



21世纪高等学校规划教材

杜洪奎
王强
丁涛

编著

特种设备

检验检测与安全评定

 中国质检出版社



21 世纪高等学校规划教材

杜洪奎
王丁 强涛

编著

特种设备

检验检测与安全评定

中国质检出版社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

特种设备检验检测与安全评定/杜洪奎,王强,丁涛编著.

—北京:中国质检出版社,2011.8

21世纪高等学校规划教材/刘国普主编

ISBN 978-7-5026-3459-9

I. ①特… II. ①杜…②王…③丁… III. ①设备管理:
质量管理—高等学校—教材②设备管理:安全管理—高等
学校—教材 IV. ①F273.4②X931

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 146563 号

内 容 提 要

本书是安全工程专业“特种设备安全检验检测及安全评定”课程教材。全书共分九章,前3章主要讲解断裂力学基本概念、线弹性和弹塑性断裂力学;第4章主要介绍断裂理论在压力容器管道中的应用,即缺陷安全评定;第5章主要介绍金属疲劳理论、寿命预测方法与疲劳裂纹扩展规律;第6~8章主要介绍特种设备缺陷类型、检验、检测方法等;第9章主要介绍特种设备缺陷修复技术。

本书的编写本着学以致用用的原则,注重理论与工程实际相结合,内容涵盖了当代断裂理论、安全评定的研究成果和特种设备检验检测工程经验,涉及力学、机械、材料、化学、无损探伤等学科。本书适用于安全工程、过程装备与控制专业本科及研究生使用,对于从事结构、机械安全科研人员及工程专业技术人员也有很好的借鉴价值。

中国质检出版社出版发行

北京市朝阳区和平里西街甲2号(100013)

北京市西城区复外三里河北街16号(100045)

网址:www.spc.net.cn

电话:(010)64275360 68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 7.5 字数 174 千字

2011年8月第1版 2011年8月第1次印刷

*

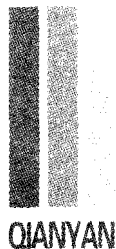
定价 16.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话:(010)68510107

前 言



压力容器、压力管道、锅炉等是具有爆炸危险的特种承压设备,特种设备安全是安全工程专业所涉及的重要组成方面。在特种设备安全知识中,特种设备检验检测占有举足轻重的地位,是确保特种设备安全运行的重要手段。作者在长期的教学、科研及工程实践中,深刻体会到学习特种设备检验检测及安全评定方法的重要性。本书是安全工程专业“特种设备安全检验检测及安全评定”课程教材,本课程的开设能起到巩固基础知识、跟踪前沿科研动态、联系工程实际的纽带作用。

全书共分9章。第1~3章,主要讲解断裂力学基本概念、线弹性和弹塑性断裂力学;第4章主要介绍断裂理论在压力容器及管道中的应用,即缺陷安全评定;第5章主要介绍金属疲劳理论、寿命预测方法与疲劳裂纹扩展规律;第6~8章主要介绍特种设备缺陷类型、检验、检测方法,在用容器检验与安全状况等级评定;第9章主要介绍特种设备缺陷修复技术。

本书的编写本着学以致用原则,与工程实际密切结合,不仅讲是什么,而且讲为什么;同时,着重于基本理论和适用条件的解析,为读者提供可选方法与有益启示。本书内容涵盖了当代断裂理论、安全评定的研究成果和特种设备检验检测工程经验,涉及力学、机械、材料、化学、无损探伤等学科。这对从事特种设备检验检测工作的人员提出了较高要求,要求他们不仅要有宽广的专业背景,而且要有丰富的工程经验。

本书在章节次序的编排上,先讲断裂理论与安全评定,后讲特种

设备检验检测,因为在检验检测中常涉及断裂分析的内容,只有在充分理解断裂理论的基础上,才能更好地把握特种设备检验检测。

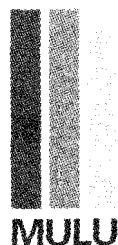
本教材适用于安全工程、过程装备与控制专业本科生及研究生,建议讲授 42 学时左右。本书对从事结构、机械安全的专业技术人员也有很好的借鉴价值。

由于编者水平所限,错误及欠妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

2011 年 4 月

目 录



第 1 章 断裂力学的基本概念	1
1.1 断裂与安全设计	1
1.2 低应力脆断与断裂力学	2
1.3 断裂韧性(K_{IC})	3
1.4 应力场强度因子(K_I)	4
1.5 断裂力学的初步应用	5
第 2 章 线弹性断裂力学	7
2.1 弹性力学基本概念	7
2.1.1 应力分量和应变分量	7
2.1.2 广义胡克定律	9
2.1.3 平面应力与平面应变	9
2.2 裂纹附近的应力场和应力场强度因子	11
2.2.1 三种裂纹组态	11
2.2.2 裂纹尖端附近应力场	11
2.2.3 应力场强度因子 K_I	12
2.3 裂纹尖端塑性区	13
2.3.1 屈服判据	14
2.3.2 裂纹尖端屈服区大小	15
第 3 章 弹塑性断裂力学	18
3.1 J 积分理论	18
3.1.1 J 积分定义	18
3.1.2 J 积分与裂纹尖端应力应变场的关系	20
3.1.3 临界 J 积分(J_{IC})	21
3.2 COD 理论	21
3.2.1 COD 定义	21
3.2.2 D-M 模型	21

3.2.3	COD 判据的工程应用	23
3.2.4	全屈服断裂的 COD 分析	24
第 4 章	压力容器与管道缺陷安全评定	29
4.1	断裂力学在压力容器中的应用概述	29
4.1.1	断裂力学在工程中的应用	29
4.1.2	结构完整性技术	30
4.1.3	合乎使用原则	30
4.2	压力容器缺陷评定	31
4.2.1	缺陷评定一般程序	31
4.2.2	缺陷的规则化与等效化	31
4.2.3	应力应变分析	36
4.2.4	材料性能数据的确定	41
4.2.5	脆断评定	43
4.3	缺陷评定案例分析	45
4.3.1	液化石油气球罐缺陷评定案例	45
4.3.2	热压机蓄势器缺陷评定案例	47
4.3.3	水洗塔缺陷评定案例	48
第 5 章	金属疲劳及疲劳裂纹扩展	51
5.1	金属疲劳的基本理论	51
5.1.1	疲劳与疲劳失效	51
5.1.2	平均应力对疲劳寿命的影响	53
5.1.3	疲劳硬化与疲劳软化	54
5.1.4	结构疲劳寿命估算方法	55
5.2	疲劳裂纹扩展速率(da/dN)	59
5.3	影响疲劳裂纹扩展速率(da/dN)的因素	61
5.3.1	平均应力的影响	61
5.3.2	超载的影响	61
5.3.3	加载频率(f)的影响	62
5.3.4	温度的影响	63
5.4	压力容器与管道缺陷疲劳评定	63
5.4.1	概述	63
5.4.2	疲劳裂纹扩展评定的基本方程	63
5.4.3	疲劳裂纹扩展量的计算	65
第 6 章	特种设备常见缺陷	68
6.1	概述	68



6.2	结构缺陷	68
6.3	局部缺陷	71
6.4	腐蚀缺陷	75
6.4.1	化学腐蚀	75
6.4.2	电化学腐蚀	77
第 7 章	特种设备常规检测方法	80
7.1	宏观检验方法	80
7.2	无损探伤	80
7.3	理化检验	82
7.3.1	力学性能试验	82
7.3.2	化学成分分析	83
7.3.3	金相分析	83
7.3.4	断口分析	83
7.3.5	物质成分分析与结构分析	83
7.3.6	实验应力分析	83
7.4	耐压试验与气密试验	84
7.4.1	耐压试验	84
7.4.2	气密试验	84
第 8 章	在用压力容器检验与安全状况等级评定	86
8.1	检前准备工作与安全防护	86
8.1.1	原始资料审查	86
8.1.2	制定检验方案(特别针对重大设备装置)	86
8.1.3	检前准备与安全防护	86
8.2	在用压力容器检验	87
8.2.1	年度检验	88
8.2.2	全面检验(内外部检验)	88
8.3	在用压力容器安全状况等级评定	93
8.3.1	安全状况等级划分及含义	93
8.3.2	安全状况等级评定(具体办法)	93
8.4	检验与评定案例	98
第 9 章	在用压力容器缺陷修复	102
9.1	缺陷修复与安全	102
9.2	缺陷修复程序	102
9.2.1	准备工作	102

9.2.2 常用缺陷修复方法	103
9.3 在用压力容器补焊修复技术	104
9.3.1 补焊准备工作	104
9.3.2 补焊修复技术	105
9.4 补焊修复工程案例——1 000 m ³ 液化石油气球罐补焊修复	106
9.4.1 基本概况	106
9.4.2 补焊修复方案与焊接工艺试验	107
9.4.3 球罐补焊修复工艺	109
9.4.4 缺陷修复后检验	110
参考文献	111

第 1 章 断裂力学的基本概念

1.1 断裂与安全设计

飞机的机翼大梁在飞行中突然断裂,火箭发动机外壳在水压试验中爆炸飞裂,在寒冷海水中行驶的轮船轰然断成两截,大型发电机转子、汽轮机叶轮在高速运转时突然脆断等,这些灾难性工程断裂事故近半个世纪以来在世界各地相继发生,而且遍布在工业、交通、军事等要害部门。只有查明这类灾难性事故发生的原因,找出其规律才能预防类似事故的发生。基于此,科学工作者开展了大量研究工作,无论在理论上还是实践上都获得了很大成功,与此同时,也开创了断裂力学这门新兴学科。

如图 1-1 所示,为一光滑金属试样简单拉伸试验曲线,即工程应力—应变曲线(σ — ϵ 曲线)。

OA 呈直线,属弹性变形阶段。 $\sigma=E\epsilon$,式中, E 为弹性模量, ϵ 为应变。对中低碳钢 $E=2.0\times 10^5$ MPa,到了 B 点,试样发生明显塑性变形,AB 段称“屈服”平台,其对应的应力称屈服强度,用 σ_s 表示。

BC 段为应变硬化阶段,随着应变 ϵ 的变化,应力 σ 呈非线性变化规律,显示应变强化。

到了 C 点,外加应力达到最大值,这时试样的某一部分横截面开始发生明显收缩,产生所谓“缩颈”现象。过了 C 点,由于“缩颈”地区横截面急剧减小,使试样继续伸长所要的外力 F 越来越小,直至断裂点 D。

由应力定义知 $\sigma=F/A$,外力 F 除以真实截面 A 称为真应力 σ_t ,缩颈后虽然外力 F 下降,但横截面 A 下降更大,故真应力 σ_t 继续增大,直至试件断裂。

在工程 σ — ϵ 曲线中,A 是被看作定值代入计算的,故其曲线过点 C 后是下降的,而构件真实的应力水平却是增大的,如图 1-2 所示。

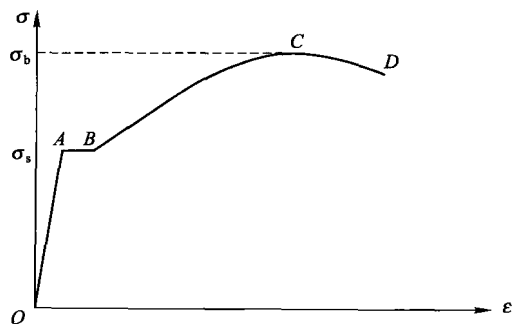


图 1-1 工程应力应变曲线

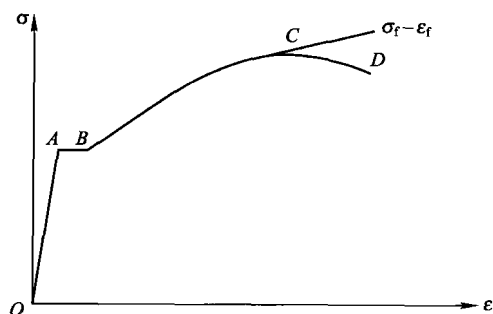


图 1-2 真应力应变曲线

工程上为了简化计算,多采用工程 σ — ϵ 曲线,故 C 点应力可看作物体开始破坏的最大应力,称强度极限,用 σ_b 表示。

对于一定的材料, σ_s 、 σ_b 均为常数,可用实验方法测定。如 20 钢, $\sigma_s=240\text{ MPa}$ 、 $\sigma_b=380\text{ MPa}$ 。设用此钢种做的拉杆截面积 $A=10\text{ mm}^2$,则使拉杆断裂的外力为 $F=\sigma_b \times A=380 \times 10=3\,800\text{ N}$ 。显然,若该拉杆吊重大于 $3\,800\text{ N}$,它将被拉断。

为了保证不出断裂事故,设计构件时,必须满足 $\sigma \leq \sigma_b$ 。对于构件,当工作应力 $\sigma \geq \sigma_s$ 时,就要产生明显的塑性变形,它也会使构件失去正常的工作能力,因此, σ_s 就是可以被设计上利用的极限应力。

但考虑到一些偶然因素,如材料的分散性、构件截面积的波动,计算载荷可能比实际载荷要低等,故要把 σ_s 打上一个折扣(除以一个系数 $n \geq 1$),作为设计时的许用应力 $[\sigma]$ 。

$$[\sigma] = \sigma_s / n_s \quad (n_s \geq 1) \quad (1-1)$$

n_s 称为安全系数,一般 $n_s=1.5 \sim 2$,它反映人们对事物的认识程度,如果我们对多种影响构件安全的因素都很清楚,就可以合理选择 n 值,做到既经济又安全。

对于铸铁、石料、水泥等没有明显塑性变形的脆性材料其工程 σ — ϵ 曲线如图 1-3 所示,主要利用其抗压性能,故断裂强度 σ_b 是它的危险应力,其许用应力为:

$$[\sigma] = \sigma_b / n_b \quad (n_b \geq 1) \quad (1-2)$$

根据以上分析,只要构件上的工作应力 σ 不超过许用应力 $[\sigma]$,就能保证构件在使用过程中不会发生断裂事故,这就是传统的工程构件设计方法,即



图 1-3 脆性材料工程应力应变曲线

$$\sigma \leq [\sigma] = \begin{cases} \frac{\sigma_s}{n_s}, & \text{对塑性材料} \\ \frac{\sigma_b}{n_b}, & \text{对脆性材料} \end{cases}$$

1.2 低应力脆断与断裂力学

在一般情况下,用传统设计思想设计的构件是安全可行的,只要保证 $\sigma \leq [\sigma]$,一般都可安全使用。但随着高强度和超高强度材料的使用,工程构件大型化,焊接工艺的普遍化,接二连三地发生了传统设计观点不能解释的灾难性脆断事故。这类事故的共同特点是断裂应力低于 σ_s ,甚至低于 $[\sigma]$,尽管材料是塑性材料,但却以脆性方式断裂。这类事故统称为低应力脆断事故。通过对该类事故的核查,发现没有超过许用应力 $[\sigma]$,材料性能也能满足设计要求,这样,用传统设计理论就不能解释低应力脆断事故。

从大量低应力脆断事故的失效分析中,还发现了一个有共同规律的现象,断口分析显示大部分都存在断裂源,如壳体焊缝上存在宏观裂纹、未焊透、咬边等。这些宏观裂纹可能是制造时已存在而无损探伤漏检的,如:焊接裂纹,也可能是后天新生的,如:疲劳裂纹、应力腐蚀裂纹、蠕变裂纹等。总之,构件内部存在宏观裂纹是造成构件低应力脆断的直接原因。



假定材料是均匀的,连续的, $\sigma \leq [\sigma]$ 时,构件是安全的,这时无论是测量 σ_s 、 σ_b 的拉伸试样,还是实际构件,内部都不存在宏观裂纹。测 σ_s 用的拉伸试样由于很小(直径 $\Phi=10\text{ mm}$),容易做到内部不含宏观裂纹,用它测出的强度 σ_s 、 σ_b 能够代表无裂纹构件的真实强度,传统设计 $\sigma \leq [\sigma]$ 就能保证构件安全。如果实际构件中原来就存在宏观裂纹,破坏了材料内部的均匀连续性,这时再用无裂纹小试样测出的 σ_s 、 σ_b 强度指标就不能代表有裂纹构件的真实强度,如仍用 $\sigma \leq [\sigma]$ 进行强度设计就难于保证构件安全。

从研究无裂纹构件的强度、刚度、稳定性出发逐渐形成了材料力学这门学科。同样,为了研究含裂纹构件强度、力学性能变化规律逐渐形成了一门新兴学科—断裂力学。从断裂力学的观点来看,在工程构件中难免存在裂纹,夹渣、气孔、未焊透等亦可作裂纹看待,由于这些裂纹类缺陷失稳扩展就导致了构件的破坏。基于此,对这种破坏问题进行理论分析和实验研究,提出了一些新的安全性评定原则,就可保证含裂纹构件的使用安全。

在分析构件低应力脆断基础上发展起来的断裂力学,由于它能把断裂应力、裂纹大小、材料抵抗裂纹扩展的能力(即 K_{IC} 、 δ_c 等)定量地联系在一起,因此它不仅能圆满解释常规设计不能解释的低应力脆断问题,而且也避免这类事故指明了努力的方向。用断裂力学可对含裂纹构件的安全性和寿命做出定量或半定量评价。断裂力学的出现促使许多部门的设计思想发生了改变,如核容器防脆断设计,飞机容限损伤设计等。另外,它也为发展新材料,新工艺指明了方向,正由于断裂力学显示了强大的生命力,从而获得迅猛发展。

1.3 断裂韧性(K_{IC})

撕布时先用剪刀剪一个口子,这样很容易沿着剪口把整块布撕成两半;一个充足气的气球,若用针扎一下,则气球马上爆破。这就表明,当构件中有了宏观裂纹后实际的断裂强度就要降低。另外可以看到,构件的断裂是由于裂纹的扩展造成的,因此实际断裂应力应当和原始裂纹尺寸有关,也应当和材料抵抗裂纹快速扩展的能力有关。

如图 1-4(a)所示,对于一个内部没有宏观裂纹的均匀试样,在拉伸时,应力分布是均匀的,每一点的应力都等于 $\sigma=F/A$ 。用应力线的概念来描述应力,规定每一点的应力值 σ 等于穿过该点单位面积应力线的条数,某点线密集,则该点应力就大。对无裂纹试样,由于每一点应力相等,故其应力线密集度都一样。应力线分布均匀,如图 1-4(a)所示。

如试样中有长为 $2a$ 的宏观裂纹,受同样外力 F ,这时试样中各点的应力就不再是均匀的了。这是因为裂纹内表面是空腔,不受应力作用,没有应力就没有应力线。含裂纹试样中的应力线不能穿过裂纹而进入裂纹内表面,但应力线的特点又使它不能中断在试样内部,故应力线就被迫绕过裂纹尖端上下相连如图 1-4(b)所示,这样,长为 $2a$ 裂纹上的应力线就全部挤在裂纹尖端,裂纹尖端应力线密度增大,即裂纹尖端地区的应力比平均应力要大。远离裂纹尖端,应力线逐渐趋于平均。

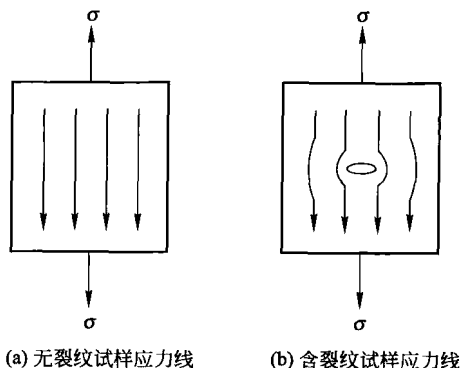


图 1-4 应力线分布图

在裂纹尖端附近, y 方向正应力 $\sigma_y \gg \sigma$ (平均应力), 即存在应力集中。当外加应力 σ 还比较小时, 裂纹尖端的应力集中就可能使尖端附近某一范围内的应力 σ_y 都达到材料解理断裂强度, 从而使裂纹前端材料分离, 裂纹快速扩展, 试样脆断。裂纹尖端应力分布如图 1-5 所示。这就是说, 一般含裂纹试样的实际断裂应力 σ_c 就明显比无裂纹试样低, 甚至远低于材料的屈服强度。

对无裂纹试样, 当 $\sigma \geq \sigma_b$ 时, 试样就断裂, σ_b 可以作为材料抵抗断裂的能力, σ_b 越大, 试样越不容易断裂。

对含裂纹试样, 用什么指标作为材料抵抗裂纹失稳断裂的能力的度量呢?

对含裂纹试样, 因整个的裂纹长度 $2a$ 上的应力线都挤在裂纹尖端, 如果裂纹越大, 就有更多的裂纹线挤在裂纹前端, 应力线更密集, 应力集中更严重, 试样就可以在更低的外应力下断裂, 即断裂应力 σ_c 更低。大量实验表明: $\sigma_c \propto 1/\sqrt{a}$ 。另外, σ_c 也和裂纹形状、加载方式有关, 即 $\sigma_c \propto 1/(\sqrt{a}Y)$, 其中 Y 是一个和裂纹形状和加载方式有关的量。实验研究表明, 对每一种特定工艺状态下的材料, $\sigma_c \sqrt{a}Y = C$ (常数)。它和裂纹大小、几何形状、加载方式无关, 只和材料本身成分、热处理、加工工艺有关, 我们称之为断裂韧性, 用 K_{IC} 表示。

$$K_{IC} = \sigma_c \cdot \sqrt{a} \cdot Y \quad (1-3)$$

对于特定材料 K_{IC} 是常数, 如同材料的 σ_s 、 σ_b 一样, 是材料本身的一种属性。

当构件中裂纹形状和大小一定时, 即 $\sqrt{a} \cdot Y$ 一定, K_{IC} 愈大, 则 σ_c 也大, 即构件脆断所需要的应力 σ_c 也高, 构件越不容易发生脆断。同理, 对不同的断裂韧性 K_{IC} , 构件在同样的断裂应力下 ($\sigma = \sigma_c$) 失效, 则所对应的裂纹尺寸不同, K_{IC} 愈大, 则容许的裂纹尺寸 a_c 也大。

总之, 构件材料 K_{IC} 愈大, 则此构件阻止裂纹失稳扩展的能力就愈大, K_{IC} 是材料抵抗裂纹失稳扩展能力的度量, 是材料抵抗低应力脆断的韧性参数, 也反映出材料的裂纹敏感性。一般来说, 低碳钢、低合金钢 K_{IC} 大, 裂纹不敏感; 高碳钢 K_{IC} 较小, 裂纹敏感性大, 易发生低应力脆断。

1.4 应力场强度因子 (K_I)

利用弹性力学的方法, 可以求出裂纹前端应力场的具体表达式。如图 1-5 所示, 在试样中心有一长为 $2a$ 的贯穿裂纹, 外加应力 σ 和裂纹平面垂直, 拉伸时, 裂纹张开。计算表明在裂纹延长线上 (即 X 轴上) 距裂纹尖端距离 r 处, 沿 y 方向正应力 σ_y 为:

$$\sigma_y = Y \cdot \sigma \sqrt{a} / \sqrt{2\pi r} \quad (1-4)$$

其中, Y 是裂纹形状系数, 如对无限体中心贯穿裂纹, $Y = \sqrt{\pi}$ 。

对于裂纹尖端任意一点, 其坐标 r 是已知的, 该点的内应力 σ_y 的大小就由 σ 、 a 、 Y 决定。令 $K_I = Y \cdot \sigma \sqrt{a}$, 则 $\sigma_y = K_I / \sqrt{2\pi r}$, 裂纹前端应力场 σ_y 主要由 K_I 决定, K_I 大则 σ_y 大, K_I 控制了裂纹尖端附近的应力场, 它是决定应力场强度的主要因素, 故 K_I 称为应力场强度因子。

随着外加应力 σ 增大, 裂纹前端应力场强度因子 K_I 不断增加, 而裂纹前端应力场 σ_y 则

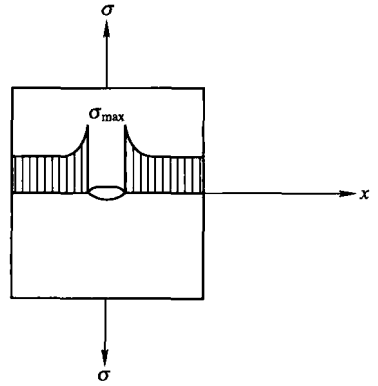


图 1-5 裂纹尖端应力线

随 K_I 增大而增大。当 K_I 增大到某一临界值时,就能使裂纹前端某一区域内的内应力 σ_y 大到足以使材料分离,从而导致裂纹失稳扩展,试样断裂。裂纹失稳扩展的临界状态所对应的应力场强度因子成为临界应力场强度因子,用 K_{IC} 表示,它就是材料的断裂韧性。

由 $K_I = Y \cdot \sigma \sqrt{a}$ 知,当外加应力 $\sigma = \sigma_c$ 时,从而裂纹失稳扩展,试样断裂,就是临界状态,这时应力场强度因子就是断裂韧性 K_{IC} ,故 $K_{IC} = Y \cdot \sigma_c \cdot \sqrt{a}$ 。

因为断裂韧性 K_{IC} 是应力场强度因子 K_I 的临界值,故两者存在密切的联系,但其物理意义不同。 K_I 是裂纹前端应力场强度的度量,它和 σ 、 a 、 Y 有关,是裂纹扩展的推动力; K_{IC} 是材料阻止裂纹失稳扩展能力的度量,是材料特性参数,它与 σ 、 a 、 Y 无关,只与材料化学成分、热处理状态、加工工艺有关。

K_I 是含宏观裂纹构件失稳断裂的动力, K_{IC} 是含宏观裂纹构件失稳断裂的阻力。 $K_I \geq K_{IC}$,发生失稳断裂; $K_I \leq K_{IC}$,不发生失稳断裂。

1.5 断裂力学的初步应用

【例 1-1】 如图 1-6 所示,一圆筒形火箭发动机壳体,水压试验时,发生低应力脆断。相关技术参数:圆筒半径 R ,壁厚 δ , $R/\delta = 110$, $\sigma_s = 1\,470\text{ MPa}$, $\sigma_b = 1\,666\text{ MPa}$,高强钢。爆破压力: $P_b = 6.5\text{ MPa}$, $[\sigma] = 980\text{ MPa}$ 。裂纹源尺寸: $a = 2\text{ mm}$, $2c = 10\text{ mm}$ 。设计压力 $p = 8.8\text{ MPa}$, $K_{IC} = 176\text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ 。

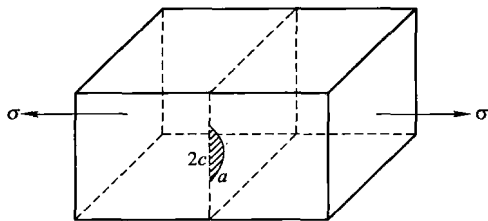


图 1-6 壁壳内裂纹图

(1) 常规设计分析:

爆破压力下圆筒形壳体环向应力:

$$\sigma_c = \sigma_\theta = \frac{p_b \cdot R}{\delta} = 6.5 \times 110 = 715\text{ MPa} < [\sigma] = 980\text{ MPa}$$

说明在满足常规设计准则情况下发生低应力脆断。

(2) 断裂力学分析:

在脆断开裂的壳体上,存在 $2c = 10\text{ mm}$,深 $a = 2\text{ mm}$ 的表面半椭圆裂纹,它就是断裂源。半椭圆表面裂纹应力强度因子 K_I :

$$K_I = Y \cdot \sigma \sqrt{a}$$

$$Y = 1.1 \sqrt{\frac{\pi}{Q}}$$

$$Q = \Phi^2 - 0.212(\sigma/\sigma_s)^2$$

Φ 是和椭圆裂纹形状有关的椭圆积分,可从断裂力学相关专业书籍中获得。

当 $K_I \geq K_{IC}$ 时,裂纹就将失稳扩展。

$$K_I = Y \sigma \sqrt{a} = 1.1 \sigma_c \cdot \sqrt{\pi a} / \sqrt{\Phi^2 - 0.212(\sigma_c/\sigma_s)^2}$$

$$\sigma_c = K_{IC} \cdot \Phi / \sqrt{3.77a + 0.212(K_{IC}/\sigma_s)^2}$$

对该裂纹 $\frac{a}{c} = \frac{2}{5}$, 查表得出 $\Phi = 1.15$ 代入上式得:

$$\sigma_c = 721.2 \text{ MPa}$$

该计算结果是与水压试验容器爆破时筒体中的环向应力 $\sigma_\theta = 715 \text{ MPa}$ 相符合的, 这样用断裂力学就能圆满地解释壳体的低应力脆断事故。

由于工程构件多为焊接件, 要使焊缝中不存在超标缺陷是不切合实际的, 由于无损探伤灵敏度的局限性, 太小的缺陷不能检出。应用断裂力学可以给出不发生低应力脆断所允许存在的最小断裂尺寸, 为制定构件质量验收标准提供依据。

$$K_I = Y\sigma\sqrt{a} \leq K_{IC}$$

$$a_c = \frac{1}{Y^2} \cdot \left(\frac{K_{IC}}{\sigma} \right)^2$$

a_c 即为含裂纹构件发生低应力脆断的极限容许尺寸, 若构件中含裂纹 $a \geq a_c$, 则结构是不安全的, 有发生失稳断裂的危险; $a < a_c$, 结构安全, 依此制定质量验收标准。

为了防止工程结构发生低应力脆断, 可以更新材料, 选择 K_{IC} 更大的材料, 则裂纹容限可以提高。如果不更新材料, 对高强钢可采用改变热处理方法, 如提高回火温度, 在材料屈服强度 σ_s 略有降低的情况下, K_{IC} 却大大提升, 则裂纹容限可以较大提高。

第 2 章 线弹性断裂力学

含裂纹工程构件的低应力脆断,往往是快速的脆性断裂。构件破坏之前宏观裂纹没有明显的扩展,裂纹前端的塑性区相对构件尺寸来说也比较小,裂纹周围材料仍可看成是均匀、连续的弹性介质,可以用弹性力学的方法来定量的研究裂纹前端的应力、应变场,以及和裂纹扩展有关的能量关系,这就是线弹性断裂力学。

2.1 弹性力学基本概念

2.1.1 应力分量和应变分量

因为力是有方向的,故应力也有方向性。一般来说,应力和其作用面不一定垂直,为此可将其分解为两个分量,一个是垂直于作用面的正应力,用 σ 表示,另一个是平行于作用面的剪应力,用 τ 表示。如果过某点 A 的平面上只有正应力而无剪应力($\tau=0$),则此面上的正应力称 A 点的主应力,该平面就称为主平面,如图 2-1(a)所示。

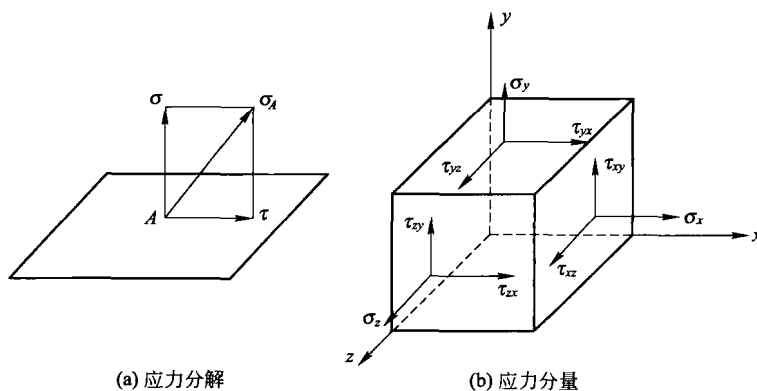


图 2-1 应力分量

如在弹性体内任一点,取一单元体,如图 2-1(b)所示,面上的应力分量主要有 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 τ_{xy} 、 τ_{yx} 、 τ_{xz} 、 τ_{zx} 、 τ_{yz} 、 τ_{zy} 。其中, σ_x 表示垂直 x 轴平面上的正应力, σ_y 表示垂直 y 轴平面上的正应力, σ_z 表示垂直 z 轴平面上的正应力。 τ_{xy} 表示剪应力方向沿 y 轴,剪应力作用平面的法向沿 x 轴; τ_{yx} 表示剪应力方向沿 x 轴,剪应力作用平面的法向沿 y 轴;其他依此类推。

根据剪应力互等定理, $\tau_{xy}=\tau_{yx}$ 、 $\tau_{xz}=\tau_{zx}$ 、 $\tau_{yz}=\tau_{zy}$ 。因此过一点只有 6 个独立的应力分量,即

$$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$$

如图 2-2 所示,弹性受力后就要发生弹性变形,如果仅受正应力作用,一个矩形单元 $ABCD$ 变形后变为 $A''B''C''D''$ 。变形前 $AB=\Delta x$,变形后 $A''B''=\Delta x+\Delta u$,变化了 Δu ,其中 u 是指点沿 x 轴方向位移。单元体在 x 方向平均应变 $\bar{\epsilon}_x=\frac{\Delta u}{\Delta x}$,在极限条件下用微分表示, $\epsilon_x=$

$\frac{\partial u}{\partial x}, \epsilon_x$ 即为 A 点沿 x 方向的应变。

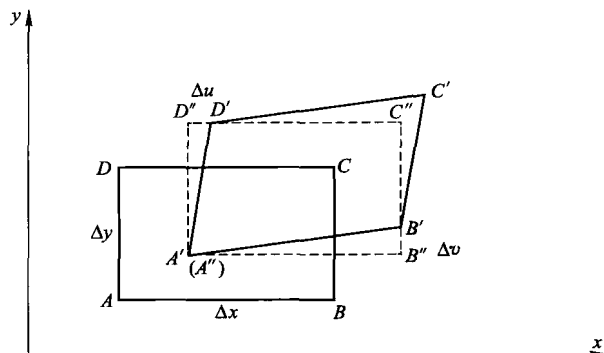


图 2-2 位移与应变

如果 A 点 y 和 z 方向位移分别为 v 和 w , 则 y, z 方向的应变为:

$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$$

如果在单元体上不仅作用有正应力, 还有剪应力, 则单元体不再保持长方形, 而要变为菱形 $A'B'C'D'$ 。 $\angle DAB$ 变为 $\angle D'A'B'$, 两者之差:

$$\theta_1 + \theta_2 = \frac{B'B''}{A'B''} + \frac{D'D''}{A'D''} = \frac{\Delta v}{\Delta x} + \frac{\Delta u}{\Delta y}$$

在极限条件下用微分表示成为剪应变, 用 γ_{xy} 表示, 即:

$$\gamma_{xy} = \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

同理可得:

$$\gamma_{xz} = \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\gamma_{yz} = \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

概括起来, 正应变分量和角应变分量的关系为:

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2-1)$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2-2)$$

$$\epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2-3)$$

$$\gamma_{xy} = \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2-4)$$

$$\gamma_{xz} = \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2-5)$$

$$\gamma_{yz} = \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2-6)$$