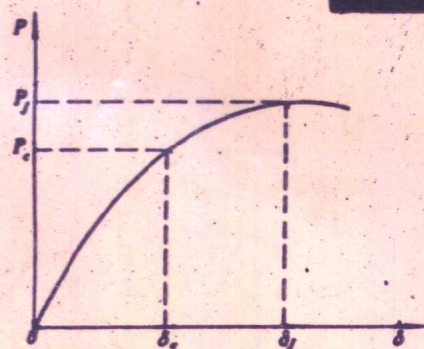
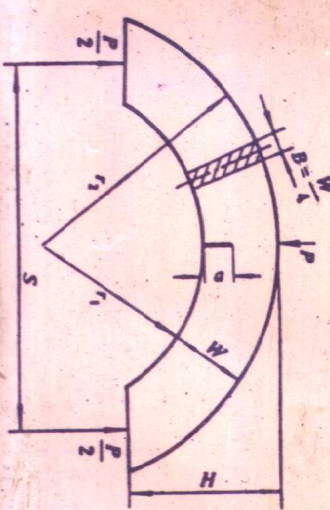
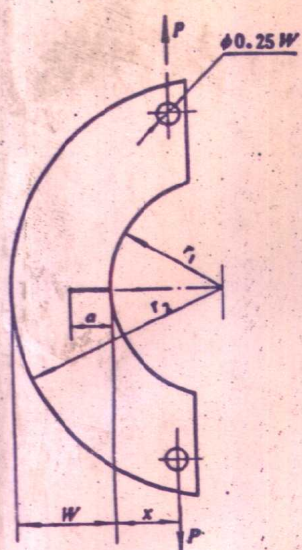


李志安 主编

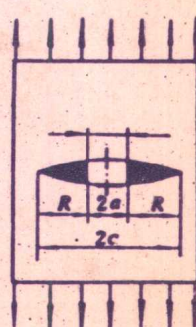
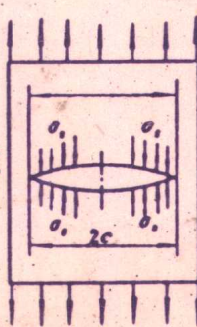
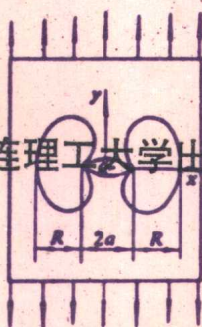
金志浩 宫殿民 副主编

压力容器断裂

理论与缺陷评定



大连理工大学出版社



压力容器断裂理论与缺陷评定

主 编:李志安

副主编:金志浩 宫殿民

审 定:王志文

大连理工大学出版社

(辽)新登字16号

图书在版编目(CIP)数据

压力容器断裂理论与缺陷评定/李志安等编著. —大连:
大连理工大学出版社, 1994. 8
ISBN 7-5611-0926-1

I. 压… I. 李… III. ①压力容器-断裂-理论②压力容器-缺陷-评定 IV. TH49

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第07497号

压力容器断裂理论与缺陷评定

Yalirongqi Duanlie Lilun Yu Quexian Pingding

李志安 主编

* * *

大连理工大学出版社出版发行

(邮政编码116024)

大连海事大学印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: $17\frac{5}{8}$ 字数: 417千字
1994年8月第1版 1994年8月第1次印刷

印数: 0001—3000册

* * *

责任编辑: 王佳玉 责任校对: 邓玉萍

封面设计: 石 佳

* * *

ISBN 7-5611-0926-1 定价: 8.50元
TK·19

序

压力容器的安全可靠性是人们非常关心的问题。断裂力学的发展为评定带缺陷构件奠定了科学基础。断裂力学在工程上的应用日益广泛,世界上许多国家都分别制定了以断裂力学为理论依据的压力容器缺陷评定规范。我国在这方面的工作起步虽较晚,但发展甚快,90年代有了长足的进展。目前全国有30余所高等院校的化工机械专业,为本科生开设了“断裂力学与缺陷评定”或内容类似的课程,但目前尚无一本合适的教材,是以各校只得分别自行编写讲义。另外,目前国内已出版的有关断裂力学方面的书籍,大多侧重于介绍断裂力学的基本理论,而对近10多年来断裂力学的新发展介绍甚少,而且,对用断裂力学原理制定的缺陷评定规范的介绍也很少。为此,以沈阳化工学院李志安为主编的本书作者提出出版本书,旨在满足高等院校化工机械专业和相关专业本科课程的需要,填补教材的空白,同时也为读者介绍断裂力学及其应用方面的国内国外近期发展。

本书叙述断裂力学的基本原理,介绍近10多年来弹塑性断裂理论的新的进展;介绍并比较国内外缺陷评定规范及评定方法,并讨论在这一方面的发展;阐述断裂参数的测定方法及其它有关内容。

本书内容丰富新颖,结构紧凑,着重理论与工程应用的相互结合,阐明理论通俗易懂。本书的撰写是为了用作高等院校化工机械专业和相关专业的教材,也可供断裂力学与缺陷评定的研究人员以及从事压力容器的研究、设计、制造、管理的技术人员参考之用。

李志安

东北理工大学

1994年1月4日

AS 03/08

前 言

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设备使用条件的严酷化等因素,曾使锅炉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越来越显得重要。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。我国在这方面工作虽起步较晚,但发展速度是非常快的,尤其90年代又有了新的进展。国内高等院校中的化工机械专业及与压力容器相关的专业,都为本科生开设了“断裂力学在压力容器中的应用”这一类的课程。然而,至今尚无一本合适的教材。为此,我们编写了“压力容器断裂理论与缺陷评定”一书,旨在满足高等院校本科课程的需要。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。

本书共分八章。依次为概论;压力容器脆断理论;弹塑性断裂理论;材料断裂性能及其测试;弹塑性断裂分析的工程方法;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,有关基础理论在附录中给出。作为本科生课程,主要讲授第一、二、三、四、六章内容,约40学时。其它章节作为选修。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。

本书第一章和第八章由沈阳化工学院李志安、大连大通铜箔层压板公司宫殿民编写;第二、六章及附录由沈阳化工学院金志浩编写;第三、五、七章由李志安编写;第四章由宫殿民、金志浩、李志安编写。全书由李志安副教授统稿,由华东理工大学王志文教授审定。

本书编写工作中得到了化机行业的专家和学者的支持与帮助。化机界老前辈华东理工大学据定一教授为本书写序;华东理工大学李培宁教授、沈阳化工学院宋明晨教授都对初稿提出许多宝贵意见。作者在此表示深深的谢意。另外,辽宁省劳动局王俊对本书初稿提出许多有益的意见和建议,并提供资料;还有沈阳市锅炉压力容器协会刘杰,沈阳市劳动局李薇、沈阳化工学院钟国宁等同志对本书编写工作都给予了大力支持,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免有缺点错误,诚请读者批评指正。

目 录

第一章 概论	(1)
第一节 压力容器的断裂	(1)
一、锅炉与压力容器断裂典型实例	(1)
二、断裂力学与材料力学的差别	(4)
第二节 断裂理论的产生与发展	(5)
第三节 压力容器断裂理论与缺陷评定内容概述	(7)
一、断裂理论内容概述	(7)
二、断裂性能测试	(9)
三、压力容器缺陷评定标准	(9)
四、压力容器缺陷评定实例	(9)
第二章 压力容器的脆断理论	(10)
第一节 裂纹与裂纹扩展的类型	(10)
一、裂纹的类型	(10)
二、裂纹扩展的类型	(11)
第二节 裂纹尖端的应力场和位移场	(12)
一、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)
二、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	(13)
三、无限大平板中Ⅰ型穿透裂纹尖端附近的应力场和位移场	(14)
四、无限大平板中Ⅱ型穿透裂纹尖端附近的应力场和位移场	(14)
第三节 应力强度因子和按应力强度因子建立的断裂判据	(15)
一、应力强度因子	(15)
二、按应力强度因子建立的断裂判据	(16)
第四节 塑性区修正与线弹性断裂理论的适用范围	(18)
一、塑性区的形状和尺寸	(18)
二、应力强度因子的塑性区修正方法	(21)
三、线弹性断裂理论的适用范围	(23)
第五节 能量理论与能量判据	(24)
一、裂纹驱动力与能量判据	(25)
二、能量释放率 G_I 与应力强度因子 K_I 的关系	(26)
第六节 复合型裂纹的断裂判据	(27)
一、最大周向应力理论	(28)

二、应变能密度因子理论.....	(30)
三、最大应变能释放率理论.....	(31)
四、复合型断裂的工程判据.....	(32)
第七节 常见裂纹构件的应力强度因子解	(36)
一、应力强度因子求解方法概述.....	(36)
二、几种带穿透裂纹构件的应力强度因子 K_I 的计算	(38)
三、埋藏裂纹应力强度因子 K_I 的计算	(47)
四、表面裂纹应力强度因子 K_I 的计算	(49)
五、压力容器中心裂纹的应力强度因子 K_I 的计算	(50)
习题	(53)
第三章 弹塑性断裂理论	(55)
第一节 概述	(55)
第二节 COD 理论	(56)
一、COD 定义	(56)
二、COD 判据	(57)
三、两种典型裂纹模型的 COD 计算公式	(58)
四、COD 设计曲线	(66)
第三节 J 积分理论	(69)
一、 J 积分的定义及其守恒性	(69)
二、 J 主导和 J 控制裂纹扩展	(72)
三、 J 积分判据及其有效性分析	(75)
四、两种典型弹塑性断裂问题的 J 积分.....	(76)
习题	(79)
第四章 材料断裂性能及其测试	(81)
第一节 平面应变断裂韧性 K_{IC} 及其测试.....	(81)
一、测试 K_{IC} 的基本原理	(81)
二、 K_{IC} 测试中对试样尺寸的要求	(82)
三、临界载荷 P_c 的确定	(83)
四、 K_{IC} 有效性判据	(85)
五、断裂韧性 K_{IC} 测试的基本过程	(86)
第二节 裂纹尖端张开位移临界值 δ_c 的测试	(88)
一、测试 δ_c 的基本原理	(88)
二、测试 δ_c 的基本过程	(95)
三、 δ_c 测试中有关问题的讨论	(97)
第三节 J 积分临界值 J_{IC} 的测试	(98)
一、测试 J_{IC} 的基本原理	(99)
二、临界点的确定	(101)
三、测试 J_{IC} 的基本过程	(101)

第四节 裂纹扩展阻力曲线及其测试	(102)
一、阻力曲线概念	(102)
二、阻力曲线应用及测试标准简述	(105)
三、 J_R 曲线测定方法综述	(106)
四、 J_R 曲线测试中试样的几何形状和尺寸要求	(107)
五、 J_R 曲线测试要点	(110)
第五章 弹塑性断裂分析的工程方法	(117)
第一节 概述	(117)
第二节 弹塑性断裂分析工程方法基本技术	(118)
一、弹塑性估算方法	(118)
二、全塑性解	(119)
三、用工程方法进行断裂分析	(119)
第三节 常见含裂纹构件的弹塑性解	(120)
一、三点弯曲单边开裂平板(三点弯曲试件)	(121)
二、紧凑拉伸试样	(123)
三、受拉伸的中心裂纹板条	(124)
四、受均匀拉伸的单边切口试样	(126)
五、双边切口试件	(128)
六、含轴向裂纹的内压圆筒	(129)
七、含周向裂纹的圆筒	(131)
第四节 裂纹驱动力图及其应用	(134)
一、紧凑拉伸试件裂纹驱动力图	(135)
二、受拉伸的含周向裂纹圆筒的裂纹驱动力图	(138)
三、裂纹驱动力图的其它应用	(138)
第五节 稳定性评定图	(140)
第六节 失效评定图	(143)
一、以COD理论为依据的失效评定图	(144)
二、以 J 积分理论为基础的失效评定图	(145)
第六章 压力容器的疲劳裂纹扩展及寿命估算	(149)
第一节 概述	(149)
一、压力容器中的疲劳问题	(149)
二、交变应力的循环特性	(149)
三、含裂纹构件的疲劳设计——破损安全设计法	(150)
第二节 疲劳裂纹的扩展规律与寿命估算	(151)
一、疲劳裂纹的扩展过程	(151)
二、疲劳裂纹扩展的门槛值	(152)
三、疲劳裂纹的亚临界扩展速率及寿命估算	(153)
第三节 影响疲劳裂纹扩展速率的因素	(160)

一、平均应力对 da/dN 的影响	(160)
二、过载峰对 da/dN 的影响	(163)
三、加载频率对 da/dN 的影响	(165)
四、温度对 da/dN 的影响	(166)
第四节 腐蚀疲劳	(167)
一、应力腐蚀开裂	(167)
二、腐蚀疲劳	(169)
习题	(172)
第七章 压力容器缺陷评定标准及其进展	(173)
第一节 压力容器缺陷评定技术进展	(173)
一、概述	(173)
二、压力容器缺陷评定技术的新进展	(174)
第二节 以线弹性断裂理论为基础的标准	(175)
一、美国 ASME 规范第 III 卷附录 G	(175)
二、美国 ASME 规范第 XI 卷附录 A	(178)
第三节 以 COD 理论为依据的标准	(182)
一、国际焊接学会 IIW-X-749-74 标准	(182)
二、英国 BSI PD 6493-1976 标准	(185)
三、日本 WES 2805-1980 标准	(185)
四、德国 DVS 2401-1 标准	(187)
五、中国 CVDA-1984 标准	(188)
第四节 采用失效评定图技术的标准	(200)
一、英国 CEBG 老 R6 标准	(201)
二、美国 EPRI 的评定规程	(201)
三、英国 CEBG 新 R6 标准	(206)
第五节 我国压力容器缺陷评定技术的进展	(222)
第八章 压力容器缺陷评定典例	(225)
第一节 我国压力容器典型工程实例	(226)
第二节 美国 EPRI 评定规程应用举例	(234)
附录 I 弹性力学的基本方程及两种平面问题	(241)
附录 II 复变函数的基本知识	(248)
附录 III 弹性力学平面问题的复变函数表示	(250)
附录 IV 用 Westergaard 应力函数解平面裂纹问题	(252)
附录 V 用 Muskhelishvili 应力函数解平面裂纹问题	(258)
附录 VI 求解弹性体平面裂纹问题的边界配位法 (Williams 法)	(268)
参考文献	(271)

第一章 概 论

第一节 压力容器的断裂

一、锅炉与压力容器断裂典型实例

近半个世纪以来,特别是第二次世界大战以后,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,曾使锅炉与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锅炉与压力容器断裂破坏的实例。

1. 1965年美国发生著名的260 SL-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,其抗拉强度为 $\sigma_t=2500\text{MPa}$,屈服点应力为 $\sigma_s=1750\text{MPa}$,设计中取偏低值,再考虑焊缝系数为 $\varphi=0.9$,因此取 $\sigma_d=1450\text{MPa}$ 。设计内压力为 $P=6.1\text{MPa}$,取安全系数 $n_s=1.3$,平均半径 $R=3310\text{mm}$,则壳体壁厚为:

$$t = PRn_s/\sigma_d \\ = 6.1 \times 3310 \times 1.3/1450 = 18.15\text{mm}$$

最后取壳体壁厚为 $t=18.5\text{mm}$ 。

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。由于火箭系一次负载,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 $\sigma_f=P_fR/t=3.8 \times 3310/18.5=679\text{MPa}$ 。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。

2. 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 $\sigma_t=582\text{MPa}$,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:

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

$$P_s = \sigma_s \ln k = 84.4 \text{ MPa}$$

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 2 吨重,飞出 45 米远。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。

3. 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 BS1113-1958 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。这究竟是什么原因呢?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 的大埋藏裂纹。

4. 1969 年西德一台用 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。

5. 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,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 $12 \times 3\text{mm}^2$ 的裂纹扩展到 $70 \times 5\text{mm}^2$,达到了临界裂纹尺寸而断裂。

6. 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:是由于在制造时(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的。

7. 我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 $P_f=14\text{MPa}$ 。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,给我们提出了这样一个问题,既然这些容器设计都是符合常规强度要求,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作过调查。日本用HT-60和HT-80钢制造的大型球罐,在45只中普查出近2 000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12 700台压力容器进行一次事故实况的调查。在100 300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10 000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。

表 1-1 英国调查事故原因分类表

事故原因	事故次数	百分比(%)
裂 纹	118	89.3
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

我国有关组织也作过类似的调查,其调查情况见表1-2。

表 1-2 我国调查压力容器事故原因分类表

事故原因	事故次数	百分比(%)
裂 纹	50	62.5
腐蚀(含氢脆)	22	27.5
焊接缺陷	6	7.5
错用材料	2	2.5
总 计	80	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,更大量地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。

二、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是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:材料力学研究连续材料(无缺陷)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最大计算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 和 σ_b 分别为材料的屈服应力和抗拉强度, n_s 和 n_b 为相应的安全系数。

对于断裂力学,则采用断裂判据来判断含裂纹结构是否安全。如线弹性断裂判据即为:

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

式中 K_I 为应力强度因子,与裂纹尺寸 a 和裂纹体所载荷 σ 有关($K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$); K_{Ic} 是材料的断裂韧性,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须满足:

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

式中 n_D 为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坎值, 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坎值 ($\Delta K < \Delta K_{th}$) 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. 腐蚀介质下的情况

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, 记录作用的应力和破断的时间曲线 ($\sigma-T$), 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_{ISCC} , 即裂纹稳定条件为:

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

式中 K_{ISCC} 是材料在应力腐蚀条件下抵抗裂纹失稳扩展断裂的能力指标。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, 我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。

第二节 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。是他首先提出将强度与裂纹长度定量地联系在一起的。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 的能量思想的重要性还缺乏应有的认识。所以, 断裂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, 它大大地促进了断裂力学的发展。尤其引人注目的是《自由轮》断裂事故。1942 年至 1947 年间, 美国采用全焊接工艺制造了 5000 艘称“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, 一为存在缺陷。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等。又驱使断裂的研究工作在欧洲展开。断裂力学作为一门科学, 公认为从 1948 年开始。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。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。

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,在裂纹尖端将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,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。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,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80年代初提出了一种弹塑性断裂分析的工程方法^[1,2],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^[3],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80年代中后期,国际上的压力容器缺陷评定标准,纷纷采用以 J 积分理论为依据进行修订。到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理论而占有了统治地位。

我国从70年代初开始研究压力容器断裂理论,经十年的研究工作,及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。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深入研究分析,使我国的压力容器缺陷评定技术有了很大发展。目前,我国正在研究编制新的以 J 积分理论为依据的压力容器缺陷评定标准。

第三节 压力容器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;介绍我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。

一、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。它是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,以确保其构件安全服役。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. 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。本书第二章就是这部分内容的详细介绍。

(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即为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。本书则以讨论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 和含裂纹构件所受载荷 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_{Ic} 。这样,对于带裂纹的构件来说,其强度准则就应该是:

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

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_{Ic} 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_{Ic} 的最低值,即 $(K_{Ic})_{\min}$ 。此值是材料的性能常数,即对于不同的材料有不同的但是确定的 $(K_{Ic})_{\min}$ 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_{Ic} 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:

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

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 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 表示的断裂数据为:

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

(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,其中之一就是 J 积分。 J 积分的定义为:

$$J = \int_{\Gamma} \left[W dy - \bar{T} \frac{\partial u}{\partial x} dS \right] \quad (1-10)$$

式中 W 是应变能密度或形变功密度,其表达式为:

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

$\bar{T}$ 为积分回路上任意弧线元 (dS) 所对应的面元上的应力矢量; u 为应力 $\bar{T}$ 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纹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,裂纹就将开始扩展。此临界值即是材料的断裂韧性。在