



断裂力学在锅炉 及压力容器上的应用

221

李泽震 著
周则恭

劳动人事出版社

说 明

自1979年以来,我局举办了多期锅炉压力容器安全监察干部培训班、无损探伤人员培训班和技术报告会,并根据培训班和报告会的需要,组织有关同志编写了一些教材和参考资料。现在选编一部分,加以补充修订后,由劳动人事出版社陆续出版。

这套书,可以作为各地锅炉压力容器安全监察部门培训技术干部的教材和参考资料;也可以作为锅炉压力容器安全监察干部的自学材料。

这些书中有些探讨性意见与我国现行的锅炉压力容器安全监察规程、标准不尽一致,仅供研究参考。在处理实际问题时均应以现行规程、标准的规定为准。内容中的缺点和错误,请读者批评指正,以便再版时改正。

劳动人事部锅炉压力容器安全监察局

一九八四年二月

断裂力学在锅炉及压力容器上的应用

李泽震 周则恭著

劳动人事出版社出版

(北京市和平里中街12号)

交通出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092 16开本 9印张 230千字

1984年7月北京第一版 1984年7月北京第一次印刷

印数: 1—12,200册

书号: 15238·0065 定价: 1.00元

序 言

自从人类发明蒸汽机，利用蒸汽作为动力源以来，一直用锅炉作为产生蒸汽的装置。虽然在使用初期，蒸汽压力不过几个以至十几个大气压，但锅炉爆炸事故却经常发生，造成死伤累累。经分析鉴定，事故主要是由于设计和制造中有许多缺陷，使锅炉的强度不够所致。后来美国机械工程学会(ASME)制定了锅炉及压力容器规范，对锅炉及压力容器提出了强度要求，效果十分显著。随后一些国家也先后制订了类似的规范，从而基本上防止了爆炸事故的发生。但是，即使按照规范设计和制造的锅炉和压力容器，少数爆炸事故还有所发生，特别是在产品出厂前作水压试验时，无论是圆柱形容器还是球形容器的爆炸事故均有所闻见，运行中的事故也不少，损失更大。这些执行规范后依然发生的事故，被人们看作是“意外”事故。

在上述的保证强度的规范中，把制作锅炉和压力容器的材料看成是均匀而没有缺陷的。规范根本不允许(宏观)裂纹的存在。但据对所谓“意外”事故的观察分析，发现爆炸的根源在于材料有缺陷，如局部偏析、夹杂异物，或由于焊接裂缝等等。对现在运行中的锅炉或压力容器作无损探伤检验，也发现许多是有缺陷的。实际上，不少容器正在带伤运行。

通过观看金相照片，可知我们使用的材料远远不是均匀而无缺陷的。尽管肉眼看来是光滑的材料，在显微镜下依然可看到许多微观的缺陷。其实，宏观的缺陷也不少。这是由于漏检，或缺陷处在无法作无损检验的部位。因此锅炉和压力容器规范中不允许裂缝存在的规定究在是一种天真的想法，并不符合客观实际。

近二十年发展起来的断裂力学，就是以裂缝为对象研究发生断裂的原因，以及防止断裂的方法等问题的新学科。开始时着眼于脆性材料，发展了线弹性断裂力学。但锅炉及压力容器要求有很高的安全性，不允许应用脆性材料，故线弹性断裂力学不能解决锅炉及压力容器方面的问题。1963年，英国的科垂耳(A.H.Cottrell)和威尔斯(A.A.Wells)创建了适用于塑性材料的断裂韧性指标，即裂纹张开位移(COD)，奠定了一般金属材料的断裂力学基础，为研究锅炉和压力容器的断裂问题提出了一个新的途径。

我国通用机械研究所李泽震高级工程师和周则恭教授是国内研究COD最早的同志之一。为了促进国内锅炉及压力容器的安全管理工作，他们编写了这本书，简要地介绍了现阶段国内外在锅炉及压力容器上应用的以COD为主的断裂力学技术。我们相信，此书一定会得到读者们的欢迎。

王 仁 东

目 录

第一章 绪 论	(1)
§1-1 传统强度理论的局限性	(1)
§1-2 断裂力学的产生与发展	(1)
§1-3 压力容器及锅炉破坏事例	(3)
§1-4 断裂力学的研究对象与分类	(6)
§1-5 断裂力学的基本判据简介	(6)
§1-6 断裂力学在锅炉及压力容器应用的主要方面	(10)
第二章 线弹性断裂力学	(13)
§2-1 应力强度因子理论	(13)
§2-2 复合型断裂判据	(32)
§2-3 平面应变断裂韧性 K_{Ic} 的测试方法	(34)
§2-4 动态断裂韧性概念	(37)
参考文献	(38)
第三章 弹塑性断裂力学	(39)
§3-1 概述	(39)
§3-2 COD 理论	(40)
§3-3 COD 测试方法	(45)
§3-4 COD 设计曲线与宽板试验	(51)
§3-5 J 积分理论	(61)
§3-6 J 积分的测试方法	(63)
参考文献	(65)
第四章 疲劳裂纹扩展规律及压力容器(锅炉)的疲劳寿命	(67)
§4-1 概述	(67)
§4-2 疲劳裂纹扩展规律	(67)
§4-3 压力容器(锅炉)寿命估算	(70)
§4-4 影响疲劳裂纹扩展的因素	(72)
§4-5 疲劳裂纹扩展界限值 ΔK_{th} (即下门槛值)及其影响因素	(75)
§4-6 裂纹扩展速率的测试方法	(77)
参考文献	(78)
第五章 断裂力学在锅炉及压力容器的应力腐蚀裂纹扩展问题中的应用	(79)
§5-1 压力容器与管道的应力腐蚀破坏	(79)
§5-2 应力腐蚀的特点与机理	(79)
§5-3 传统试验方法的局限性	(80)
§5-4 da/dt 与 K_I 的关系曲线及 K_{ISCC}	(80)
§5-5 K_{ISCC} 的测定方法	(81)

§5-6 K_{ISCC} 在工程设计中的应用	(84)
§5-7 传统试验方法与断裂力学试验方法的结合	(86)
§5-8 压力容器结构应力腐蚀试验	(86)
§5-9 腐蚀疲劳及断裂力学的应用	(88)
参考文献	(89)
第六章 带缺陷的锅炉及压力容器断裂压力的计算	(90)
§6-1 概述	(90)
§6-2 锅炉及压力容器断裂压力的断裂力学计算式	(90)
§6-3 高强度钢制压力容器脆断应力计算式	(92)
§6-4 中低强度钢制压力容器断裂压力计算式	(93)
§6-5 带斜裂纹压力容器及锅炉断裂压力的工程计算式	(95)
§6-6 带表面裂纹的韧性材料制压力容器及锅炉的断裂应力	(100)
§6-7 结束语	(100)
参考文献	(102)
第七章 COD 设计曲线在锅炉、压力容器及管道中的应用	(103)
§7-1 选材选工艺	(103)
§7-2 确定缺陷验收标准	(105)
§7-3 确定压力容器的许用应力	(105)
§7-4 进行断裂事故分析	(106)
§7-5 JWES-2805 标准评定缺陷方法与 COD 设计曲线的对比	(106)
§7-6 阿拉斯加管线的其他评定方法与 COD 设计曲线的比较	(107)
参考文献	(110)
第八章 压力容器(锅炉)防脆断规范	(111)
§8-1 概述	(111)
§8-2 IIW “从脆断破坏观点评定缺陷的推荐方法”及 BSI PD6493	(111)
§8-3 日本焊接工程协会标准 JWES2805	(124)
参考文献	(128)
第九章 工程评定实例	(129)
§9-1 $\phi 1010$ 毫米氨合成塔筒况	(129)
§9-2 断裂力学试验及分析的主要结果	(130)
§9-3 安全评定意见	(136)
附录 I 按 IIW(X-749-74)法 评定择要	(137)
附录 II 按 ASME 规范评定择要	(137)
参考文献	(137)

第一章 绪 论

§1-1 传统强度理论的局限性

传统强度理论是研究构件在外载荷作用下各点的应力,并进行所谓无损伤设计。它要求:

$$\sigma \leq [\sigma] \quad (1-1)$$

即要求构件的应力 σ 必须小于、最多等于材料的许用应力 $[\sigma]$ 。对于脆性材料 $[\sigma] = \sigma_u / n_u$; 对于塑性材料 $[\sigma] = \sigma_y / n_y$ 。其中 σ_u 、 σ_y 分别为材料的抗拉极限和屈服强度; n_u 、 n_y 分别为对 σ_u 及 σ_y 所取的安全系数。它反映了人们对构件断裂各种因素的认识程度。如对外载荷作用下构件产生的应力 σ 计算精确,所选取试样测得的 σ_u 或 σ_y 能够准确地代表构件内部材料对破坏的抗力的话,则可适当降低 n_u 或 n_y 。工程构件如能满足式(1-1)要求,即被认为是安全的。这就是传统强度理论所采用的方法。

对于三十年代广泛采用的低强度结构钢材,其断裂韧性有余而强度不足,结构破坏以塑性失效为主的情形,这种设计方法是合理的。

四十年代广泛地采用了焊接方法。由于焊接工艺水平低,焊接缺陷多,再加之中强度结构钢的低温脆性,因此发生了一系列焊接压力容器、锅炉汽包以及桥梁、“自由轮”低应力脆断事故。特别是五十年代,高强度材料问世以来,此时断裂韧性不足而产生更多、更典型的低应力脆断事故。传统强度理论既不能解释发生事故的原因,也找不出改进的途径。

特别是美国北极星导弹压力壳低应力脆断事故影响极大,它是按照传统强度理论设计的,即将之具体应用于圆筒形压力壳体则式(1-1)变为下式:

$$\sigma = \frac{PR}{t} \leq [\sigma] \quad (1-2)$$

式中: R ——圆筒形壳体的平均半径;

t ——壳体壁厚;

P ——容器承受的内压。

强度是足够的,理应不发生爆破。按机械性能五大指标复核,材料亦无问题。这件事使得工程技术界大为震惊,怎样才能避免事故的发生呢?按传统强度理论的观点,为提高压力壳的安全性,只有提高材料的强度 σ_u 或 σ_y ,或者增大壳体壁厚 t 以增加安全储备 (n_u 或 n_y)。但是事与愿违,事实上正好适得其反,在更低的应力下壳体就脆断了,欲想安全反而更加不得安全。说明传统强度理论在这些新的工程领域内,显得束手无策,完全无能为力。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。

§1-2 断裂力学的产生与发展

六十年代发展起来的线弹性断裂力学成功地解决了这类工程构件的低应力脆断问题。线弹性断裂力学的 K 判据认为:当裂纹构件的应力强度因子(表示裂纹尖端附近应力场强弱程度的一个因子 K_I),达到材料固有的临界值——断裂韧性 K_{Ic} 。(它是平面应变状态下材料

抵抗裂纹失稳扩展的能力)时,裂纹构件就发生失稳断裂(后面尚要详细叙述)。即:

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} = K_{Ic} \quad (1-3)$$

式中: a ——裂纹尺寸;

Y ——几何与受力状态的修正系数。

将上式与式(1-1)对比,可见断裂力学不仅考虑应力的影响,而且考虑裂纹尺寸的影响,而实际的工程构件总是存在各种大大小小的缺陷的。所以断裂力学与实际更为符合。由式(1-3)可以求得压力壳发生断裂时的临界裂纹尺寸 a_c 。其中火箭压力壳如取 1.3 倍的安全系数,水压试验压力为工作压力的 1.1 倍,即 $\sigma = 1.1 \times \frac{\sigma_y}{1.3}$ 。如取 $Y = 1.2$, 则:

$$a_c = \frac{1}{\pi Y^2} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma} \right)^2 = 0.3 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_y} \right)^2 \quad (1-4)$$

为减轻壳体重量,以增大火箭推力,设计选取高强度钢 D6AC: $\sigma_y = 140$ 公斤/毫米²,这种材料的断裂韧性不高,如 $K_{Ic} = 180$ 公斤/毫米^{3/2}。代入上式,则:

$$a_c = 0.3 \left(\frac{180}{140} \right)^2 \approx 0.5 \text{ 毫米}$$

如此小的临界裂纹尺寸常属于探伤灵敏度以下,检查不出或容易漏检。故在水压试验时发生低应力脆断是不足为奇的。按传统强度理论企图通过提高材料强度以增大安全储备,完全忽略断裂韧性,甚至使之降得更低,即 $\frac{K_{Ic}}{\sigma_y}$ 值变得更低,由式(1-4)可见其产生低应力脆断的临界裂纹尺寸 a_c 就变得更小,或者说对于相同的裂纹尺寸,其断裂应力更低也就成为极其自然的结果。因为对这类强度有余、韧性不足而引起的脆性断裂,提高强度不起作用,却反而降低了材料的断裂韧性。这就是传统强度理论处于无能为力状态的内在原因。

线弹性断裂力学通过定量计算,就这样简单地解释了这类高强度材料构件产生低应力脆断的内在原因。不仅如此,它还进而找到解决这类工程问题的现实途径。由式(1-4)可知:如果我们确有把握探测出 $a = 1.2$ 毫米的缺陷,只要保证材料的断裂韧性 K_{Ic} 较高,如要求

$$K_{Ic} \geq 2\sigma_y \quad (1-5)$$

就可避免脆断事故。

对于这种强度有余、韧性不足的高强度钢,适当地降低强度(σ_y 小一些),提高断裂韧性 K_{Ic} ,就能避免压力壳产生低应力脆断而保证生产得以安全地进行。实际上断裂力学也就是这样地解决了这类工程中急待解决的问题。但却对材料及焊缝提出了另一个新的性能控制参量——断裂韧性指标,从而提高了产品质量及其可靠性,确保其安全使用。

宇航压力容器也采用 K_{Ic}/σ_y 为指标的选材标准,即按“强而韧”的标准,以补充以往仅考虑用 σ_y/ρ (ρ 为材料比重)为指标的“强而轻”的选材标准。其中还包括对焊接接头的要求,补充以往的“等强度”原则,还要求按“等韧性”原则来进行焊接接头的设计与选择焊接金属及改进焊接及热处理工艺,以及“强度与韧性相匹配”,发展强而轻而韧的材料及工艺。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可靠性方面取得成功而登上月球的。

断裂力学的发展可追溯到二十年代初,Griffith 在研究飞机窗罩玻璃脆断原因时,通过试验指出:有表面缺陷的玻璃试样,其断裂应力低于材料拉伸强度。同时还总结出断裂强度 σ_f 与表面裂纹深度的平方根($\sqrt{a}$)成反比的实验规律,即 $\sigma_f \sqrt{a} = \text{常数}$ 。他还导出关于玻璃类材料脆断的能量判据。但是直接将其应用于金属材料会引起几个数量级的差异。

生产的发展推动科学技术的发展。四十年代及五十年代,高、中强度钢的应用,结构大型化,厚板焊接、残余应力的存在、材质劣化等使得缺陷发生的几率增大,缺陷尺寸大于临界值的几率增大,由此发生脆断的几率也随之增大。为解决这些问题产生了以应力强度因子理论为主的线弹性断裂力学。进而为解决大量工程常用的中低强度钢的断裂问题,又发展了弹塑性断裂力学。我们在第二章及第三章予以介绍。

压力容器及锅炉损坏的另外两种主要形式是:受往复载荷作用而产生的疲劳破坏及受环境影响而产生的应力腐蚀破坏,这就促使断裂力学应用于疲劳裂纹、应力腐蚀裂纹扩展规律的研究,我们将在第四章及第五章给予阐述。其他各章我们着重介绍断裂力学应用于锅炉及压力容器的实际工程问题。如中低强度钢实用的 COD 设计曲线,断裂压计算式,缺陷评定方法及应用实例等。

§1-3 压力容器及锅炉破坏事例

一、脆断实例

1965年美国发生了另一个著名的 260SL-1 固体火箭发动机压力壳的典型脆断事故。该压力壳内径为 $\phi 6600$ 毫米($\phi 260$ 英寸)。为了减轻重量以增大火箭推力(2分钟产生6百万磅的推力),选取高强度材料以减小壁厚,材料为 18Ni-Cr-Mo-Ti 钢,其屈服强度为 175 公斤/毫米²,设计中取低值再考虑焊缝系数为 0.9,最后取 145 公斤/毫米²。设计内压为 61 大气压,取 1.3 倍安全系数,按传统强度理论式(1-2)计算出压力壳壁厚 $t = 18.15$ 毫米,取最终壁厚为 18 毫米。设计规定对一次载荷的最大水压试验压力为操作压力的 1.1 倍,即 $P_w = 67$ 公斤/厘米²。但是在 1965 年 4 月 11 日水压试验时,只打压到 $P_t = 38$ 公斤/厘米²,也就是说仅为水压试验压力的 56% 时,就发生爆炸飞裂事故。断裂时的切向应力 $\sigma_t = P_t \frac{R}{t} = 67.6$ 公斤/毫米²。不但远低于材料屈服强度(175 公斤/毫米²),还远低于工作应力(110 公斤/毫米²)。属于典型的低应力脆断。由裂源的尺寸及 K_{Ic} 实测的范围,按第 6 章的计算结果求出的断裂应力 $\sigma_c = 60.7 \sim 68.7$ 公斤/毫米²,而实际断裂应力 $\sigma_t = 67.6$ 公斤/毫米²,刚好介于两者之间。

不仅高强度钢制压力容器产生脆断,中低强度钢制压力容器与锅炉亦产生一定数量的脆断事故。早期的有:1944 年 10 月 20 日美国东俄亥俄州的一台 $\phi 21.3$ 米,高 12.8 米的筒形压力容器,三台内径 $\phi 17.4$ 米的贮存液化天然气的球形压力容器,均因韧性差而爆炸,128 人死亡,损失达 680 万美元。

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 $\phi 1.925$ 米,壁厚 150 毫米,全长 18.3 米,重 164 吨,筒体和锻件均为 Mn-Cr-Mo-V 钢。水压试验压力为 490 公斤/厘米²,设计压力为 360 公斤/厘米²,当试验压力达 352 公斤/厘米² 时发生脆断。容器断成两段并飞出四块碎片,其中最大的一块碎片重 2 吨,飞出 45 米。断裂是从法兰锻件与筒体的埋弧焊焊缝开始的,裂源是热影响区与焊缝金属间的一长约 10 毫米的三角形深埋裂纹。

产生脆断的主要原因是退火温度不够(规定为 650℃ 而实际上只加热到 520℃),致使焊缝金属的韧性很低,而又存在一定数量的残余应力。再加之环缝焊接过程中曾中断了预热,残余氢在高残余拉伸应力区聚集而产生了延迟裂纹。

在破坏容器的焊缝金属上测得： $K_{Ic} = 185.5$ 公斤/毫米 $^{3/2}$ ， $\sigma_y = 45.5$ 公斤/毫米 2 ，根据 F.M.Burdekin 推荐的断裂力学计算式(详见第三章)，如不计残余应力，按设计应力 $\sigma = 0.67\sigma_y$ 计算，深埋裂纹的最大允许高度为 17 毫米。按未消除残余应力计算式，其最大允许高度为 3 毫米。前已说明实际上存在一定的焊接残余拉伸应力故而导致脆断。

英国 Cockenzil 电站高压锅炉汽包脆断事故系另一典型事例。汽包内径 $\phi 1700$ 毫米，壁厚 140 毫米，全长 23 米，设计压力 195 公斤/厘米 2 ，水压试验压力 280 公斤/厘米 2 ，材料为 Mn-Cr-Mo-V 钢，经三次水压试验无事，而在 Cockenzil 电站连接组装接管附件后作投产前水压试验时，压力接近满压 280 公斤/厘米 2 时，突然脆性断裂。究竟是什么原因呢？事后发现裂纹表面有 0.02 毫米厚的氧化铁薄膜，认为是退火再热裂纹。测定断裂韧性，按 F.M.Burdekin 计算式计算出临界裂纹尺寸与实际裂纹尺寸相近，即按断裂力学计算该台锅炉汽包处于临界脆断边缘，故前三次水压试验未破坏，而在第四次水压试验时（又增加了管线安装的附加应力）因而产生脆性断裂。

二、疲劳破坏实例

使用中的破坏事故可举芬兰合成氨高压气体水冷器的脆断事例。其管箱外径为 1090 毫米，最小壁厚 85 毫米，设计压力为 310 公斤/厘米 2 ，钢材为 Mn-Cr-Mo-V 钢。该水冷器是 1968 年 12 月制造的，1969 年 11 月第一次投产，工作了 75 天，在 1970 年 3 月第二次投产，于 235 公斤/厘米 2 下运行 1 小时突然断裂。

产生断裂的原因是消除应力热处理温度太低，未能很好地改善材料韧性及消除残余应力，而升温速度控制不好导致产生退火再热裂纹。之所以在第一次投产运行中未发生断裂，而在第二次投产运行时发生脆断，是由于疲劳、应力腐蚀疲劳等作用，使原来尺寸 12×3 毫米的裂纹扩展到临界尺寸 70×5 毫米之故。

三、应力腐蚀实例

例如国内某化肥厂两台 120 米 3 液氨球罐，直径 $\phi 6.1$ 米，壁厚 30 毫米，采用 16MnCu 钢板制造。于 1972 年投入使用，1979 年大修时在两台球罐内侧、南极板与南温带组焊的环焊缝上（手工焊）发现了数以百计的裂纹，大多数裂纹与焊缝垂直（即为横向裂纹），裂纹位于焊肉上，并向两侧母材延伸，裂纹长度一般为 10~30 毫米，最长 47 毫米，深度为 4~6 毫米。裂纹延伸到母材的长度一般不超过 4~6 毫米。使用压力多为 16 公斤/厘米 2 。分析结果为：内表面裂纹是液氨引起的应力腐蚀裂纹。南极板与南温带的环焊缝为最后组焊的焊缝，焊接拘束应力最大，又长年浸泡于介质之中，由此产生应力腐蚀。南非也曾报到过卧式液氨储罐发生应力腐蚀裂纹导致爆炸的事故。

锅炉操作中常加碳酸钠对水作软化处理以防止锅炉结垢。但是锅炉水呈碱性后，由于过热浓缩，碳酸钠往往在汽包的铆接缝内沉积，造成铆钉与钢板的应力腐蚀断裂。铆接锅炉汽包因苛性脆化而断裂事例也屡见不鲜。

由上述极少的几个事例即可看出：要防止锅炉及压力容器断裂，除控制断裂韧性防止水压试验时产生脆断外，尚需要考虑裂纹亚临界扩展问题，如由疲劳、应力腐蚀、腐蚀疲劳及高温蠕变引起的裂纹缓慢扩展问题。上述压力容器与锅炉的三种主要破坏型式都是断裂力学的重要研究内容。

英国调查了 12700 台容器，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。这个几率虽不算太高，但每次灾难性破坏却伴随着惨痛的人身伤亡和严重的经济损失。英国调查的 10 万个容器运行年中发生了 132 件破坏事故

(其中七件是灾难性的)，按事故原因分类如表 1-1。

表1-1

事故原因	件数	百分比 (%)
裂 纹	118	89.3
腐蚀(包括应力腐蚀)	2	1.5
使用不当	8	6.1
制造缺陷	3	2.3
蠕 变	1	0.8
总 计	132	100

在118件由裂纹引起的事故中，又按其性质分类列举如表1-2。

表1-2

裂 纹 种 类	件 数	百 分 比 (%)
疲劳裂纹(机械的, 热的)	47	40
腐蚀裂纹(包括应力腐蚀裂纹)	24	20.3
制造过程中产生的裂纹	10	8.4
未确定的	35	29.6
不易分类的	2	1.7
总 计	118	100

我国球罐事故及产生裂纹的情况是严重的。据不完全统计，我国球罐在水压试验中断裂或泄漏以及在使用中爆破或泄漏的事故率有时高达 2 % 左右。至于球罐的开罐检查中发现表面裂纹情况更是普遍。当然这样高的事故率是不正常的，有着多种多样原因，迫切需要研究解决。

由此可见：

(一)大型压力容器及锅炉汽包难免存在各种缺陷。在冶炼、锻造、焊接、热处理等工艺过程中均可能产生诸如疏松，夹杂物，咬边，未焊透和裂纹等各类缺陷。要完全避免这些缺陷，从工艺技术及经济方面考虑都是难以实现的。而且，即使在制造中情况良好，在使用过程中也会产生裂纹，例如在循环载荷作用下，应力集中部位可能萌生疲劳裂纹，在腐蚀性环境中可能萌生应力腐蚀裂纹，以及原来的微小缺陷及裂纹，在循环载荷作用下，在腐蚀或高温环境中也会缓慢扩展的。

(二)裂纹尺寸增大，将削弱构件原来的断裂强度。当裂纹扩展到某一尺寸时，裂纹突然快速扩展，致使构件发生低应力脆性断裂。

(三)裂纹是否产生失稳扩展，从而导至构件的完全破坏，不仅取决于裂纹尺寸的大小，还受到裂纹部位应力水平和材料抗断裂性能（即断裂韧性）等控制。所有这些都要求利用断裂力学给予定量计算与判定。

§1-4 断裂力学的研究对象与分类

断裂力学是研究裂纹体的强度的。应用弹性理论、弹塑性理论研究裂纹尖端局部地区的急剧变化的应力、应变和位移场以及积聚的能量的变化规律，从而推导得到裂纹失稳扩展的力学条件。研究裂纹缓慢扩展速率与断裂力学参数之间的关系。由于主要研究裂纹快速扩展与缓慢扩展规律，故断裂力学又称为“裂纹力学”。

断裂力学初期的研究工作侧重于高强度低韧性钢的脆性断裂，由于这种钢材在线弹性范围断裂，断口几乎没有明显的塑性变形，故可用线弹性力学理论分析研究，称之为“线弹性断裂力学”。当有人试图沿用线弹性断裂力学研究中、低强度高韧性材料的断裂问题时，由于断裂之前裂纹尖端产生大范围屈服，上述理论失效。但工程上需要解决大量的中、低强度结构钢断裂问题，以及高应变区或局部屈服部位中小裂纹导致断裂的问题，从而逐渐形成了“弹塑性断裂力学”或称为“屈服断裂力学”的新学科。

“断裂动力学”是研究动载下裂纹失稳扩展与止裂规律的。目前断裂动力学所提出的一些材料的断裂韧性参数虽已逐步用于实际，例如美国考虑到核容器失水后瞬时大量补水受到的动载，而在核容器规范中（ASME 锅炉与压力容器规范第 III 篇）采用了动态断裂韧性 K_{ID} 及止裂断裂韧性 K_{IS} 作为控制参量，但是从总的来说，将动态断裂力学普遍应用于实际结构，作为定量止裂设计理论尚有待进一步研究。

断裂力学除了研究脆性裂纹失稳扩展，还研究疲劳破坏、应力腐蚀破坏、蠕变破坏等的裂纹扩展及断裂规律。近几年来，也开始研究在静载下延性裂纹缓慢扩展的规律。

断裂力学与工程可靠性理论相结合，于七十年代形成了“概率断裂力学”。要全面在工程中应用还有待于长期积累各种资料数据和对各种事故与特殊工况进行详尽分析。但是在参数敏感性分析方面，即研究影响断裂的各种参数的变化对断裂概率的影响（如为提高核容器的安全可靠急需了解集中人力与财力投到哪几个环节最收实效），已得到初步应用。

和上述从宏观的力学规律研究断裂现象的“宏观断裂力学”相区别，从微观的位错理论等研究断裂问题，形成了“微观断裂力学”。近年来，有人又倡导所谓宏观与微观相结合的断裂力学。

总之由于断裂力学兴起的年代较晚，它所涉及的学科又多，当前它还处在蓬勃发展阶段，因此无论研究的对象、方法及其分类等都尚未定型。

当前总的研究趋势是：从线弹性范围向弹塑性范围发展；从静力学范围向动力学发展，从宏观微观分离走向宏观与微观的结合；从“确定性”的方法向概率统计的方向发展。值得庆幸的是，断裂力学的发展一直是与生产实际密切结合的，因此，近年来，有人认为断裂力学不仅是固定力学的一个分支，而且是工程技术科学或材料科学的一个分支，较广泛地应用于工程实践中。从目前来看，主要在压力容器、航空、造船、桥梁等工业部门得到应用。而且断裂力学的研究成果已列入这些部门的设计、制造、验收与使用规范。

§1-5 断裂力学的基本判据简介

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。他认为裂纹失稳快速扩展的必要

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。

设单位厚度的无限大板上具有一个穿透板厚的，长为 $2a$ 的中央裂纹。该板承受拉伸应力 σ 后，两端固定如图1-1(a)所示。图1-1(b)示出其载荷位移图，板内储存的弹性应变能可用面积 OAB 表示。当裂纹扩展 Δa ，则裂纹体的系统刚度减小，故载荷一位移图中直线斜率下降，储存的弹性应变能相应减小为 OBC。显然裂纹从 a 扩展到 $a + \Delta a$ ，所释放的弹性应变能可用面积 OAC 表示。

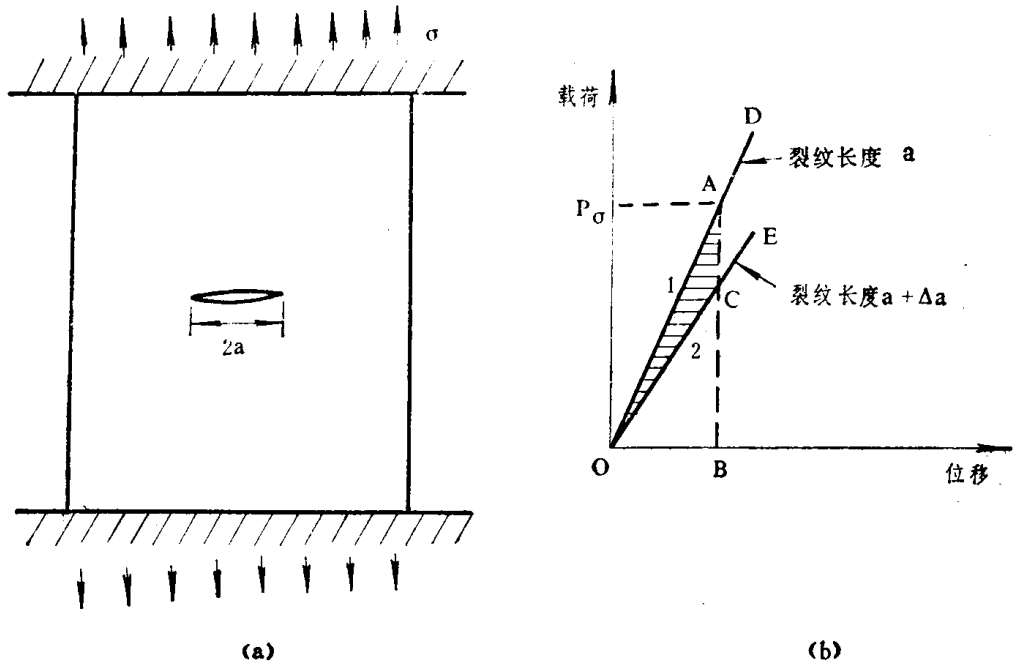


图 1-1

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释放的应变能为 $\frac{dU}{da}$ ，简称应变能释放率，常用 G 表示，又称之为裂纹扩展力。

上述关系，根据弹性理论的计算，由于长 $2a$ 的裂纹存在，平面应力状态的弹性应变能降低值为：

$$U = \pi \sigma^2 a^2 / E \quad (1-6)$$

对于平面应变状态：

$$U = (1 - \nu^2) \pi \sigma^2 a^2 / E \quad (1-7)$$

式中：E——弹性模量；

ν ——泊桑系数；

σ ——无限远处作用的拉伸应力；

a ——裂纹半长。

因此：

$$G = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} \quad (\text{平面应力状态}) \quad (1-8)$$

$$G = \frac{(1 - \nu^2) \pi \sigma^2 a}{E} \quad (\text{平面应变状态}) \quad (1-9)$$

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。 G 是一个材料常数，

由实验决定，又称为断裂韧性。因此用

$$G \geq G_c \quad (1-10)$$

判断裂纹失稳扩展。

上例裂纹扩展时，
平面应力状态：

$$\frac{\pi \sigma_c^2 a}{E} = G_{1c}$$

平面应力的断裂应力：

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{EG_{1c}}{\pi a}} \quad (1-11)$$

平面应变的断裂应力

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{EG_{1c}}{(1-\nu^2)\pi a}} \quad (1-12)$$

二、应力强度因子判据 (K 判据)

Irwin 在其他人对裂纹尖端的应力与应变场进行分析，得出一组具有奇异性的应力场和位移场公式的基础上，引进了一个重要参量—应力场强度因子 K。这样一来，断裂力学问题与弹性力学问题更广泛地联系起来，从而形成了线弹性断裂力学体系。

因裂纹体受载情况不同，裂纹破坏有三种基本型式：I 型或称张开型，II 型或称滑开型，III 型或称撕开型。有时实际情况为三种型式的复合。三种型式中以张开型最危险，工程中最为重视，故仅介绍 I 型。

图1-1所示的具有中央贯穿 2a 长的裂纹的无限大板受均匀拉伸应力 σ 作用的情况即为 I 型裂纹问题。Irwin 用 Westergaard 方法分析裂纹尖端附近的应力与应变场，得到如下近似公式：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_z &= 0 \text{ (平面应力)} \\ \sigma_z &= \nu(\sigma_x + \sigma_y) \text{ (平面应变)} \\ \tau_{yz} &= \tau_{zx} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

式中： $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ ——各应力分量。

r, θ ——以裂纹尖端为原点，xy 平面上的极坐标；

K_I ——各应力分量的共同因子 $\sigma \sqrt{\pi a}$ ，下标 I 表示 I 型裂纹；

各应力分量均与 $\sqrt{r}$ 成反比，当 $r \rightarrow 0$ 时，则各应力分量趋于无限大。但 K_I 在裂纹尖端附近却是一个有限量。 K_I 是一个表示这个奇异应力场强弱程度的因子。 K_I 值增大则各点的应力按同一比例增大， K_I 值减小则各点的应力按同一比例减小。

实验证明，当 K_I 达到某一临界值，裂纹就失稳扩展，该值称为临界应力强度因子，以 K_{Ic} 表示。 K_{Ic} 是一个由实验决定的材料常数。不同的材料就有不同的 K_{Ic} 值。因 K_{Ic} 表征了

材料对裂纹失稳扩展的抗力，又称之为断裂韧性。故脆性断裂的条件为：

$$K_I \geq K_{IC} \quad (1-14)$$

又称为 K 判据。K 判据与 G 判据是等价的，第二章将证明它们具有如下关系式：

平面应力状态

$$G_I = \frac{K_I^2}{E}; \quad G_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{E}$$

平面应变状态

$$G_I = \frac{(1-\nu^2)K_I^2}{E}; \quad G_{IC} = \frac{(1-\nu^2)K_{IC}^2}{E}$$

(1-15)

一般情况下，

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

式中：Y——取决于几何形状与受力状态的系数。

其临界值为

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a_c} = K_{IC}$$

从而得到：

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

a_c 称为裂纹的临界尺寸，在应力 σ 作用下，如果裂纹尺寸 a 大于或等于 a_c ，则裂纹失稳扩展。因此也可把脆性断裂判据改写为：

$$a \geq a_c \quad (1-16)$$

三、裂纹尖端张开位移判据 (COD 判据)

如果将线弹性断裂力学的 K 判据或 G 判据用于低强度高韧性材料，由于断裂前裂纹尖端塑性区尺寸大到可与裂纹尺寸相比拟的程度则使该判据失效。同时欲测定这类材料的 K_{IC} ，试样尺寸要求极大，使之失去意义，当然与之同时要求极大吨位的试验机。

Wells 对弹塑性断裂问题引进了裂纹尖端张开位移 (简称 COD) 概念。认为裂纹尖端材料的塑性应变达到某一最大允许值时，裂纹就将扩展。由于裂纹尖端塑性应变不易测量，但它与裂纹尖端张开位移有一定关系，故用 COD 作为控制裂纹开始扩展的参量。即裂纹尖端张开位移 COD (或用 δ 表示) 达到材料固有的临界值 δ_c 时，裂纹就要开始扩展：

$$\delta \geq \delta_c \quad (1-17)$$

又称之为 COD (δ) 判据。弹塑性状态及全面屈服状态均有 δ 的表达式，详见第三章。

在线弹性情况下， δ 判据与 K 判据等是等价的。第三章将给出它们的换算关系，很明显 COD 判据应用范围较线弹性判据为广，特别对工程中大量常见的弹塑性断裂及全面屈服断裂实际问题，提供了解决问题的途径。

大量的大型宽板结构试验数据及模拟或实物容器断裂试验验证了这一判据，使之在工程中得到广泛的应用。

四、J 积分判据

J 积分的定义是：

$$J = \int_{\Gamma} W(x, y) dy - \vec{T} \frac{\partial u}{\partial x} ds \quad (1-18)$$

式中：W(x, y)——任一点 (x, y) 的应变能密度，即单位体积的应变能；

Γ ——围绕裂纹尖端的任意积分路径；
 $\vec{T}$ ——在路径 Γ 上任一点 (x, y) 外部材料对 Γ 弧元 ds 上沿外法线方向作用的张量矢量： $\vec{T} = \sigma_{ij} \vec{n}$ ；
 $\vec{n}$ ——该点 (x, y) 外法线单位矢量；
 $\vec{u}$ ——该点 (x, y) 的位移矢量；
 ds —— Γ 上的弧元(见图1-2)。

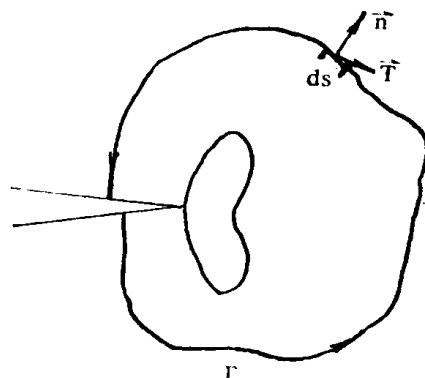


图 1-2

由于 J 积分值具有与积分路径无关的特性，如果 Γ 路径取得距离裂纹尖端很近，则 J 积分值表征了裂纹尖端附近的应变能及内应力功的状况，故可以认为 J 积分值是表征裂纹尖端应力应变场力学状况的平均度量。

对线弹性断裂， J 积分值与应变能释放率 G 是等价的。因此在小范围屈服条件下， J 积分值就表示裂纹扩展单位面积时系统所释放的能量。

所以 J 积分可看成 G 在弹塑性情况下的推广。故而提出：当 J 积分达到材料的临界值 J_0 时裂纹开始扩展。即以

$$J \geq J_0 \quad (1-19)$$

作为断裂判据。

§1-6 断裂力学在锅炉及压力容器应用的主要方面

由前所叙可明显看出，利用断裂力学对锅炉及压力容器进行事故分析，取得了很大成效。它不仅能定量解释事故发生的原因，还进而提出解决问题的途径，使原来无法解决的重大工程问题，得以顺利的解决。

断裂力学建立了裂纹尺寸、应力或应变水平及材料断裂韧性三者间的定量关系。这就为确保锅炉及压力容器的安全及经济使用提供了有效的手段。例如当已知设计应力及裂纹尺寸（往往按漏检缺陷规定“设计裂纹尺寸”），通过选材提出材料应达到的断裂韧性值以达到控制脆断事故发生的目的，如前所叙脆断是锅炉及压力容器的主要破坏形式之一。另外通过提高材料抗应力腐蚀的能力（例如国外发展新材料能使之抗应力腐蚀性能提高数倍，用于重要的压力容器），以防止应力腐蚀断裂。当然与此同时还要用断裂力学来指导选择优良的焊接等工艺来与之配合。所以指导选材和选取优良制造工艺以提高锅炉及压力容器质量，创名牌产品提高竞争能力（特别是出口产品）是断裂力学应用的一个重要方面。

按“质量控制标准”（国外又称之为“随意性标准”）检查锅炉及压力容器，或者是使用一段时期后作定期检查，往往发现超标缺陷或裂纹。继续使用唯恐不安全，停止使用又无充足理由，但是依据断裂力学就可定量评价缺陷对结构安全可靠性的影响，确定其能否发生断裂，而且通过疲劳，应力腐蚀及蠕变的断裂力学计算能定量估算构件的安全使用寿命。在这些方面断裂力学取得了很大成效。近十年来国外已制订了许多以断裂力学为基础的缺陷验收标准。所以在已知材料断裂韧性及应力情况下，判断已知缺陷能否使用或制定科学的缺陷验收标准，是断裂力学应用的另一个重要方面。

当然利用断裂力学进行破坏事故分析，在已知缺陷尺寸及材料断裂韧性的情况下，确定

合理的工作压力（升压使用以达到物尽其用的目的，降压使用以确保安全），以及采用新的“破损安全设计”思想方法，结合“断裂管理控制”，使产品在使用寿命期间，裂纹不至扩展到允许界限范围以外。例如国外对运输液化石油气及液化天然气的设备（实际上由几个大型球罐组成）就是这样设计与控制的。这些也都是断裂力学在锅炉及压力容器应用的重要方面。

一、选材选工艺

随着压力容器及锅炉的大型化、轻量化，常不得不选用强度级别较高的材料，此时断裂韧性低，应力腐蚀界限应力强度因子低。强度有余，韧性不足是高强度材料的特点，也是高强度钢制压力容器产生脆断的一个主要原因。因此对这类压力容器选材时，必须兼顾强度与韧性两个参量。如按传统强度理论观点，仅以强度为指标，片面追求强度而损害韧性，以为强度越高越安全，有时却适得其反。

例如国内某部门试制高强度钢球形容器，先选用 $\sigma_u = 195$ 公斤/毫米² 的高抗拉伸强度的钢材，它对设计应力的安全系数 $\sigma_u/\sigma_{\text{设}} = 2.2$ ，看来似乎安全储备不低，其结果是试制出来的几台容器均在水压试验中脆断，后按断裂力学关于高强度钢兼顾强度与断裂韧性这个选材原则，改变钢材化学成份及热处理工艺等，使其强度由 195 公斤/毫米² 下降为 140 公斤/毫米²。而仅保证强度的安全储备 $\sigma_u/\sigma_{\text{设}} = 1.58$ ，这样一来，按传统的强度设计观点看来安全系数由 2.2 降为 1.58，应该比以前更不安全了，但实际结果却正好相反，容器却台台安全通过了水压试验。这是因为按断裂力学观点：该材料是因为强度有余韧性不足而产生的脆断，强度已不是控制指标了。此时适当地降低了一些强度而使断裂韧性值由 168 公斤/毫米^{3/2} 上升为 214 公斤/毫米^{3/2}，提高了 27%，而使临界裂纹尺寸相应提高 60%，故其实际安全可靠性的确确实提高了。

由于高强度材料选材的标准改变了，材料部门研制高强度钢材新品种的方向，也从重点追求高强度指标转向研制“强而韧”的材料，这是一大进步。

中低强度钢制压力容器、锅炉及管道，一般说来其断裂韧性值较高，因而在工作应力下导致裂纹失稳扩展的临界裂纹尺寸较大，故相对说来其低应力脆断几率较小。但是有时焊接材料选择不当，焊接工艺参数控制不严致使焊缝断裂韧性变低；修补焊缝部位漏检缺陷过大；焊接残余拉伸应力过高而未能很好消除；由强制就位焊接致使焊接拘束应力过大等原因，也会产生低应力脆断，如前述事例。因此中低强度钢制锅炉及压力容器也有通过选材控制断裂的问题。

对于中低强度钢制锅炉及压力容器，设计应力水平已定，再假定可能漏检的裂纹尺寸，就可按第三章叙述的 COD 设计曲线来确定母材及焊缝要求的最低断裂韧性 δ_c ，按此要求选材及选择合宜的焊接及热处理等工艺，从而保证母材及焊缝的断裂韧性达到规定的最低值，就能有效地避免脆断事故的发生。

二、缺陷安全评定及“符合使用要求”的验收标准

以往的产品探伤验收标准不是从分析产品使用要求出发，而是由当时工艺及探伤水平按经验制定的。随着无损探伤方法的不断改进，探伤灵敏度的不断提高，能检出越来越小的缺陷，其中有些缺陷对断裂强度并无实质性的损害，如果一有裂纹，不论其尺寸大小，所在部位的应力水平、材料断裂韧性有多高，一律报废，显然不能充分发挥材料的潜力。另外这将使存在着对产品使用性能危害性小的缺陷的材料造成大量的不必要的浪费。例如英国对高质量压力容器主焊缝进行统计，在全部返修的缺陷中，仅夹渣就占 84%，他们认为其中绝大部分返修都是不必要的。不必要的返修造成巨大的人力、物力浪费的明显例子，是第七章介绍

的美国输油管线，全部返修费用将高达5200万美元，后用 COD 设计曲线并试验验证后，仅一段跨河管线就节省了几百万美元。我们国内几个单位在 1973 年，对某厂生产的五台内径 $\phi 1010$ 毫米的多层包扎氨合成塔焊缝横向裂纹安全评定，结果节省了数百吨低合金钢材及数百万人民币。我们对某化肥厂进口的两台内径 $\phi 700$ 毫米，320 大气压的高压氨分离器安全评定，解决了该厂停产每天损失数十万元人民币的问题。1976 年我们为某电厂 20 万千瓦发电机组的 670 吨/时高压锅炉汽包进行断裂力学分析试验，不仅节省近百万元的设备费，而且使该厂即时投产，间接经济收益数千万元，现已安全运转达六、七年之久。我们对 11 万吨/年尿素合成塔、高压蓄热器、高压钢管、1C,13 高压容器及球罐等生产实际问题进行的断裂力学安全评定均有类似的作用。例如我们国内几个单位对某石化总厂由国外供材、组装的四台球罐的超标缺陷，进行安全评定。这些球罐虽保留有安全评定容许的超标缺陷，仍安全运转数年之久，取得很好的经济收益。

美国西屋电气公司为美国海军部建造的一批核潜艇，偶然发现发射导弹器的压缩空气容器有裂纹，后经普遍探伤，每艘潜艇内的容器都有或大或小的裂纹。美国海军部认为全部拆换涉及到国家安全。经断裂力学分析评定，认为其中绝大多数是安全的。

不必要的或不良的返修不仅造成经济上的重大损失。从安全性方面来看，往往也造成不良的后果。因为在高拘束度下进行返修，常产生更严重的有害缺陷，焊后现场热处理等亦不如制造厂有利，往往更易引起事故。例如日本德山的 2226 立方米丙烯球罐，系 80 公斤级高强度钢制成，在水压试验时破裂，裂源恰在补焊部位，这类事例屡见不鲜，教训是惨痛的。

为此，国外技术先进的国家均制定出，基于断裂力学的“符合使用要求”的定量验收标准或指导性方法。例如美国 ASME 锅炉及压力容器规范第 III 篇附录 G，第 XI 篇附录 A 就是以线弹性断裂力学为基础制订的。1974 年国际焊接学会 IIW 提出了“从脆断观点评定缺陷的推荐方法”。英国标准协会 1976 年提出“焊接缺陷验收标准草案”，1980 年修改后为 BSI PD6493(1980)。日本 1976 年也制订了 JWES2805“按脆断评定焊接缺陷验收标准”，1980 年又出了修订稿。我们在第八章给以介绍。国外同时采用两套标准监控锅炉及压力容器的制造与使用，使之既安全又经济。我国机械工业部通用机械研究所等十几个单位，也正在进行试验研究与理论分析工作，准备提出我国的标准文件。

三、断裂事故分析

在低应力脆断结构的碎片断口上，通常都能找到断裂源，即裂纹或类裂纹缺陷（有时肉眼可见，有时需进行断口形貌学分析），进而求得原始缺陷的尺寸。结构材料的断裂韧性可直接由试验测定，有时亦可由材料的 V 型缺口冲击试样冲击值换算得到。依据常规的应力分析不难求得断裂时裂纹部位的应力。进而借助于断裂力学建立三者间的关系，就不难定量地证实必然发生断裂的原因。如本章 §1-3 节所简述的各个破坏实例。同采用传统强度理论能定量地说明结构塑性失效事例一样，采用断裂力学的断裂判据亦能定量地说明脆断的原因，从而有针对性地采取措施以防止脆断事故的发生。鉴于本章 §1-2 及 §1-3 中已有足够的说明，这里不再赘述。