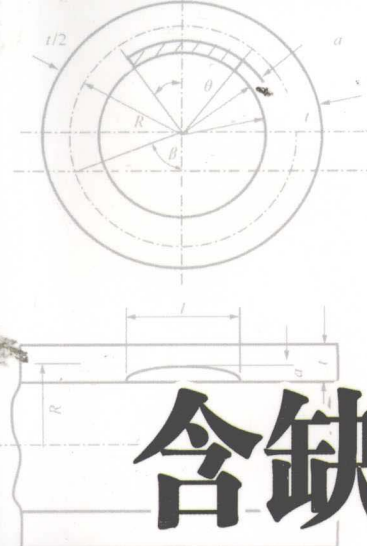




含缺陷承压设备 安全分析技术

沈士明 编著

HAN QUEXIAN CHENGYA SHEBEI
ANQUAN FENX

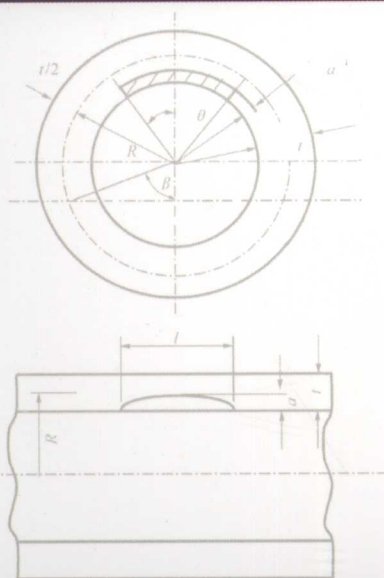
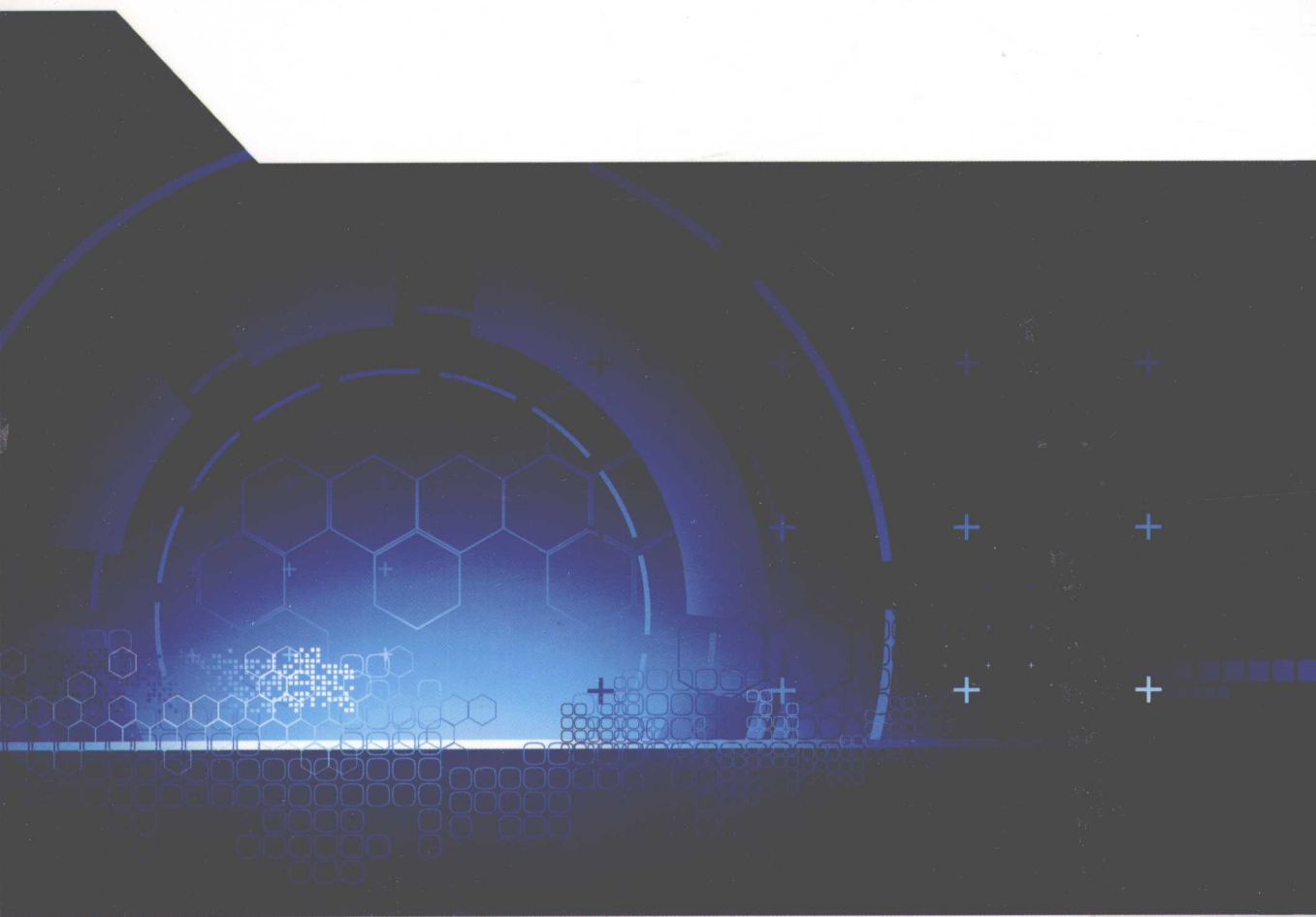
中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

责任编辑：潘向阳 于田甜

责任校对：李 伟

封面设计：七星博纳



ISBN 978-7-5114-0662-0



9 787511 406620 >

定价：45.00元

含缺陷承压设备 安全分析技术

沈士明 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书介绍了在役设备“合乎使用”准则的理论基础,同时较详细地介绍国内外含缺陷承压设备安全评定的最新标准与规范中的一些技术与方法,并结合实例加以应用,以提高读者的理论基础与运用规范解决工程实际问题的能力。

本书主要是供从事承压设备安全管理的技术人员参考,同时也可作为高等学校研究生和本科生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

含缺陷承压设备安全分析技术/沈士明编著. —北京:
中国石化出版社,2010.12
ISBN 978-7-5114-0662-0

I. ①含… II. ①沈… III. ①压力容器—缺陷—安全
性—评价 IV. ①TH490.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 248619 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com.cn

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 15.25 印张 378 千字

2011 年 3 月第 1 版 2011 年 3 月第 1 次印刷

定价:45.00 元

承压设备是一种特种设备,它包括锅炉、压力容器与管道以及储运、换热、分离与反应设备的壳体等结构,被广泛应用于化工、石油化工、能源、冶金、医药、食品等过程工业中,经常用以处理易燃、易爆和有毒的介质,这些设备在运行过程中因各种原因而时有事故发生,给人的生命、国家的财产和环境造成不同程度的伤害。

由于特种设备的事故易发性与事故发生后果的严重性,其安全问题受到各级领导、工程技术人员与广大群众的高度关注。我国与世界各国都对承压设备的设计、制造、检验与管理制定了一系列的标准、规范与法规,这些标准、规范与法规可以分成两大类,即“质量控制”标准与“合乎使用”的准则。尤其是“合乎使用”的标准,近年来发展很快,亦日趋成熟,各种新的标准相继修订并公布,对在役承压设备的安全性起到了技术保障作用。

我国的压力容器与管道的应用面广量大,这些设备由于制造、使用中诸多因素,可能存在缺陷,它给设备的安全运行带来威胁,如何保障含缺陷设备的安全性,又不产生过度检验与维修,这就需要正确使用“合乎使用”准则的相关标准与规范,对它们进行正确的评判。这将给生产带来显著的经济效益和社会效益,这是生产和社会发展的需求。

为了适应这一需求,高等工科院校有关专业的本科生、研究生的教学中,都设置了承压设备安全分析的教学内容,安排了相应的课程,选修这些课程的学生人数也日益增加。为了满足教学的要求,在多年来对研究生开设“工程断裂力学与疲劳分析”与“压力容器与管道安全分析”课程的基础上,根据国内外技术发展的新趋势编写本书,介绍在役设备“合乎使用”准则的理论基础与最新技术方法,以满足生产实际中工程技术人员正确运用“合乎使用”准则解决实际问题以及高等学校培养新型人才的需求。

在本书的编写过程中,编者力求简洁、系统、全面地介绍“合乎使用”准则的理论基础,同时较详细地介绍我国含缺陷压力容器安全评定的最新规范 GB/T 19624《含缺陷压力容器安全评定》以及国外最新的标准与规范中的一些技术与方法,如美国石油协会的 API 579 - 1/ASME FFS - 1, 2007《Fitness For Service》、英国的 BS7910: 2005《Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures》与欧盟的 SINTAP (Structural Integrity Assessment Procedure for European Industry)等,并结合实例加以应用,以提高读者的理论基础与运用规范解决工程实际问题的能力。

本书分为两大部分,第一部分主要讲述“安全分析的理论基础”——工程断裂力学与裂纹扩展的基本理论,共分三章;第二部分主要介绍安全分析技术,即“合乎使用”准则的评定方法与相应的标准与规范,共分四章。

本书第七章由赵建平教授编写,其余各章均由沈士明教授执笔。在编写过程中,书稿部分文字输入等方面得到了段志祥博士、刘庆刚博士和薛吉林博士等的大力帮助,在此表示感谢。

本书在编写过程中也得到了中国石化出版社的鼓励与帮助,在此深表感谢。

本书主要是供从事承压设备安全管理的技术人员参考,同时也可作为高等学校研究生和本科生的教材。

由于编者水平有限,书中不乏有不妥与谬误之处,恳请读者批评指正。

绪 论

0.1 承压设备的特殊性与危险性	(1)
0.2 以弹塑性理论为依据的设计方法面临挑战	(1)
0.3 断裂力学与“合乎使用”的准则	(3)
0.3.1 断裂力学的兴起与发展	(3)
0.3.2 “质量控制”和“合乎使用”的准则	(4)

第 1 篇 金属材料的脆性断裂力学基础

第 1 章 金属材料与结构的脆性断裂

1.1 裂纹及其对材料与结构强度的影响	(7)
1.1.1 裂纹的分类	(7)
1.1.2 裂纹对材料强度的影响	(8)
1.2 能量释放率断裂理论	(10)
1.2.1 Griffith 能量释放率理论	(10)
1.2.2 Orowan 理论	(11)
1.2.3 能量释放率及其断裂判据	(12)
1.2.4 裂纹扩展能量释放率的计算	(12)
1.2.5 能量释放率的裂纹扩展阻力与阻力曲线	(14)
1.3 应力强度因子断裂理论	(14)
1.3.1 I 型裂纹尖端附近处的应力场和位移场	(15)
1.3.2 II 型与 III 型裂纹尖端附近处的应力场与位移场	(16)
1.3.3 I 型裂纹应力强度因子的计算	(17)
1.3.4 G 与 K 的关系	(27)
1.3.5 应力强度因子理论的断裂判据及其应用	(29)
1.3.6 金属材料平面应变断裂韧度的 K_{Ic} 测试	(30)
1.4 I 型裂纹尖端的塑性区及 K_I 因子的塑性修正	(36)
1.4.1 I 型裂纹尖端的塑性区	(36)

1.4.2	应力强度因子 K_I 的塑性修正	(41)
1.4.3	线弹性断裂力学的适用范围	(43)
1.5	复合型裂纹的脆性断裂准则	(44)
1.5.1	最大周向应力理论(σ_θ 准则)	(45)
1.5.2	能量释放率理论(G 准则)	(45)
1.5.3	应变能密度因子理论(S 准则)	(46)
1.5.4	复合裂纹脆性断裂理论的工程处理准则	(47)
1.5.5	复合裂纹脆性断裂理论的应用实例	(48)
参考文献		(51)

第2章 金属材料的弹塑性断裂力学基础

2.1	裂纹张开位移(COD)理论	(52)
2.1.1	COD 的定义	(53)
2.1.2	COD 参量 δ 的表达式	(54)
2.1.3	COD 理论的断裂判据	(61)
2.1.4	材料临界 COD 的测试	(61)
2.1.5	COD 断裂理论的应用	(63)
2.2	J 积分理论	(65)
2.2.1	J 积分回路定义及其守恒性	(65)
2.2.2	J 积分与裂纹尖端应力应变场	(68)
2.2.3	J 和 G_I 以及 COD 的关系	(69)
2.2.4	J 积分的工程估算方法	(71)
2.2.5	J 积分理论的启裂判据	(77)
2.2.6	J 积分的形变功定义	(77)
2.2.7	J 主导条件	(79)
2.2.8	J 积分理论的失稳扩展的判据	(79)
2.3	弹塑性断裂韧度与阻力曲线的测试	(81)
2.3.1	施加力 F 与位移 V 的关系曲线	(82)
2.3.2	弹塑性断裂韧度 δ 特征值的测定	(82)
2.3.3	弹塑性断裂韧度 J 特征值的测定	(84)
2.3.4	材料阻力曲线的测试	(86)
参考文献		(91)

第3章 金属材料的疲劳破坏与寿命预测

3.1	概述	(92)
3.2	疲劳载荷与疲劳破坏	(93)
3.2.1	疲劳载荷	(93)
3.2.2	几种疲劳概念	(94)

3.2.3 疲劳设计的观点	(94)
3.2.4 疲劳破坏的过程	(95)
3.3 疲劳裂纹的亚临界扩展速率与寿命预测	(97)
3.3.1 疲劳裂纹扩展的门槛值	(97)
3.3.2 疲劳裂纹的亚临界扩展速率	(98)
3.3.3 疲劳裂纹扩展寿命的估算	(99)
3.3.4 应用实例	(101)
3.4 影响疲劳裂纹扩展的因素	(104)
3.4.1 平均应力的影响	(104)
3.4.2 过载峰的影响	(105)
3.4.3 加载频率的影响	(107)
3.4.4 温度的影响	(108)
3.4.5 环境的影响	(108)
3.5 应力腐蚀开裂与腐蚀疲劳裂纹扩展	(108)
3.5.1 材料的应力腐蚀开裂	(108)
3.5.2 材料的腐蚀疲劳破坏	(115)
参考文献	(119)

第 2 篇 承压设备安全评定技术与规范

第 4 章 安全评定技术

4.1 概述	(120)
4.2 安全评定技术	(121)
4.2.1 单判据评定技术	(121)
4.2.2 双判据评定技术	(123)
4.3 评定中安全系数的确定	(129)
4.3.1 总安全系数	(129)
4.3.2 分安全系数	(130)
4.3.3 概率分安全系数	(130)
参考文献	(132)

第 5 章 我国承压设备的安全评定技术

5.1 前言	(134)
5.2 平面缺陷的断裂失效评定	(135)
5.2.1 断裂评定所需要的资料与数据	(136)
5.2.2 平面缺陷的断裂评定	(143)

5.3 非平面缺陷的断裂评定	(154)
5.3.1 凹坑缺陷的断裂评定	(154)
5.3.2 气孔与夹渣缺陷的断裂评定	(156)
5.4 平面缺陷的疲劳评定	(157)
5.4.1 疲劳评定所需数据的确定	(157)
5.4.2 疲劳裂纹应力强度因子幅值 ΔK 的计算	(159)
5.4.3 免于疲劳评定的判别	(158)
5.4.4 疲劳裂纹扩展量的计算	(159)
5.4.5 容许裂纹尺寸的计算与安全性评价	(160)
5.4.6 平面缺陷疲劳评定例题	(160)
5.5 非平面缺陷的疲劳评定	(163)
5.5.1 评定步骤	(164)
5.5.2 评定例题	(166)
5.6 压力管道的安全评定	(169)
5.6.1 概述	(169)
5.6.2 含平面缺陷压力管道的安全评定	(170)
5.6.3 含体积型缺陷压力管道的安全评定	(172)
参考文献	(175)

第6章 国外承压设备安全评定的相关标准

6.1 概述	(176)
6.2 欧洲工业结构完整性评定方法 SINTAP	(176)
6.2.1 基本内容	(177)
6.2.2 多级评定与失效评定曲线	(177)
6.2.3 SINTAP 规程新发展的一些细节	(182)
6.3 美国石油学会 API 579: 2007	(183)
6.3.1 含局部减薄缺陷承压设备的评定	(184)
6.3.2 受火损伤承压设备的评定	(191)
6.4 英国标准 BS7910: 2005	(196)
6.4.1 BS7910 与 PD6493	(196)
6.4.2 “爆破前泄漏”的评定方法	(197)
6.5 美国机械工程师学会锅炉与压力容器规范	(201)
6.5.1 IWB-3640 简介	(202)
6.5.2 基于失效模式的评定规程和验收准则	(203)
6.5.3 基于失效评定图的评定规程和验收准则	(211)
6.5.4 根据施加应力的压力管道评定方法	(214)
参考文献	(215)

第7章 概率断裂力学及其安全评定基础

7.1 概述	(216)
7.2 可靠性分析基本原理及方法	(216)
7.3 压力容器缺陷评定中主要参数的统计特性	(218)
7.3.1 初始缺陷尺寸的分布规律	(218)
7.3.2 裂纹检出率的分布规律	(219)
7.3.3 缺陷尺寸参数的不确定性与无损检测概率(DP)的定量关系	(220)
7.3.4 断裂韧度的分布规律	(221)
7.4 压力容器缺陷概率安全评定	(221)
7.4.1 压力容器缺陷概率安全评定方法研究进展	(221)
7.4.2 例题	(225)
7.5 模糊概率断裂简介	(226)
7.6 随机有限元法在断裂力学中的应用	(230)
7.6.1 位移偏导数 $\frac{\partial \{u\}}{\partial Y_j}$ 的计算	(230)
7.6.2 应力偏导数 $\frac{\partial \{\sigma\}}{\partial Y_j}$ 的计算	(231)
7.6.3 刚度矩阵偏导数 $\frac{\partial [K]}{\partial Y_j}$ 的计算	(231)
7.6.4 Jacob 矩阵的行列式的偏导数 $\frac{\partial J }{\partial Y_j}$ 的计算	(232)
7.6.5 随机有限元方法在断裂力学中的应用	(232)
参考文献	(233)

绪 论

0.1 承压设备的特殊性与危险性

承压设备是一种特种设备,它包括锅炉、压力容器与管道以及储运、换热、分离与反应设备的壳体等结构,被广泛应用于化工、石油化工、能源、冶金、医药、食品等过程工业中。这些设备在运行过程中因各种原因而时有发生,会给人的生命、国家的财产和环境造成不同程度的伤害。特别是随着经济的发展,承压设备的事故发生次数有上升的趋势,2008年我国共发生特种设备事故有307起,事故总起数比2007年增加了20%,其中使用管理混乱、违章操作和维护缺失等是造成事故的主要原因。

尤其是在化工、石化工业中应用的承压设备,它们通常是在一定压力与温度的环境下工作,条件比较恶劣,因此承压设备的事故时有发生。它们又经常处理易燃、易爆和有毒的腐蚀性介质,一旦发生事故,极易产生燃烧、爆炸和有毒介质的蔓延而造成毒害与环境污染,其破坏力是十分巨大的。例如1984年墨西哥城由于储存液化气的容器产生泄漏而引起的火灾,造成500多人的死亡,79000多人严重伤害,并造成巨大的财产损失,可以说是上个世纪世界范围内最大的工业事故之一;1998年3月5日,我国西安市煤气公司发生液化气泄漏而引发的爆炸事故,在持续两天的事故过程中,共发生了4次爆炸,造成11人死亡、1人失踪、33人受伤,共炸毁400m³球罐2台,100m³卧式储槽4座,烧毁气罐车10余辆,经济损失惨重。2005年11月13日,吉林石化分公司双苯厂发生爆炸事故,造成8人死亡,1人重伤,59人轻伤,使苯胺二车间2座塔、12台储罐以及相关管线全部毁坏,直接经济损失达6908万元,爆炸后产生的部分泄漏物料进入下水管线后流入松花江,造成严重的水体污染。

0.2 以弹塑性理论为依据的设计方法面临挑战

我国与世界各国对承压设备的设计大都是按照弹性设计的方法进行的。如我国的国家标准GB 150《钢制压力容器》它是与美国的ASME Boiler and Pressure Vessel Code VⅢ Division 1《Rules for Construction of Pressure Vessels》相对应,是以弹性理论为依据的强度或刚度设计标准。

弹性理论也称弹性力学,它的性质与任务与材料力学是一致的,是研究材料或弹性体在外力作用下或承受温度变化等原因而产生的应力、应变和位移的学科,是研究材料与结构在外力作用下的屈服、断裂以及防止屈服和断裂的方法。因此弹性力学与材料力学有很多共同之处,例如它们都是建立在材料与结构连续、各向同性的基础上。当然它们之间也有区别,其区别主要表现在以下三个方面:

(1) 研究范围不同。在材料力学中,主要是研究所谓杆、梁和轴类构件在拉伸、压缩、剪切、扭转和弯曲等载荷作用下的应力、应变和位移。而弹性力学的研究范围除了这些构件

外,还研究板、壳以及堤坝、地基等实体构件。因此如非圆截面杆的扭转、应力集中、接触应力等问题,材料力学是不能精确解决的,必须用弹性力学来解决。

(2) 出发条件不同。在材料力学中,除了一些必要的基本假设(如假设材料是完全弹性的、连续的和各向同性的)以外,对不同的研究对象还增加了一些所谓的“附加假设”(如研究梁弯曲时所作的平面假设等),以使问题得到进一步的简化。这些附加假设往往在一定条件下才与实际情况相近,而不符合这些条件时,其解会有较大的误差。例如受均布载荷的梁,正应力沿着梁截面高度线性分布的假设,只有在梁的高度 h 与梁的跨度 l 之比(h/l)不大时,才与实际情况相符,而当 $h/l > 4$ 时,这一假设就与实际情况相差甚远。这就表明,材料力学中的附加假设具有局限性,它不反映一般条件下的实际情况,而在弹性力学中摒弃了这些附加假设,是更具有一般性。

(3) 研究的方法不同。在材料力学中,研究平衡条件时,所考虑的对象是从构件上切出的分离体,是保证分离体的平衡,而往往不能保证构件各细小部分的平衡。但在弹性力学中,研究平衡时,所考虑的对象是组成该弹性体的所有微分单元体,是建立微体平衡方程,因此能保证弹性体所有各部分的平衡。由于弹性力学与材料力学所用的方法不同,与此相对应的所采用的数学工具也不尽相同,所得结果的精确程度也不同。

但也应指出,在所谓“应用弹性力学”中,例如板、壳体等的计算中,由于问题的复杂性,也会采用一些附加假设来简化问题,这就使弹性力学与材料力学的区别不大了。

随着工业的发展,承压设备向大型化、高参数化发展,承压设备的直径与壁厚也越来越大,采用弹性理论为基础的设计方法显得不能满足要求,因此相应的分析设计方法也应运而生,我国的行业标准 JB 4732《钢制压力容器——分析设计标准》,与美国的 ASME Boiler and Pressure Vessel Code V III Division 2《Alternative Rules for Construction of Pressure Vessels》相对应。这些设计标准中,采用了塑性与疲劳分析的理论,提出了承压设备的极限载荷、材料的安定性理论与疲劳设计等方法,使承压设备的设计又向前迈进了一步。

但这些方法都是建立在承压设备材料的连续性假设的基础上的。实践表明,采用这些标准设计的构件,有时也会不安全,而产生断裂事故。尤其是随着工业的发展,高强度材料和超高强度材料($\sigma_s > 1400\text{MPa}$)的采用,焊接结构或者服役于低温和腐蚀环境中的构件,意外断裂事故的发生就更加频繁。例如,1943~1947年间,美国制造的5000艘全焊接“自由轮”,竟发生了1000多例断裂事故,其中238艘完全毁坏,有的甚至折成两截。1965年美国发生了著名的260SL-1固体火箭发动机压力壳断裂事故,该壳体内径为260in($\phi 6600\text{mm}$),为减轻壳体重量以增大火箭推力,采用了马氏体钢(18Ni-Co-Mo-Ti钢),其屈服极限为1750MPa,设计中取焊缝系数为0.9,设计内压为6.1MPa,安全系数取1.3,设计壳体壁厚为18.5mm,壳体制成后,按规定进行水压试验,水压试验压力为6.7MPa(1.1倍的工作压力),但当水压试验升压到3.8MPa时,壳体发生了爆炸飞裂,据计算断裂时壳体的应力为676MPa,远低于材料的屈服极限,也低于壳体的工作应力(1100MPa),属低应力脆断。事故后经分析,从断裂碎片上找到三个断裂源,其中之一为深3mm,长15.2mm的表面裂纹。再如1965年12月英国John Thompson公司制造的一台大型氨合成塔,水压试验时发生脆断,该容器内径为1925mm,壁厚150mm,全长18300mm,重160t,筒体与锻件均为Mn-Cr-Mo-V钢,水压试验压力为49.0MPa,当试验压力升到35.2MPa时,断成两截并飞出四块碎片,其中最大一块约重2t,飞出45m。分析结果表明,断裂从法兰锻件与筒体的埋弧焊缝开始的,该处有一边长约10mm的三角形深埋裂纹,再由于消除应力退

火温度不够(规定 650°C , 而实际上只加热到 520°C), 致使焊缝金属韧性降低, 水压试验时裂纹便向韧性差而又没有很好消除残余应力的焊缝扩展而导致断裂。我国 2001 年 2 月某容器制造厂为化肥工业所制造的水冷器, 水冷器为 U 形管换热器。管程走高压合成气, 壳程走冷却水。管程封头部分为无折边球形封头, 其球半径为 710mm , 封头壁厚为 85mm , 由 13MnNiMoNbR 厚板冲压而成; 壳程为圆筒形, 其圆筒直径为 1300mm , 壁厚为 12mm ; 水冷器的管板厚 360mm , 由 20MnMo 锻件加工而成。管板与封头的焊接采用自动焊, 焊丝为 H10Mn2。水冷器制造完成后进行管程水压试验, 当压力升至 37MPa 时, 突然发生爆炸(管程设计压力为 31.4MPa , 水压试验压力为 39.25MPa), 致使一工人受伤。爆炸事故现场观察可见, 水冷器封头裂成三块(两块较大, 有一块较小), 有一块较大的飞出后撞在附近的平板车上反弹, 断裂基本上是沿着封头与管板相接焊缝处沿管板侧。由断口放射纹排列的方向和断口的颜色很容易地辨别出裂源, 它是一条最大深度达 23mm 、长度为 200mm 的裂纹。某城市通讯公司的灭火系统于 2003 年建成并投入运行, 共有钢瓶 113 只, 其中充装压力为 15MPa 的 IG541 灭火剂。系统于 2006 年 12 月 4 日因钢瓶防爆片失效而发生过一次意外启动, 使 1#~53# 钢瓶的内装灭火剂全部泄放, 后重新充装 IG541 灭火剂, 于 12 月 26 日恢复系统运行。至 2007 年 1 月 30 日, 其中 53# 储气钢瓶突然发生爆炸, 钢瓶被炸成两节, 近瓶底一节沿钢瓶纵向撕开, 近头部一节没有撕开而保持原样。分析结果表明, 由于瓶中有凝水存在, 导致钢瓶内壁腐蚀而形成蚀坑, 同时电化学腐蚀所析出的扩散 H 诱导裂纹从蚀坑启裂, 并使裂纹扩展至高强钢材料的临界裂纹尺寸而产生爆炸。

对上述和众多断裂事故进行了大量的分析研究发现, 这些事故的发生有几个共同特点:

(1) 断裂事故都属于低应力脆断。即断裂时的工作应力水平都较低, 一般不超过材料的屈服极限, 甚至还低于常规设计的许用应力, 尽管材料具有一定的塑性, 也会发生脆断。

(2) 断裂总是由构件的表面或内部的宏观缺陷(裂纹)作为起源。这种宏观裂纹源是在加工过程或使用过程中产生, 并在使用过程中产生扩展。

(3) 裂纹源一旦超过某一临界尺寸时, 裂纹将以极高的速度扩展而产生断裂。

(4) 中、低强度钢的脆断事故, 通常发生在较低温度下, 而高强度钢则没有明显的温度效应。

(5) 原始缺陷可能在一定条件下产生裂纹扩展, 当裂纹尺寸达到材料的临界裂纹长度时, 引起结构的断裂。

由分析可知, 缺陷(裂纹)是造成构件低应力脆断的根源。这也是常规与分析设计方法不能解释这些断裂事故的原因所在, 因为裂纹的存在破坏了材料均匀、连续和各向同性这些前提, 为了解释这些问题, 断裂力学应运而生。

0.3 断裂力学与“合乎使用”的准则

0.3.1 断裂力学的兴起与发展

断裂力学是研究含裂纹构件的强度和裂纹扩展规律的一门学科。断裂力学研究的主要内容是含裂纹材料或构件的强度与断裂破坏, 以解决生产实际中提出的问题:

(1) 用什么判据来判断断裂发生的时机, 用什么参量来进行表述?

(2) 确定多大的缺陷或裂纹会使构件断裂, 反之即多小的裂纹或缺陷是允许在构件服役

期内存在?

(3) 分析计算从允许存在的小裂纹扩展到能使构件断裂的大裂纹需多少时间,即构件寿命的评估,从而确定既保证安全、又能避免不必要停车损失的检验周期。

断裂问题的研究可追溯到 1920 年 Griffith 对玻璃中所含裂纹的脆性扩展研究。他成功地提出了以含裂纹体的应变能释放率为参量的裂纹失稳扩展准则,较好地解释了玻璃等脆性材料的低应力脆断问题。Griffith 的断裂理论可用于估算脆性固体的理论强度,并给出了断裂强度与裂纹尺寸之间的正确关系,这对后来断裂力学的发展起了很大的影响。

1944 年 Zener 和 Hollman 又首先把 Griffith 理论用于金属材料的脆性断裂,1949 年 Orowan 对 Griffith 理论作了修正,计入了材料塑性的影响。

但脆性断裂理论的重大突破还应归功于 G. R. Irwin,他在 1957 年提出了应力强度因子的参量,以表征在外力作用下弹性体裂尖附近的应力强度,随后又在此基础上形成了材料断裂韧性的概念,并建立了材料断裂韧性的测试实验技术,从而创立了以应力强度因子为参量的裂纹体断裂准则——线弹性断裂力学。它被广泛地应用于许多工业领域,逐步成为结构设计、材料选择和在役检验的主要依据。

1963 年, A. A. Wells 发表了关于在外力作用下弹性体裂纹尖端张开位移(COD , Crack Opening Displacement)的著名著作,提出了以 COD 断裂参量和表征材料性能的临界 COD 值的概念。建立了以 COD 作为弹塑性断裂参量判别裂纹失稳扩展的一个近似工程方法。

1968 年 J. R. Rice 提出了二维含裂纹体 J 积分,将之定义为围绕含裂纹体裂纹尖端的一个与路径无关的回路积分,以描述裂纹尖端附近在非线弹性情况下的应力、应变场,并建立了相应的断裂判据。

由断裂力学的兴起与发展过程可见,工程上断裂力学可以分为线弹性断裂力学和弹塑性断裂力学。

线弹性断裂力学是采用弹性力学的分析方法来研究线弹性裂纹体的断裂问题。它认为裂纹体内各点的应力-应变关系服从虎克(Hook)定律。它包括能量释放率理论与应力强度因子理论。线弹性断裂理论比较严谨,发展较早,也比较成熟,它是断裂力学的基础。但是金属材料都有一定的韧性,严格的线弹性断裂问题几乎不存在。裂纹的扩展总伴随着裂纹尖端的塑性变形,而理论和实践证明,只要该塑性区尺寸远小于裂纹的尺寸,并对线弹性断裂力学进行适当修正,其计算结果不致产生太大的误差。对高强度钢、在低温下工作的构件和一些大断面尺寸的构件,往往在断裂前裂纹尖端的塑性区尺寸很小,也可用线弹性断裂力学进行分析。

弹塑性断裂力学是采用弹性力学和塑性力学来研究含裂纹的弹塑性体的断裂问题。它包括裂纹尖端张开位移理论与 J 积分理论等。因为对常用的中、低强度钢构件,在断裂前裂纹尖端塑性区尺寸都较大,将不符合线弹性的条件,就需采用弹塑性断裂力学的分析方法,因此它在工程应用中具有更大的意义,也是断裂力学中研究和最活跃的领域。

断裂力学的兴起与发展,从理论上阐述了一些承压设备发生爆炸等事故的原因,这也推动了承压设备安全监察与管理理念的变化与发展。为对新制造的设备与在役设备分别采用不同的准则进行安全监察与管理提供了理论依据。

0.3.2 “质量控制”和“合乎使用”的准则

由于承压设备事故的易发性与事故发生的后果严重性,它们的安全问题受到各级领导、

工程技术人员与广大群众的高度关注。我国与世界各国都对承压设备的设计、制造、检验与管理制定了一系列的标准、规范与法规,这些标准、规范与法规大致可以分成两大类,即“质量控制”标准与“合乎使用”的标准。它们对承压设备设计、制造与使用的各个阶段的安全性起到了技术保障作用。

“质量控制标准”通常是针对新建造的承压设备的质量保障而制定的。主要用于新的承压设备的设计与建造,在这些标准中对新建承压设备的材料选择、强度设计、结构设计以及制造检验等都有相应的规定。它们对承压设备的质量保证起着重要作用,但也要看到它们的不足,一方面它们是建立在一定的经验基础上的,例如在材料强度安全系数的选取方面,因此有时会带来设计结果的保守性;而有些计算方法确定是建立在一定假设条件的前提下,这有可能与实际情况之间产生不一致性;另一方面,这些标准在设计时都没有考虑承压设备中存在缺陷的可能性,而承压设备在制造与使用过程中难免存在或产生一些缺陷,有些缺陷由于细微或其他原因在制造检验时未能发现,而在生产过程中这些缺陷产生扩展以致承压设备产生事故。对于第二种情况,美国的 ASME Boiler and Pressure Vessel Code III《Rules for Construction of Nuclear Facility Components》中已经考虑,该标准对核设备的承压部件设定了假想缺陷(裂纹),但它设定的假想缺陷深度达部件壁厚的 $1/4$,缺陷的长度为缺陷深度的 6 倍。在设计时考虑这样的缺陷显然是保守的。

“质量控制标准”对承压设备的焊接质量检验方法有多种,对检验所得的缺陷的限制是严格的。我国的行业标准 JB 4730—2005《承压设备无损检测》中规定了 5 种无损检验方法:射线检测、超声检测、磁粉检测、渗透检测与涡流检测。在对接焊接接头中,根据缺陷的性质可分为裂纹、未熔合、未焊透、条形缺陷与圆形缺陷等五类;按照接头中缺陷的性质、数量与密集程度可分成四个质量等级(I、II、III和IV级)。I级对接焊接接头内不允许存在裂纹、未熔合、未焊透与条形缺陷,质量为II级和III级的对接焊接接头内不允许存在裂纹、未熔合与未焊透,对接焊接接头中缺陷超过III级者为IV级。根据《压力容器安全技术监察规程》的要求:对压力容器对接接头进行全部(100%)或局部(20%)无损检测时,若采用射线检测其透照质量不应低于 AB 级,其合格级别为III级,且不允许有未焊透;如采用超声检测,合格级别为II级。对 GB 150《钢制压力容器》、GB 151《管壳式换热器》等标准中规定进行全部(100%)无损检测的压力容器、第三类压力容器、焊缝系数为 1.0 的压力容器以及无法进行内外部检验或耐压试验的压力容器,对其对接接头进行全部(100%)无损检测时,如采用射线检测其透照质量不应低于 AB 级,其合格级别为II级;如采用超声检测,合格级别为I级。由此可见,按质量控制标准对缺陷的限制是十分严格的。

在生产实际中,对新建造的承压设备必须要按“质量控制标准”进行验收,以保障承压设备的先天完好性。但是对在役的承压设备,如果仍然按“质量控制标准”进行检验与验收,由于多种原因使在役承压设备存在超过质量控制标准所限制的缺陷,例如有些设备在新设备检验时未能发现缺陷(因为检验仪器与设备的灵敏度不够或操作人员的疏忽而漏检等),有些设备在服役过程中因各种原因会产生缺陷,有些设备原来未发现或“质量控制标准”允许的缺陷在使用过程中产生扩展而达到或超过标准允许的尺寸,因此导致这些在役承压设备不符合质量控制标准。如对在役承压设备仍然以质量控制标准来进行检验与限制,那么将会有很多承压设备因不能满足标准的要求而需要翻修或更换。但这些承压设备实际上还能够满足服役条件的使用要求。为了在保证安全的前提条件下,能充分发挥承压设备的能力,避免过度的返修与更换,以提高经济效益,为此提出了“合乎使用”的准则。

“合乎使用”的准则是以保证安全生产为前提、以合乎使用为目的的评判准则。它是根据承压设备的结构、材料特性、操作条件以及缺陷性质与大小为依据,根据断裂力学的原理来进行评判的。近年来,随着断裂力学的兴起与发展,“合乎使用”准则的评判方法也得到迅速的发展。

我国 20 世纪 70 年代起就开展的断裂力学的工程应用研究,于 1984 年制定了 CVDA-84《压力容器的缺陷评定》,这一规程为我国在役压力容器的安全评定发挥了巨大的作用;随着国际上“合乎使用”准则研究的深入,也推动了我国这一领域的研究,在 20 世纪 90 年代我国“八五”国家重点科技攻关计划《在役锅炉压力容器安全评估与爆炸预防技术研究》实施所取得成果的基础上,于 1995 年编写了“在役含缺陷压力容器安全评定规程”(SAPV95),该规程是国内几十个单位历时 5 年的共同研究的成果汇集,是在严谨的理论分析、大量试验研究和十多年实际安全评定工作经验总结的基础上编写而成的,在编写中积极消化与吸收国际最新的科研成果,跟踪并等效采用同类型的国际规范,力求使规程具有科学性、先进性和实用性。规程采用了分级(三级)评定的思路,它既保持了 CVDA-84(采用 COD 设计曲线)的简单评定方法(筛选评定),又与世界先进合乎使用准则接轨,采用了双判据失效评定图(采用通用失效评定图)的技术(常规评定)和 J 积分理论的 $J-R$ 阻力曲线(采用美国 EPRI 工程优化评定方法)评价裂纹失稳扩展的全过程(精细评定)。它既反映了当时我国压力容器安全评定技术已接近了国际先进水平,也解决了实际生产中遇到的大量在役压力容器存在超标缺陷的问题。该规程得到了普遍的应用。经近十年的使用,又在此规程的基础上,结合我国的实际情况与“九五”国家重点科技攻关计划《在役含缺陷压力管道安全评估关键技术研究》的成果,制定了我国国家标准 GB/T 19624—2004《在用含缺陷压力容器安全评定》。这是首次以国家标准形式颁布的、用于在役压力容器安全评定的法规性文件。

对“合乎使用”准则的应用,在我国《压力容器安全技术监察规程》中也有规定。对大型关键性在用压力容器,经定期检验,发现大量难于修复的超标缺陷。使用单位因生产急需,确需通过缺陷安全评定来判定能否监控使用到下一检验周期或设备更新时,应按照一定的程序和要求办理相应手续。这表明对在役含缺陷的承压设备可以采用以“合乎使用”准则为基础的缺陷安全评定来确定其使用安全性。

第 1 篇 金属材料的脆性断裂力学基础

在工业生产中的大多数承压设备，是采用焊接结构。由于制造设备原材料可能存在缺陷、在制造过程会形成缺陷以及经长期的服役后也会产生缺陷，这些缺陷的存在会对设备的安全运行构成威胁，并且会大大降低设备的使用寿命。为了对含缺陷承压设备进行安全分析，所需的重要理论基础之一是断裂力学。

断裂力学是固体力学的一个分支，是研究有缺陷构件断裂强度和裂纹扩展的一门学科，或者说是研究含裂纹构件的裂纹平衡、扩展和失稳规律，以保障构件安全运行的一门科学。

第 1 章 金属材料与结构的脆性断裂

1.1 裂纹及其对材料与结构强度的影响

压力容器与管道等承压设备常常会存在各种缺陷。母材在冶炼与轧制中可能会产生夹杂、气孔，焊接过程中会产生裂纹、未焊透、未熔合、气孔及夹杂等，机加工时可能引起刻槽与刀痕等。这些缺陷中，裂纹对构件的破坏是最危险的，在断裂力学中，也常把各种缺陷简化为裂纹进行分析。

1.1.1 裂纹的分类

裂纹是一种平面型缺陷，通常是指尖端曲率半径趋近于零的缺陷。裂纹的种类很多，可按不同方法分类。按裂纹几何特性来分，可分为穿透裂纹、表面裂纹和埋藏裂纹。

(1) 穿透裂纹 贯穿材料与结构厚度的裂纹称穿透裂纹[图 1-1(a)]。在工程处理中，也常将裂纹深度为 0.7 倍结构厚度的裂纹作为穿透裂纹考虑，以提高安全性。

(2) 表面裂纹 裂纹位于材料与结构表面，或者裂纹深度与结构厚度相比较小时称为表面裂纹[图 1-1(b)]。在断裂力学中，表面裂纹常被简化为半椭圆形裂纹。

(3) 埋藏裂纹 裂纹位于材料与结构厚度的中部[图 1-1(c)]。断裂力学中，常将埋藏裂纹简化为圆片状或者椭圆片状。

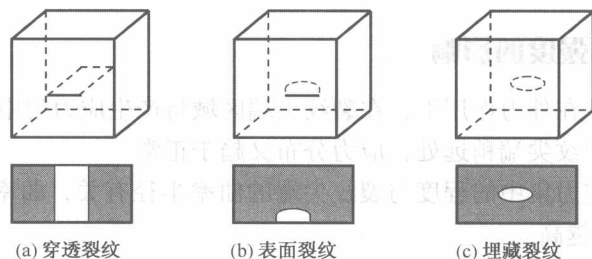


图 1-1 裂纹按几何特征分类