

普通高等院校安全工程专业
“十二五”规划教材

压力容器与管道安全评定

主 编 贾慧灵

副主编 杜鹏飞



国防工业出版社
National Defense Industry Press

普通高等院校安全工程专业“十二五”规划教材

压力容器与管道安全评定

主 编 贾慧灵

副主编 杜鹏飞

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书针对过程工业生产中大量使用的压力容器和压力管道,系统地阐述了有关承压装备安全评定所依据的基本理论和工程分析方法,介绍了近年来国内外安全评定标准及其最新进展。

本书主要包括线弹性断裂理论及工程应用、弹塑性断裂理论及工程分析、压力容器的安全评定、压力管道的安全评价和压力容器及管道的检测。本书注重理论与工程实际相结合,通过大量的实例深入浅出地阐述了安全评定理论及评定方法。

本书不仅可作为过程装备与控制工程专业和安全工程专业大学本科生的教材,也可作为从事过程装备设计、制造、安全分析和安全监查等工程技术人员学习、参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

压力容器与管道安全评定/贾慧灵主编. —北京:国防工业出版社,2014. 1

普通高等院校安全工程专业“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 118 - 09144 - 1

I. ①压... II. ①贾... III. ①压力容器 - 安全评价 - 高等学校 - 教材②压力管道 - 安全评价 - 高等学校 - 教材 IV. ①TH490. 8②U173. 9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 262465 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京市李史山胶印厂

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 13 字数 300 千字

2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 36.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

普通高等院校安全工程专业“十二五”规划教材

编委会名单

(按姓氏笔画排序)

- | | |
|-----|--------------|
| 门玉明 | 长安大学 |
| 王 志 | 沈阳航空航天大学 |
| 王洪德 | 大连交通大学 |
| 尤 飞 | 南京工业大学 |
| 申世飞 | 清华大学 |
| 田 宏 | 沈阳航空航天大学 |
| 司 鹄 | 重庆大学 |
| 伍爱友 | 湖南科技大学 |
| 刘秀玉 | 安徽工业大学 |
| 刘敦文 | 中南大学 |
| 余明高 | 河南理工大学 |
| 陈阮江 | 中南大学 |
| 袁东升 | 河南理工大学 |
| 梁开武 | 重庆科技学院 |
| 景国勋 | 河南理工大学 |
| 蔡 芸 | 中国人民武装警察部队学院 |

前 言

压力容器及压力管道是过程工业生产中广泛使用的设备,由于过程工业涉及的原料及产品多有易燃、易爆、有毒、有腐蚀性的特点,且现代过程工业生产过程多具有高温、高压、深冷等特点,与其他行业相比,过程工业生产的各个环节不安全因素较多,具有事故后果严重,危险性和危害性更大的特点,因此对压力容器及压力管道安全可靠生产的要求更加严格,客观上要求从事过程生产的管理人员、技术人员及操作人员必须掌握或了解基本的安全知识。结合实际需求,过程装备与控制工程专业开出过程设备安全评定技术专业课程,为便于教学,根据近年来的教学实践经验,我们编写了本书。

为了确保压力容器及压力管道的安全性,西方工业化国家早已把它们纳入政府安全监察体系内进行法制化管理。我国自国发[1982]22号《锅炉压力容器安全监察暂行条件》和劳动部[1990]8号《压力容器安全技术监察规程》和劳锅字[1990]3号《压力容器定期检验规程》等一系列相关规程陆续发布实施,压力容器监察与管理逐步进入法制化管理的轨道。为适应“培养21世纪具有更强适应性的高等工程专门人才”的需求,本书内容紧密结合近些年颁布的新法规和新标准,如《特种设备安全监察条例》(2009)、TSG R0004—2009《固定式压力容器安全技术监察规程》和GB/T 19624—2004《在用含缺陷压力容器安全评定》等,循序渐进地介绍过程设备的安全评定理论基础,重点介绍在役过程设备的“合于使用”的最新安全评定方法,以期学生带着最新的安全评定思想离开学校,走上工作岗位时能很快适应并担当起过程设备安全评定和管理的重任。

本书编写过程中,结合有关标准认真研究了国内同类教材的长处和不足,取长补短。有以下几方面的特色:

(1) 压力管道虽是应用很广泛的承压过程装备,但现有的压力容器教程中很少涉及压力管道,学生就业中又往往会接触到压力管道,故本书将压力管道与压力容器并重介绍,让学生对两者均有所了解。

(2) 全书取材上淘汰一些旧的标准、技术和过于复杂的算法,在有限的课时中,保证内容尽量讲得全面的同时,侧重于基本概念和基础理论的深入学习。

(3) 重视理论与工程实际的结合,不仅体现在内容的取材上,同时体现在大量例题和习题的选取上,尽量选取与工程实际相结合的题目,真正做到“学用结合、学以致用”。

本书第1章由杜鹏飞编写,第2章~第5章由贾慧灵编写,第6章由杜鹏飞编写。全书由贾慧灵统稿。本书获内蒙古科技大学教材建设项目资助。

由于过程设备安全技术涉及面很广,作者的经历与水平有限,取材上的疏漏和编写上的不妥之处在所难免,敬请读者提出宝贵意见。

编者

2013年12月

V

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 压力容器与管道在工业生产中的应用	1
1.2 压力容器与压力管道的特点	3
1.3 压力容器与管道的安全问题	4
1.4 断裂理论的产生与发展	6
1.5 压力容器及管道的质量控制标准与合于使用评定标准	8
1.6 压力容器及管道的无损检测技术	9
习题	11
第 2 章 线弹性断裂理论及工程应用	12
2.1 裂纹类型及其扩展型式	12
2.2 能量释放率理论	14
2.3 裂纹尖端的应力场	16
2.3.1 无限大平板中的 I 型穿透裂纹尖端附近的应力场	16
2.3.2 无限大平板中 II 型穿透裂纹尖端附近的应力场	16
2.3.3 无限大平板中 III 型穿透裂纹尖端附近的应力场	17
2.4 应力强度因子及其断裂判据	17
2.4.1 应力强度因子	17
2.4.2 应力强度因子断裂判据	19
2.4.3 应力强度因子求解方法	19
2.4.4 其他带穿透裂纹构件的 K_I 计算公式	21
2.4.5 非穿透裂纹的 K_I 计算公式	22
2.5 塑性区修正与线弹性断裂理论的适用范围	24
2.5.1 塑性区的形状和尺寸	24
2.5.2 应力强度因子的塑性区修正方法	28
2.5.3 线弹性断裂理论的适用范围	30
2.6 压力容器裂纹的应力强度因子 K_I 的计算	32
2.7 K 判据的工程应用与实例	33

习题	35
第3章 弹塑性断裂理论及工程分析	37
3.1 概述	37
3.2 COD 理论	38
3.2.1 COD 定义	38
3.2.2 COD 判据	39
3.2.3 D-M 模型及其 COD 公式	40
3.2.4 全面屈服条件下的 COD 公式	47
3.3 J 积分理论	49
3.3.1 J 积分的定义及其守恒性	49
3.3.2 J 积分与 G_I 、 K_I 和 COD 的关系	52
3.3.3 两种典型弹塑性断裂问题的 J 积分	53
3.4 弹塑性断裂分析的工程方法	56
3.4.1 COD 设计曲线	56
3.4.2 弹塑性 J 积分的工程估算方法	59
3.4.3 失效评定图技术	60
3.4.4 裂纹驱动力图	64
习题	65
第4章 压力容器的安全评定	67
4.1 概述	67
4.2 GB/T 19624 简介	68
4.3 断裂与塑性失效评定	68
4.3.1 评定方法	68
4.3.2 缺陷的表征	69
4.3.3 平面缺陷评定所需应力的分类及确定	74
4.3.4 材料性能数据的确定原则	76
4.3.5 平面缺陷的简化评定	76
4.3.6 平面缺陷的常规评定	79
4.3.7 凹坑缺陷的安全评定	82
4.3.8 气孔和夹渣缺陷的安全评定	83
4.4 疲劳评定	84
4.4.1 平面缺陷的疲劳评定	84
4.4.2 体积型焊接缺陷的疲劳评定	87

4.5	GB/T 19624 标准的特色与创新点	89
4.5.1	GB/T 19624 标准的特色	89
4.5.2	GB/T 19624 标准的主要创新点	92
4.6	在用含缺陷压力容器的疲劳安全评价技术基础	94
4.7	世界各国缺陷评定规范的最新进展	96
4.7.1	欧洲工业结构完整性评定方法 SINTAP	97
4.7.2	英国含缺陷结构完整性评定标准(R6)	100
4.7.3	BS 7910:1999(PD6493 的修订版)	103
4.7.4	美国石油学会 API 579:2000 合于使用推荐实施规程简介	104
	习题	106
第5章	压力管道的安全评价	108
5.1	压力管道安全分析的基本方法	108
5.1.1	压力管道强度分析	109
5.1.2	压力管道的振动分析简介	127
5.1.3	压力管道的腐蚀与防护	128
5.2	长输管道的安全评价方法简介	128
5.2.1	进行长输管道安全评价的目的	128
5.2.2	长输管道的安全评价	129
5.2.3	长输管道安全评价工作程序	131
5.2.4	长输管道安全评价范围的确定	134
5.2.5	长输管道安全评价单元的划分	134
5.2.6	安全评价方法的选择	134
5.3	压力管道的安装及安全评价	135
5.3.1	管道安装的特点与方法	135
5.3.2	压力管道焊接工艺评价	136
5.3.3	压力管道的焊接缺陷及防止措施	137
5.3.4	压力管道的事故报告与事故处理	140
5.3.5	压力管道修理改选后的检验	141
5.4	压力管道缺陷的安全评价	142
5.4.1	管道缺陷安全评价的一般准则	142
5.4.2	压力管道腐蚀减薄后的评价	142
5.4.3	中、低压管道环焊缝单面未焊透缺陷的安全评价	144
5.4.4	压力管道材料劣化的评价示例	145
5.4.5	ASME XI IWB-3650 压力管道缺陷评定规范介绍	148

习题 152

第 6 章 压力容器及管道的检测 153

6.1 宏观检测 153

6.2 理化检测..... 155

6.3 射线检测及缺陷等级评定..... 155

6.3.1 X 射线、 γ 射线的产生和性质 155

6.3.2 射线检测的原理和准备 156

6.3.3 焊缝射线透照缺陷等级评定 163

6.3.4 射线防护 165

6.4 超声波检测及缺陷等级评定..... 166

6.4.1 超声波检测的基础知识 166

6.4.2 超声波检测缺陷 176

6.4.3 超声检测焊接接头的缺陷等级评定 183

6.5 表面检测及缺陷等级评定..... 184

6.5.1 磁粉检测 184

6.5.2 渗透检测 191

习题 194

参考文献 196

第 1 章 概 论

1.1 压力容器与管道在工业生产中的应用

压力容器与管道是石油化工工业生产过程中不可缺少的设备。随着生产的发展,它们的使用日益广泛,数量不断增加。

为了适应石化工业发展的需要,压力容器逐渐趋向大型化和结构复杂化,同时,为了改善压力容器的性能,适应生产的发展,在压力容器的设计制造中不断地采用新材料、新工艺和新技术,这样,压力容器的安全可靠性问题就显得更加突出,引起了人们的密切关注。

同样,压力管道也是一种特种设备,其分布极广,凡是输送流体介质的场合一般都需要使用压力管道。据不完全统计,国内已形成了东北、华东华北、西北三大原油输送管道网,管道总长已超过 9000km,输送的原油已达总产量的 89.31%。近年来建设的四川、西北、华北以及“西气东输”等天然气长输网的管道总长也已超过 9000km,输送的天然气占总产量的 60.97%。成品油长输管道的数量相对较少,已建成的管道也有近 4000km,如 1998 年 12 月开工建设的兰州经成都至重庆的成品油管道,全长 1251km,该管道已于 2002 年 9 月投入使用。随着国民经济的快速发展,成品油的管道输送必将迎来一个快速发展的时期。由此可见,石油天然气的长距离输送、城镇燃气和公用动力蒸汽的输送、各种石油化工生产装置等都使用了大量的管道。压力管道在生产中的广泛使用可能引起的燃爆或中毒的危险性也日益增加。

压力容器与管道的安全问题之所以特别重要,主要是因为它们既是工业生产中广泛使用的特种设备,又是容易发生事故且往往是灾难性事故的特殊设备。为了确保它们的安全使用,许多经济发达国家制定了一系列的制度——法律、法规、标准和规定对这些设备进行安全管理和监督、监察,同时还制定了一整套的执行监督机制。近年来,随着我国经济的不断发展,不断增多的压力容器与管道的使用,安全问题也受到了日益的关注。我国在安全管理和监督、监察制度方面也取得了明显的进展,一方面参考了国外经济发达国家所实行的行之有效的措施;另一方面又根据我国的实际情况,制定了一系列的法律、法规 and 规定,指导全国压力容器和管道生产与使用的安全管理与监察工作,争取实现规范化管理。

1. 压力容器在工业生产中的应用

压力容器是一种能承受压力载荷的密闭容器。它的主要作用是储存、运输有压力的气体、液体或液化气体,或者是为这些流体的传热、传质反应提供一个密闭的空间。

压力容器具有各种各样的结构和形状,无论是容积只有几升的瓶、罐,到上万立方米的球形容器或上百米高的塔式容器,都在工业生产领域中得到了广泛的应用。例如,工业上使用相当普遍的压缩空气,其主要来源为空气压缩机及其附属设备,此外,如气体冷却

器、油水分离器、储气罐等,这些都属于压力容器的范畴。工业生产中常使用的各种气体盛装容器或输送管道,往往都要求增压后再储存或输送,如液化气储罐、槽(罐)车等也都是压力容器;制冷装置中的多数设备,如蒸发器、冷凝器、液体冷却剂储罐等也都属于压力容器的范畴。

另外,某些工业产品的制备往往需要在较高的温度下进行,在生产工艺中常需要加热物料,其最常使用的热源为有压力的水蒸气。用这种水蒸气来加热的设备,如蒸汽夹套、蒸汽列管加热器,或是直接加热式设备,如蒸汽锅炉、蒸汽消毒器等也是一种压力容器。

化工生产中所使用的反应装置大部分都是压力容器。为了提高设备的生产效率,许多化学反应需要在加压的条件下进行,或者需要在较高的压力下加速其反应,如用氢和氮来合成氨,就需要在 $10 \sim 100\text{MPa}$ 下进行,而且许多参与这些反应的有压力的介质往往又都需要先经过精制、加热或冷却等工序,这些工艺过程所使用的设备必须是压力容器。随着石油化学工业的迅速发展,高分子聚合物的生产不断扩大,大部分聚合反应也需要在较高的压力下进行。如用乙烯气体聚合生成聚乙烯,用低压法生产需在 $3.5 \sim 10\text{MPa}$ 的压力下进行,用高压法生产则需要 $100 \sim 250\text{MPa}$ 。因此,制取高分子聚合物的设备中不仅所使用的聚合釜是压力容器,这些单体分子在聚合反应前的一系列工艺生产过程中(储存、精制、加热等)也需要压力容器。

由此可见,压力容器在工业生产中的应用极为普遍,尤其是在石油化工和化学工业中,几乎每一个工艺过程都离不开压力容器,而且还常常是主要的生产设备。

2. 压力管道在工业生产中的应用

压力管道在工业生产中的应用极为广泛,化工、石油、制药、能源、航空、环保、钢铁、公用工程等各类工业企业都不同程度地需要使用压力管道。

通常,管道根据不同的特性有各种不同的分类方法。根据管道承受内压的不同可以分为真空管道、中低压管道、高压管道、超高压管道;根据输送介质的不同可以分为燃气管道、蒸汽管道、输油管道、工艺管道等,而工艺管道又以所输送介质的名称命名为各种管道;根据管道使用材料的不同可以分为碳钢管道、低合金钢管道、不锈钢管道、非铁金属管道(如铜管道、铝管道等)、复合材料管道(如金属复合管道、非金属复合管道和金属与非金属复合管道等)和非金属管道。根据《特种设备安全监察条例》,压力管道是指利用一定的压力,用于输送气体或者液体的管状设备,其范围规定为最高工作压力大于或等于 0.1MPa (表压)的气体、液化气体、蒸气介质或可燃、易爆、有毒、有腐蚀性、最高工作温度高于或等于标准沸点的液体介质,且公称直径大于 25mm 的管道。按照《压力管道安全管理与监察规定》的要求,从压力管道的安全管理和监察角度出发,将压力管道分为工业管道、公用管道(包括燃气管道和蒸汽管道)和长输管道。

(1) 工业管道是指工业企业用于输送工艺介质的工艺管道、公用工程管道和其他辅助管道。工业管道主要集中在石化、炼油、冶金、化工、电力等行业。

(2) 公用管道是指城镇范围内用于公用或民用的燃气管道和热力管道。公用管道主要集中在城镇建设等公用事业行业。

(3) 长输管道是指产地、储存库、使用单位之间的用于运输商品介质的管道。长输管道根据所输送介质的不同可以分为输油管道、输气管道、输送浆体管道和输水管道等。其中,输油管道又分为原油输送管道和成品油输送管道。

迄今为止,国内外已研究和开发的管道运输系统有水力管道、风动管道、集装胶囊管道和旅客运输管道等。除固体浆料输送管道(如煤浆输送管道)已在美国等地应用、国内也正准备建设外,目前应用最广泛的是输油(原油、成品油)管道及输气管道。

由此可见,使用压力容器制备产品过程中,其原材料的输送和工艺流程中物料的运动与传输,都离不开压力管道。此外,在油、气输送管线中,管道是工程的主体。

1.2 压力容器与压力管道的特点

1. 压力容器的特点

1) 压力容器的定义

压力容器,或称为受压容器,从广义上来说,应该包括所有承受流体压力的密闭容器。但在工业生产中承载压力的容器很多,其中只有一部分相对来说比较容易发生事故,而且事故的危害性较大。为此,许多国家就把这样的容器作为一种特殊的设备由专门的机构进行监督,并按规定的技术法规进行设计、制造和使用管理。习惯上所说的压力容器,就是指这一类作为特殊设备的容器。一般规定中并不把盛装液体介质的容器列入特殊设备的范畴,但必须注意的是,这种液体是指在常温下的液体,而不包括工作温度高于标准沸点的饱和液体和沸点低于常温的液化气体。

关于压力容器的界限,目前各国都有规定,尽管其规定可能有所不同,但是基本原则是一致的,是指那些比较容易出事故,且事故的危害性较大的那些设备。一般来说,压力容器发生事故的可能性和危害程度与所盛装的工作介质、工作压力和容积有关。

工作介质指的是容器所盛装的或在容器中参与反应的物质。压力容器爆破时所释放的能量大小首先与其工作介质的物性、状态有关。从物质的物性状态考虑,压力容器的工作介质应该包括压缩气体、水蒸气、液化气体和工作温度高于其标准沸点的饱和液体。除此之外,还应考虑容器的工作压力和容积。工作压力和容积范围的划分,一般都是人为地加以规定,而不像工作介质那样有一个明显的界限,对这种范围,一般都规定了一个下限值。

目前,纳入我国监察范围的压力容器应是同时具备下列三个条件的容器:

(1) 最高工作压力不大于或等于 0.1MPa (表压,不含液体静压力)。

(2) 内径(非圆形截面则表示的是其断面的最大尺寸) $D \geq 0.5\text{m}$,且容积 $V \geq 0.025\text{m}^3$ 。

(3) 介质为气体、液化气体或最高工作温度大于或等于标准沸点的液体。

2) 压力容器的特点

压力容器一般多承受静止而比较稳定的载荷,不像旋转机械那样容易因过度磨损而失效,也不像高速发动机那样因承受高周循环载荷而容易发生疲劳破坏。其工作特点如下:

(1) 使用条件比较苛刻。工作中不但承受大小不同的压力载荷(有时还是脉动循环载荷),而且工作介质多为有毒、易燃、易爆物质。

(2) 容易超负荷。容器内压力常会因操作失误或发生异常反应而迅速升高,而且往往在发现时,容器已经破裂。

(3) 局部应力比较复杂。在容器开口处和结构不连续处,常会因局部应力或交变载荷而引起疲劳破裂。

(4) 容器内可能隐藏有严重缺陷。焊接或锻造的容器常会在制造中留下微小裂纹等严重缺陷,在工作中,一定条件下这些缺陷会导致容器突然破裂。

2. 压力管道的特点

1) 压力管道的定义

本书所指的压力管道是1996年4月国家劳动部颁布的《压力管道安全管理与监察规定》所限定范围内的管道,是指生产、生活中使用的可能引起燃爆或中毒等危险性较大的特种设备,并不是简单意义上的受压管道。蒸汽管道,有毒、易燃、易爆介质的管道,煤气、天然气管道,石油、天然气长输管道,管内介质工作压力大于或等于0.1 MPa的管道等,都属于压力管道。若管内为容易引起燃烧、爆炸和强腐蚀介质的物质,即使在常压下,仍规定将这些管道作为压力管道管理。而输送无毒、不可燃、无腐蚀性介质的管道,如压缩空气等,只有当压力大于1.6 MPa时,才把这些管道列入压力管道的管理范畴。

2) 压力管道的特点

压力管道的特点基本上与压力容器相似,不同之处在于压力管道输送的介质一般都是流动的液体、气体或固体,因而存在一些与压力容器不同的特点:

(1) 工作环境常为高温、高压,这些介质往往为有毒、易燃、易爆且常具有腐蚀性,因此对系统的完整性有特别高的要求。

(2) 管道常温安装,高温运行,金属材料受热膨胀。若设计不当,可能在某些位置产生较大的应力和弯矩,影响管道或与管道连接设备的正常运行。

(3) 运行过程中管道出现振动是一种常见的现象。严重的振动会加速裂纹扩展,威胁系统的安全运行。

(4) 管道设计时既需要考虑满足工艺要求,又需要考虑具有一定的柔性,以提高其吸收金属热膨胀变形的能力和抵抗振动的能力。

(5) 施工安装一般都在生产现场进行,环境和工作条件较差,温度和湿度难以控制。由于通常需要在高空作业,而管道的位置既不能随意移动,也无法旋转,所以,给安装作业带来了较大的困难。

(6) 管道输送的介质常具有腐蚀性,因而必须针对腐蚀问题采取必要的防腐蚀措施。

(7) 需要严格控制管道组件和附件的质量,否则可能出现严重事故隐患。

总之,压力容器和压力管道都是具有其自身特点的一类特殊设备,对其安全问题,需要严密关注和认真地分析研究,采取必要的应对措施,防止由此产生不良的后果或严重的事故。

1.3 压力容器与管道的安全问题

1. 压力容器的安全问题

压力容器所盛装的介质多为压缩气体或饱和液体。因此容器一旦破裂,瞬间介质卸压膨胀所释放出的能量极大,不但使容器本身遭到破坏,还会产生强大的冲击波摧毁周围设备和建筑物。往往还会诱发一连串的恶性事故,给国民经济造成重大损失。如1979年9月7日,温州市某厂,因钢瓶灌装前未作认真检查,将1只灌入氯化石蜡的钢瓶充灌液

氯,引起强烈的化学反应产生高温、高压而猛烈爆炸,其碎片又击穿 5t 液氯计量罐 1 只,并引爆了已灌氯气的钢瓶 4 只。爆炸中心 0.5m 厚的水泥地坪被炸成直径 6m、深近 2m 的大坑,360m² 钢筋混凝土结构的灌装车间全部炸毁。大量的氯气扩散持续了 2h 40min,扩散总量达 11t,污染范围 7.35 km²,死亡 59 人,中毒住院 779 人。此外,眼膜充血、呕吐咳嗽等轻微中毒者不计其数。

鉴于压力容器的破坏会导致十分严重的后果,因此世界各国都非常重视压力容器的安全问题。英国原子能局及联合部技术委员会曾联合对使用年限在 30 年以内,且符合英国压力容器规范的 12700 台压力容器,进行了一次事故实况调查,于 1968 年发表了调查报告。在这 12700 台容器中,有 10 起事故是在使用前进行水压试验时发生的(不包括按工艺规程进行无损探伤发现缺陷后加以修补的产品),有 132 起事故是在 100300 台·运行年(各台容器与运行年数乘积的总和)的使用中发生的。这个统计数字表明,制造中每台发生事故的概率为 0.79‰,使用中每台·运行年发生事故的概率为 1.32‰。对使用中所记载的这 132 起事故,按其破坏起因分类如表 1-1 所列。表 1-1 表明压力容器的破坏事故主要是由于裂纹的存在所致,占总事故的 89.4%。因裂纹引起的事故分类统计情况见表 1-2,可见,因疲劳裂纹和腐蚀裂纹引起的破坏又占了其中 60% 以上。

表 1-1 在役压力容器事故起因统计

事故起因	事故次数	百分率/%
裂 纹	118	89.4
腐蚀(包括应力腐蚀)	2	1.5
使用不当	8	6.0
制造缺陷	3	2.3
蠕 变	1	0.8
总 计	132	100

表 1-2 裂纹事故分类统计

裂纹种类	事故次数	占裂纹事故的百分率/%	占总事故的百分率/%
疲劳裂纹(机械的、热的)	47	39.8	35.6
腐蚀裂纹 (包括应力腐蚀裂纹)	24	20.3	18.2
制造时产生的裂纹	10	8.5	7.6
未确定的裂纹	35	29.7	26.5
不好分类的裂纹	2	1.7	1.5
总 计	118	100	89.4

我国有关组织也做过类似的调查,其统计结果与国外情况基本一致,见表 1-3。

表 1-3 我国在役压力容器事故起因统计

事故起因	事故次数	百分率/%
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

由此可见,解决好含裂纹缺陷压力容器的安全使用问题,对提高安全生产、降低事故率具有重大的现实意义。

2. 压力管道的安全问题

中国石油化工集团公司系统所属企业均为现代化的大型企业,拥有 I、II、III 类管道

6300km 以上。尽管该公司所属各企业的生产设备较为先进,且对安全生产较为重视,但是由于我国目前的科学技术水平较西方发达国家仍相对落后,管件的制造质量、安装质量以及运行管理人员的素质参差不齐,加之检修周期延长,检修项目与检修时间的矛盾突出,因而常导致检修质量存在一些问题,特别表现在焊接质量方面,有的企业焊接缺陷占总缺陷数的 80%,某些单位甚至在检验中发现焊缝合格率仅为 20% ~ 30%。由此可见,在石化系统中加强压力管道安全管理任务也是十分紧迫和繁重的。

城市燃气的输送主要依靠管道,它的安全关系着千家万户。但是我国对城市地下输气管道的管理严重滞后,没有达到有序管理的水平,其中违章占压现象较为严重,增加了地下管道的负荷,容易造成管道损坏,一旦发生泄漏,其后果是相当严重的。例如,1995 年某市因地下煤气管道密封不严,煤气漏入高压电缆沟中,由附近的一个蜂窝煤炉引燃了泄漏的煤气,导致一次爆炸发生,随后由于 10000V 埋地高压电缆突然跳闸,再次引爆电缆沟内的煤气,引起二次大爆炸,并造成多人伤亡,直接经济损失达上百万元,这仅是近年来发生的重大事故之一。因此,预防有关事故的发生值得我们高度重视。目前,随着我国城市建设的迅速发展,地下管网管理不善、管网资料不全、分布混乱的问题,还没有得到有效的改善,存在着一些不安全的因素。

我国的长输管道主要是输油、输气管道、油田集输管道和部分成品油管道。长输管道设有专门的管理系统,设计、施工和技术管理均有一定的质量控制措施和较为先进的检测手段。进入 20 世纪 90 年代以来,有关部门陆续引进了国外的先进监测仪器,对部分管道进行了内检测,有效地控制了腐蚀泄漏事故,并且国务院颁布了《石油天然气管道保护条例》,对保证石油、天然气长输管道的安全起到了一定的作用,但因没有配套完整的实施细则,具体执行中存在一定的困难。例如,某些地方政府及沿途农民存在抵触情绪,仍有一些违章建筑强行施工,多处管道被取方挖砂,造成管道裸露、悬空;公路、水利工程多处与管道交叉;部分管道通过的地带被划入经济开发区。所有这些都对管道的安全构成了威胁,有些地方,甚至被不法分子在管道上打孔盗油、盗气,存在着严重的不安全因素。

目前,压力管道的安全问题已逐步引起了各方面的注意,有关管理部门也已采取了若干措施,并取得了一定的成效。国务院 1996 年颁布的《压力管道安全管理与监察规定》,有力地推动了压力管道安全管理工作。在 2003 年,国务院专门颁布了《特种设备安全监察条例》,将压力容器与管道的管理工作提高到一个新的水平。但是,要真正实现这一目标,还需要做很多工作,首先是需要让更多的人了解有关安全管理的意义,其次是提高相关施工人员和管理人员的技术素质和责任心。同时,要建立、健全一整套行之有效的法律、法规、技术规范和实施细则。

1.4 断裂理论的产生与发展

传统的设计思想是以强度理论为基础的。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,没有空隙或裂缝等缺陷。至于假设与实际材料之间的差别,均放到安全系数中考虑。对处于低温、腐蚀环境中的高强钢焊接构件,传统强度理论设计的构件并不安全。断裂力学则从材料实际存在缺陷或裂纹这一情况出发,在大量试验的基础上,研究带缺陷材料的断裂韧度,进行断裂分析和缺陷评定。

断裂力学思想的出现可追溯到 20 世纪 20 年代。1920 年,Griffith(格里菲斯)在研究飞机窗罩玻璃脆断原因时,首先将强度与裂纹尺寸定量地联系在一起,对玻璃平板进行了大量的试验研究,提出了能量理论思想,建立了脆断理论的基本框架。但由于当时工程中金属材料低应力破坏事故并不突出,人们对断裂问题及他的能量理论思想的重要性还缺乏应有的认识,所以关于断裂问题的研究在很长一段时期内一直停留在科学好奇上,而没有进入工程应用。直到 20 世纪 50 年代前后,世界上发生了多次灾难性的焊接船只断裂事故、压力容器及压力管道的破裂事故及飞机爆炸失事事故,才使得低应力脆断问题在工程界中受到了充分重视。由此,美国和欧洲等工业发达国家相继开展了裂纹体断裂问题的研究,从而大大推进了断裂力学的发展。

但是,断裂力学公认为一门学科是从 1948 年开始的,这一年 Irwin(欧文)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,所以断裂力学初期的研究对象主要是脆断问题。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(Stress Intensity Factor)的概念,并创立了测量材料断裂韧性的试验技术。这样,作为断裂力学的最初分支——线弹性断裂力学便开始建立起来。20 世纪 60 年代以后,线弹性断裂理论开始广泛应用于各个工程领域,并逐步成为结构设计、选材与检验的主要依据之一。早期的美国 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制定的。

线弹性断裂力学是建立在线弹性力学基础上的,它只适用于脆性材料或塑性较差的材料,如高强度钢或在低温下使用的中、低强度钢。而对于塑性较好的材料,如工程中大量使用的中、低强度钢等,一般并不适用。因为,这些材料在裂纹发生扩展之前,裂纹尖端将出现一个较大的塑性区,此塑性区的尺寸将接近裂纹本身的尺寸,有时甚至达到整体屈服。对于这种大范围屈服或全面屈服断裂问题,线弹性断裂力学的结论已不再成立。为了研究塑性材料的断裂问题,又产生了断裂力学的另一分支——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问题,常因过于复杂而难以得到简单实用的结果,故一般多采用偏于保守的、便于工程应用的近似方法。目前,用于弹塑性断裂研究的较为成熟的方法是 COD(Crack Opening Displacement)法和 J 积分法。

COD 法,习惯上又称为 CTOD(Crack Tip Opening Displacement),是由 Wells(威尔斯)于 1963 年首先提出的,后来发展成为半经验的“COD 设计曲线”,在工程中得到了广泛应用。从 20 世纪 70 年代末到 80 年代初,国际上以 COD 设计曲线为理论基础的压力容器缺陷评定标准占了统治地位。

J 积分的概念是由 Rice(赖斯)于 1968 年首先提出的。 J 积分是一个定义明确、理论严密的应力应变参量,其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的特性,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, J 积分理论比 COD 理论更为合理。但由于 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。1981 年,美国电力研究院(EPRI)在对 J 积分进行了大量的研究基础上,提出了弹塑性断裂分析的工程方法,并

提供了各种含裂纹结构 J 积分的全塑性解的塑性断裂手册,解决了 J 积分的工程计算问题,从而大大推动了 J 积分的工程应用。20 世纪 80 年代中期以后,国际上的压力容器缺陷评定标准纷纷以 J 积分理论进行修订。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了 COD 理论而占有了统治地位。

由于断裂力学的发展是与生产实际密切结合的,因而被广泛地应用于工程实践。至今在许多领域中解决了大量实际问题。特别是在解决抗断设计、合理选材、预测构件疲劳寿命、制定合理的质量验收标准和防止断裂事故方面得到了广泛运用,补充了传统强度理论的不足,使断裂力学分析成为保证构件安全的一个重要依据。

1.5 压力容器及管道的质量控制标准与合于使用评定标准

实际上,几乎所有机械部件都不可避免存在着不同程度的缺陷。设备的大型化、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。而且在使用过程中,还会因载荷、介质等各种因素的影响,萌生出新的缺陷。

压力容器及压力管道在制造和使用中发现的缺陷是否允许继续存在,目前有两类标准可作为判别依据:一类是以质量控制为基础的标准,简称“质量控制标准”;另一类是以符合使用要求为目的的标准,又称“合于使用标准”。

“质量控制标准”是以获得优质产品为目的而制定的,它以相应的强度条件为前提,把所有缺陷都看成是对容器强度的削弱和安全的隐患,不考虑容器具体使用工况的差异,单从制造的质量保证出发,要求质量保持在较高的水平上。如美国的 ASME 锅炉及压力容器规范、GB 150《压力容器》及国家、行业、企业制定的有关压力容器设计、选材、制造、检验等标准,都属于这一类标准。“质量控制标准”的产生对提高压力容器质量、保证安全生产起了重大作用。然而也应当看到,这种标准在一定程度上依赖于积累的经验,其中不少规定是按现有焊接及无损检验所能达到的水平制定的,没有考虑缺陷的存在对容器可靠性的影响,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大的部位(如接管区)因不便探伤却不加限制,而对危害性较小的部位有时反而要求过严,以致带来了大量的不必要返修,造成经济上的巨大浪费。根据英国对质量较好的压力容器主焊缝所作的统计,在所有作过返修的缺陷中,夹渣占 84%,气孔占 3%,其他为平面缺陷。从使用可靠性来看,非平面缺陷通常危害是较小的。因此对无害缺陷的不必要返修不仅给经济上造成巨大浪费,而且修复不当还可能会产生新的更为有害的缺陷,给安全带来严重的后果。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,同一部位在高拘束度下返修,产生了一条肉眼可见的横跨整个焊缝的大裂纹。这种例子很多,教训也很深刻,所以返修不是处理缺陷的最好办法。

实践证明,并非所有的缺陷都会导致容器破裂失效。重要的问题在于,能否正确地对缺陷做出评定,确定出哪些缺陷是有害的,哪些缺陷并不妨碍压力容器的安全使用。断裂力学的产生和发展为合理地解决这个问题提供了科学依据。

“合于使用标准”与“质量控制标准”不同,它以断裂力学为基础,以合于使用为原则,