

林钧富 周道祥 李泽震 编 著

压力 容器 缺陷 评定

中国石化出版社

压力容器缺陷评定

林钧富 周道祥 李泽震 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书叙述了线弹性和弹塑性断裂力学的基本原理；介绍了压力容器裂纹的疲劳扩展特性及一些断裂参数的测试方法；简介了国内外压力容器缺陷评定规范，并加以对比；列举了有关带裂纹压力容器的试验研究；提供了国内外较具特色的压力容器缺陷评定实例；还介绍了断裂力学及其在压力容器缺陷评定中的应用的发展、以及国内外压力容器缺陷评定规范的修订及进展。书后附有压力容器缺陷评定报告范例。本书内容丰富，语言简练，结构紧凑，突出了与工程实际紧密结合的特点。

本书可供从事压力容器研究、设计、制造、安装、检验和管理的工程技术人员参考，亦适用于大专院校有关专业师生。

压力容器缺陷评定

林钧富 周道祥 李泽震 编著

中国石化出版社出版

(北京朝阳区太阳宫路甲1号 邮政编码：100029)

海丰印刷厂排版

海丰印刷厂印刷

新华书店 北京发行所 发行

787×1092毫米 32开本 8¹/₂印张 174千字印1-3300

1991年8月北京第1版 1991年8月北京第1次印刷

ISBN 7-80043-155-X/TH·023 定价：3.90元

前 言

压力容器的安全可靠，始终是人们非常关心的问题。为此，在一些国家的压力容器规范中，都不允许有类似裂纹的缺陷存在，然而事实表明，压力容器都不同程度地存在着这类缺陷。随着设备大型化、高强度钢和焊接技术的广泛使用，使产生裂纹类缺陷的倾向有增无减。若按过去惯用的方法，就要求消除容器上所有的缺陷或将容器作退役处理。这就意味着要花大量的经费、人力和时间。据统计，我国目前共有重要的在役压力容器100余万台，如全面进行检测，对超标缺陷返修，估计将需要花费150多亿元。

事实上，有些缺陷并不影响压力容器的安全使用。这样，一个新的工程概念，即以“合于使用”为原则的缺陷评定方法发展起来了。它主要是建立在断裂力学基础之上的。

七十年代初，一些工业技术先进的国家，就开始把断裂力学的研究成果应用于工程实际。到1985年止，国外先后颁布了十多个缺陷评定规范或指导性文件，并广泛地应用于工程实际，因而受到普遍重视。

近二十年来，我国科研人员及工程技术人员对断裂力学在压力容器的应用方面进行了大量工程实验研究、工程应用研究和理论分析工作，并取得了一系列很有价值的成果。压力容器学会和化工机械与自动化学会共同组织人员，认真总结国内外压力容器断裂力学的研究成果和实践经验，于1984年编制出我国“压力容器缺陷评定规范”(CVDA——1984)。

这一规范已应用于我国近千台压力容器的缺陷评定工程中。这对于防止压力容器破坏事故起到了重要作用，已取得了巨大的经济效益。

为了反映断裂力学在压力容器上应用的成果，并促使其进一步发展，为了帮助有关工程技术人员更好地掌握和应用“压力容器缺陷评定规范”，特编此书。

本书阐述了线弹性和弹塑性断裂力学的基本原理和一些断裂参数的测试方法，介绍了带裂纹压力容器试验研究成果，对国内外压力容器缺陷评定规范作了简介，给出了国内外压力容器缺陷评定实例，总结了断裂力学在压力容器缺陷评定中的应用经验，并介绍了这方面的进展情况。

我们希望，本书能帮助压力容器的工程技术人员熟悉、掌握和应用“压力容器缺陷评定规范”，对在役压力容器进行检测和缺陷评定，以达到安全、经济的目的。

在本书的编著工作中，我们得到了周则恭教授、彭汝英和曾广欣高级工程师的帮助，在此一并致以深切的谢意。

限于编著者的水平，难免出现缺点和错误，望读者提出批评指正。

目 录

前 言

第一章 绪 论	1
§ 1-1 压力容器与锅炉的断裂	1
§ 1-2 断裂力学的产生与发展	5
§ 1-3 压力容器的“质量控制标准”和 “合于使用评定标准”	8
第二章 线弹性断裂力学基础	12
§ 2-1 引 言	12
§ 2-2 裂纹扩展的能量释放率—— G 判据	13
§ 2-3 裂纹尖端的应力场及应力强度因子	16
§ 2-4 平面应变断裂韧度 K_{Ic} 的测试方法	22
§ 2-5 应力腐蚀界限应力强度因子 K_{Isc} 的测试方法	27
第三章 弹塑性断裂力学基础	34
§ 3-1 概 述	34
§ 3-2 裂纹尖端张开位移 (COD) 理论	35
§ 3-3 J 积分理论	41
§ 3-4 COD 测试方法	46
§ 3-5 J 积分的测试方法	60
第四章 裂纹的疲劳扩展	66
§ 4-1 疲劳裂纹扩展特性	66
§ 4-2 疲劳裂纹扩展速率	68

§ 4-3	疲劳裂纹扩展寿命估算	72
§ 4-4	疲劳裂纹扩展速率的测试方法	76
第五章	压力容器缺陷评定规范简介	83
§ 5-1	COD 设计曲线	83
§ 5-2	国外压力容器缺陷评定规范简介	87
§ 5-3	我国压力容器缺陷评定规范简介	100
第六章	带裂纹压力容器试验研究	108
§ 6-1	静压爆破试验	108
§ 6-2	疲劳试验	138
第七章	压力容器缺陷评定实例	150
§ 7-1	概 述	150
§ 7-2	国内压力容器缺陷评定实例	156
§ 7-3	国外压力容器缺陷评定实例	178
第八章	压力容器缺陷评定进展	195
§ 8-1	压力容器及管道缺陷评定规范 的修订	195
§ 8-2	EPRI与R/H/R6规范的修订及进展	204
§ 8-3	断裂力学及其在工程中的应用的进展	212
附录	球罐缺陷评定报告	217

第一章 绪 论

§ 1-1 压力容器与锅炉的断裂

随着现代工业的迅速发展,近几十年来,由于大量采用高强度和超高强度材料,广泛地运用焊接技术,尤其是压力容器向大型化发展,厚截面或超厚截面压力容器日益增多。在化学工业和石油化学工业中,还大量使用中低温压力容器。这些都使容器与锅炉断裂事故增多,引起了世界各国的普遍关注,从而也推动了对断裂问题的研究。这里我们介绍几例较为典型的压力容器及锅炉断裂事故^[1,2,3]。

五十年代末期,美国北极星导弹固体燃料发动机壳体在试验发射时发生爆炸事故,壳体所用材料为D6AC高强度钢($\sigma_s=1400\text{MPa}$,破坏应力低于屈服应力 σ_s 的一半。破坏是突然发生的,事前无明显预兆,损失严重。这一事故用传统的强度理论无法解释。1965年美国发生了另一著名的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 $\phi 6600\text{mm}$,材料为18NiCrMoTi钢,其屈服强度为 1750MPa ,设计中考考虑焊缝系数0.9,强度限取 1450MPa ,按传统强度理论设计壁厚为 18mm 。水压试验压力为 6.7MPa 但1965年4月11日水压试验时,打压到 3.8MPa 结果发生了爆炸飞裂事故。此时破坏应力 $\sigma_f=676\text{MPa}$,远低于设计的工作应力 1100MPa 。这两个事故对断裂力学的产生有重大影响。

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 $\phi 1.925\text{m}$ ，厚 150mm ，全长 18.3m 。筒体和锻件材料为MnCr-MoV钢，设计压力为 36MPa ，水压试验压力为 49MPa ，试验中压力达 35.2MPa 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 20kN 飞出 45m 远。断裂是从法兰锻件与筒体的埋弧焊焊缝开始的，裂源是焊缝金属与热影响区之间一个约 10mm 长的三角形深埋裂纹。产生脆断的原因主要是退火温度不够，比规定温度低 130°C ，致使焊缝金属韧性低，又有残余应力存在。加之环缝焊接过程中曾中断预热，残余氢在高残余拉应力区聚集而产生延迟裂纹。

1966年英国Cockenzil电厂锅炉汽包在水压试验时发生断裂破坏。筒体长 23m ，内径 $\phi 1700\text{mm}$ 、壁厚 140mm ，材料为MnCrMoV，设计压力为 19.5MPa ，水压试验压力为 28MPa ，该容器以新的贯通形管接头代替旧的管接头，在沿该管接头的汽包筒身内侧靠近省煤器接头处有一个长 330mm 、深 90mm 的大裂纹。破坏从这里开始，裂纹扩展呈人字形前进。

汽包的设计、选材、制造、热处理及检验均符合英国标准BS1113-1958要求。焊接完毕后，在退火前磁粉探伤并未发现任何裂纹。该裂纹在退火处理的初期形成，但尚未达到临界尺寸，顺利通过三次水压试验。在Cockenzil电站连接组装接管附件后作投产前的水压试验时，压力接近满压 28MPa 时，突然发生脆性破坏。

1969年西德一台用MnNiMoV (BHW38) 低合金钢制成的锅炉汽包，内径 $\phi 1450\text{mm}$ 、壁厚 75mm 、总长度为 11.6m 。当水压试验压力达工作压力的 1.3 倍时，汽包突然发生脆性断裂。断口分析表明：在第一个下降管管接头附近有一条长

240mm、深15mm的裂纹。断口呈黑色,裂纹边缘有氧化皮,这说明裂纹是在消除应力退火时产生的。断裂从第一个下降管缺陷位置开始。向封头扩展的裂纹有三条。

西德的这个汽包发生脆断事故的主要原因是管接头处产生消除应力退火裂纹,而钢的强度值又比规定的下限值高200MPa,故韧性值偏低。

1970年,日本一台多层压力容器在水压试验中突然发生脆断。容器用HT60钢制成,内径为 $\phi 1560\text{mm}$ 、壁厚144mm、全长6.02m。容器焊后未作消除应力退火处理就进行水压试验,当试验压力达到1.5倍的设计压力时突然发生脆断。断裂发生在筒体与锻造封头的环焊缝靠近锻件一侧的熔合线上。造成破坏的原因是焊接至30mm深的部位时,由于焊缝中氢的影响,产生断断续续的裂纹,存在有残余应力。在水压试验中裂纹扩展达到临界尺寸,造成破坏。

1970年3月,芬兰合成氨高压气体水冷器在23.5MPa压力下运行中突然破坏。该水冷器是1968年12月制成的,材料为MnCrMoV钢。其管箱外径为 $\phi 1090\text{mm}$ 、最小壁厚85mm,设计压力为31MPa。1969年11月第一次投产运行75天,1970年3月第二次投产运行1hr发生脆断。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并消除残余应力,而升温速度控制不好,致使产生退火再热裂纹。由于疲劳与腐蚀疲劳等的作用,使原来尺寸为 $12 \times 3\text{mm}^2$ 的裂纹扩展到临界尺寸 $70 \times 5\text{mm}^2$,造成破坏。

日本高压气体安全协会对球罐破坏事故作过调查。日本HT-60和HT-80钢制造的大型球罐,在45只中就查出近2000条裂纹,其中长度超过10mm的有600条。1968年就有两个直径超过10m的球罐在水压试验时发生脆断。

英国调查了12700台容器，制造中发生灾难性事故的 概率为万分之二点三；使用中发生灾难性事故的概率约为万分之零点七。这个值虽不算高，但每次灾难性事故总伴随有惨痛的人身伤亡和重大的经济损失。英国调查的10万个容器中，运行一年发生了132件破坏事故（其中7件是灾难性的），按事故原因分类如表1-1。

表 1-1 事故原因分类表

事 故 原 因	件 数	百分比(%)
裂 纹	118	89.3
腐蚀(含应力腐蚀)	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，按其性质分类 列 出 表 1-2。

表 1-2 造成事故的裂纹性质分类表

裂 纹 种 类	件 数	百分比(%)
疲劳裂纹(机械的,热的)	47	40
腐蚀裂纹(含应力腐蚀裂纹)	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

由表1-1中可以清楚地看出，由于裂纹扩展造成破坏占总数的比例高达89.3%，而疲劳裂纹及腐蚀裂纹引起的破坏又占其中60%以上。由此可见，解决好了带裂纹容器的安全使用问题，将会大大降低事故率，对提高生产能力有着重大的作用。

我国球罐中出现裂纹以及造成事故的情况同样是严重的。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，有时竟高达2%左右。近几年来，大量球罐开罐检查发现，绝大多数球罐都存在着数量不等、严重情况不同的裂纹，对安全生产造成威胁，迫切需要研究解决。

§ 1-2 断裂力学的产生与发展

在相当长的历史时期内结构构件的设计都是依照一定的强度条件进行的，要求构件内的工作应力 σ 不大于材料的允许应力 $[\sigma]$ 。在建立计算工作应力的理论公式时，采用了连续性假设和均匀性假设，认为组成构件的材料是密实的，没有空穴或裂隙等缺陷。至于假设与实际材料之间的差距，计算模型与实际工作状态的差距，载荷估计误差及一些不确定因素的影响，均放到安全系数中考虑。这种无损设计思想反映了人们对造成构件破坏的各种因素的认识水平，一定程度上正确地反映了在广泛采用低强度结构材料情况下的断裂规律，所以是相对合理的，是可行的，满足了工程要求。

在四十年代广泛采用了焊接工艺。由于焊接水平低，焊接缺陷多，加上中强度钢的低温脆性，焊接压力容器、锅炉汽包以及桥梁、舰船等发生了一系列的脆断事故。尤其是到五十年代，大量使用高强度材料使脆断事故日益频繁。例如

在第二次大战期间，美国二千五百艘自由轮发生了一千多次破坏事故，其中238艘船完全报废，19艘沉没。据统计，有24艘船舶甲板完全断裂。事故大多发生在美国、冰岛、英国这条北大西洋航线上，这里冬季气温多在零度以下，船又是全焊接结构。1938年到1942年间各国共有四十座桥梁倒塌，仅比利时一地在1947年到1950年的四年内，就有十四座桥梁发生脆断事故，其中六次是在低温下发生的。1954年，英国两架“彗星”式喷气式飞机先后在地中海上空发生爆炸失事。许多国家多次发生压力容器、锅炉与压力管道的断裂事故。尽管事故迭起，当时并未引起足够的重视，一度甚至认为是由未预料到的偶然因素造成的。五十年代后期，美国北极星导弹固体燃料发动机压力壳发射时的爆炸事故，才引起人们的高度重视。

对于事故所作的大量调查研究表明，事故绝大多数是由构件中的裂纹扩展造成的。此时工作应力大多低于材料的屈服强度，这种破坏又称为低应力脆断。传统的强度理论无法解释这类破坏事故，也无法找到避免发生类似事故的途径。在常规设计中虽然考虑了应力、材料的强度指标，以及几何形状突变处的应力集中，却没有考虑构件中不可避免地存在某种缺陷或裂纹，所以它无法解决裂纹所带来的问题。人们有必要研究裂纹扩展的规律以及材料抗断裂的能力，从而发展了断裂力学。

断裂力学的出现可追溯到二十年代初期，Griffith 在研究飞机窗罩玻璃脆断原因时，通过实验发现：有表面缺陷的玻璃试样，其断裂应力 σ_f 低于拉伸强度，随着玻璃表面裂纹深度的增加，断裂应力逐渐下降（图1-1）。他总结出断裂应力 σ_f 与表面裂纹深度 a 的平方根成反比的规律，即

$c_f \sqrt{a} = \text{常数}$ 。

进一步的研究表明，对那些材料强度很高的结构构件来说，因强度不足造成破坏的危险不再是唯一重要的了。高强度材料韧性劣化，变得“娇”脆起来，对裂纹非常敏感，韧性不足成了真正的威胁。在这种情况下，裂纹尖端局部区域应力场强弱程度对是否引起裂纹扩展起决定作用。断裂力学

就是要寻找决定裂纹尖端应力场强弱程度的力学参量——应力强度因子 K_I (或 K_{II} , K_{III})，从而和材料抗断裂的能力——断裂韧性 K_{Ic} 一起建立断裂判据：

$$K_I \leq K_{Ic}$$

断裂力学方法成功地解释了高强度材料制成的容器为什么会发生低应力脆断。例如美国北极星导弹发动机壳材料强度达 1400 MPa，断裂韧性较低，取 $K_{Ic} = 1800 \text{ N/mm}^{3/2}$ ，安全系数取 1.3，此时裂纹的临界尺寸仅为 0.5 mm，由于探伤仪灵敏度有限，这样小的裂纹往往漏检，事故迭出就不足为奇了。

断裂力学指出了解决问题的途径，提出了“强度和韧性相匹配”的选材原则，解决了一系列工程中急待解决的问题，保证了安全生产及有关产品的可靠性。断裂力学也得到了迅速发展。

由于工程构件中广泛应用低强度钢，断裂力学又面临着

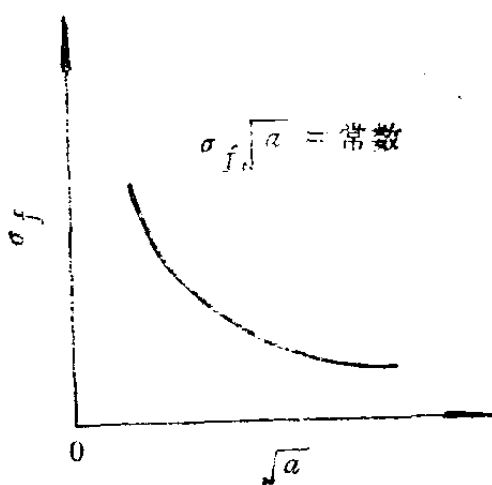


图 1-1 断裂应力与裂纹深度的关系

新的问题。例如在压力容器中较高的设计应力（常达到屈服应力的三分之二左右），几何形状突变处存在明显的应力集中（应力集中系数可达2~2.5左右），焊缝区的残余应力，材料的高韧度，使构件中的裂纹处在高应变场中。裂纹扩展之前常伴随着较大范围的屈服，其塑性区的尺寸常常接近或超过裂纹本身的尺寸，裂纹扩展的形态与在高强度低韧性的材料中的扩展极不相同。对这些问题线弹性断裂力学已无法解决，人们又发展了弹塑性断裂力学。

由于塑性理论本身的特点，采用解析方法求解弹塑性断裂力学问题时，常因过于复杂而难以得到便于实用的结果。目前一般多采用偏于安全的、便于工程应用的近似方法。较为成熟的是 COD 理论和 J 积分理论，应用较广。

对于构件中的裂纹由于疲劳而扩展或由于应力腐蚀而造成破坏，也进行了深入的研究。此外，研究裂纹动态扩展的断裂动力学也取得了一系列有价值的成果。

§ 1-3 压力容器的“质量控制标准”和“合于使用评定标准”^[4,5]

压力容器、锅炉或压力管道，在制造过程中及运行中发现的缺陷是否允许继续存在，目前有两大类标准可作为判别依据，一类是以控制质量为基础的标准，另一类是以符合使用要求为基础的标准，又称为“合于使用标准”。前者以相应的强度条件为前提，后者是以最近一些年建立的断裂力学理论为基础的。

“质量控制标准”是要求压力容器及锅炉质量保持在较高的水平上，对提高产品质量保证安全生产起了重大作用。例如1816年到1848年间，仅密西西比河上蒸汽机轮船因锅炉爆

炸而丧生的人就达1443人。1865年死亡人数达最高记录，只桑塔拉蒸汽轮船锅炉爆炸就造成1547人死亡。美国机械工程师协会（ASME）“锅炉与压力容器规范”制订以后，对设计、选材、制造、检验，以及超压试验和监控使用等方面，作出了具体规定，事故率显著降低。然而，我们也应该看到，这种规范在一定程度上是依赖积累的经验。不少规定是根据焊接及无损检验所能达到的质量水平制订的，没有考虑到缺陷的存在对产品可靠性的影响，有一定的随意性。由于缺乏科学的定量计算，按这类标准行事就可能导致对危害性较小的部位要求过严，而对某些危险性大的部位（如接管区）却因不便探伤而未加控制。事实上，造成破坏的裂纹往往正源于此处。与安全性密切相关的经济性亦要求对各种缺陷作具体的分析，以避免不必要的返修。

根据英国对质量较好的压力容器主焊缝所作的统计，所有作过返修的缺陷中，仅夹渣一项就占84%，而这种非平面缺陷通常危害性是较小的。前些年美国阿拉斯加管线完工后，无损检验发现有四千余处缺陷超过“质量控制标准”，全部返修费用高达五千二百多万美元。为返修跨河的一条焊缝需要修建一条沉箱水坝，仅此一项就花费了二百五十万美元，而实际返修时间仅用三分半钟（其中还包括磨去小气孔的覆盖层）。这种返修所造成的浪费十分惊人。

“合于使用标准”与“质量控制标准”有所不同，它是以合于使用为原则，对存在的缺陷要按照严格的理论分析作出评定，确定缺陷是否危害安全可靠，并对缺陷的发展及可能造成的危险作出判断。那些不会对安全生产造成危害的缺陷将允许存在，结构如含有虽不造成威胁但可能会进一步发展的缺陷，将允许在监控下使用。若构件所含缺陷在构件

降低使用规格后并不构成危险，则可考虑降格使用；至于那些所含缺陷已对安全生产构成危险的构件，必须立即采取措施，或返修，或停止使用。所以采用“合于使用标准”既保证了安全生产，又提高了经济效益，收效极为显著。

阿拉斯加管线上，采用了“合于使用标准”对检出的四千余处缺陷进行评定，无任何一处会危害使用的安全可靠，美国政府接受了这一评定结果。例如有三处缺陷的跨河管线未作返修就节省了数百万美元。

其实不必要的返修不仅在经济上造成巨大浪费，延误交货期限影响声誉，更有甚者还会给安全带来严重的后果。这是因为在高拘束度下进行返修，往往会产生更为有害的裂纹取代原来危害性较小的夹渣，这样更容易造成事故。有过这样的例子，同一部位多次在高拘束度下返修，产生了一条目力可见贯穿整个焊缝的大裂纹。这种例子甚多，教训很深刻。

现代工业迅速发展，大型的焊接构件，特别是低合金高强度钢制成的厚壁或超厚壁高压容器的广泛使用，已使随意性的标准规定“不得有裂纹或裂纹类缺陷存在”极难实现。这是因为巨型焊缝难以避免产生平面缺陷。再者探伤精度大大提高，甚至已能发现晶格缺陷。这都是原来标准所未曾考虑的。

对使用中的带有缺陷的容器，按“合于使用标准”作安全评定，直接关系到生产安全，情况较为复杂，必须慎重从事：人们所面临的问题相当严重。近年来，全国检查了一大批球罐，除极少数合格投入生产外，绝大多数都存在着大量的超标缺陷，有的甚至造成全厂停产。化工压力容器的调查表明，在役容器有三分之一以上存在大量的超标缺陷。凡有