

目 录

第一章 引言与综述

1.1 现代断裂力学的理论及其应用	(2)
1.1.1 断裂事故的后果.....	(2)
1.1.2 断裂力学和材料力学.....	(5)
1.1.3 线弹性断裂力学的基本用途.....	(7)
1.1.4 线弹性断裂力学的各种关系.....	(9)
1.1.5 一些断裂力学的应用实例.....	(12)
1.1.6 处理复杂结构/裂纹的方法.....	(13)
1.1.7 损伤容限评估.....	(15)
1.1.8 规范要求.....	(17)
1.2 断裂力学的起源	(19)
1.2.1 结构设计的发展.....	(19)
1.2.2 Griffith理论.....	(21)
1.2.3 Griffith理论的某些困难.....	(23)
1.2.4 断裂力学的起源.....	(24)
1.2.5 应力强度因子.....	(25)
1.2.6 断裂的原子模拟.....	(28)
1.3 断裂力学基础	(30)
1.3.1 亚临界裂纹扩展.....	(30)
1.3.2 纤维增强复合材料.....	(33)
1.3.3 橡胶材料.....	(34)
1.3.4 断裂力学中的数值方法.....	(35)
1.3.5 裂纹的快速扩展.....	(35)
1.3.6 动态裂纹的止裂.....	(37)
1.3.7 统计断裂力学.....	(40)
1.4 非线性研究	(41)
1.4.1 简单的裂纹尖端塑性模型.....	(41)
1.4.2 COD法的起源.....	(42)
1.4.3 COD法的扩充.....	(43)

1.4.4 J 积分	(45)
1.4.5 共线的窄条屈服模型	(46)
1.4.6 其他窄条屈服模型	(47)
1.4.7 弹性断裂力学的起源	(48)
1.4.8 不稳定断裂理论	(50)
1.4.9 非线性条件下裂纹扩展准则	(51)
1.5 非线性和动态处理的必要性	(53)
1.5.1 热冲击问题	(54)
1.5.2 劣化的核电管道	(57)
1.5.3 裂前渗漏的条件	(58)
1.6 断裂力学的现状及前景	(60)
1.7 参考文献	(62)

第二章 固体力学基础

2.1 应力分析	(70)
2.1.1 平衡方程	(71)
2.1.2 主应力	(73)
2.2 应变分析	(74)
2.2.1 应变张量	(74)
2.2.2 相容方程	(75)
2.3 弹性	(76)
2.3.1 应变能密度	(76)
2.3.2 线弹性材料	(76)
2.3.3 余应变能密度	(77)
2.3.4 弹性边值问题	(78)
2.3.5 橡皮弹性体	(78)
2.4 能量原理	(79)
2.4.1 虚功原理	(79)
2.4.2 势能	(79)
2.4.3 余势能	(80)
2.5 粘弹性	(81)
2.5.1 线性粘弹性材料	(81)

2.5.2 简单的热流变材料	(84)
2.5.3 对应原理	(85)
2.6 弹塑性	(86)
2.6.1 屈服准则	(86)
2.6.2 塑性增量理论	(88)
2.6.3 塑性形变理论	(90)
2.6.4 刚塑性材料	(91)
2.7 粘弹塑性	(93)
2.8 参考文献	(97)

第三章 线弹性断裂力学

3.1 线弹性裂纹尖端场	(98)
3.1.1 反平面问题	(98)
3.1.2 平面问题	(101)
3.1.3 断裂准则	(103)
3.2 应力强度因子	(104)
3.2.1 封闭形式的解	(105)
3.2.2 数值法	(109)
3.3 裂纹体能量	(113)
3.3.1 能量释放率	(113)
3.3.2 J -积分	(116)
3.3.3 其他不变的积分	(120)
3.4 塑性区和断裂韧性	(122)
3.5 平面应力断裂和 R-曲线	(129)
3.6 参考文献	(134)

第四章 动态断裂力学

4.1 动态裂纹扩展和止裂概念	(137)
4.1.1 基本定义和术语	(138)
4.1.2 裂纹扩展速度的准静态分析	(139)
4.1.3 动态裂纹扩展分析	(144)

4.1.4	裂纹分叉	(146)
4.1.5	裂纹止裂的早期看法	(147)
4.1.6	弹性动态断裂力学基础	(152)
4.1.7	裂纹止裂方法	(155)
4.1.8	动态断裂力学的非线性观点	(160)
4.2	动态断裂力学的数学基础	(162)
4.2.1	弹性动力学裂纹尖端场	(162)
4.2.2	能量释放率	(165)
4.2.3	弹性动态回路积分	(168)
4.3	一些简单结构的分析	(169)
4.3.1	双悬臂梁试件	(169)
4.3.2	双扭试件	(173)
4.3.3	增压管道中的轴向裂纹扩展	(175)
4.3.4	稳态裂纹扩展	(178)
4.3.5	窄条屈服模型的应用	(179)
4.4	动态断裂力学的应用	(181)
4.4.1	裂纹扩展实验	(181)
4.4.2	动态裂纹扩展分析	(187)
4.4.3	动载荷作用下裂纹的起裂	(188)
4.4.4	终段弹道学和碎裂	(189)
4.5	参考文献	(192)

第五章 弹塑性断裂力学

5.1	Dugdale 模型	(198)
5.2	反平面弹塑性解	(206)
5.3	裂纹尖端的塑性场	(211)
5.3.1	I 型场	(213)
5.3.2	断裂准则	(217)
5.4	塑性断裂工程计算法	(219)
5.4.1	全塑性解	(219)
5.4.2	估算法	(221)
5.4.3	硬化失效评估图	(224)

5.4.4 其他估算法	(226)
5.5 J 积分试验	(227)
5.5.1 单试件试验	(228)
5.5.2 标准的 J_{Ic} 试验法	(231)
5.6 J 主导和 J 控制裂纹扩展	(234)
5.7 J 控制裂纹扩展的稳定性	(239)
5.7.1 撕裂模量	(239)
5.7.2 η 因子	(242)
5.7.3 示例	(246)
5.7.4 硬化化材料的撕裂不稳定性	(247)
5.7.5 应用	(251)
5.8 持续裂纹扩展	(257)
5.8.1 裂纹尖端张开角	(258)
5.8.2 扩展裂纹渐近场	(261)
5.8.3 理论和试验对比	(265)
5.8.4 持续裂纹扩展的 J 积分	(267)
5.9 结束语	(270)
5.10 参考文献	(271)

第六章 纤维增强复合材料的断裂力学模型

6.1 初步见解	(275)
6.1.1 分类和术语	(276)
6.1.2 基本力学性能	(277)
6.1.3 各向异性断裂力学	(278)
6.1.4 关于断裂力学应用的基本见解	(280)
6.1.5 微观机理断裂过程	(281)
6.2 线弹性断裂力学分析模型	(284)
6.2.1 裂纹长度修正及其他简单模型	(285)
6.2.2 计及非自相似裂纹扩展模型	(285)
6.2.3 统一的临界应变模型	(286)
6.2.4 复合型断裂模型	(287)
6.2.5 前景	(289)

6.3 非线性断裂力学分析模型	(290)
6.3.1 连续体模型	(290)
6.3.2 混合模型	(292)
6.3.3 有限元模型	(296)
6.4 有关专题	(296)
6.4.1 胶结断裂力学	(297)
6.4.2 纤维脱丝模型	(299)
6.4.3 加速特性	(300)
6.5 参考文献	(302)

第七章 时间相关的断裂

7.1 静态裂纹尖端场	(306)
7.1.1 第二阶段弹性蠕变	(307)
7.1.2 第一阶段弹性蠕变	(313)
7.1.3 第一阶段-第二阶段蠕变	(315)
7.1.4 第一阶段塑性蠕变	(317)
7.1.5 弹性指数硬化蠕变	(318)
7.1.6 ΔT_c 积分	(319)
7.2 蠕变裂纹扩展	(321)
7.2.1 第二阶段弹性蠕变裂纹场	(321)
7.2.2 稳态裂纹扩展	(326)
7.2.3 瞬态裂纹扩展	(328)
7.2.4 第一阶段弹性蠕变裂纹场	(330)
7.3 蠕变裂纹扩展关系式	(331)
7.4 粘弹性裂纹扩展	(338)
7.4.1 凝聚断裂模型	(339)
7.4.2 实验对比	(342)
7.5 结束语	(344)
7.6 参考文献	(346)

第八章 疲劳裂纹扩展的某些非线性方面

8.1 疲劳裂纹扩展预测的基本见解	(349)
8.1.1 等幅疲劳裂纹扩展关系	(349)
8.1.2 载荷相互作用效应	(352)
8.1.3 裂纹闭合概念	(354)
8.1.4 闭合论述	(357)
8.2 关于疲劳裂纹扩展的理论模型	(357)
8.2.1 Budiansky和Hutchinson模型	(358)
8.2.2 斜条带屈服模型	(361)
8.2.3 疲劳中的短裂纹问题	(367)
8.2.4 焊接处疲劳裂纹的扩展	(369)
8.3 参考文献	(373)

第九章 断裂力学资料来源

9.1 技术杂志	(377)
9.2 会议文集	(379)
9.3 标准	(380)
9.4 学位论文	(380)
9.5 文摘性期刊	(380)
9.6 进展综述	(381)
9.7 手册	(381)
9.8 专题论文	(381)
9.9 教科书	(381)
9.10 参考文献	(383)

附录A 全塑性解汇编

A.1 紧凑拉伸试件	(384)
A.2 中心裂纹板条	(386)
A.3 单边切口试件	(387)
A.4 双边切口试件	(389)
A.5 含轴向裂纹的压力圆筒	(391)
A.6 含圆周裂纹的圆筒	(393)

索 引

应力换算系数

	兆帕	千磅/英寸 ²	公斤/毫米 ²
1兆帕(牛顿/毫米 ²) =	1	0.1450	0.1019
1千磅/英寸 ² =	6.895	1	0.7031
1公斤/毫米 ² =	9.807	1.4223	1

应力强度因子换算系数

	兆帕米 ^{1/2}	千磅/英寸 ^{3/2}	牛顿/毫米 ^{3/2}	公斤毫米 ^{3/2}
1兆帕米 ^{1/2} =	1	0.910	31.62	3.224
1千磅/英寸 ^{3/2} =	1.099	1	34.75	3.542
1牛顿/毫米 ^{3/2} =	0.3162	0.02876		0.1019
1公斤/毫米 ^{3/2} =	0.3102	0.2823	9.807	1

第一章 引言与综述

任何工程结构都不可避免有类似裂纹的缺陷存在。但在这同时,不断增长地对能源和材料的节省要求却希望结构设计具有较小的安全系数。因而,对结构损伤容限的定量精确分析愈来愈成为防止各类承载设备发生断裂的主要任务。当然并非一直如此,保守的设计方法在防止灾难性事故方面一直是卓有成效的。它的主要内容是避免大的应力集中,同时把发现裂纹的零件立刻进行维修或退役处理。然而,目前出现了两个重要的因素否定了这种传统方法。

首先,先进的无损检测(NDE)方法将从前被忽视的缺陷检测出来。其次,裂纹状缺陷的存在并不一定意味着结构零件已经达到(甚至接近)它的使用寿命。因此,修理或更换零件的费用与零件继续使用而导致失效的可能性之间是可以分析比较的。一个新的工程概念即损伤容限已经发展起来,为这个目的提供了定量的指导。而损伤容限在很大程度上是建立在断裂力学基础上的。本书将要阐明,断裂力学虽然不是评定结构完整性的唯一标准,但它起着中心角色的作用。

有关断裂的问题显然要追溯到古代,而许多这方面的研究没有文字记载。但是的确有一些早于我们这个时代的学术研究,这可见 Gordon 的著作(1.1)。象 Timoshenko 在《材料力学历史》(1.2)中介绍的(也可在 Irwin 的回顾文章(1.3)中见到),15世纪达·芬奇曾做过测定铁丝强度的试验。他发现在恒定直径的情况下,铁丝的长度与断裂的载荷成反比。这一结果会被理解为强度与铁丝的长度有关,除非我们推测出裂纹的存在决定着断裂时的应力大小,也就是说,被试验材料的体积越大,存在长裂纹的可能性就越大。考虑到那个时代铁丝的质量,这个结论就更有说服力了,尽管它没有定量的在性质上反映这种可能性。以裂纹扩展为基础的断裂力学需要有应力和应变的数学概念,而这些概念直到19世纪才由 Cauchy 和其它一些伟大的法国数学家和工程师提出(1.4)。

A. A. Griffith 首先提出将强度与裂纹长度定量地联系在一起(1.5)。因此,做为一种可能性,断裂力学可追溯到1922年。然而,许多人都认为断裂力学在很大程度上是一门工程学科,而非仅仅只是一种科学上的好奇,诸如 George Irwin 在二次世界大战后数年里所作的基础性贡献就说明了这一点。所以,我们认为断裂力学应该从1948年开始。在这一年, Irwin 发表了他的第一篇经典文章(1.6)。

由于紧接在 Irwin 之后的研究工作几乎全部集中在非线性断裂力学上,这就表现出断裂力学发展历史上的第二个明显的分界点。该分界点的产生是与引入处理非线性问题的基本概念有关的,产生时间可认为在1968年。在这一年里, J. Rice 提出了他的 J 积分(1.7),并且由 J. W. Hutchinson(1.8)说明了如何利用这一概念来避免直接描述与裂纹扩展有关的非线性及奇异性问题。我们把超出线性断裂力学的用来处理非线性及动力学问题的方法和理论统称为高等断裂力学。

就象我们的书名所暗示的那样,本书主要重点将放在非线性及动力学问题方面。这些方面需要有超出目前通用的分析方法。为了将整个内容分阶段地阐述,本章作为一个综述性的章节,其目的在于为那些从前不熟悉断裂力学的读者提供一个引论。在写作上,我们力图使它容

易为熟悉应力应变基本概念(即读过大学本科《材料力学》课程)的人所理解。本章第一节介绍了当前技术的应用,紧接后四节从历史的观点介绍了断裂力学。倒数第二节中,叙述了一些当前普遍感兴趣而用通常的线弹性断裂力学理论又不能完全满足要求的实际问题。最后,用一个探讨性的小节给出了我们自己对断裂力学理论及其应用的意见。

1.1 现代断裂力学的理论及其应用

断裂力学是一门工程学科,它基本上是从应用力学和材料科学中抽出来的(大致同比例)。就它最基本的形式而言,它可用来解决有关确定带有不同尺寸和不同位置的裂纹构件的(实际的或假想的)最大承载能力的问题。然而,它也可以用来预测在疲劳或环境影响的作用下,裂纹扩展到临界尺寸的扩展速率,以及确定制止裂纹快速扩展的条件。近几年发展起来的损伤容限设计方法现在已经进入实用,这样就能够有效地利用材料的一些性能,而没有这种方法的话,这些性能基本上限于线弹性范围。

实际问题中,在有些情况下,大区域弹塑性或随时间相关变形可能是先于断裂发生的,这时,线弹性断裂力学的方法就普遍不适用了。但是目前在这方面已有现成的程序,而且也能处理更为复杂的情况,诸如焊接开裂及其它有残余应力存在的问题,象纤维加强复合材料那样的各向异性材料以及粘性和其它粘弹性材料。然而,如果不了解现代断裂力学应用的方法,就不大可能接受这些先进的工作。基于这种想法,我们以描述现代断裂力学及其应用做为本书的开始。为了与贯穿全书的方法相一致,我们将用应用力学的观点来描述。

1.1.1 断裂事故的后果

本书的读者一定已经对断裂力学有一些特定的兴趣,并且,毫无疑问对断裂在实际中的后果也有普遍的了解。尽管如此,给出一些断裂事故的图例可能还是有益的。首先,图1.1、1.2和1.3取自Burdekin(1.9)的文章,它们展示了一个由类似裂纹的缺陷引起结构灾难性断裂事故的事例。象这样的结构失效照片并非少见,这几张照片具有的独到之处是,引起断裂的缺陷被特别地指出来了。这些缺陷与断裂的结构一起被展现在图1.1、1.2和1.3中。在这三种情况下,均可看到其初始缺陷不是很大,可以设想它们是能够在失效发生前很好地被检测出来的,于是应用断裂力学可推演出该结构的危险程度。显然它们的情况并非如此。

象照片所示的与工业事故相关的由于断裂所带来的损失是不易确定的。它可能只取决于更换零件的费用以及对年产量造成的暂时性损失。但是,在其它一些例子中,生命的损失和附近设备的财产损失就使以上的费用变得微不足道了。也许最令人瞩目的事故是1944年Cleveland发生的液化气罐的灾难性大破裂。图1.4展示了工厂周围的破坏情况。在图片中心附近还可见到破裂后的容器及原来其它四个容器中的两个。

据Atallah(1.10)报道,79座房屋,2个工厂以及大约217辆汽车在这次事故中彻底毁坏。另外还有35座房屋和13个工厂遭到严重破坏。各类财产总损失达600到700万(1944年)美元。事件的后果显然与最初的容器破裂有关,破裂的容器使大量的液化气泄出,接着液体气化并且由于某种原因被点燃了。据Atallah记载,当气体被点燃时,事故最严重的是液化气容器的大火和随之而来的爆炸,它使130人丧生,300人重伤。由图1.4可看到破坏后的残景,不难想象事故是十分严重的。



图1.1 由一个焊接裂纹引起的核电站锅炉失效

Cleveland液化天然气罐失效事故的起因一直未查明。但是，人们认为可能是由于焊接缺陷接着疲劳裂纹扩展所引起。疲劳裂纹扩展可能是由于重载的铁路运输及附近许多锻压工厂产生的振动和冲击造成的(1.10)。与此相对应的可能性是气罐材料——低碳3.5%镍合金钢——在250°F使用温度下韧性太差。

1982年，国家标准局(NBS)委托了一项有关由所有断裂事故直接或间接地对美国经济造成损失的研究。这项研究由Duga等(1.11)进行，不出所料，研究结果表明这个损失费用的确是很高的。随同对所有断裂事故造成的直接和间接损失的研究，他们还得出由于材质不均匀而进行结构的过保守设计，以及对结构实行检查、修理和更换降质材料等所需要的大概费用。这项花费大约每年1200亿美元。可以设想一下，在整个世界范围内这种花费是多么惊人，而且随着我们社会的日益综合化，对于结构完整性更加依赖，那么未来这种花费又将是多少呢？

NBS研究工作的一个有趣的特点是对可能的费用节省也作了估计。它指出,如果将当今所有最先进的断裂控制技术应用于实践中的话,大约每年可节省350亿美元(约为美国这项花费总数的30%)。如果应用今后可能指望产生的更新的知识,则另外还有280亿美元(约占23%)可以节省下来。无论怎样看待这些估计,有一点已相当清楚,即断裂是一个严重的问题,有许许多多的工作需要去做。考虑到断裂力学是一门较新的工程学科,所以不必为许多结构设计者、金相专家、无损检测人员和其它一些与结构完整性有关的工程师还没有将断裂力学做为可以应用而且应该应用的工程工具而感到惊奇。

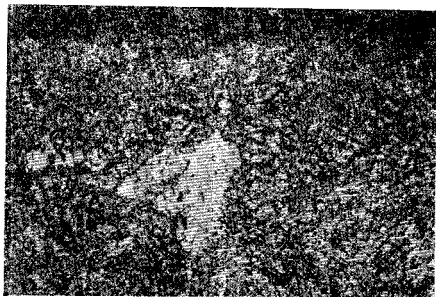


图1.2 由热影响区裂纹引起的氮化器失效



图1.3 由一个表面裂纹引起的电站锅炉失效

1.1.2 断裂力学和材料力学

在所有结构工程师所熟悉的材料力学方法中，问题总是针对一个具有特定几何形状的结构(假定是没有缺陷的)来确定它的承载能力。要完成这一工作，首先要计算确定出外载荷与结构中最大应力的关系，然后将这样得到的最大应力与材料的强度相比较，加上适当的安全系数，当最大应力小于材料强度时，就认为设计是合理的。这种方法与断裂力学的相似之处可从图1.5看出。

在图1.5 (a) 的简单结构中，固支悬臂梁长度为 L ，梁高度为 H ，厚度为 B ，在自由端

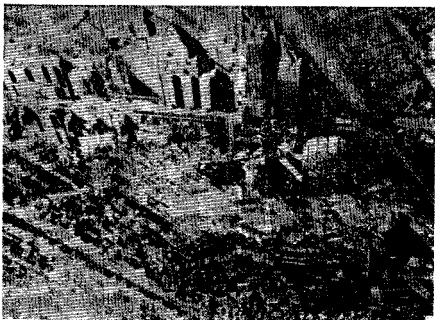


图1.4 破裂的液化天然气贮存罐附近的一片废墟

地下管道爆炸着检修孔盖冲上天空。剧烈的地下爆炸掀起了整个街道路面，房屋被毁坏，水气管道被炸裂，几百家商店的橱窗玻璃和居民住宅玻璃被震碎……爆炸时的火球高度达2800英尺（据估计），甚至有被烤熟的鸟从天上掉下来。

有载荷 W ，如图1.5(b)所示。最大拉应力作用于固端最外层纤维上，它与外载荷及构件尺寸的关系为：

$$\sigma_{max} = \frac{6WL}{BH^2} \quad (1.1-1)$$

可以假定，只要 σ_{max} 不超过材料的屈服极限 σ_y ，结构就不会失效。因此，对于尺寸已确定的梁， W 必须足够小以满足方程(1.1-1)的右边小于 σ_y 。为了保证这一点，引入安全系数 S 来应付材料性能的分散性及意外的工作过载。利用式(1.1-1)，当 σ_{max} 小于 σ_y/S 时有：

$$W < \frac{BH^2}{6SL} \sigma_y \quad (1.1-2)$$

于是结构至少在材料力学的观点上是安全的。

现在再来考虑这样一个梁，它不是毫无缺陷的，而是含有一个裂纹。进一步可假设裂纹位于最大的应力发生处，如图1.5(c)所示。就象以后将要仔细讨论的那样，当有裂纹存在时，控制结构力学特性的参数至少在线性理论中是客观存在的，它被称为应力强度因子。这个参数通常记为 K ，可由类似于在无裂纹件上计算应力的数学方法确定出来。对于较小尺寸的裂纹，分析图1.5(c)这样带裂纹的梁可得出较理想的近似解

$$K = 1.12\sigma_{max}\sqrt{\pi a} \quad (1.1-3)$$

其中 a 为裂纹长度， σ_{max} 为无裂纹时裂纹处的应力。

断裂力学中的基本关系是让 K 等于一个临界值。这个临界值通常为材料性能常数，称为平面应变断裂韧性，一般记做 K_{Ic} 。当 K 达到与 K_{Ic} 相等时，认为裂纹失稳扩展。因此，保证

K 小于 K_{Ic} 就可以将结构设计得安全可靠。由 $K < K_{Ic}/S$ 可得到进一步的保证。这里与材料力学的方法一样, S 为安全系数。利用式 (1.1-1) 来代替式 (1.1-3) 中的 σ_{max} , 可得

$$W < \frac{BH^2}{6SL} \frac{K_{Ic}}{1.12\sqrt{\pi a}} \quad (1.1-4)$$

这便是用断裂力学计算出的安全载荷。

比较式 (1.1-2) 和 (1.1-4) 是很有意义的。可看出结构几何尺寸和安全系统在两式中的作用是完全相同的, 即通过因子 $(BH^2/6SL)$ 加入式中。另外, 两式都包含有一个基本材料性能常数, 尽管它们有所不同。这两个式子本质上的差别是: 断裂力学的方法明确地引入了一个新的物理量——类似裂纹缺陷(真实或虚设)的尺寸。在断裂力学中裂纹的尺寸是一个决定性参数, 正是由这个特别的参数将断裂力学与传统的失效分析区分开来。

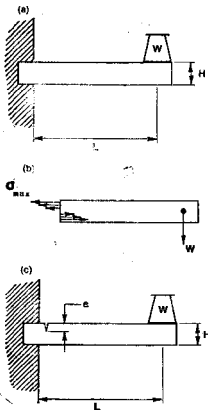


图1.5 材料力学与断裂力学的基本方法比较: (a) 无缺陷的悬臂梁。
(b) 无缺陷梁的拉伸应力分布。
(c) 带裂纹的梁

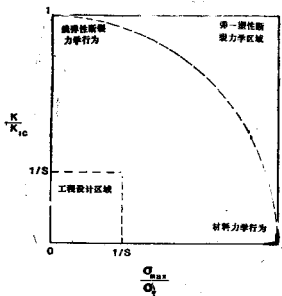


图1.6 断裂力学给出的广义工程结构完整性评估

1.1.3 线弹性断裂力学的基本用途

图1.6根据失效边界描绘出了断裂力学作为工程结构完整性评估基础的广泛意义。显然, 断裂力学并不排除传统的方法, 当结构使用韧性相当高的材料 (K_{Ic} 很大), 并且只有很小的裂纹 (K 很小) 时, 则处于材料力学的适用范围。相反, 如材料是脆性的 (K_{Ic} 低) 且强

度 (σ_r) 很高, 这时即使有很小的裂纹存在也有可能引起断裂。所以这时断裂力学的评估是最关键的。

然而, 断裂并非结构失效的唯一形式。在图1.5的例子中, 悬臂梁的自由端过大的挠度也在某些应用中被视为失效, 即便这时梁仍然可以承受一些载荷。因此, 只能说在有类似裂纹缺陷存在的情况下, 断裂可能是最令人关心的问题。

注意这里“裂纹”和“缺陷”似乎是可交换使用的, 但是所有裂纹都可以认为是缺陷而非所有缺陷就一定是裂纹。区别就在于尖端“锐”的程度, 作为裂纹的缺陷在尖端具有非常小的曲率半径。显然容许缺陷不是裂纹, 但除非有明确的事实说明这点, 才能慎重下此结论。

尽管这有点与我们本节主要目的有偏离, 但图1.6右上角的区域所示的特殊情况还是值得注意的。在这一区域中, 带裂纹的结构在裂纹扩展前将经历大范围塑性变形。这时, 我们一直在讨论的线弹性处理方法就失效了。本章后面将要讨论, 在这种情况下需要使用非线性断裂力学的处理方法, 并且需要更确切地定义断裂力学参数。然而作为介绍性的一章, 只要求读者接受线弹性断裂力学(简称为LEFM)的这一特点就足够了。即: 它对所有含裂纹结构在受载情况下的应用条件是裂纹尖端周围存在很小的非弹性变形。

那些LEFM能够适用的问题, 也就是满足所谓“小范围屈服”条件的问题, 满足这个件的要求是: 外载必须足够小以致不会产生广泛的塑性屈服。图1.7给出了Fedderson(1,7)积累的中心裂纹平板的数据, 它表明断裂发生的载荷比净截面估计的失效载荷低很多。这个结果是用一种航空材料做出的, 它作为一个典型的例子, 说明LEFM已被如此有效地应用于实践。

通常, 结构中出现的缺陷有以下三种形式: (1) 材料中固有的缺陷(如金属中的夹杂, 复合材料中未粘住区域等); (2) 在加工安装结构零件时产生的缺陷(如焊接时熔化不足, 焊接电弧冲击等); (3) 零件使用中产生的缺陷(如腐蚀、划伤、疲劳以及环境造成的开裂等)。在线弹性断裂力学的适用范围内, 缺陷产生的原因不同不会造成什么差别。一个给定尺寸和位置的类似裂纹缺陷被假定服从相同的断裂准则而不考虑其产生的初始原因。断裂力学的基本潜力可在以下两个大的方面发挥效益。首先, 对在某一位置存在一定尺寸裂纹的工程结构, 可以确定出它的最大安全工作载荷。这些裂纹可能是在实际检验中被发现的, 这样就对结构能否继续进行安全使用产生了问题。其次, 对于一个给定的载荷, 可确定出不会发生断裂的最大裂纹尺寸, 这样就可以为检验工作事先提供一个规范。

对线弹性断裂力学来说, 它最重要的应用是在重量成为主要关心的问题中。当屈服强度增高(如高强度钢), 则断裂韧性就降低。加上用于高承载零件的必要性, 就使得断裂力学

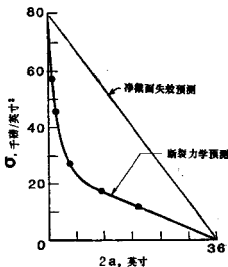


图1.7 针对7075-T6铝合金中心裂纹受拉伸板条, 净截面失效预测与断裂力学预测的比较

分析变得十分关键, 以便使性能与可靠性之间取得适当的平衡。事实上, 运用断裂力学进行结构完整性的评估, 很大程度上是由于在宇航、远洋以及其它用高强度材料以减轻重量的应用中应考虑微小缺陷的重要性。

1.1.4 线弹性断裂力学的各种关系

线弹性断裂力学由以下两方面的工作将裂纹尺寸与使构件断裂的载荷联系起来: (1) 承载结构的应力数学分析; (2) 实验测定的材料断裂性能。用定量的形式表示, 断裂发生的条件为:

$$K(a, D, \sigma) = K_c(T, \sigma, B) \quad (1.1-5)$$

这里 K 为计算出的参数, 象式 (1.1-5) 表示的那样, 它取决于裂纹长度 a , 结构尺度 D 以及外载 σ , 而与材料性能无关。相反 K_c 是一个材料参数, 称为断裂韧性。它取决于裂纹尖端温度 T 、加载速度 $\dot{\sigma}$ ($\equiv d\sigma/dt$) 以及带裂纹的截面厚度 B 等。 K_c 是通过实验测定的量与结构几何尺寸、外载以及裂纹大小和位置无关*。

尤其重要的是, 为了进行断裂力学评估, K 和 K_c 都是必要的, 单独就这两个参数本身来说是没有意义的。回顾 1.1.2 节中讨论的断裂力学与材料力学的相似性, 可发现这一点也同样地存在于材料力学中。材料的强度即破坏这种材料的试件所需要施加的应力水平, 通常由

表 1.1 几种带裂纹结构应力强度因子的近似计算式

结 构	裂 纹	载 荷	应力强度因子
受拉伸应力的非常大体	长度为 $2a$ 的中心裂纹	垂直裂纹的远距离拉应力 σ	$K = \sigma\sqrt{\pi a}$
受拉伸应力的非常大体	长度为 a 垂直于自由边的边缘裂纹	垂直裂纹的远距离拉应力 σ	$K = 1.12\sigma\sqrt{\pi a}$
受拉伸应力作用宽度为 $2a$ 的板条	长度为 $2a$ 的中心裂纹	垂直于裂纹的远距离拉应力 σ	$K = \sigma\sqrt{\pi a} \sec^{1/2} \left(\frac{\pi a}{2W} \right)$
直径为 D 厚度为 h 的容器	长度为 $2a$ 的轴向穿透裂纹	内压力 P	$K = \frac{PD}{2h} \sqrt{\pi a} \cdot \left[1 + 3.22 \frac{a^3}{Dh} \right]^{1/2}$
直径为 D 厚度为 h 的容器	长度为 $2a$ 的周向穿透裂纹	内压力 P	$K = \frac{PD}{4h} \sqrt{\pi a} \left[1 + 1.12 \frac{a}{Dh} \left(1 - \exp \left(-1.54 \sqrt{\frac{a}{Dh}} \right) \right) \right]$
具有半径为 R 的圆孔的非常大体	两条对称的长度均为 a 的孔边缘裂纹	垂直于裂纹的远距离拉应力 σ	$K = \sigma\sqrt{\pi a} \left[1 + 2.365 \left(\frac{R}{R+a} \right)^{1.4} \right]$

* 当加载速率很大时, 常用符号 K_{Ic} 来表示断裂韧性。式 (1.1-5) 用来表示快速扩展裂纹时, 也用符号 K_{Ic} 。