

王志文 徐宏 关凯书 张莉 编著

HUAGONG SHEBEI SHIXIAO  
YUANLI YU ANLI FENXI

# 化工设备失效 原理与案例分析



华东理工大学出版社  
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

# 化工设备失效原理与 案例分析

王志文 徐 宏 关凯书 张 莉 编著

### 图书在版编目(CIP)数据

化工设备失效原理与案例分析/王志文等编著. —  
上海:华东理工大学出版社,2010.11  
ISBN 978-7-5628-2688-0

I. ①化… II. ①王… III. ①化工设备-失效机  
理-研究生-教材 IV. ①TQ05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 196141 号

## 化工设备失效原理与案例分析

.....

编 著 / 王志文 徐 宏 关凯书 张 莉  
责任编辑 / 周 萍  
责任校对 / 张 波  
出版发行 / 华东理工大学出版社  
社 址:上海市梅陇路 130 号,200237  
电 话:(021)64250306(营销部)  
传 真:(021)64252707  
网 址:press.ecust.edu.cn  
印 刷 / 常熟华顺印刷有限公司  
开 本 / 787 mm×1092 mm 1/16  
印 张 / 28  
字 数 / 710 千字  
版 次 / 2010 年 12 月第 1 版  
印 次 / 2010 年 12 月第 1 次  
印 数 / 1—1500 册  
书 号 / ISBN 978-7-5628-2688-0/TQ·156  
定 价 / 88.00 元

(本书如有印装质量问题,请到出版社营销部调换。)

# 序

化工过程设备是石油、化工、冶金、火电、核电、食品等工业处理高温、高压、易燃、易爆、腐蚀、有毒介质生产过程的特种设备，一旦失效，往往并发火灾、中毒等灾难事故，人民生命财产蒙受巨大损失，影响社会安定，防止设备失效是过程机械工作者不可推卸的责任。现代化工过程设备技术就是在与化工设备失效斗争中发展起来的，失败是成功之母，通过失效分析找到失效原因、作为前车之鉴，不仅可以避免再次发生相同失效事故，往往推动了新的设备设计技术和结构完整性评定新技术的涌现或完善，促进了新材料、新结构或新制造方法的诞生或发展。

化工过程设备发生失效的原因多种多样，而且随着设备的大型化和运行条件的更为苛刻，应用材料的种类也越来越多，失效形式错综复杂，给设备失效分析及预防带来了新的挑战。传统的失效分析技术主要依托于材料学科，化工过程设备的失效分析不仅包括金属材料失效分析，还具有它自身的特点。化工过程设备大多是焊接大型承压设备、高压压缩气体贮有大量能量，万一发生爆炸，后果严重，如果是可燃、易爆、有毒介质，会引起二次爆炸、火灾、中毒等灾难事故，因而压力容器与管道的爆破与强度失效是化工设备失效的首要问题，超压下压力容器的韧性爆破、脆性破坏的解理断裂、拘束度过大引起塑性降低的局部失效、交变载荷下的疲劳失效、含缺陷容器的断裂分析都是化工设备失效分析所需的特有技术。如果考虑到设备在高温或低温下工作，在使用过程中的材质脆化，问题将更为复杂。化工设备的材料的种类也特别的多，内贮介质组成各异，材料与介质的相互作用引起的材料损伤更是千变万化，不同材料在不同介质和温度条件下会引起各种腐蚀损伤，如应力腐蚀开裂、氢致开裂、应力诱导的氢致开裂、氢鼓泡的氢损伤、高温的氢腐蚀、氢脆、应变时效脆化、回火脆化……，条件各异，因而从事化工设备失效分析所需知识面极广，必须有跨学科视野，不同学科专家的协同配合，在实践中不断学习总结经验，提高失效分析结论的可靠性。

近年来我国已形成一批从事化工过程机械失效分析科学研究与工程实践的技术队伍，在解决化工、石化、电力等过程工业中设备失效分析与预防方面已发挥了重要作用。有的高校在相关专业的工程硕士培养中业已增设了失效分析与预防的学位课程，有的还将其列为

工学硕士及博士生的选修课程,成为高级工程技术人才实现全面工程教育的重要措施。本书作为此学位课程或选修课程的教材,获得了华东理工大学研究生院工程硕士课程建设的立项与资助,也得到了华东理工大学出版社优秀教材出版资金的支持。

本书的作者们多年来与化工、石化、冶金、电力企业合作,理论联系实际,完成了大量化工设备失效分析的任务,工程实践中积累了上百个失效分析案例,为撰写本书奠定了很好的基础。本书编写中十分重视工程案例,各章编入的典型案例绝大多数均是作者实践的成果。除列出测试数据和各种图像外,还阐释了案例的分析思路,问题的实质和得到科学结论的过程。虽然国内外失效分析的出版物种类繁多,但分析化工设备失效原理及工程案例的书籍却较为鲜见。本书是一本值得一读的化工设备失效理论与实践紧密结合的优秀读物。本书不仅可满足动力工程、机械工程及安全工程类工程硕士或工学硕士的教学要求,同时也可供过程工业企业广大设备管理人员及特种设备检验、监察、管理人员阅读参考。

华东理工大学机械与动力工程学院教授

李培宁

# 前 言

化学工业在国外亦称为过程工业。过程(Process)是指化工生产中的单元操作过程,如流体输送过程;各种传热过程;各种传质过程;非均相物质的分离过程;合成、分解、聚合、燃烧等反应过程或生化反应过程;物料储藏或运输过程等等。化工、石油化工、医药、轻工、冶金、火电乃至核电生产均是由这些单元操作过程组合而成,因而又都可称为流程工业或过程工业。进行这些单元操作的机械设备便称为过程设备(装备)。过程设备的服役条件(工况)具有特殊性,如承受压力载荷、承受温度载荷、承受介质的腐蚀或介质还具有毒性、可燃性等。大多数过程设备都具有承受压力载荷的外壳,并且可拆卸连接处应能保证密封性,因此过程设备大多数又属压力容器及管道。种种原因导致过程设备各种机理的失效,直至最终破坏发生事故时可能都会以爆炸或介质泄漏的形式表现出来,从而由爆炸(包括器外的二次爆炸)冲击波、燃烧、火灾、毒性伤害而导致人员伤亡、财产损失及环境损害,后果会很严重。这是过程设备失效及事故与其他机械失效的重要差异。

过程设备绝大部分是由各种金属材料制成的,失效分析基本上依赖于用金属材料的失效机理与断口特征来进行鉴别和分析,传统上由金属材料专业专家们承担,其学科也属于材料学科。近年来我国过程工业大量发展,过程设备迅速增多,失效事故也频频发生。由于过程设备的破坏形式具有特殊性,过程设备失效分析工作除材料专业的专家外往往需要熟悉化工单元操作和懂得承压设备技术的学者专家参与。而且生产企业及国家相关行政监督监察部门加大力度管理安全,愈来愈重视失效分析工作。事故分析中除进行行政性的事故分析与处理之外,还要求有专家组专门进行技术上的失效分析工作支持。这大大促进了我国失效分析工作的发展,并培养锻炼了大批失效分析的技术队伍。

从教育培训角度看,生产企业和国家生产安全技术监督部门均迫切需要培养懂得失效分析工作的技术干部和行政官员,因此需要加强这方面的培训。大学中动力工程、安全工程类专业的工程硕士很多学校都专门设置了失效分析类的学位课程。华东理工大学研究生院十分重视工程硕士学位课程的教材建设,华东理工大学出版社设立工程硕士教材建设专项奖励基金,本书是在这一背景下获得立项与资助的,并要求加强工程案例的编写。

本书的第1章是失效分析的概论,是原本不具备金属材料专业基础的人员了解失效分析

工作的基础。第2章是焊接缺陷和焊缝断裂失效的分析方法概述。第3章是承压设备超载发生韧性爆炸失效的分析,是本书的一大重点,也是特色之一。第4章是脆性断裂失效分析和化工设备中常见的各种脆断问题。第5章是疲劳失效和承压设备的疲劳失效特点。第6章和第7章是腐蚀失效尤其是现阶段极为多见的应力腐蚀开裂失效分析。第8章为高温化工设备中常见的蠕变失效及高温下材料组织劣化脆化问题分析。除第1章外每章都精选了4~8个典型案例,案例在编写中突出了做失效分析的思路和方法,以及得出结论的充足依据。本书努力追求写出过程设备失效分析的特色和案例中的分析求解思路。

本书的第1、3、4章及第5章的正文部分由王志文教授执笔;第2章由张莉副研究员执笔;第5章的案例及第6、7章由关凯书教授执笔;第8章由徐宏教授执笔。全书由王志文教授统稿。各章的案例大部分是本书编著者亲历的失效分析工程案例。本书的写作一定会存在不少问题,甚至对一些案例的分析会存在争议,欢迎广大读者热忱给予指点。

编著者

2010年7月

# 目 录

<b>第 1 章 失效分析概论</b> .....	1
1.1 失效与失效形式的分类 .....	1
1.1.1 失效的概念 .....	1
1.1.2 失效的危害性 .....	2
1.1.3 常见失效形式的分类 .....	3
1.2 金属材料的结晶结构、变形和断裂 .....	5
1.2.1 金属材料的结晶结构 .....	5
1.2.2 晶格及晶面的表征 .....	6
1.2.3 实际金属晶体结构中的缺陷 .....	7
1.2.4 金属材料变形的本质 .....	8
1.2.5 金属材料的断裂 .....	9
1.3 金属材料的断裂机制 .....	11
1.3.1 微孔聚集型断裂 .....	11
1.3.2 解理断裂 .....	17
1.3.3 金属材料的疲劳断裂 .....	24
1.3.4 蠕变损伤与断裂 .....	28
1.3.5 腐蚀失效与破坏 .....	36
1.4 失效分析中常用的分析仪器 .....	50
1.4.1 光学显微镜(OM) .....	50
1.4.2 电子显微镜(EM) .....	51
1.4.3 成分分析仪器 .....	53
1.5 失效分析工作的内容 .....	55
1.5.1 失效分析中的诊断技术概述 .....	56
1.5.2 失效现场处理和调查 .....	57
1.5.3 失效状况的整体外观检查及取证 .....	58
1.5.4 材料的检验与鉴定 .....	58
1.5.5 断口形貌的检验与鉴定 .....	58
1.5.6 失效分析中的验证性试验与计算分析 .....	60
1.5.7 失效分析中的综合分析 .....	62
1.5.8 失效分析中的综合诊断方法 .....	64
参考文献 .....	67



<b>第 2 章 焊接缺陷及裂纹分析</b> .....	70
2.1 焊接缺陷产生的原因及防治 .....	70
2.1.1 焊缝内部缺陷 .....	70
2.1.2 焊缝外部缺陷 .....	73
2.2 焊接裂纹 .....	75
2.2.1 焊接热裂纹 .....	77
2.2.2 焊接冷裂纹 .....	80
2.2.3 再热裂纹 .....	85
2.2.4 层状撕裂 .....	87
案例 2A 乙烯裂解炉对流段超高压蒸汽过热器炉管焊接裂纹分析 .....	89
案例 2B 液化石油气球罐焊接裂纹分析 .....	93
案例 2C 锅炉筒体焊缝中裂纹的失效分析 .....	98
案例 2D 废热锅炉蒸发器管弯头与侧板焊接裂纹的失效分析 .....	104
参考文献 .....	111
<b>第 3 章 承压设备的韧性失效分析</b> .....	113
3.1 压力容器的超压变形和韧性爆破过程分析 .....	113
3.1.1 超压变形和爆破试验的爆破曲线 .....	113
3.1.2 压力容器爆破过程分析 .....	114
3.1.3 容器屈服压力和爆破压力的理论估算 .....	116
3.1.4 容器韧性爆破断裂的实质 .....	118
3.2 压力容器韧性破坏的宏观特征 .....	118
3.2.1 有明显的塑性变形——鼓胀 .....	119
3.2.2 爆破口的宏观特征 .....	119
3.2.3 韧性爆破一般不产生碎片 .....	120
3.3 压力容器韧性破断后的断口特征 .....	121
3.3.1 断口的宏观形貌特征 .....	121
3.3.2 断口显微形貌特征 .....	123
3.4 压力容器韧性失效的原因分析 .....	125
3.4.1 腐蚀减薄 .....	125
3.4.2 超载 .....	126
3.4.3 超温 .....	127
3.4.4 结垢与结焦 .....	127
3.5 压力容器韧性失效的预防 .....	129
3.5.1 防止超载或防止超装 .....	129
3.5.2 防止壁厚减薄 .....	129
3.5.3 防止超温 .....	130
案例 3A 多层式厚壁反应塔局部腐蚀后爆破穿孔失效 .....	131
案例 3B 烃转化炉炉管爆管事故分析 .....	135

案例 3C 丁烷—氧气焊炬爆炸事故分析	144
案例 3D 充氮车蓄能器钢瓶爆炸事故分析	148
参考文献	161
<b>第 4 章 化工设备的脆性断裂失效分析</b>	163
4.1 化工设备脆性断裂失效的宏观特征	163
4.1.1 宏观变形量小	163
4.1.2 易产生碎片	163
4.1.3 主断口平齐	165
4.1.4 脆断失效的基本原因分析	166
4.2 材料的脆性引起的脆断失效	166
4.2.1 脆性材料的脆断问题	167
4.2.2 低温韧脆转变引起的脆断	168
4.2.3 加工制造过程中致脆引起的脆断	170
4.2.4 焊接接头脆化导致脆断	170
4.2.5 高温长期运行引起钢材的脆化	171
4.2.6 铁素体类钢的氢致脆化——氢脆问题	172
4.3 宏观缺陷引起的脆断——低应力脆断	173
4.3.1 低应力脆断概念	173
4.3.2 导致低应力脆断的常见缺陷	174
4.3.3 断裂力学的基本原理与低应力脆断	174
4.4 脆性断裂的断口特征	177
4.4.1 低温冷脆型的解理或准解理断口	177
4.4.2 长期中温高温服役后材料脆化导致脆断后的断口特征	178
4.4.3 低应力脆断的断口特征	182
4.5 脆性断裂的预防措施	185
案例 4A 炼油装置减压塔补焊管孔后母材脆性开裂	188
案例 4B $\phi 325$ 氯气输送管道脆断事故分析	192
案例 4C 中温炉管安装中水压试验时爆裂事故分析	200
案例 4D 聚乙烯挤出机齿轮减速箱螺栓脆性断裂分析	209
参考文献	215
<b>第 5 章 疲劳失效分析</b>	216
5.1 交变载荷与交变应力	216
5.1.1 过程机械中常见的交变载荷	216
5.1.2 疲劳的载荷谱	218
5.1.3 金属疲劳失效分析中最为关注的问题	220
5.2 疲劳断裂的机理及力学表征	220
5.2.1 金属材料疲劳裂纹的萌生机理及疲劳断裂的第 I 阶段	221

5.2.2	疲劳裂纹扩展的机理及断裂力学表征——疲劳断裂的第Ⅱ阶段	223
5.2.3	疲劳断裂的第Ⅲ阶段——瞬断区	225
5.3	疲劳断裂的失效分析	226
5.3.1	疲劳断裂的宏观特征分析	226
5.3.2	疲劳裂纹的形貌	229
5.3.3	疲劳断口的宏观特征	230
5.3.4	疲劳断口的电子显微特征	236
5.3.5	容易与疲劳断口相混淆的其他断口	242
5.4	热疲劳失效	246
5.4.1	热应力与热疲劳	246
5.4.2	热疲劳失效的特点	246
5.5	腐蚀疲劳失效	247
5.5.1	腐蚀疲劳的一般定义	247
5.5.2	腐蚀疲劳裂纹特征	248
5.5.3	腐蚀疲劳断口形貌特征	248
5.6	疲劳断裂失效的预防	250
5.6.1	一般预防原则	250
5.6.2	压力容器低周疲劳失效的预防措施	250
案例 5A	聚丙烯聚合釜接管低周疲劳断裂	252
案例 5B	安全阀的液位计连通接管疲劳断裂	256
案例 5C	泵传动轴疲劳断裂失效	259
案例 5D	钛冷凝器的钛管断裂与泄漏失效分析	262
参考文献		265

<b>第 6 章</b>	<b>局部腐蚀失效</b>	267
6.1	腐蚀失效分类	267
6.1.1	按腐蚀机理分类	267
6.1.2	按腐蚀破坏的形式分类	267
6.2	点腐蚀失效	268
6.2.1	点腐蚀机理	269
6.2.2	点腐蚀失效的宏观形貌	270
6.2.3	点腐蚀失效的金相形貌	272
6.2.4	点腐蚀失效的扫描电镜形貌	274
6.2.5	点腐蚀的影响因素和防止措施	275
6.2.6	抗点腐蚀能力的表示方法	277
6.3	缝隙腐蚀失效	278
6.3.1	缝隙腐蚀产生的条件	278
6.3.2	缝隙腐蚀机理	278
6.3.3	缝隙腐蚀宏观特征	279

6.3.4	缝隙腐蚀与点腐蚀的比较 .....	279
6.3.5	影响因素及防止措施 .....	279
6.4	晶间腐蚀失效 .....	280
6.4.1	晶间腐蚀机理 .....	280
6.4.2	晶间腐蚀的宏观特征 .....	282
6.4.3	晶间腐蚀的金相特征和检验 .....	283
6.4.4	晶间腐蚀的断口扫描电镜形貌 .....	284
6.4.5	晶间腐蚀的预防 .....	284
6.5	选择性腐蚀 .....	285
6.5.1	机理 .....	285
6.5.2	脱锌 .....	285
6.5.3	石墨腐蚀 .....	286
6.5.4	选择性腐蚀的特征 .....	286
案例 6A	膨胀节点腐蚀 .....	287
案例 6B	点腐蚀诱发的疲劳失效 .....	288
案例 6C	316L 不锈钢管道晶间腐蚀失效 .....	290
案例 6D	超级奥氏体不锈钢硫酸泵晶间腐蚀失效 .....	293
案例 6E	选择性腐蚀案例 .....	296
	参考文献 .....	297
<b>第 7 章</b>	<b>应力腐蚀开裂失效 .....</b>	<b>299</b>
7.1	应力腐蚀破裂的条件与特点 .....	299
7.2	应力腐蚀机理 .....	299
7.2.1	阳极溶解机理 .....	299
7.2.2	氢致应力腐蚀开裂 .....	301
7.2.3	应力作用 .....	301
7.2.4	敏感性介质 .....	302
7.3	应力腐蚀裂纹的形貌特征 .....	303
7.3.1	宏观形貌 .....	303
7.3.2	显微形貌 .....	304
7.4	奥氏体不锈钢的应力腐蚀 .....	307
7.4.1	氯离子的应力腐蚀 .....	307
7.4.2	冷加工奥氏体不锈钢在湿 H <sub>2</sub> S 溶液中的应力腐蚀影响 .....	310
7.4.3	高温水对奥氏体不锈钢引起的应力腐蚀 .....	311
7.4.4	连多硫酸应力腐蚀 .....	312
7.4.5	控制不锈钢应力腐蚀破裂的主要途径 .....	313
7.5	双相不锈钢的应力腐蚀失效 .....	314
7.5.1	应力腐蚀机理 .....	315
7.5.2	焊缝的应力腐蚀 .....	317

7.5.3	焊缝的应力腐蚀特征	318
7.6	碳钢碱脆	319
7.6.1	产生的条件	319
7.6.2	特征	319
7.6.3	预防措施	321
7.7	碳钢硝脆	321
7.8	无水液氨对碳钢和低合金钢的应力腐蚀	323
7.9	湿硫化氢对低合金钢的应力腐蚀和氢损伤	324
7.9.1	湿硫化氢引起的氢鼓泡(HB)	325
7.9.2	氢致开裂(HIC)	326
7.9.3	硫化物应力腐蚀开裂(SSCC)	327
7.9.4	氢致破裂和硫化物应力破裂的比较	328
7.9.5	应力导向氢致开裂(SOHIC)	328
7.9.6	湿 H <sub>2</sub> S 应力腐蚀的预防	330
7.10	铜及铜合金的应力腐蚀开裂	331
7.10.1	环境的影响	331
7.10.2	应力腐蚀机理	332
7.10.3	微观特征	332
案例 7A	连多硫酸导致奥氏体不锈钢 Ω 环应力腐蚀	333
案例 7B	冷加工的波形膨胀节在湿硫化氢环境下的爆裂事故	336
案例 7C	双相不锈钢应力腐蚀案例	342
案例 7D	碳钢管线焊缝碱脆开裂失效	344
参考文献		346
<b>第 8 章</b>	<b>高温运行设备蠕变及材料损伤的失效分析</b>	<b>350</b>
8.1	高温运行设备对材料性能的要求	350
8.2	金属材料的高温蠕变	350
8.2.1	高温承载金属力学行为特点	350
8.2.2	金属材料的蠕变	351
8.2.3	持久强度	353
8.2.4	金属材料的高温松弛	365
8.3	长期高温运行后材料组织和性能的变化	366
8.3.1	珠光体球化	367
8.3.2	石墨化	372
8.3.3	回火脆化	375
8.3.4	合金元素在固溶体和碳化物相之间的重新分配	376
8.4	高温设备及管道常用钢	380
8.4.1	耐热钢及其分类	380
8.4.2	耐热钢的主要成分及合金化	381

---

8.4.3 常用耐热钢的性能 .....	383
8.4.4 离心铸造高温炉管 .....	383
案例 8A 制氢装置蒸汽管线超温运行后果评价与选材 .....	388
案例 8B 2.25Cr-1Mo 钢高温回火脆化 .....	395
案例 8C 制氢转化炉炉管可用性评估与剩余寿命分析 .....	402
案例 8D 乙烯装置开工锅炉水冷壁管长期过热爆管 .....	410
案例 8E 催化烟气管线开裂原因分析及替换材料试验研究 .....	413
案例 8F 乙烯裂解炉辐射段炉管过度弯曲变形原因分析及结构改进 .....	420
案例 8G 支吊架失常对高温管线安全运行的影响 .....	425
案例 8H 超高压蒸汽管线高温运行材质损伤及剩余寿命预测 .....	427
参考文献 .....	433

# 第 1 章 失效分析概论

自从欧洲工业革命以来制造了大量动力与机械设备,伴随而来的就是不断发生的机械设备的事故,如锅炉爆炸、桥梁断裂、传动设备的磨损与断裂等。随着 20 世纪上半叶焊接技术的发展与广泛应用又出现了大量焊接结构的断裂和破坏,这就逐步促使失效分析这一机械工程分支学科的建立和发展。随着近代材料科学、电子显微镜技术和各种测试分析技术、腐蚀科学的发展,使失效分析的理论和技术更加完善和走向现代化,并仍在不断发展,同时又促进了许多工程技术与科学的发展。上百年的失效分析技术的发展对材料科学技术、机械设计的强度理论、制造技术及焊接技术、腐蚀理论的发展都起到巨大的推动作用。从工程技术角度来看,失效分析能发现许许多多重大装备损坏的原因,大大促进了各个工业部门的技术进步。

在化学工业、石油及石油化工、电力、冶金等以过程工程为特色的流程工业中使用的设备具有共同的特色,如大部分设备为由回转气体构造而成的容器及管道的设备。它们所承受的不仅有机械载荷,还承受压力载荷,并且还有由于温度(或高温或低温)形成温差应力的载荷并造成金属材料性能的变化,而且还都接触不同腐蚀性能的化学介质。因此化工设备的失效类型几乎包罗万象,非常复杂,这些设备的断裂、泄漏、甚至爆炸所造成的后果往往是灾难性的。研究与掌握化工设备的失效规律,可以大大提高化工设备的设计水平、材料的冶炼水平、加工制造水平、检验水平及科学管理水平,从而促进工业部门技术水平的提高,使安全得到保障。

每一项重大失效分析的成果都是经验教训的总结,甚至是血的教训的总结。这是人类从事生产活动中积累的宝贵财富,值得从事工程技术研究、理论研究人员重视,也值得设计、制造、检验、使用管理以及安全技术工程人员重视。在现代工程技术高等教育中学习失效分析技术是很有现实意义的。

## 1.1 失效与失效形式的分类

### 1.1.1 失效的概念

失效是一个非常宽泛的概念,可以认为凡是不能正常发挥原有功能的情况都应视为失效,包括机械、电器、仪表,甚至药品、食品都能应用这一概念。本书主要叙述的是机械设备,尤其是化工设备的失效。而化工设备的失效主要又以锅炉、压力容器与压力管道为核心,因为这是国家技术质量监督部门纳入特种设备专门监督管理的 7 类特种设备之一。化工设备的失效是指符合下列三种情况之一的现象:

- ① 完全失去原定的功能。如压力容器及管道的破裂或轴类等零部件的过度变形或断裂。
- ② 虽还能运行,但已部分失去原有功能或不能良好地达到原定的功能。如压缩机气缸的磨损、轴承的间隙过大,或容器和管道发生密封泄漏等。

③ 虽还能运行,但已严重损伤而危及安全性,使可靠性降低。如压力容器出现裂纹、严重的鼓胀变形或减薄,容器管道或压缩机中有害物质的严重泄漏。

“失效”与“故障”虽然都是指正常功能的丧失,但“故障”可以排除或修理,而后又恢复原有功能。“失效”则偏重于功能丧失到不能继续使用甚至必须报废的程度。

“失效”与“事故”两者紧密相联而概念有所差异。“失效”偏重于指产品本身的功能状态,而“事故”是强调失效事件的后果,即偏重于造成的损失和危害。失效事件不一定都造成事故,但有的却会造成事故甚至灾难性事故。失效分析与事故分析所追求的目标是基本一致的,即都希望弄清造成失效或事故的原因。但两者又有一定的区别,失效分析着重技术上的分析,弄清原因以获得杜绝事故的指导性意见;而事故分析是以失效分析为基础弄清原因之后再分清责任,并进行按责任的处理。

“失效”与“报废”也是两个不同的概念。“报废”是指不符合技术要求或不具备应有功能的产品的处理结果,可能是已失效的产品,也可能是尚未使用过的产品。因此,失效可能导致报废,而报废的不一定是失效。质量低劣必然导致使用中过早失效而报废。先进国家的企业对一些一旦失效会导致严重事故的设备,往往规定使用年限按时报废和更换,形成了强制性规定,即使浪费一点也确保生命的安全和防止次生灾害的严重损失,这在总体上可以获得更好的经济效益和社会效益。一旦形成制度后便不会有人冒着风险去延期使用。

### 1.1.2 失效的危害性

失效一旦造成事故将会造成不同程度的危害。化工设备中往往承受介质的压力和腐蚀,甚至是易燃易爆或有毒物质,一旦失效不但易引起设备本身的损坏,有时由于内部介质的危害性也会引发灾难性事故,往往直接危害社会公共安全。

例如 1984 年墨西哥某厂液化石油气的 6 台大型球形储罐和 48 台大型卧式储罐在一起事故中先后全部被炸毁,500 多人被烧死,5 000 多人受伤,1 000 多人下落不明,该事故至今原因不明。1984 年印度博帕尔市的一家美国农药厂的一台甲基异氰酸盐储罐发生剧毒物质的严重泄漏事故,5 套安全系统全部失灵,致使泄漏事故无法控制,造成 2 580 人中毒死亡,200 000 多人受伤,其中主要是中毒而致双目失明<sup>[3]</sup>。1986 年前苏联切尔诺贝利核电站反应堆内化学爆炸,核管道内放射性物质大量外泄,致使 31 人死亡,300 多人受伤,环境污染后果极为严重<sup>[3]</sup>。

在 20 世纪 70 年代末和 80 年代初,我国曾多次发生压力容器和管道的灾难性事故。1979 年吉林市石油液化气站球罐的毁灭性事故,温州液氯钢瓶爆炸事故等均为大型的灾难性事故。这些事故客观上促进了我国政府机构重视压力容器与管道的安全整治与管理。1980 年我国展开了大规模的压力容器安全整治,从原材料、设计、制造、检验、使用登记和使用管理上全方位建立法规,使压力容器的安全逐步走上有法可依、有章可循的状态。我国于 20 世纪 90 年代末又着手压力管道的安全整治。21 世纪初,国家又将压力容器、压力管道与锅炉等设备整合为承压设备并作为特种设备由国家技术质量监察机构实施统一管理。

尽管近年来的技术进步使化工厂的设备事故发生率有所下降,但事故仍有发生,并且还会经常出现一些新的失效情况。美国统计出的锅炉压力容器的失效事件 1986 年共发生 3 318 起,死亡 102 人,伤 259 人;1988 年共发生 2 830 起,死亡 24 人,伤 88 人。日本统计的



1976—1983年期间的压力容器与管道事故共909起,其中误操作引起的事故占55%,设备缺陷引起的事故占45%<sup>[3]</sup>。近年来我国石油加工及石油化工企业由于进口大量国外原油,油中含硫含酸含盐量大大超过国内原油,导致腐蚀失效问题日趋严重,引起事故频发。为增强设备钢材的抗腐蚀能力而盲目使用常规的奥氏体不锈钢,这又导致奥氏体不锈钢设备发生应力腐蚀开裂的失效问题不断发生。直至2005年我国官方发表的承压设备事故统计资料表明,2001~2004年之间的4年中我国承压设备的安全状况总体上保持了平稳态势,事故率保持在 $10^{-5}$ 次/(台·年)的较低的国际认可水平上(可参见表1.1)<sup>[1]</sup>。其中,承压设备中的气瓶事故率更低。

表 1.1 2001—2004 年我国承压设备事故率(起数事故率)<sup>[1]</sup>

单位:起/(万台·年)

年份	锅炉	压力容器	气瓶
2001	0.98	0.32	$0.49 \times 10^{-2}$
2002	0.65	0.23	$0.38 \times 10^{-2}$
2003	0.41	0.33	$0.34 \times 10^{-2}$
2004	0.61	0.24	$0.37 \times 10^{-2}$

表1.1中所统计的承压设备共发生事故650起,其中特大事故2起,重大事故34起,严重事故614起。这650起事故中共造成死亡542人,受伤1183人,直接经济损失15288.74万元人民币。同时这650起事故中锅炉事故为144起(占22%),土制锅炉149起(占23%),压力容器事故150起(占23%),气瓶事故153起(占24%),压力管道事故54起(占8%)。应该认识到,很多未造成人员死亡的失效与事故未进入官方统计之内。

近代对压力容器的失效划分为灾难性和潜在性两类。前者不但容器设备自身遭到毁灭性破坏,还引起人员伤亡、火灾、建筑物及其他设备的毁坏,而潜在性失效是指尚未引起灾难性事故之前及时发现并停止使用或进行修复。前面所说美国的统计数字即包括了相当大比例的潜在性失效。

从容器和管道已发生的灾难性事故中,可发现一些普遍性规律,例如:

① 薄壁容器的事故多于高压与超高压的厚壁容器,这主要是高压容器的设计、选材、制造和检验直至运行维护普遍受到重视,管理严格。

② 管道及阀门等附件引起的事故多于容器本身的事故。

在失效事件的统计与分析中,人们愈来愈关心容器事故发生的概率问题。1984年英国Nichols认为,压力容器灾难性事故发生的概率在 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 台/年,而核容器的事故概率为 $10^{-5}$ 台/年<sup>[2]</sup>。井上威恭认为压力容器失效概率的控制目标应达到 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 台/年,则安全状况大为改善<sup>[4]</sup>。

### 1.1.3 常见失效形式的分类

失效形式可以从不同角度分类。例如按失效(断裂)时变形的大小,按失效(断裂)时金属或合金材料在晶体中的断裂途径,按失效机理,如:裂纹形成机理、磨损机理以及磨蚀机理或形态等分类。因此,失效是一个广义的概念,不局限于断裂、腐蚀等狭义的失效。较为合适的分类方法是分为:过度变形失效、断裂失效和表面损伤失效等三大类,详见图1.1。