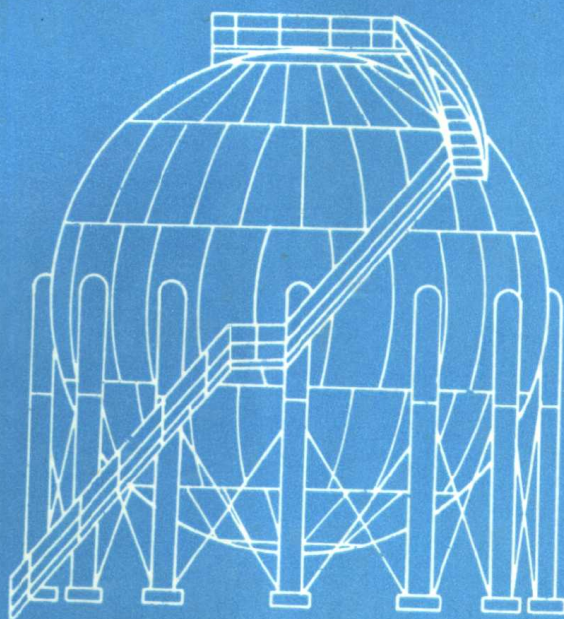


压力容器

安全可靠性及应用实例

胡长廉 主编

徐 滔 胡家顺 胡长廉 编著

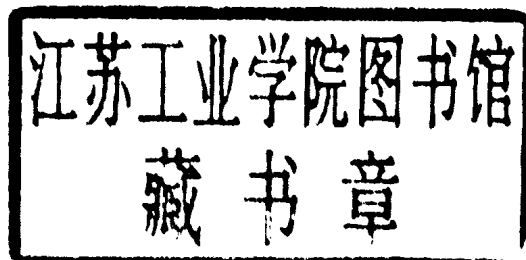


北京科学技术出版社

压力容器安全可靠 及应用实例

胡长廉 主编

徐滔 胡家顺 胡长廉 编著



北京科学技术出版社

(京)新登字207号

内 容 简 介

本书简明系统地对压力容器的选材、缺陷评定、事故分析、安全评定、疲劳寿命预测、抗断设计计算、可靠性设计及制造、使用管理等诸方面给予了介绍。在介绍中着重通过列举压力容器的工程实例来帮助读者掌握基础理论的应用。

本书可供高等学校化工机械工程专业师生作为教学参考书,也可供从事石油、化工、航天、电站锅炉、核工程以及安全监察管理等部门的工程技术人员作为继续教育的教材或教学参考书。

压力容器安全可靠性及应用实例

胡长廉 主编

徐 滔 胡家顺 胡长廉 编著

北京科学技术出版社出版

(北京西直门南大街16号)

邮政编码 100035

北京市海淀区东华印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 17印张 422千字

1993年4月第一版 1993年4月第一次印刷

印数1—3000册

JSBN7-5304-1377-5/T·284 定价:12.00元

前 言

压力容器在工业生产中的应用极为广泛，尤其在石油化学工业中，大多数工艺过程几乎都离不开压力容器，并且往往是生产中的关键设备。随着石油、化学工业的飞速发展，其工艺流程日趋复杂，加之运行条件的苛刻、新材料、新技术、新工艺的应用以及易燃、易爆、有毒害介质等因素的影响，使人们对容器的安全可靠性问题提出了越来越高的要求。

本书从压力容器安全可靠角度出发，力图简明系统地对压力容器在设计、制造、验收、运行、管理诸方面提高其安全可靠作一介绍，并运用断裂力学、疲劳分析、可靠性理论，对容器的选材、缺陷评定、事故分析，寿命预测等进行了较为详细的阐述。同时通过列举大量的工程实例的方式帮助读者理解和掌握本书所述的内容，以达到在实际工作中举一反三地加以应用的目的。

参加本书编写的有：胡长廉（编写第二、三章），胡家顺（编写第四、五章），徐滔（编写第一、六章）。全书由胡长廉主编。

在本书的编写过程中得到华中理工大学的博士生、博士后指导教师马毓义教授的热情支持和关心，并为本书审稿。

本书可供高等学校化工机械工程类专业师生作为教学参考书，亦可供从事容器的研究、设计、制造以及安全监察管理部门的工程技术人员作为继续教育的教材或教学参考书；还可供核能、航天、造船、电力等工业部门的工程技术人员参考。

容器的安全可靠是一个涉及面很广的课题，编者虽作了很大的努力，但由于水平有限，难免有谬误和疏漏之处。希望广大读者批评指正。

编者 1992年6月

114-3/00

目 录

第一章 绪论	(1)
§1 压力容器的破坏实例.....	(1)
§2 传统理论设计的危机.....	(2)
§3 断裂、疲劳及可靠性设计的诞生和发展.....	(3)
§4 压力容器的系统安全工程.....	(4)
第二章 线弹性断裂力学及应用实例	(5)
§1 概述.....	(5)
一、断裂力学的基本判据.....	(5)
二、裂纹种类及其扩展的基本类型.....	(8)
三、线弹性断裂力学基本理论简介.....	(10)
四、线弹性断裂判据在工程上的应用.....	(11)
§2 应力强度因子计算式及其裂纹尺度的换算.....	(12)
一、各种类型裂纹的应力强度因子 K_I 的计算式.....	(12)
二、小范围屈服下, 应力强度因子 K_{I^*} 的计算式.....	(21)
三、压力容器在“鼓胀效应”影响下应力强度因子 K_I 的计算式.....	(25)
四、压力容器上复合型裂纹(斜裂纹)的应力强度因子 K_I 的计算式.....	(26)
五、非穿透裂纹尺度的换算.....	(34)
§3 压力容器的断裂应力计算.....	(36)
一、断裂设计的优越性.....	(36)
二、线弹性断裂力学的应用范围和解题步骤.....	(38)
三、 K_{Ic} 的经验计算式.....	(38)
四、高强度钢制造压力容器的断裂应力计算.....	(39)
五、中、低强度钢制造压力容器的断裂应力计算.....	(43)
六、压力容器上斜裂纹的断裂应力计算.....	(45)
七、韧性材料制造的压力容器上表面裂纹的断裂应力计算.....	(46)
§4 焊接区域的断裂分析和计算.....	(47)
一、焊接残余应力的影响.....	(48)
二、错边和角变形的影响.....	(50)
三、焊接结构的断裂设计.....	(56)
四、防止焊接接头脆断的措施.....	(73)
§5 线弹性断裂力学工程应用实例.....	(75)
第三章 弹塑性断裂力学及应用实例	(85)
§1 概述.....	(85)
一、线弹性断裂力学的局限性.....	(85)
二、弹塑性断裂力学的产生与发展.....	(86)
§2 COD 理论在压力容器上的应用	(86)

一、小范围屈服的断裂分析	(86)
二、全面屈服的断裂分析	(90)
三、COD 理论的应用实例	(91)
§3 J 积分理论在压力容器上的应用	(101)
一、断裂韧性的测试	(101)
二、计算容器壁上的长裂纹	(102)
三、计算全屈服区中所包围的小裂纹	(102)
§4 压力容器的“先漏后断”设计准则	(103)
§5 压力容器的断裂事故分析	(105)
一、断裂事故分析的要点	(105)
二、断裂事故分析实例	(106)
三、断裂安全分析的确定论方法	(107)
§6 带缺陷压力容器的修复	(110)
一、压力容器缺陷修复的意义	(110)
二、缺陷返修的检查 and 测定	(110)
三、缺陷修复的判别	(111)
四、缺陷的修复工艺	(112)
第四章 压力容器的疲劳设计分析及应用实例	(115)
§1 概述	(115)
§2 压力容器的低循环疲劳	(115)
一、疲劳曲线	(116)
二、平均应力对低循环疲劳的影响	(119)
三、考虑平均应力影响后的疲劳寿命的计算	(111)
四、低循环疲劳曲线的修正	(122)
§3 压力容器的疲劳设计规范简介	(125)
一、从压力容器疲劳试验失效模型来讨论疲劳设计曲线	(125)
二、压力容器进行疲劳设计分析的条件	(126)
三、压力容器的交变应力幅计算	(127)
§4 疲劳裂纹的扩展规律及寿命估算	(129)
一、疲劳裂纹亚临界扩展特征	(129)
二、疲劳裂纹亚临界扩展机理	(130)
三、疲劳裂纹亚临界扩展速率和寿命估算	(130)
§5 工程应用实例	(133)
一、已知条件	(133)
二、容器内筒与钢带的疲劳分析	(134)
三、对受试容器进行断裂力学分析和针对缺陷进行寿命估算	(136)
第五章 压力容器可靠性设计及应用实例	(141)
§1 可靠性设计的基本理论	(141)
一、可靠性的定义和尺度	(141)

	二、可靠性设计中的分布函数.....	(143)
	三、分布函数的代数运算.....	(146)
§2	压力容器的可靠性设计.....	(149)
	一、应力—强度干涉模型.....	(149)
	二、设计参数的确定.....	(151)
	三、可靠性设计中的安全指标.....	(153)
	四、压力容器可靠性设计步骤.....	(157)
§3	故障树分析方法简介.....	(161)
	一、故障树的构造.....	(162)
	二、最小割集和最小路集.....	(163)
	三、顶事件发生概率的计算.....	(165)
	四、结构重要度.....	(168)
§4	压力容器可靠性设计中的计算机应用程序.....	(170)
	一、正态分布函数及分位数的计算程序.....	(170)
	二、应力、强度为各种不同分布时可靠度的计算程序.....	(177)
第六章	压力容器安全工程	(187)
§1	钢制压力容器制造质量要求.....	(187)
	一、材料.....	(187)
	二、筒体和封头加工.....	(201)
	三、焊接.....	(205)
	四、焊后热处理.....	(223)
	五、产品试板及工艺纪律检查试板.....	(224)
	六、无损探伤.....	(225)
	七、压力试验.....	(229)
	八、压力容器铭牌、油漆、包装、运输.....	(231)
§2	压力容器安全使用.....	(231)
	一、压力容器安全技术管理.....	(231)
	二、超压泄放装置.....	(235)

第一章 绪 论

§1 压力容器的破坏实例

20世纪50年代以来,世界各国,特别是工业发达的国家,随着工业生产的突飞猛进,生产水平的高速发展,在压力容器、船舶、飞机、宇宙航空、火箭、导弹、原子能电站锅炉、高压容器等各个工业领域,广泛采用了新工艺、新材料,特别是高强度钢得到广泛应用。按照传统材料力学理论的等强度设计准则所设计制造出来的工程结构和压力容器,好像是完全可靠的,可是却往往在低应力状况下发生突然的脆断事故。

本世纪30至40年代,出现了大量的桥梁倒塌、船舶沉没等事故。如美国在第二次世界大战后期,约共计2500艘自由型万吨货轮,在服役期间有145艘断成两截,700艘左右受到严重损坏。

在50年代,随着空间技术的发展,又出现了不少飞机、火箭、导弹坠毁爆炸的灾难性事故。如1950年美国北极星导弹固体燃料发动机的压力壳,按传统理论设计、制造、检验均合格,可是在水压试验时,突然发生低应力脆断事故,这震惊了世界上整个工程技术界。1965年美国又发生一件著名的260SL-1固体火箭发动机压力壳爆炸的典型脆断事故。该压力壳的内径 $D_i=6600\text{mm}$,为了减轻重量以增大火箭的推力,选用了18Ni-Cr-Mo-Ti高强度钢,按传统强度理论计算所得到的压力壳厚度为 $t=18\text{mm}$,设计规定水压试验压力 $P_T=6.57\text{MPa}$,可是在1965年4月11日进行水压试验时,只加压到 $P_f=3.73\text{MPa}$ 时,也就是说该压力仅为水压试验压力的56.77%时,就发生了爆炸飞裂事故。

早在1944年10月20日,美国俄亥俄州克利夫兰市发生了一起液化天然气贮罐爆炸并引起大火的重大的恶性事故。建于1942年的一台圆筒形贮罐(直径21.3m,高12.6m),在运行中突然发生脆性断裂,并产生许多碎片。大量的可燃性气体夹着液滴,成雾状向四周扩散。附近的工厂、商店、住宅等先后发生气体爆炸和火灾,周围的市区被火焰包围,形成一片火海。20分钟后,与圆筒形贮罐相邻的3号球罐(直径17.4m),由于支柱被火烧弯而倒塌;整个球罐在火焰烘烤下发生强烈的蒸气爆炸,喷射的火焰高达300m。这场由于压力容器破裂而引起连锁反应的灾难性事故,使79栋住宅,219辆汽车和2座工厂全部烧毁,另外还有13座工厂和35栋住宅遭到部分破坏,死亡133人,经济损失达680万美元。又如,1965年12月,英国John Thompson公司制造的一台大型氨合成塔,在水压试验时发生脆性断裂。该容器内径 $D_i=1925\text{mm}$,壁厚 $t=150\text{mm}$,全长 $L=18.3\text{m}$,重164t,筒体和封头均为Mn-Cr-Mo-V钢锻件,设计压力 $P=35.3\text{MPa}$,水压试验压力 $P_T=48\text{MPa}$,当试验压力达到 $P_f=35.42\text{MPa}$ 时突然发生脆断。容器断成两段,并飞出四块碎片,其中最大的一块碎片重达2t,飞出45m。

英国Cockenzil电站高压锅炉汽包脆断事故系又一典型实例。汽包内径 $D_i=1700\text{mm}$,壁厚 $t=140\text{mm}$,全长 $L=23\text{m}$,设计压力 $P=19.12\text{MPa}$,水压试验压力 $P_T=27.46\text{MPa}$,材料为Mn-Cr-Mo-V钢,经三次水压试验都安全无事,而在Cockenzi | 电站连接组装接管附件后,当投产前作第四次水压试验,压力接近满压 $P_T=27.46\text{MPa}$ 时,突然发生脆性断裂。

事后发现裂源表面有0.02mm厚的氧化铁薄膜，认为是退火再热裂纹所致。测定材料的断裂韧性，按断裂力学的计算求得临界裂纹尺寸与实际裂纹尺寸相近，因此，必然会产生脆性断裂。

以上列举的几个典型破坏实例说明：要防止压力容器断裂，除控制断裂韧性，防止水压试验时产生低应力脆断外，需要考虑断裂亚临界扩展问题；疲劳所引起的裂纹缓慢扩展的问题；压力容器的安全可靠性分析问题以及压力容器的系统安全工程问题。

英国调查了12700台压力容器，制造中发生的灾难性事故几率为万分之二点三，使用中发生的灾难性破坏几率约为万分之零点七。虽然这个几率不算太高，但是每次灾难性破坏，都造成惨痛的人身伤亡和严重的经济损失。

在我国，类似事故的发生也是不少的。据不完全统计，我国球罐在水压试验时发生断裂或泄漏以及在使用中发生爆破或泄漏的事故率，有时也高达2%左右，至于球罐在开罐检查中发现表面裂纹的情况更是普遍。这对使用单位来说是很令人担心的。因此，从设计、制造、安装和使用的角度看来，必须建立评定带缺陷或裂纹的在役压力容器安全性的标准，以防止压力容器断裂事故的发生并对压力容器进行安全可靠性设计。我国于1984年建立了在役压力容器的缺陷安全性评定标准，即《压力容器缺陷评定规范CVDA-84》。

§2 传统理论设计的危机

众所周知，传统理论设计是以材料力学为基础，即假定材料是均质、连续、各向同性、没有缺陷和裂纹，设计时压力容器在外载荷作用下壳体上的各点应力（两向应力或三向应力），要满足下列条件：

$$\sigma \leq [\sigma]^t \begin{cases} \sigma_s^t/n_s & \text{——塑性材料（如中、低强度钢、合金钢），} n_s=1.6 \\ \sigma_b/n_b & \text{——脆性材料（如铸铁），} n_b=3 \end{cases}$$

满足上述条件的压力容器就安全，否则就不安全。这就是传统理论设计所采用的方法。

传统理论设计方法，在工程技术界已成功地应用了100多年。在30年代，由于广泛采用的是低强度结构钢，其断裂韧性有余而强度不足，容器的破坏主要是以蠕变失效为主，这种设计方法是合理的。

在40年代，广泛采用了焊接容器，由于当时的焊接技术水平低，焊接缺陷多，加之当时多采用中强度钢，又有低温脆性，所以发生了一系列焊接压力容器、锅炉汽包以及自由型船舶的低应力脆断事故。

到了50年代，由于高强度钢的问世和广泛采用，压力容器的破坏事故往往是因为材料的韧性不足，但强度却有余，传统理论既不能解释发生事故的原因，也无法找出改进的途径。特别是1950年美国北极星导弹压力壳低应力脆断事故影响极大，震惊了世界上整个工程技术界。经典的、传统理论设计发生了危机。按照传统强度理论的观点，为了提高压力壳的安全性，只有提高材料的屈服限 σ_s^t 和强度限 σ_b^t 或者增大壁厚，以此增加安全储备量。但是事与愿违，压力壳在更低的应力下就脆断了。希望安全反而更不安全。由此说明传统理论在这些新的工程领域内，显得束手无策，处于完全无能的境地。于是广泛地组织力量进行新的探索研究，从而诞生了断裂力学这门新学科。

§3 断裂、疲劳及可靠性设计的诞生和发展

断裂力学是一门新兴学科,是固体力学与工程实际紧密结合的产物。是在1920年Griffith提出裂纹扩展能量释放率理论的基础上发展起来的。50年代, G. R. Irwin加以完善, 并提出应力强度因子理论。他认为: 决定裂纹扩展的因素是裂纹尖端附近的应力强度因子 K 。

断裂力学的诞生和发展, 解决了传统强度理论所不能解决的问题, 找到了压力容器出现低应力脆断事故的原因。并使人们懂得, 在选用材料时, 不能片面地选用高强度而忽略断裂韧性指标。

60年代以来, 断裂力学从线弹性问题发展到弹塑性问题, 从宏观发展到微观, 从实验室走向工程实际, 形成了一个新的科学体系。目前, 国民经济的各个领域都在加强对断裂力学的研究, 各种先进的试验手段以及计算技术更给断裂力学的深入研究增添了新的活力。

随着对断裂理论的深入研究, 逐步发展了疲劳断裂、腐蚀断裂、应力腐蚀断裂、蠕变断裂、高聚物的断裂等多方面理论。70年代提出了概率断裂理论, 即应用可靠性理论, 并借助计算技术研究裂纹扩展的规律。除力学之外的金属学、化学, 甚至基本粒子物理等方面的研究, 如原子、位错以至杂质和晶粒等微观范围内的断裂过程(包括裂纹的形成, 裂纹扩展)也有所发展, 从而获得有关裂纹扩展和断裂的准则。

目前, 断裂理论已广泛地用于工程设计, 先进的工业国家, 如美、英、日已将断裂设计和测试标准化, 制定了规范。国际焊接协会也订出了相应的标准, 供工程设计人员使用。我国也组织过较大的专业队伍, 对氨合成塔、锅炉汽包、人造地球卫星等作过成功的断裂力学分析。

压力容器由于它的危险性、重要性和复杂性, 自然地成为断裂力学研究的重要对象。但由于它的影响因素较多(温度、压力、腐蚀、辐射), 材料塑性较好, 应力状态复杂, 给断裂力学的研究增加了不少的困难。尽管如此, 也必须针对压力容器的安全可靠, 重点研究下列六个方面的问题。

(1) 多小的裂纹或缺陷是允许存在的。即这种小裂纹或缺陷不会在预定的服役期间发展成断裂时的大裂纹?

(2) 多大的裂纹就可能发生断裂。即用什么判据来判别断裂发生的时机?

(3) 从允许存在的小裂纹扩展到断裂时的大裂纹, 需要多长的时间, 即压力容器的使用寿命如何计算, 以及裂纹扩展速率的影响因素和测定方法?

(4) 在既保证安全, 又能避免不必要的停产损失的前提下, 探伤检测周期应如何安排?

(5) 万一检测时发现了裂纹, 应该如何处理?

(6) 为了确保压力容器的安全, 应如何进行可靠性设计?

断裂力学是一门正在发展中的新兴学科。它在工程结构中广泛地用于分析断裂事故; 研究裂纹体强度及裂纹的发生、扩展的规律, 并根据这一规律设计安全的工程结构; 制定合理的质量验收标准及工艺制度; 研究新材料等方面并取得了很大成就。阿波罗登月宇航压力容器就是通过提高断裂韧性来控制抗脆断裂可靠性取得成功而登上月球的。可以预测, 断裂力学这门学科, 必将超出所谓“力学”范畴, 而成为一门涉及多学科的边缘学科, 在工程结构的设计、安全可靠实践中将发挥越来越大的作用。

§4 压力容器的系统安全工程

由于压力容器的使用范围非常广泛，除用于工业生产外，还用于基本建设、医疗卫生、地质勘探、文教体育等国民经济的各个部门。且又比较容易发生灾难性的事故，其破坏性是极其严重的，因此，它的安全问题特别值得重视。许多工业发达国家，都把锅炉和压力容器作为一种特殊设备，需要设置专门机构进行监督。并按规定的规范对压力容器的设计、制造、检验、安装、使用和维修等方面作了详细的规定，以确保压力容器的安全运行。

虽然压力容器的事故率较高，但这并不是说，压力容器发生事故是不可避免的。压力容器的安全运行有一定的客观规律，有些压力容器之所以发生爆炸事故，是由于不重视、不认识甚至违反了这些客观规律所造成的。所以，要防止压力容器发生事故，保证安全运行，就需要掌握它的客观规律，摸清它是怎样发生破坏的，该怎样防止它发生破坏。研究压力容器的各种破坏型式及其产生的原因，研究可能造成各种破坏类型的不安全因素，以及防止产生这些因素的具体措施和检验方法，以预防压力容器事故的发生。

要研究压力容器的各种破坏机理以及防止产生破坏的措施和方法，需摸索压力容器的安全运行规律，并通过生产实践与科学试验来完成。一方面，在实际生产过程中，对压力容器发生的爆破事故，必须进行仔细的、认真的调查研究，彻底查明造成事故的确切原因，分析破坏机理，查明安全运行的规律，探求防止事故的措施；另一方面，通过专门的科学试验来研究、探索、开拓新理论，解决采用新材料、新工艺、新结构中不断涌现的问题。

第二章 线弹性断裂力学及应用实例

§1 概述

早在1920年, Griffith提出了能量准则, 建立了断裂应力(σ_f)、裂纹尺寸(c)和材料性质(A)三者之间的关系:

$$\sigma_f = A/c$$

他是现代断裂力学的创始人、先驱。

30年代以后, 由于一连串地发生低应力脆断事故, 传统理论无法作出圆满解释, 从而促使人们又联想到断裂力学的创始人Griffith所提出的能量理论。

1957年, Irwin提出了应力强度因子 (Stress Intensity Factor) 的概念。

1964年, 美国材料试验学会 (ASTM) 和美国国家宇航局 (NASA) 出版了一本系统的断裂力学文集。1970年提出了关于平面应变断裂韧性 K_{Ic} 测试试行标准 (ASTM E399-70), 这标志线弹性断裂力学的形成。我国于1978年制定《金属材料平面应变断裂韧性 K_{Ic} 试验方法 (YB947-78)》。

线弹性断裂力学发展最早, 它是断裂力学的基础。发展较成熟, 应用也较多。它主要是从能量和应力强度出发来研究裂纹尖端的应力应变场, 从而得出断裂判据。

一、断裂力学的基本判据

(一) 应变能释放率判据 (G 判据)

Griffith 首先用能量平衡的方法研究了裂纹体的强度。他认为裂纹失稳并快速扩展而导致断裂的条件是: 弹性体中裂纹扩展而释放出来的弹性应变能大于它产生新断裂面所消耗的能量。

设裂纹扩展 Δa 所释放的弹性应变能为 ΔU , 则裂纹扩展单位长度所释放的弹性应变能为 dU/da , 简称为应变能释放率, 又称裂纹扩展力, 以 G 表示。

根据弹性理论计算, 其能量释放率 G 用下式表示。

在平面应力状态下:

$$G = \pi \sigma^2 a / E \quad (2-1)$$

在平面应变状态下:

$$G = (1 - \mu^2) \pi \sigma^2 a / E \quad (2-2)$$

式中 σ ——外加名义应力, MPa;

E ——弹性模量, MPa;

a ——裂纹尺寸, mm;

μ ——泊松比, 一般取 $\mu=0.3$;

当能量释放率 G 达到某一临界值 G_c 时, 裂纹就开始失稳扩展。而 G_c 是一个材料常数, 由实验决定, 又称断裂韧性。

其断裂判据为:

$$G \geq G_c \quad (2-3)$$

根据断裂判据, 从而得出断裂应力计算式。

在平面应力状态下的断裂应力计算式:

$$\sigma_c = \sqrt{EG_c/\pi a} \quad (2-4)$$

在平面应变状态下的断裂应力计算式:

$$\sigma_c = \sqrt{EG_c/(1-\mu^2)\pi a} \quad (2-5)$$

(二) 应力强度因子判据 (K 判据)

脆性断裂理论的重大突破, 应归功于1957年Irwin 所提出的应力强度因子概念, 以及断裂韧性概念的形成、断裂韧性实验技术的建立。从而得到了 K 判据, 并且在工业生产中广泛应用获得成功。这标志着断裂力学的最初分支——线弹性断裂力学的建立。

实验证明, K 是裂纹尖端处应力应变场的度量。当 K 达到某一临界值, 裂纹就发生失稳扩展, 该值称为临界应力强度因子, 以 K_c 表示。 K_c 是一个由实验决定的材料常数, 不同的材料有不同的 K_c 值。由于 K_c 表征了材料对裂纹失稳扩展的抗力, 故称为材料断裂韧性。其断裂判据为:

$$K \geq K_c \quad (2-6)$$

K 判据和 G 判据是等价的, 其关系为:

在平面应力状态下:

$$G = K^2/E; \quad G_c = K_c^2/E$$

在平面应变状态下:

$$G = (1-\mu^2) K^2/E; \quad G_c = (1-\mu^2) K_c^2/E$$

在一般情况下应力强度因子计算式为:

$$K = Y \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2-8)$$

式中 Y ——几何形状因子

断裂判据为:

$$K = Y \sigma \sqrt{\pi a} \geq K_c$$

由此导出裂纹的临界尺寸 a_c 的计算式:

$$a_c = \frac{1}{\pi} (K_c/Y\sigma)^2 \quad (2-9)$$

在工作应力 σ 的作用下, 如裂纹尺寸 a 大于或等于 a_c 时, 则裂纹将发生失稳扩展而导致断裂。因此, 也可将脆性断裂判据改为:

$$a \geq a_c \quad (2-10)$$

(三) 裂纹尖端张开位移判据 (δ 判据)

如果将线弹性断裂力学的 G 判据或 K 判据应用于中低强度高韧性的钢材, 由于在断裂前裂纹尖端塑性区尺寸增大到可与裂纹尺寸相当的程度而使 K 判据(或 G 判据)失效。同时, 欲测定这类钢材的断裂韧性 K_c 。所需求的试件尺寸极大, 使之失去意义, 测试时, 还需要有极大吨位的试验机, 难于实现。

例如, 对 $\sigma_s = 460\text{MPa}$, $K_{Ic} = 108.5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 的低合金钢材, 就需用厚度为150mm的板材作为试样, 测试时就需用拉力为2000吨的拉力试验机。

1963年Wells提出了裂纹尖端张开位移的概念。他认为材料在外力作用下, 裂纹尖端处的塑性应变达到某一最大允许值时, 裂纹将发生失稳扩展。由于裂纹尖端处塑性应变不易测

量, 但它与裂纹尖端张开位移有一定的关系。故用 δ 作为控制裂纹开始扩展的参量。

当裂纹尖端处张开位移 δ 达到材料固有临界值 δ_c 时, 裂纹就开始产生失稳扩展。其断裂判据为:

$$\delta \geq \delta_c \quad (2-11)$$

(1) 在线弹性状态下, δ 判据和 K 判据是等价的。

(2) 在弹塑性状态下, 裂纹尖端处张开位移 δ 的计算式为:

在平面应力状态下:

$$\delta = \frac{8\sigma_s a}{\pi E} \ln \sec \left(\frac{\pi \sigma}{2\sigma_s} \right) \quad (2-12)$$

在平面应变状态下:

$$\delta = \frac{8(1-\mu^2)\sigma_s a}{\pi E} \ln \sec \left(\frac{\pi \sigma}{2\sigma_s} \right) \quad (2-13)$$

(3) 在全面屈服状态下, 裂纹尖端处张开位移 δ 的计算式为:

$$\delta = 2\pi \epsilon a \quad (2-14a)$$

在平面应力状态下, 其线弹性断裂力学中的 δ 与 K 之间的关系为:

$$K^2/E = \sigma_s \delta$$

$$\text{则} \quad \delta = 2\pi \epsilon_s r_s \quad (2-14b)$$

式中 ϵ_s ——屈服应变, $\sigma_s = \epsilon_s \cdot E$;

r_s ——平面应力状态下塑性区特征尺寸。

在大变形情况下 ($\sigma \geq \sigma_s$, 而应力水平 $\sigma/\sigma_s \geq 1$)。

Wells假定: 材料没有应变硬化现象时, 则材料在全屈服应变 ϵ 和屈服点应变 ϵ_s 之间存在下列关系:

$$\epsilon/\epsilon_s = r_s/a$$

从而得到全屈服状态下, 裂纹尖端处的张开位移 δ 计算式:

$$\delta = 2\pi \epsilon a$$

(四) J 积分判据 (能量法)

1968年Rice提出了在弹塑性或非线形条件下, 能够定量描述含裂纹物体的应力应变场强度, 又易于用实验测定或理论计算场的参量—— J 积分。从能量守恒出发来分析平面问题, 其定义如下:

$$J = \int_{\Gamma} \left[W dy - \vec{T} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) ds \right] \quad (2-15)$$

上式为能量线积分, 亦即 J 积分的回路积分定义, 简称 J 积分。

式中 Γ ——从裂纹自由表面的任一点 (x, y) 开始 (如下表面), 沿反时针方向 (为弧长 S 的正向) 环绕裂纹尖端, 而终止于裂纹另一边 (如上表面) 自由表面上任一点的任意积分回路曲线;

W ——在弹性裂纹物体中的应变能密度; 在弹塑性裂纹物体中为单调加载过程中试件各处微元所承受的应力形变功密度。

W 是回路 Γ 上任一点 (x, y) 的应变能密度其值为:

$$W = \int \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad i, j = x, y \quad (2-16)$$

式中 σ_{ij} 为应力分量；

$\vec{T}$ ——作用在积分回路 Γ 线元 ds 上，沿外法线方向的张力（表面力）矢量
 $(\vec{T} = \sigma_{ij} \cdot \vec{n}_{ij})$ ；

$\vec{u}$ ——位移矢量；

$\vec{n}$ ——该处外法向单位矢量；

ds ——回路 Γ 上的弧元。

可以证明， J 积分的数值是一个与积分回路无关的常数，具有守恒性。

如图 2-1 所示，假设有任意两个积分回路 T 和 T' ，在小应变条件下，根据其应变位移关系以及平衡微分方程，利用格林积分公式，可以证明积分数值与积分路径无关。即

$$\int_T \left[W dy - \vec{T} \left(\frac{\partial u}{\partial x} ds \right) \right] = \int_{T'} \left[W dy - \vec{T} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) ds \right]$$

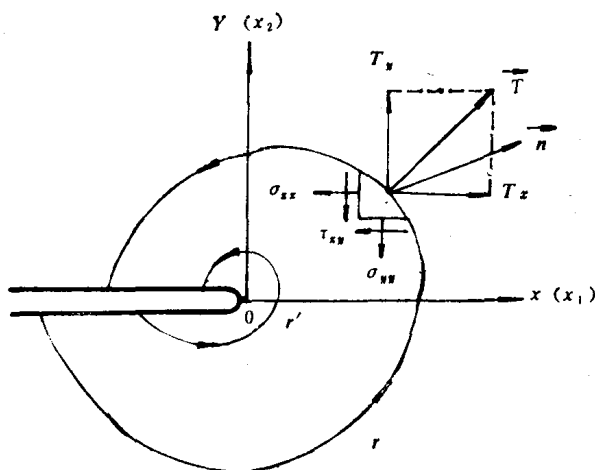


图2-1 裂纹尖端 J 积分回路及守恒性

当 J 积分值达到材料临界值 J_c 时，裂纹将开始发生失稳扩展。其断裂判据为：

$$J \geq J_c \quad (2-17)$$

利用 J 积分与 G 、 K 的关系，可得如下关系式：

(1) 在平面应力状态下，其关系式为：

$$J = G = K^2 / E \quad (2-18a)$$

(2) 在平面应变状态下，其关系式为：

$$J = G = (1 - \mu^2) K^2 / E \quad (2-18b)$$

二、裂纹种类及其扩展的基本类型

(一) 裂纹种类

按沿板的厚度方向分布的不同位置，构件或材料中常见的裂纹可分为三类。第一类为穿

透裂纹，如图2-2a所示；第二类为表面裂纹，如图2-2b所示；第三类为深埋裂纹，如图2-2c所示。

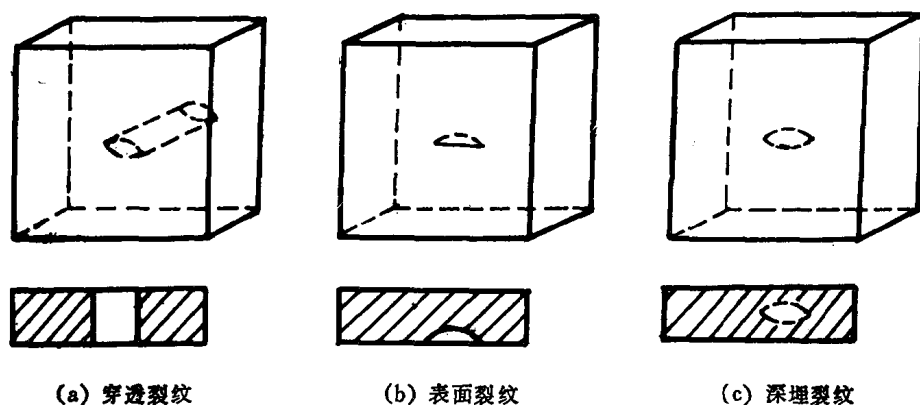


图2-2 常见裂纹种类

(二) 裂纹扩展的基本类型

对于含有裂纹的物体（常称裂纹体），在外力的作用下，Irwin于1957年提出了在一般应力场中，按裂纹与作用应力方向之间的关系，可将裂纹的失稳扩展分为三种基本类型。即张开型、滑移型和撕裂型。亦称为Ⅰ型、Ⅱ型和Ⅲ型。三种类型裂纹面的变形情况，如图2-3所示。

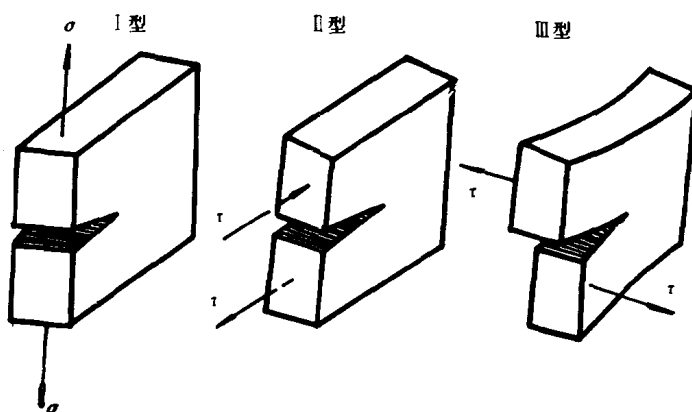


图2-3 裂纹的三种基本类型

Ⅰ型为张开型，裂纹体受法向外力（垂直于裂纹面的方向）作用，裂纹表面的位移垂直于裂纹平面；Ⅱ型为滑移型，裂纹体受面内剪力（平行于裂纹面的方向）作用，裂纹表面的位移在裂纹平面内，且垂直于裂纹的主边界；Ⅲ型为撕裂型，裂纹体受面外剪力的作用，裂纹表面的位移在裂纹平面内，且平行于裂纹的主边界。

在这三种裂纹扩展的基本类型中，以Ⅰ型裂纹最危险，故用断裂力学来解决试件或材料的断裂问题时，主要是研究Ⅰ型裂纹扩展所引起的低应力脆断。为了区别三种基本类型的应力强度因子 K ，故分别以 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 来表示。

在工程实践中，有时还会出现斜裂纹。如图2-4所示。既非Ⅰ型，亦非Ⅱ型，在压力容器器中尤为多见。这时称这种裂纹为Ⅰ、Ⅱ混合型裂纹，或者其他几种混合型裂纹，有时也叫

做复合型裂纹。解决这类裂纹扩展问题的准则，叫做复合断裂判据。

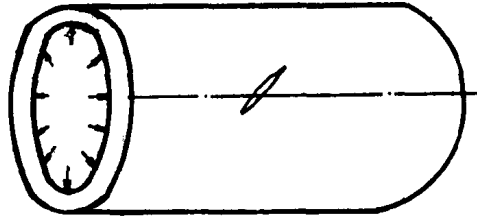


图2-4 容器上的斜裂纹

三、线弹性断裂力学的基本理论简介

(一) I型裂纹尖端的应力应变场

1. 受双向应力拉伸作用下的 I 型穿透裂纹尖端的应力应变场，如图2-5 所示。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2}\theta \right) \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2}\theta \right) \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3}{2}\theta \end{aligned} \right\} \quad (2-19)$$

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$$

2. 受单向应力拉伸作用下的 I 型穿透裂纹尖端的应力应变场，如图2-6 所示。

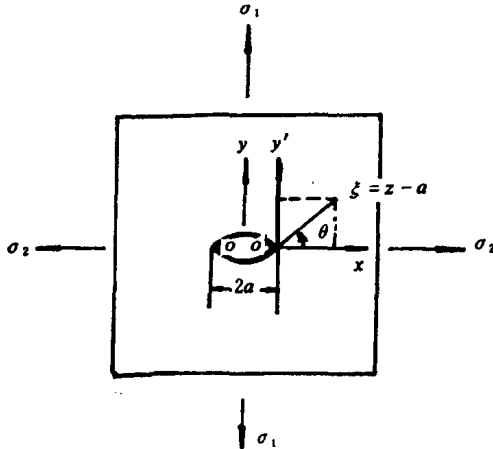


图2-5 双向应力作用下的 I 型裂纹

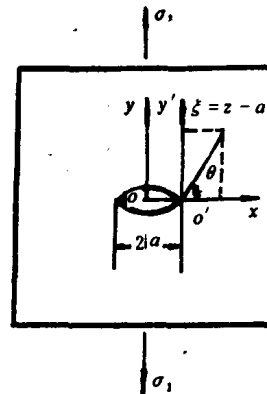


图2-6 单向应力作用下的 I 型裂纹

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2}\theta \right) - \sigma \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2}\theta \right) \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3}{2}\theta \end{aligned} \right\} \quad (2-20)$$