就是通常提到的断口三要素，分别以 F、R、S 表示。图 2-2(a)、(b) 分别为无缺口拉伸试件和冲击试件断口的断口区域示意图。

纤维区呈粗糙的纤维状，它是断裂的开始区，裂纹源在这个区域产生。在应力作用下材料内部的晶界、某些夹杂物等有缺陷的地方产生微孔洞或微裂纹，最终导致产生宏观裂纹，发生断裂。纤维区是韧性断裂区。

放射区呈放射花样，放射区是裂纹扩展区，该区与纤维区相邻。纤维区和放射区的交界标志着裂纹由缓慢扩展向快速扩展的转化。对放射区来说，构件的形状不同，放射区的放射花样也同，如图 2-3 所示。放射方向与裂纹扩展方向一致，并逆指向裂纹源，放射区是脆性断裂区。

剪切唇表面比较光滑，与应力轴约呈 45 度角。剪切唇是裂纹扩展的最后阶段，剪切唇也是裂纹快速不稳定扩展的区域，按照断裂力学的观点，它是在平面应力条件下发生的不稳定扩展。剪切唇也是韧性断裂区。

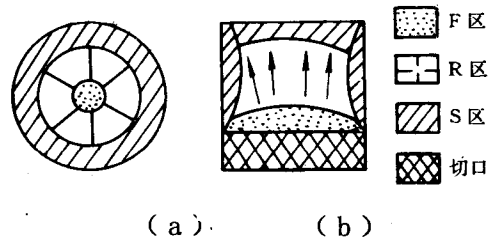


图 2-2 断口区域示意图

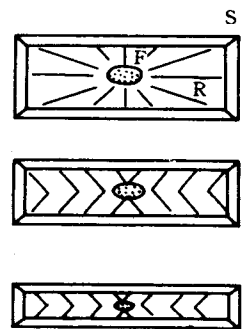


图 2-3 放射区示意图

需要指出的是，疲劳断口与上述静载下断口的宏观特点不同。疲劳断口宏观特点是贝纹花样，它是疲劳裂纹扩展留下的痕迹。贝纹线从疲劳核心开始，呈弧状向外推进，如图 2-4 所示。疲劳裂纹的扩展方向与最大拉应力相垂直。最终断裂区是疲劳裂纹扩展达到临界尺寸后产生快速破断而形成的，呈现剪切唇或放射花样。

通过断口的宏观分析可以判断该种断裂是疲劳断裂还是静载下的断裂，即如果存在贝纹花样，则表明构件是疲劳断裂。

通过断口的宏观分析可以大致估计断裂性质，即脆性断裂还是韧性断裂。一般情况下，材料韧性好，纤维区占的面积较大，甚至没有放射区，全是纤维区和剪切唇。当材料脆性增大，放射区增加，纤维区减小，甚至不存在纤维区和剪切唇，并且放射区的花样很细小，变的不明显和呈现别的特征。同时根据

断口的粗糙程度、光泽和颜色也可大致估计断裂的性质，断口越粗糙，颜色越灰暗，表明裂纹扩展过程中塑性变形越大，韧性断裂的程度越大，反之断口细平、光泽，则脆性断裂所占的比重大。

通过断口的宏观分析可以找到裂纹源的位置，即根据放射花样或人字纹的走向（逆指向裂纹源），确定裂纹源的位置。

二、断口的微观分析

断口的微观分析是进一步深化断口宏观分析的结果，研究断裂发生的机理，了解引起断裂的原因。

断口的微观分析工具是电子显微镜，简称电镜。电镜分为透射电镜和扫描电镜。在使用透射电镜时，由于电子只能穿透 80 ~ 100nm 的材料，必须将断口的形貌制成一个薄的电子可穿透的复型。扫描电镜是用一束极细的强电子束在断口表面上扫描，断口表面将由于初级电子的激发而发射二级电子，示波器上就会显现这些二级电子所构成的断裂表面的图象。因此应用扫描电镜可以直接观察断裂表面。电镜的分辨率高，可达 1nm 以内，放大倍数可达 5 ~ 80 万倍（通常断口分析用到 2000 ~ 4000 倍即可得到满意的结果）。

透射电镜最大的优点是分辨率比扫描电镜高，成相、照相质量好，不必破坏断口，可在现场制作复型，然后带回观察研究。其缺点是不能直接对断口进行观察，同时由于复型断口型貌容易失真，无法定点选区，也不可能低的放大倍数下进行观察（最低放大倍数为 1000 倍）。

扫描电镜的优点是能对断口进行直接观察，形貌真实，有立体感，可以选定区域进行观察并能逐次增加或减小放大倍数以利于观察，其缺点是分辨率较透射电镜低。

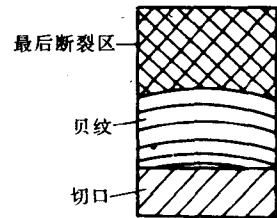


图 2-4 疲劳裂纹断

根据断口的微观分析可将断裂类型分为解理断裂、韧窝断裂和疲劳断裂。

解理断裂是一种穿晶断裂，是在某个特定的结晶面上，因原子键的简单破裂而发生的断裂。它是发生在结晶材料中最脆的一种断裂形式，尤其当材料的使用温度低于其无脆性转变温度或在高的应变速率的情况下，发生这种断裂的可能性增加。解理断裂在一个晶粒内部

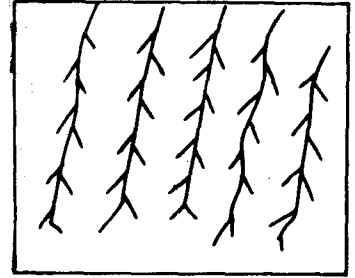


图 2-5 解理断裂示意图

裂纹具有一定的平直性，当裂纹达到晶界处由于晶界的影响，裂纹改变方向，所以解理断口是由许多取向略有差别的光滑小平面对组成，每组小平面对代表一个晶粒。小平面的反光性能好，所以解理断口有闪光，这是解理断口的一个特征。一个晶粒内会发生多个平行的裂纹，它们结合相交会产生“解理台阶”，这种小台阶也会汇成大台阶，从而形成河流花样，如图 2-5 所示。河流花样是解理断口的重要特征，根据河流的走向可以确定裂纹走向，即由上游走向下游。解理断口除河流花样外有时还会出现舌状，鱼骨状花样。

韧窝断裂是韧性断裂，它最主要的特征是存在韧窝，这是由于材料在断裂过程中会伴有大的塑性变形，需要消耗较大的能量。它也是属于穿晶断裂，但它的机理与解理断裂不同。它的产生是由于金属材料中存在着不同尺寸的第二相粒子，如金属的氧化物、碳化物和氮化物，这些二相粒子与金属本身的弹性系数不同。当金属发生塑性变形时，由于变形的不协调，粒子和基体之间就会产生出空穴，随着应力、应变的增大，孔穴增加、长大、聚集，贯穿直至发生断裂。每一个空穴就是一个韧性窝坑，在每个韧坑的上断口或下断口处会找到一个粒子。断口表面成粗糙的不规则状，根据受力的不同会形成不同形状的韧窝。

疲劳断裂的主要特征是在裂纹扩展区呈贝纹状花样（或称年轮花样、海滩花样），有时用宏观方法观察不清，用微观方法才呈现清楚。贝纹的条纹基本平行，但略带弯曲，呈波浪状，条纹线与裂纹断开方向垂直，每条条纹代表一次载荷过程，条纹总数就是循环次数，上、下断口的纹路完全对应。