

过程装备与控制工程丛书

过程装备断裂理论与缺陷评定

李志安 张建伟 吴剑华 主编



化学工业出版社
教材出版中心

过程装备与控制工程专业课程教材

过程设备设计 (核心课程教材)
(获第六届石油和化学工业优秀教材
一等奖)

过程流体机械 (核心课程教材)
过程装备控制技术的应用 (核心课程
教材)

工程热力学 (核心课程教材)
工程热力学学习指导
工程流体力学 (核心课程教材)

工程材料 (核心课程教材)
过程装备成套技术
过程装备成套技术设计指南

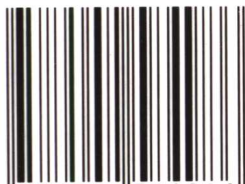
过程装备密封技术
过程装备CAD
压力容器现代设计与安全技术
过程装备与控制工程专业实验
过程装备与控制工程专业英语
过程装备维修管理工程
过程装备力学基础

过程装备腐蚀与防护
过程装备断裂理论与缺陷评定
粉体力学与工程
微控制器原理与实例
化工容器设计 (第三版)
化工制图
化工制图习题集 (第二版)

国家级“十五”规划教材

过程装备制造与检测
(获第七届石油和化学工业优秀教材一等奖)
过程设备设计 (第二版) (核心课程教材)
设备故障诊断
过程装备密封技术 (第二版)
过程装备力学基础 (第二版)
有限元技术基础
压力容器安全管理技术

ISBN 7-5025-8498-6



9 787502 584986 >

ISBN 7-5025-8498-6 定价: 36.00元

过程装备与控制工程丛书

过程装备断裂理论与缺陷评定

李志安 张建伟 吴剑华 主编



化学工业出版社
教材出版中心

· 北京 ·

本书是《过程装备与控制工程丛书》中的一个分册,叙述了压力容器断裂的基本理论,介绍了近年来弹塑性断裂理论的新进展及其应用,介绍了国内外压力容器缺陷评定标准及其发展。

全书共分7章,包括:概论;线弹性断裂理论;弹塑性断裂理论;材料断裂性能及其测试原理;压力容器的疲劳裂纹扩展及寿命估算;压力容器缺陷评定标准及其进展;压力容器缺陷评定典例等。全书注重理论与工程实际相结合,阐述理论深入浅出,通俗易懂;书中有例题和习题。

本书可作为过程装备与控制工程专业和相关专业大学本科生的教材,亦可作为研究生参考教材,并可供从事断裂理论与过程装备缺陷评定的研究人员及压力容器研究、设计、制造、管理等工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

过程装备断裂理论与缺陷评定/李志安,张建伟,吴剑华主编. —北京:化学工业出版社,2006.4

(过程装备与控制工程丛书)

ISBN 7-5025-8498-6

I. 过… II. ①李… ②张… ③吴… III. ①化工过程-化工设备-弹塑性断裂力学 ②化工过程-化工设备-缺陷-评价 IV. TQ051

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第032423号

过程装备与控制工程丛书 过程装备断裂理论与缺陷评定

李志安 张建伟 吴剑华 主编

责任编辑:程树珍

文字编辑:宋薇

责任校对:吴静

封面设计:于兵

*

化学工业出版社
教材出版中心 出版发行

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码100029)

购书咨询:(010)64982530

(010)64918013

购书传真:(010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷有限责任公司印装

开本787mm×1092mm 1/16 印张13½ 字数331千字

2006年6月第1版 2006年6月北京第1次印刷

ISBN 7-5025-8498-6

定价:36.00元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

前言

在过程工业中，用于输送流体的机器和完成物理化学过程的装置统称为过程装备。过程装备大多都有一个封闭的外壳，这个外壳又大多承受着压力载荷，所以通常将这个承受压力载荷的封闭外壳体称为压力容器。

随着现代工业的迅速发展，压力容器也向大型化发展。由于设计压力的提高、高强度钢材的大量采用、焊接技术的普通运用以及过程装备使用条件的严酷化等因素影响，曾使压力容器的断裂事故增多，压力容器的安全及缺陷评定技术显得越来越重要。为此，国际上对这方面工作进行了大量研究，并取得了长足进展。尤其近 10 多年来，断裂力学中的弹塑性断裂理论及其在压力容器中的应用有了新的重大进展。压力容器缺陷评定技术已有重大突破，并日趋统一。我国在这方面的工作虽起步较晚，但发展速度是非常快的，尤其是 20 世纪 90 年代以来又有了新的进展。国内高等院校中的过程装备与控制工程专业及与压力容器相关的专业，都为本科生和研究生开设了“压力容器断裂与缺陷评定”一类的课程。然而，目前尚无较为合适的教材。为此，编写了《过程装备断裂理论与缺陷评定》一书，旨在满足高等院校过程装备与控制工程专业本科和研究生课程的需要。同时，也为读者介绍断裂理论的新发展以及压力容器缺陷评定技术的新进展。

全书共分 7 章，依次为：概论；线弹性断裂理论；弹塑性断裂理论；材料断裂性能及其测试原理；压力容器的疲劳裂纹扩展及寿命估算；压力容器缺陷评定标准及其进展；压力容器缺陷评定典例。全书注重理论与工程实际相结合，阐述理论深入浅出。作为本科生课程，主要讲授第 1 章～第 6 章内容，约 36 学时，其他章节作为选修。本书除供大学本科作为教材，还可作为研究生参考教材，并可供断裂理论与过程装备缺陷评定的研究人员及压力容器研究、设计、制造、管理等工程技术人员参考使用。

本书第 1 章由龚斌和李志安编写；第 2 章由齐辉、张忠宁、张建伟编写；第 3 章由王宗勇、金丹、李志安编写；第 4 章由禹言芳、张建伟编写；第 5 章由金丹、张建伟、吴剑华编写；第 6 章由张忠宁、王宗勇、李志安编写；第 7 章由禹言芳、李志安、吴剑华编写。全书由李志安教授、张建伟教授、吴剑华教授统稿。

由于编者水平有限，书中难免有不足之处，诚请读者批评指正。

编者

2005 年 12 月

目 录

1 概论	1
1.1 压力容器断裂与断裂力学	1
1.1.1 压力容器断裂示例	1
1.1.2 断裂力学与材料力学的差别	3
1.2 断裂理论的产生与发展	5
1.3 过程装备断裂理论与缺陷评定内容概述	6
1.3.1 断裂理论内容概述	6
1.3.2 断裂性能测试原理	8
1.3.3 压力容器缺陷评定标准	9
1.3.4 压力容器缺陷评定实例	9
2 线弹性断裂理论	10
2.1 裂纹与裂纹扩展的类型	10
2.1.1 裂纹的类型	10
2.1.2 裂纹扩展的类型	10
2.2 裂纹尖端的应力场和位移场	11
2.2.1 具有中心穿透裂纹的无限大平板受两向均匀拉伸时裂纹尖端的应力场和位移场	12
2.2.2 具有中心穿透裂纹的无限大平板受单向拉伸时裂纹尖端的应力场和位移场	12
2.2.3 无限大平板中Ⅱ型穿透裂纹尖端附近的应力场和位移场	13
2.2.4 无限大平板中的Ⅲ型穿透裂纹尖端附近的应力场和位移场	14
2.3 应力强度因子和按应力强度因子建立的断裂判据	14
2.3.1 应力强度因子	14
2.3.2 按应力强度因子建立的断裂判据	15
2.4 塑性区修正与线弹性断裂理论的适用范围	17
2.4.1 塑性区的形状和尺寸	17
2.4.2 应力强度因子的塑性区修正方法	20
2.4.3 线弹性断裂理论的适用范围	21
2.5 能量理论与能量判据	23
2.5.1 裂纹驱动力与能量判据	23
2.5.2 能量释放率 G_I 与应力强度因子 K_I 的关系	24
2.6 复合型裂纹的断裂判据	26
2.6.1 最大周向应力理论	26
2.6.2 应变能密度因子理论	28

2.6.3	最大应变能释放率理论	29
2.6.4	复合型断裂的工程判据	30
2.7	常见裂纹构件的应力强度因子解	33
2.7.1	应力强度因子求解方法概述	34
2.7.2	几种带穿透裂纹构件的应力强度因子 K_I 的计算	35
2.7.3	埋藏裂纹应力强度因子 K_I 的计算	44
2.7.4	表面裂纹应力强度因子 K_I 的计算	46
2.7.5	压力容器中的裂纹的应力强度因子 K_I 的计算	47
	习题	50
3	弹塑性断裂理论	52
3.1	概述	52
3.2	COD 理论	53
3.2.1	COD 定义	53
3.2.2	COD 判据	54
3.2.3	两种典型裂纹模型的 COD 计算公式	54
3.2.4	COD 设计曲线	62
3.3	J 积分理论	64
3.3.1	J 积分的定义及其守恒性	65
3.3.2	J 主导和 J 控制裂纹扩展	68
3.3.3	J 积分判据及其有效性分析	71
3.3.4	两种典型弹塑性断裂问题的积分	72
3.4	弹塑性断裂分析的工程方法	74
3.4.1	弹塑性断裂分析工程方法基本技术	75
3.4.2	常见含裂纹构件的弹塑性解	78
3.4.3	失效评定图	91
	习题	94
4	材料断裂性能及其测试原理	96
4.1	平面应变断裂韧性 K_{Ic} 及其测试	96
4.1.1	测试 K_{Ic} 的基本原理	96
4.1.2	K_{Ic} 测试中对试样尺寸的要求	97
4.1.3	临界载荷 P_c 的确定	98
4.1.4	K_Q 有效性判据	100
4.1.5	断裂韧性 K_{Ic} 测试的基本过程	100
4.2	J 积分临界值 J_{Ic} 的测试	103
4.2.1	测试 J_{Ic} 的基本原理	103
4.2.2	临界点的确定	105
4.2.3	测试 J_{Ic} 的基本过程	105
4.2.4	J_{Ic} 与 δ_c 、 K_{Ic} 的关系	106

4.3 裂纹扩展阻力曲线及其测试	106
4.3.1 阻力曲线概念	106
4.3.2 阻力曲线应用及测试标准简述	109
4.3.3 J_R 曲线测定方法综述	110
4.3.4 曲线测试中试样的几何形状和尺寸要求	111
5 压力容器的疲劳裂纹扩展及寿命估算	114
5.1 概述	114
5.1.1 压力容器中的疲劳问题	114
5.1.2 交变应力的循环特征	114
5.1.3 含裂纹构件的疲劳设计——破损安全设计法	115
5.2 疲劳裂纹的扩展规律与寿命计算	116
5.2.1 疲劳裂纹的扩展过程	116
5.2.2 疲劳裂纹扩展的门槛值	118
5.2.3 疲劳裂纹的亚临界扩展速率及寿命估算	119
5.3 影响疲劳裂纹扩展速率的因素	125
5.3.1 平均应力对 da/dN 的影响	126
5.3.2 过载峰对 da/dN 的影响	128
5.3.3 加载频率对 da/dN 的影响	131
5.3.4 温度对 da/dN 的影响	132
5.4 腐蚀疲劳	133
5.4.1 应力腐蚀开裂	133
5.4.2 腐蚀疲劳	135
5.5 统计学方法在疲劳性能测试中的应用	137
5.5.1 最小二乘法及其在疲劳性能测试中的应用	138
5.5.2 裂纹形成和扩展的损伤当量计算	140
习题	144
6 压力容器缺陷评定标准及其进展	145
6.1 压力容器缺陷评定技术进展	145
6.1.1 概述	145
6.1.2 压力容器缺陷评定技术的新进展	146
6.2 以线弹性断裂理论为基础的缺陷评定标准	147
6.2.1 美国 ASME 规范第Ⅲ卷附录 G	147
6.2.2 美国 ASME 规范第Ⅺ卷附录 A	149
6.3 以 COD 理论为依据的标准	153
6.3.1 国际焊接学会 IIW-X-749—74 标准	153
6.3.2 英国 BSI PD 6493—1976 标准	156
6.3.3 日本 WES 2805—1980 标准	156
6.3.4 联邦德国 DVS 2401-1 标准	158

6.3.5 中国 CVDA—1984 标准	159
6.4 采用失效评定图技术的标准	171
6.4.1 英国 CEGB 老 R6 标准	171
6.4.2 美国 EPRI 的评定规程	172
6.4.3 英国 CEGB 新 R6 标准	176
6.5 中国压力容器缺陷评定技术的进展	190
7 压力容器缺陷评定典型实例	192
7.1 中国压力容器典型工程实例	193
7.2 美国 EPRI 评定规程应用举例	200
参考文献	206

1

概 论

1.1 压力容器断裂与断裂力学

1.1.1 压力容器断裂示例

第二次世界大战以后的 60 年来,特别是随着现代工业的迅速发展,压力容器也向大型化发展。由于设计压力的提高、高强度和超高强度材料的大量采用、焊接技术的普遍运用及设备使用条件的严酷化(温度、介质、载荷波动、原子辐射等)等,曾使压力容器的断裂事故普遍增多。一些按照常规的强度理论进行设计并满足强度要求的压力容器,会在服役期间甚至在试压期间发生灾难性的破坏。下面就是几个较为典型的压力容器断裂破坏的实例。

i. 1965 年美国发生著名的 260SL-1 固体火箭发动机压力壳体断裂事故。该壳体内径 $D_i=6600\text{mm}$ 。为减轻壳体重量以增大火箭推力,选用了高强度钢材 18NiCoMoTi,其抗拉强度 $\sigma_b=2500\text{MPa}$,屈服点 $\sigma_s=1750\text{MPa}$,设计中取偏低值,再考虑焊缝系数 $\varphi=0.9$,因此取 $\sigma_s=1450\text{MPa}$ 。设计内压力 $p=6.1\text{MPa}$,取安全系数 $n_s=1.3$,平均半径 $R=3310\text{mm}$,则壳体壁厚为:

$$\begin{aligned} t &= pRn_s/\sigma_s \\ &= 6.1 \times 3310 \times 1.3/1450 = 18.1\text{mm} \end{aligned}$$

最后取壳体壁厚为: $t=18.1\text{mm}$ 。

壳体制成后按设计规则要求进行水压试验,合格后方可验收。由于火箭是一次负载,故(美国)标准规定最大水压试验压力为 $p_T=1.1p=6.7\text{MPa}$ 。结果在水压试验时,当压力达到 3.8MPa 时就发生了爆炸飞裂。此压力仅为水压试验压力的 56%,其断裂应力为 $\sigma_f=p_f R/t=3.8 \times 3310/18.1=695\text{MPa}$ 。此应力不但远低于材料的屈服应力(1750MPa),还远低于工作应力(1100MPa)。事后调查,从断裂的碎块上找到三个大的断裂源,其中一个为深 $a=3\text{mm}$,长 $L=15.2\text{mm}$ 的表面裂纹。

ii. 英国 John Thompson 公司 1965 年 12 月制造的一台大型氨合成塔,水压试验时发生脆断。该容器内径 $D_i=1925\text{mm}$,壁厚 $t=156\text{mm}$,全长为 18.3m,总重为 160t。材料为 MnCr-MoV 钢,抗拉强度 $\sigma_b=582\text{MPa}$,屈服应力 $\sigma_s=460\text{MPa}$,设计压力 $p=36\text{MPa}$,水压试验压力 $p_t=49\text{MPa}$ 。该容器外径与内径之比为 $k=D_o/D_i=1.156$,接近厚壁容器。按拉美公式和弹性失效准则计算得到的屈服压力和爆破压力为:

$$p_s = \sigma_s(k^2 - 1)/(k^2 + 1) = 66.2\text{MPa}$$

$$p_b = \sigma_b(k^2 - 1)/(k^2 + 1) = 83.8\text{MPa}$$

按塑性失效准则(Tresca 屈服条件)有:

$$p_s = \sigma_s \ln k = 66.7 \text{ MPa}$$

$$p_b = \sigma_b \ln k = 84.4 \text{ MPa}$$

上面计算结果表明,此容器是完全符合常规强度要求的。但是,该容器在水压试验过程中加压到 35.3MPa 时就突然爆破,断成两截并飞出四块碎片,其中最大一块约为 2t 重,飞出 45m 远。可见,爆破压力也远小于试验压力,更远小于常规强度理论计算的爆破压力。事后检查发现,断裂是从法兰锻件与筒体的埋弧焊缝开始的,断裂源是锻件侧偏折的热影响区到焊缝金属有一边长约为 10mm 的三角形埋藏裂纹。

iii. 1966 年英国 Cockenzil 电站高压锅炉汽包在水压试验时发生断裂破坏。该汽包筒体全长为 23m,内径 $D_i = 170\text{mm}$,壁厚 $t = 140\text{mm}$,材质为 MnCrMoV 钢。设计压力为 $p = 19.5\text{MPa}$,水压试验压力 $p_t = 28\text{MPa}$ 。该汽包的设计、选材、制造、热处理及检验均符合英国标准 BS 1113—1958 的要求。焊接完毕后,磁粉探伤并未发现任何裂纹。经过三次水压试验容器无事,而在电站作投产前的水压试验时,当压力接近满压 (28MPa) 时,筒体突然发生脆性断裂,裂口长达 5m。事后分析发现,脆断起源是汽包筒身内侧靠近省煤器接头处有一个长 330mm、深 90mm 的埋藏裂纹。

iv. 1969 年联邦德国一台用 MnNiMoV 低合金钢制成的锅炉汽包,内径 $D_i = 1450\text{mm}$,壁厚 $t = 75\text{mm}$,总长为 11.6m。当水压试验压力达到工作压力的 1.3 倍时,汽包突然发生断裂。断口分析表明:在第一个下降管接头附近有一条深 15mm、长 240mm 的裂纹。裂纹从第一个下降管缺陷位置开始,向封头扩展有三条裂纹。

v. 1970 年 3 月,芬兰一合成氨高压气体水冷器在运行中突然断裂。该水冷器是 1968 年 12 月制造的,管箱外径 $D_o = 1090\text{mm}$,最小壁厚 $t = 85\text{mm}$,设计压力 $p = 31\text{MPa}$,材料为 MnNiMoV 钢。1969 年 11 月第一次投产运行 75 天,1970 年 3 月第二次投产在 $p_w = 23.5\text{MPa}$ 压力下运行 1h 突然发生断裂。产生断裂的原因是:消除应力热处理温度太低,未能很好地消除焊接残余应力,且升温速度过快,导致产生退火再热裂纹。由于疲劳及应力腐蚀等作用,使得原尺寸为 $12\text{mm} \times 3\text{mm}$ 的裂纹扩展到 $70\text{mm} \times 5\text{mm}$,达到了临界裂纹尺寸而断裂。

vi. 1974 年日本一个很小的高压氢气瓶断裂。该气瓶外径 $D_o = 230\text{mm}$,壁厚 $t = 8\text{mm}$,高为 1.2m。在一次卡车运送途中发生断裂泄漏。此事故原因是:在制造时(挤压成型),底部与筒体相邻部位有一道伤痕,这道伤痕在使用过程中由于压力交变作用使其产生裂纹并渐渐长大,直到这次卡车运行中外界颠簸作用使瓶底伤痕处进一步撕裂,氢气由此处漏出而泄压。形成的环向裂纹在外壁尺寸为 80mm,在内壁尺寸为 175mm,贯穿了壁厚,类似半椭圆状。可以想象若高压气瓶压力泄不出,裂纹继续扩展到沿底部环状断开时,该气瓶就会像火箭一样射出去。

vii. 中国四川某化肥厂合成塔,内径 $D_i = 452\text{mm}$,壁厚 $t = 25\text{mm}$,设计压力 $p = 15\text{MPa}$,材料为 16Mn 无缝钢管。1976 年制造,1979 年 1 月 1 日运行中发生断裂破坏,断裂时压力为 $p_f = 15\text{MPa}$ 。此事故发生前一周已有预兆——塔顶着火。当时停车检验环焊缝未发现缺陷,又继续使用而发生断裂。事后检查发现,无缝钢管母材部位有一埋藏裂纹。

上述事故典例中,其容器破坏特征基本一致,即容器基本上未发生塑性变形;断裂发生碎块;断口发亮,且为平齐断口。这些容器在总体上都呈现脆性特征。另外断裂压力均小于设计压力或试验压力,更小于常规理论计算的爆破压力。所以,均属于低应力脆性断裂。这些破坏事故,提出了这样一个问题,既然这些容器设计都符合常规强度要求,那么为什么会

在没有超过强度条件的情况下发生断裂破坏呢？对于这个问题的认识，人们曾经历过很长的探索过程。从断裂力学观点来看，这些破坏事故之所以发生，主要是由于作为设计依据的常规强度理论是把材料一律视为理想的均匀连续体（无缺陷），而事实上，在焊接构件内部总难免存在着如夹渣、气孔、未焊透、裂纹等缺陷。大量的灾难性事故，正是由于裂纹类缺陷在一定外部条件下迅速扩展而造成的（上述事故的断裂源也都是裂纹）。

日本高压气体安全协会对球罐破坏事故做过调查。日本用 HT-60 和 HT-80 钢制造的大型球罐，在 45 只中普查出近 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断裂。

英国原子能局及联合部技术委员会为了摸清压力容器的安全可靠，曾组织调查专案组，对使用年限在 30 年以内，且符合英国标准的 12700 台压力容器进行一次事故实况的调查。在 100300 台运行年（即各台容器与运行年数乘积的总和）的压力容器中，记载有 132 次事故。这个统计数字表明，在使用的每 10000 台压力容器，每年发生事故达 13.2 次，其中灾难性事故为 0.7 次。按其破坏原因进行分类，如表 1-1 所示。中国有关组织也做过类似的调查，其调查情况见表 1-2。

表 1-1 英国调查事故原因分类			表 1-2 中国调查压力容器事故原因分类		
事故原因	事故次数	百分比/%	事故原因	事故次数	百分比/%
裂纹	118	89.3	裂纹	50	62.5
腐蚀	2	1.5	腐蚀(含氢脆)	22	27.5
使用不当	8	6.1	焊接缺陷	6	7.5
制造缺陷	3	2.3	错用材料	2	2.5
蠕变	1	0.8	总计	80	100
总计	132	100			

从上面调查表中可以看到，大量的压力容器断裂事故均是由于裂纹的存在所致。从这个意义上说，作为常规强度指标（屈服点应力 σ_s 和抗拉强度 σ_b 等）是由近于理想连续体的小试样得到的，与实际（缺陷不可避免）结构的破坏并无直接联系。因此，常规强度准则并不能完全保证压力容器的安全使用。除压力容器断裂事故外，大量发生过焊接船舶因焊接缺陷而断裂的事故；还有结构桥梁、航天器的焊接缺陷，均导致过严重事故。于是，产生了断裂力学。

1.1.2 断裂力学与材料力学的差别

材料力学是人们所熟悉的，上面所讲的常规强度理论就属于材料力学的范畴。断裂力学是材料力学的发展和补充。断裂力学是研究带裂纹结构在各种工作条件下表征裂纹扩展推动力的参量，并研究裂纹的起裂、扩展、失稳和止裂的规律，以及材料对裂纹的断裂抗力（断裂韧性）的力学分支，并应用这些规律进行设计及含缺陷结构的安全评定，以保证结构的安全可靠性。

断裂力学与材料力学的差别在于：材料力学研究连续（无缺陷）材料的强度问题，而断裂力学则研究带裂纹（有缺陷）材料的破坏问题。虽然断裂力学是材料力学的发展和补充，但是，断裂力学与材料力学的设计思想是不同的。二者的主要差别可以从以下几个方面来看。

(1) 静载情况

在静载作用下，材料力学假设材料是均匀的、连续的，传统的强度条件是要求结构的最大应力小于或等于材料的许用应力，即：

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma] = \begin{cases} \sigma_s / n_s \\ \sigma_b / n_b \end{cases} \quad (1-1)$$

式中 σ_s, σ_b ——材料的屈服应力和抗拉强度；

n_s, n_b ——相应的安全系数。

断裂力学采用断裂判据来判断含裂纹结构是否安全，如线弹性断裂判据为：

$$K_I < K_{Ic} \quad (1-2)$$

式中 K_I ——应力强度因子，与裂纹尺寸 a 和裂纹体所受载荷 σ 有关 ($K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$)；

K_{Ic} ——材料的断裂韧性，表示材料抵抗裂纹失稳扩展能力的一个物理参量。

因为断裂力学考虑了裂纹的存在，根据断裂判据得出的断裂应力 ($K_I = K_{Ic}$ 时, $\sigma_f = K_{Ic} / \sqrt{\pi a}$) 与传统的强度条件得出的结论不一定相同。例如：有两种材料，第一种材料的屈服应力为 $\sigma_s = 720 \text{MPa}$ ，断裂韧性为 $K_{Ic} = 3500 \text{N/mm}^{1.5}$ ；第二种材料的屈服应力为 $\sigma_s = 490 \text{MPa}$ ，断裂韧性为 $K_{Ic} = 6000 \text{N/mm}^{1.5}$ 。制造一台压力容器，从满足强度要求的角度看，选择第一种材料比第二种好 (σ_s 值大)；但若考虑到缺陷的不可避免性，即存在裂纹的情况，则应选择第二种材料 (K_{Ic} 值大)。因为在相同裂纹尺寸情况下，第二种材料有较高的断裂应力。这样选择第二种材料会比第一种材料更安全。可见，盲目地追求高强度材料，并不一定能保证结构的安全可靠。

(2) 循环载荷情况

传统的疲劳设计，是用光滑试样作疲劳曲线，求出下限应力 σ_D ，称为疲劳极限（持久强度）。结构的最大工作应力应满足：

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma_D] = \sigma_D / n_D \quad (1-3)$$

式中 n_D ——循环载荷情况下的安全系数。

传统的疲劳设计还认为凡是有缺陷的构件，在循环载荷下一概不能使用。

断裂力学的观点是：带裂纹构件，只要裂纹扩展未达到临界尺寸，仍可使用。在循环载荷作用下，裂纹缓慢扩展，直至达到临界尺寸时构件才失稳破坏。载荷每循环一周，裂纹扩展的速率 da/dN 是材料的一个指标，表示材料抵抗裂纹扩展的能力。断裂力学的疲劳分析中还有一个参量 ΔK_{th} ，称为应力强度因子幅的门槛值，它与材料力学中的持久强度相对应，即当应力强度因子幅小于门槛值 ($\Delta K < \Delta K_{th}$) 时，裂纹不扩展。在断裂力学中， da/dN 和 ΔK_{th} 是循环载荷作用下材料的两个重要指标。由此可见，断裂力学对循环载荷作用下材料的研究，充实和深化了材料力学的疲劳理论。

(3) 腐蚀介质的情况

在腐蚀介质中的受拉伸构件，传统设计是用光滑试件在腐蚀介质中进行实验，记录作用应力和破断时间曲线 (σT)，以曲线的下界限应力值作为设计标准。只要工作应力小于这一临界应力，则构件是安全的。在应力腐蚀情况下，传统设计不允许构件存在裂纹。

断裂力学从带裂纹构件的实验出发，认为腐蚀介质中的受拉应力构件是否安全，要看裂纹构件的应力强度因子 K_I 是否达到或超过应力腐蚀界限应力强度因子 K_{LSCC} ，即裂纹稳定条件为：

$$K_I < K_{LSCC} \quad (1-4)$$

式中 K_{LSCC} ——材料在应力腐蚀条件下抵抗裂纹失稳扩展的断裂能力指标。

材料的另一个指标是应力腐蚀裂纹扩展速度 da/dt ，表示材料抵抗应力腐蚀裂纹扩展的

能力。与疲劳中剩余寿命的求法相似。

综上所述，断裂力学出现以后，使人们对宏观的断裂规律有了进一步的认识，对传统的设计思想进行了改善和补充。应用断裂理论，不仅可以对含缺陷构件进行剩余强度和寿命的分析，以保证构件的安全可靠，而且在选材、改进制造工艺、提高设计水平、搞好安全管理等方面也在发挥越来越大的作用。

1.2 断裂理论的产生与发展

断裂力学的思想是由 Griffith 在 1920 年提出的。他首先提出将强度与裂纹长度定量地联系在一起。他对玻璃平板进行了大量试验研究工作，提出了能量理论思想。但是由于当时金属材料的低应力破坏事故并不突出，Griffith 的理论对断裂阻力大大高于玻璃的工程材料还无法应用，人们对于断裂问题和 Griffith 能量思想的重要性还缺乏应有的认识。所以，断裂问题在一段时期内一直停留在科学好奇上，而没有进入工程应用之中。

直到第二次世界大战期间及战后几年中，在焊接船只上发生了许多次突然的灾难性断裂事故，低应力脆断问题才引起工程技术界的充分重视。这比其他任何单一因素都重要，它大大促进了断裂力学的发展。尤其引人注目的是“自由号”断裂事故。1942~1947 年间，美国采用全焊接工艺制造了 5000 艘被称为“自由号”的轮船。在运行中有 1000 多艘发生脆断破坏事故，其中有 150 艘完全破坏，有 10 艘断为两截，有 8 艘失踪。究其原因：一为低温，二为存在缺陷。这些重大事故引起美国政府的重视，美国海军研究所开始研究裂纹体的断裂问题。后来，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；美国北极星导弹上的固体燃料发动机压力壳体在试发射时发生了爆炸事故；许多国家多次发生压力容器、锅炉及压力管道的断裂事故等，又驱使断裂问题的研究工作在欧洲展开。断裂力学作为一门科学，是从 1948 年开始的。这一年 Irwin 发表了他的第一篇经典文章“Fracture Dynamic (断裂动力学)”，研究了金属的断裂问题。这篇文章标志着断裂力学的诞生。

由于早期发生的断裂事故多是低应力脆性断裂，所以，断裂力学一开始的研究对象就是脆断。关于脆性断裂理论的重大突破仍归功于 Irwin。他于 1957 年提出了应力强度因子的概念，在此基础上形成了断裂韧性的概念，并建立起测量材料断裂韧性的实验技术。这样，作为断裂力学的最初分支——线弹性断裂力学就开始建立起来。20 世纪 60 年代以后，线弹性断裂理论开始广泛渗透到各个工程领域，并逐步成为结构设计、选材与检验的主要依据之一。特别是在火箭、飞机、核容器、核管道等重要工业部门中的应用，取得了更为明显的成功。国际上出现最早的压力容器缺陷评定标准——美国 ASME 锅炉及压力容器规范第Ⅲ卷附录 G“防止非延性破坏”和 ASME 规范第Ⅺ卷附录 A“缺陷显示的分析”，就是以线弹性断裂理论为依据的。

线弹性断裂力学是建立在线弹性力学基础上的，它只适用于高强度（钢）脆性材料。而对于工程中大量使用的中、低强度钢等具有较好塑性的材料并不适用。因为这些材料在裂纹发生扩展前，在裂纹尖端会出现一个较大的塑性区，此塑性区的尺寸可接近甚至超过裂纹本身的尺寸，有时甚至可以达到整体屈服。对于这种大范围屈服断裂或全面屈服断裂问题，线弹性断裂力学的结论已不再成立。即使引入所谓塑性区修正，线弹性断裂力学方法也不能用于大范围屈服和全屈服的断裂分析。为了研究塑性材料的断裂问题，又产生了断裂力学的另一个分支——弹塑性断裂力学。

用于弹塑性断裂研究的主要方法是 *COD* (Crack Opening Displacement) 裂纹尖端张开位移法和 *J* 积分法。*COD* 法是由 Wells 于 1963 年首先提出的, 他在英国焊接杂志 (British Welding Journal, 1963) 上发表文章: “Application of Fracture Mechanics at and Beyond General Yielding (断裂力学在或超过屈服范围的应用)”。后来, *COD* 法发展成为半经验的“*COD* 设计曲线”方法应用于工程实际中。20 世纪 70 年代国际上对弹塑性断裂问题的分析主要采用 *COD* 法。以 *COD* 设计曲线为理论基础的压力容器缺陷评定标准占有统治地位。

J 积分方法是由 Rice 于 1968 年首先提出的, 他在应用力学杂志 (Journal of Applied Mechanics, 1968) 上发表文章: “A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentrations by Notches and Cracks (用与路径无关的积分近似分析缺口和裂纹尖端的应变密度)”, 建立了 *J* 积分的概念。*J* 积分是一个定义明确、理论严密的应力应变参量, 它的实验测定也比较简单可靠。此外, *J* 积分还具有与积分路径无关这一特点, 故可避开裂纹尖端处极其复杂的应力应变场。而且它不仅适用于线弹性, 也适用于弹塑性。对于弹塑性断裂问题的分析, 采用 *J* 积分理论比 *COD* 理论更为合理可靠。但是, 在 *J* 积分这一概念提出之后, 由于 *J* 积分值计算比较困难, 所以没能在工程中广泛应用。然而, 近十几年来, 随着计算机的迅速发展和日益普及, 各种复杂的含缺陷结构的 *J* 积分都已能够计算。美国电力研究院 (EPRI) 对 *J* 积分理论进行了大量研究, 于 20 世纪 80 年代初提出了一种弹塑性断裂分析的工程方法, 并提供了各种含裂纹结构 *J* 积分全塑性解的塑性断裂手册, 解决了 *J* 积分的工程计算问题。从而推动了 *J* 积分的工程应用。进入 20 世纪 80 年代中后期, 国际上的压力容器缺陷评定标准纷纷以 *J* 积分理论为依据进行修订。到 20 世纪 90 年代初, *J* 积分理论在压力容器弹塑性断裂分析中, 已基本取代 *COD* 理论占据了统治地位。

国内从 20 世纪 70 年代初开始研究压力容器断裂理论, 经十年的研究工作, 并吸取国际上先进的压力容器缺陷评定技术, 于 1984 年颁布了“压力容器缺陷评定规范 (CVDA—1984)”。它是以 *COD* 设计曲线方法为主要依据的。在当时, 与其他国家的以 *COD* 理论为基础的压力容器缺陷评定标准相比较, 具有一定的先进性。随着国际上弹塑性断裂理论的发展, 国内从 20 世纪 80 年代中期开始对 *J* 积分理论进行大量的研究工作, 并对国外先进的以 *J* 积分理论为基础的压力容器缺陷评定技术进行了深入研究分析, 使中国的压力容器缺陷评定技术有了很大发展。

1.3 过程装备断裂理论与缺陷评定内容概述

本书主要讲述应用于压力容器断裂分析的基本断裂理论; 介绍压力容器断裂理论的新发展; 介绍国际上压力容器缺陷评定标准及其最新发展; 介绍中国压力容器缺陷评定标准及其最新发展; 结合实例介绍压力容器缺陷评定方法。目的在于通过本书的学习, 能够掌握断裂力学的基本理论; 掌握压力容器缺陷评定的方法; 了解国际上压力容器断裂理论的发展状况, 以便进行更深入的研究。同时, 学会将断裂基本理论应用于过程装备 (锅炉、压力容器等设备) 的设计、制造、检验、安全评价、安全管理等工程实际之中。

1.3.1 断裂理论内容概述

断裂力学是研究带裂纹材料或结构的强度以及裂纹扩展规律的一门学科。它运用连续体力学的原理, 来研究带有缺陷的均质连续材料制成的工程构件强度与断裂条件, 建立一套适

用于这类构件理论分析与实验研究的原理和方法，以确保其构件安全使用。断裂理论可分为线弹性断裂理论与弹塑性断裂理论两大部分。

1.3.1.1 线弹性断裂理论

线弹性断裂理论的研究对象是带有裂纹的线弹性体，其基础是线弹性理论。它也是研究和分析压力容器脆性断裂的理论基础。

(1) 三种断裂类型

对于各种复杂的断裂形式，总可以分解成为三种基本断裂类型的组合。这三种基本断裂类型为：I 型断裂、II 型断裂、III 型断裂（或称为 I 型加载、II 型加载、III 型加载）。其中 I 型断裂属于张开型断裂；II 型断裂属于滑开型断裂；III 型断裂属于撕开型断裂。对于压力容器来讲，以 I 型断裂最常见、最基本、也最危险，因此研究工作也开展得最多。本书以讨论 I 型断裂为主。

(2) 应力强度因子

应力强度因子的一般表达式为：

$$K_I = Y\sigma \sqrt{\pi a} \quad (1-5)$$

它与裂纹尺寸 a 和含裂纹构件所承载荷 σ 成正比，是裂纹端部区域应力场的一个公共因子。它是决定裂纹端部区域应力场强度的因素，故称之为应力强度因子。单位为 $\text{MPa} \sqrt{\text{m}}$ 或 $\text{MN}/\text{m}^{1.5}$ ($\text{N}/\text{mm}^{1.5}$)。式 (1-5) 中 Y 为形状系数。

由 K_I 的表达式可见，随着载荷 σ 的增加， K_I 值也将增大。因此可以推断，当载荷增大到某一临界值时，构件发生破坏（裂纹扩展）。此时，应力强度因子 K_I 也达到了某一临界值 K_{σ} 。这样，对于带裂纹的构件来说，其强度准则就应该是：

$$K_I < K_{\sigma} \quad (1-6)$$

实验也证实了这一推断的正确性。这就表明：对于带裂纹的构件来说，其受载程度和极限状态再也不能用“应力”这个量来表征，而必须代之以应力强度因子。

(3) 材料的断裂韧性

大量实验表明，临界应力强度因子 K_{σ} 的值，既与裂纹体的材料有关，也与其几何形状及尺寸有关。然而，对于同一种材料而言，存在一个 K_{σ} 的最低值，即 $(K_{\sigma})_{\min}$ 。此值是材料的性能常数，即对于不同的材料有不同的 $(K_{\sigma})_{\min}$ 值。又因此值是反映材料抗断裂能力的一个指标，故把它称为材料的断裂韧性，记作 K_{Ic} 其单位与 K_I 相同。

(4) 线弹性断裂判据

如前所述，当裂纹体的应力强度因子 K_I 达到某一临界值 K_{σ} 时，裂纹就要扩展（或断裂）。而临界值的低限即是材料的断裂韧性 K_{Ic} 。所以，带裂纹构件的断裂判据则成为：

$$K_I = K_{Ic} \quad (1-7)$$

即当裂纹端部的应力强度因子等于材料的断裂韧性时，裂纹就开始扩展。此即为 I 型加载下的线弹性断裂判据。同理可得 II 型和 III 型加载下的断裂判据为：

$$\left. \begin{aligned} K_{II} &= K_{IIc} \\ K_{III} &= K_{IIIc} \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

1.3.1.2 弹塑性断裂理论

目前用于研究弹塑性断裂问题的方法主要是 COD 法和 J 积分法。

(1) COD 法

当裂纹受到垂直于裂纹线方向的拉伸时,原先贴合在一起的上、下两个裂纹表面就将分离,从而使裂纹张开。裂纹面在裂纹尖端处的张开位移量就是所谓的 COD,通常用符号“ δ ”来表示,单位为 mm。显然,随着载荷的增加,裂纹尖端的张开位移量 δ 值也将增大,即一定的 COD 值对应于一定的应力应变场强度。与线弹性断裂情况一样,当所加载荷达到某一定值时,构件也将达到断裂的临界状态。此时,裂纹尖端的 COD 值也到达一临界值,此值就等于材料的断裂韧性。在 COD 法中,材料的断裂韧性用符号 δ_c 表示。于是,用 COD 法表示的断裂判据为:

$$\delta = \delta_c \quad (1-9)$$

(2) J 积分法

在固体力学中,为了分析缺陷周围的应力应变场,常采用一些与积分路径无关的线积分, J 积分就是其中之一。J 积分的定义为:

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dy - \mathbf{T} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} ds \right) \quad (1-10)$$

式中 W ——应变能密度或形变功密度。

W 的表达式为:

$$W = \int_0^{\epsilon_{mn}} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (1-11)$$

$\mathbf{T}$ 为积分回路上任意弧线元 (dS) 所对应的面元上的应力矢量; $\mathbf{u}$ 为应力 $\mathbf{T}$ 作用点的位移矢量; Γ 为由裂纹下自由表面上的任一点开始,按逆时针方向环绕裂纹尖端地区,终止于裂纹上自由表面上任一点的任意积分线路。J 积分值同样可以作为裂尖端部应力应变场强度的度量。当 J 积分值达到某一临界值时,裂纹就将扩展。此临界值即是材料的断裂韧性。在 J 积分方法中,断裂韧性用 J_{Ic} 表示。于是其断裂判据为:

$$J = J_{Ic} \quad (1-12)$$

J 积分的单位为 kJ/m^2 、 kN/m 或 N/mm 。

1.3.2 断裂性能测试原理

(1) 断裂韧性

作为材料抗断裂能力的指标断裂韧性,根据不同的断裂参量有不同的表示,如 K_{Ic} 、 δ_c 、 J_{Ic} 是断裂理论中常用的三个参量。这三个值之间存在一定的关系。其测试方法、所用试样都已有标准。本书第 4 章将介绍断裂韧性测试原理。

(2) 阻力曲线

K_I 、 δ 和 J 积分都是裂纹尖端应力应变场强度的参量,随着这些参量值的增大,裂纹扩展量也增大。因此,可以将这些参量视为裂纹扩展的驱动力。与此相对应,作为材料的性能之一,阻碍裂纹扩展的能力称为裂纹扩展阻力,记为 K_R 、 δ_R 和 J_R 。随着裂纹的扩展量增加,阻力也随之加大。这些阻力与裂纹扩展量 Δa 之间的关系曲线称为阻力曲线。阻力曲线在断裂韧性测定及弹塑性断裂分析中都有重要的作用。在本书第 4 章中将讨论有关阻力曲线测试的一些问题。