

过程装置

故障处理及典型实例

刘超锋 孟庆乐 编著

- 故障处理方案设计

- 操作维修灵感

- 90个典型实例

**Fault
Handling**
and Its Typical Examples
about Process Equipment



化学工业出版社

过程装置

故障处理及典型实例

刘超锋 孟庆乐 编著



化学工业出版社

·北京·

本书以过程工业已经发生的、典型的 90 个真实案例探讨了过程装置故障处理的全过程,介绍了过程装置故障排查和处理的方法。主要包括:过程装置完好标准、故障分析指标及处理策略;过程装置的典型故障分析与处理技术;过程装置故障处理中的安全技术要求;过程装置故障处理的共性技术及实例;分别详细介绍了压力管道、塔釜罐槽、废热锅炉、列管式换热器、管式加热炉、板式换热器、离心泵、离心机、压缩机组、风机、膨胀机组、汽轮机组、控制装置、仪表装置的故障处理及实例。

本书通俗易懂、实用性强、内容丰富翔实,讲述了过程装置存在问题的检查、发现和处理。

本书可供从事过程装置故障处理技术及应用的企业技术人员使用,可以作为高等学校过程装备与控制工程、安全工程、能源与动力工程、化学工程与工艺、自动化等专业的师生的教材,也可以作为企业职工继续教育和技术培训的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

过程装置故障处理及典型实例/刘超锋,孟庆乐编著.
北京:化学工业出版社,2017.8
ISBN 978-7-122-30029-4

I. ①过… II. ①刘… ②孟… III. ①机械设备-故障修复 IV. ①TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 147712 号

责任编辑:高 钰
责任校对:王素芹

文字编辑:陈 喆
装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 20½ 字数 507 千字 2017 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888 (传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:89.00 元

版权所有 违者必究

过程装置主要由静设备（塔、罐、换热器、加热炉等）、动设备（压缩机组、泵等）以及管道等组成。其故障处理涉及物理学、力学、工程技术基础科学、材料学、电子通信、自动控制、安全科学等技术领域。

合理的故障处理方法有利于消除过程装置存在的问题、延长过程装置的使用寿命，确保过程装置具有最佳效能。对于正在运行的过程装置，维护保养、检维修、定期检验等各个环节与装置长周期平稳运行密切相关。过程装置带病运转，会加速装置的损坏甚至出现人身事故。分析已经发生的过程装置故障、相应的处理措施和处理后的运行效果的典型实例，对于提高过程装置的故障处理水平也有必要。

过程装置涉及过程工业中典型的过程设备、过程流体机械、管道、仪表和阀门等装置设施。具体到一个被维护的过程装备对象，被维护的过程装备本体的边界范围是：过程装备与外部管道或者装备焊接连接的第一道环向接头的坡口面、螺纹连接的第一个螺纹接头端面、法兰连接的第一个法兰密封面、专用连接件或者管件连接的第一个密封面。本书以过程工业故障频率较高的典型过程作为分析对象，有以下特点：

① 本书针对压力管道、塔釜罐槽、废热锅炉、列管式换热器、管式加热炉、板式换热器、离心泵、离心机、压缩机组、风机、膨胀机组、汽轮机组、控制装置、仪表装置等组成的过程装置运行故障处理的实际领域，结合过程装置故障处理人员在排除相关故障时的需求，用文字、表格、照片图形结合的形式详述了 90 个典型实例。

② 读者可以借助本书的内容和实例体验实际的故障处理环境、处理方法、处理流程和处理效果，学以致用，从而达到举一反三的目的。

本书可作为接触到过程装置故障处理问题的高校相关专业师生和企业技术人员的教材，也可供过程装置操作和维修的技术工人掌握过程装置故障解决方案时查阅，还可为研发、设计和技改人员在实现过程装置零故障的设计意图时参考。

本书由刘超锋、孟庆乐编著。其中，绪论、第 1~5 章、第 9~16 章由郑州轻工业学院刘超锋编著，第 6~8 章由河南省特种设备安全检测研究院新乡分院孟庆乐编著。全书由刘超锋统稿。在成书过程中，还参考了国内外相关的文献资料，特此致谢！

限于笔者的水平，本书难免有不足之处，请读者给予批评指正。

编著者

2017 年 3 月

绪论	1
0.1 过程典型静设备	6
0.2 过程典型动设备	8
0.2.1 压缩机组	13
0.2.2 风机	17
0.2.3 泵	19
0.2.4 离心机	21
0.2.5 汽轮机组	22
0.3 实例分析	24
0.4 过程装置完好标准、故障分析的指标及处理策略	27
0.4.1 完好标准	27
0.4.2 故障的分析指标	29
0.4.3 故障处理的策略	33
第1章 过程装置故障处理中的安全技术	38
1.1 一般安全技术要求	40
1.2 火灾的防范	44
1.2.1 发生火灾的原因	44
1.2.2 防火措施	45
1.3 泄漏中毒事故防范	47
1.4 实例分析	48
第2章 过程装置故障处理的共性技术及实例	57
2.1 实施者	57
2.2 实施时机	61
2.3 故障分析与处理典型技术	64
2.3.1 日常维护的技术	65
2.3.2 完整性评估技术	69
2.4 检查技术	86
2.4.1 在线检查	87
2.4.2 停车检查	90

2.5	表面沉积物的在线处理	99
2.6	实例分析	100
2.7	过程动设备故障诊断	106
2.8	实例分析	108
第3章	压力管道的故障处理及实例	116
3.1	维护不周及其预防	117
3.2	实例分析	119
3.3	在线检验项目和内容	123
3.4	停车后的全面检验项目和内容	124
3.5	停车后的耐压强度校验和应力分析要求	124
3.6	停车后的检修要求	125
3.7	压力试验要求	126
3.8	振动的原因及停车改造	126
3.9	内部堵塞后的在线处理和停车处理	127
3.10	带压堵漏技术	127
3.11	实例分析	128
3.12	日常维护	133
3.13	紧急情况停车	133
第4章	塔釜罐槽的故障处理及实例	135
4.1	维护不周及其预防	135
4.2	停车检查	136
4.2.1	主体的检查	136
4.2.2	衬里的检查	136
4.3	清洗	136
4.4	试压试漏技术	136
4.5	日常维护	137
4.6	检修要求	138
4.7	实例分析	140
第5章	废热锅炉的故障处理及实例	151
5.1	投入运行前的检查	151
5.2	操作运行中的检查	151
5.3	清洗	152
5.4	停炉	153
5.5	停车后检维修	153
5.5.1	对于锅筒的管接头	153
5.5.2	对于换热管与管板连接处	154
5.6	实例分析	155

第 6 章 列管式换热器的故障处理及实例	161
6.1 启动	161
6.2 运行中的维护	162
6.3 停车	163
6.4 检查和清洗	163
6.4.1 操作运行中的检查和清洗	164
6.4.2 停车时的检查和清洗	164
6.5 停车后的处理	165
6.6 实例分析	166
第 7 章 管式加热炉的故障处理及实例	175
7.1 点火和熄火	175
7.1.1 用油作燃料时	175
7.1.2 用燃料气作燃料时	176
7.2 正常操作	176
7.2.1 确保最佳的过剩空气率	176
7.2.2 压力和抽力的调节	176
7.2.3 火焰的调节	177
7.2.4 温度的调节	177
7.3 日常维护检查	177
7.3.1 炉内观察	178
7.3.2 炉外检查	178
7.4 定期维护检查	179
7.5 常见故障原因与对策	179
7.6 实例分析	181
第 8 章 板式换热器的故障处理及实例	183
8.1 故障原因及发现故障的方法	185
8.1.1 结垢的原因	185
8.1.2 机械堵塞的原因	186
8.1.3 泄漏的原因	186
8.1.4 查明故障的方法	186
8.2 故障排除的方法	188
8.2.1 不解体处理的方法	188
8.2.2 不解体反吹的方法	189
8.2.3 不解体清洗	189
8.2.4 解体维修	191
8.3 技术改造	194
8.3.1 外围装备的改造	194

8.3.2 本体的改造	194
8.4 实例分析	196
第9章 离心泵的故障处理及实例	198
9.1 启动前的准备	199
9.2 启动	200
9.3 运行和维护	202
9.4 停车	202
9.5 倒泵操作	203
9.6 运行中的检查及在线处理	203
9.7 停机后的维护	204
9.7.1 泵的检修	205
9.7.2 密封失效后的处理	207
9.7.3 电动机类故障的处理	209
9.8 实例分析	210
第10章 离心机的故障处理及实例	217
10.1 启动前的准备	217
10.2 启动	218
10.3 运行和维护	218
10.4 停车	218
10.5 日常维护	219
10.6 事后维护	219
10.7 定期维护	220
10.8 检修要求	221
10.9 实例分析	222
第11章 压缩机组的故障处理及实例	225
11.1 离心式压缩机组的维护	225
11.1.1 启动前的准备	225
11.1.2 启动	225
11.1.3 运行和维护	226
11.1.4 停车	227
11.2 螺杆式压缩机组的维护	228
11.2.1 启动前的准备	228
11.2.2 试车、开机	228
11.2.3 运行维护	228
11.2.4 停机	229
11.3 轴流式压缩机组的维护	230
11.3.1 机组试车前的准备	230

11.3.2	机组试车	230
11.3.3	运行和维护	231
11.3.4	机组的停车	232
11.4	活塞式压缩机组的维护	233
11.4.1	启动准备	233
11.4.2	启动	234
11.4.3	正常停车	234
11.4.4	事故停车	234
11.4.5	运行和维护	235
11.5	实例分析	236
第 12 章	风机的故障处理及实例	250
12.1	离心式风机的维护	250
12.1.1	启动前的准备	251
12.1.2	启动	251
12.1.3	运行中的维护	251
12.1.4	检修要求	252
12.2	实例分析	253
12.3	旋涡风机的维护	256
12.3.1	启动前的准备	256
12.3.2	启动	256
12.3.3	运行和维护	257
12.3.4	停车	257
12.4	罗茨鼓风机的维护	257
12.4.1	启动前的准备	257
12.4.2	启动	258
12.4.3	运行和维护	258
12.4.4	停车	258
12.4.5	检修要求	258
12.5	实例分析	259
第 13 章	膨胀机组的故障处理及实例	261
13.1	损坏及停机检修	261
13.2	启动准备	262
13.3	启动过程	263
13.4	振动监测	264
13.5	实例分析	265
第 14 章	汽轮机组的故障处理及实例	272
14.1	启动前的准备	272

14.2	启动	273
14.3	运行中的维护	274
14.4	停车	276
14.5	结垢原因与对策	277
14.5.1	结垢原因	277
14.5.2	结垢后的处理方法一	278
14.5.3	结垢后的处理方法二	278
14.6	实例分析	279
第 15 章	控制装置的故障处理及实例	282
15.1	控制系统的维护	283
15.2	调节阀的维护	285
15.3	安全阀的故障处理	286
15.4	实例分析	287
第 16 章	仪表装置的故障处理及实例	300
16.1	使用中容易出现的故障	300
16.2	日常巡检的内容	301
16.3	检修的方法	302
16.4	停车	303
16.5	开车	303
16.6	紧急停车	305
16.6.1	电源故障时	305
16.6.2	误操作时	305
16.6.3	关键仪表故障时	306
16.7	压力测量仪表的维护	306
16.8	流量测量仪表的维护	308
16.9	液位测量仪表的维护	308
16.10	温度测量仪表的维护	308
16.11	在线分析仪表的维护	309
16.12	实例分析	309
参考文献		314

过程装置涉及的设备种类极多,细分为静设备、动设备、管道、电仪(电气仪表)等。例如,炼油和化学工业专业设备主要由炉、塔、反应设备、储罐、换热设备、空气冷却器、压缩机、泵、风机、制冷设备、发电设备、变配电设备、自动化控制仪表、锅炉、起重设备、安全环境保护专用设备和炼化、化纤专用机械等组成。

过程装置的全生命周期大致可以细分为:制造、安装、运行、维护、检修、改造直到报废阶段。其中,投入生产前,要经历基础设计、现场土建施工、机械竣工直到投运。运行时,过程装置内流动的工艺介质高温、低温、深冷、超高压、高压、中压、低压、真空,有剧毒、易燃、易爆、强酸、强碱、反应活性,甚至是气固、液固、气液固等多相流。过程装置的技术水平越来越高。但是过程装置的操作和维护具有安全要求高、连续作业、链长面广的特殊性。过程装置在调试和运行方面存在一定的复杂性、不确定性,其至少一个特征参数由可接受的/通常的/标准的状态极易发生不允许的偏移,在安全、环保和经济方面存在较大隐患。发生堵塞、穿孔、破裂、泄漏、控制系统的误操作或突然中断、失控或沿线设备发生机械故障及直接导致运行受阻等,即称之为发生故障,不能满足正常的生产需求。一旦由于发生严重的故障造成的事故,将会造成极其严重的经济和安全后果,甚至造成重大不良影响。设备损坏严重,多系统企业影响日产量 25%、单系统企业影响日产量 50%,被认为是重大设备事故。有资料表明,美国的石油化工企业每年因生产装置非正常停工造成的损失达 20 亿美元,我国一套规模为 1400kt/a 的催化裂化装置开停工一次所需费用高达 500 万元人民币左右,因此,减少装置非正常停工次数值得密切关注。

故障的定义是指机械设备或系统在使用过程中,由于某种或者多种原因导致该机械设备或系统的正常使用功能部分或者全面丧失的一类事件。设备运行异常是设备处于不正常状态,即性能不能保持、性能范围超过了规定界限,但是并没有达到不能执行规定功能的状态。一旦设备的性能范围使其达到不能执行功能的程度,异常就变成了故障。有毒介质和易燃介质的泄漏、火灾、爆炸,属于造成设备损坏、环境污染和人员伤亡等的危害性故障;误操作引起的保护性动作、超负荷等,会引起危险性故障。过程装置存在因机械结构引起的设备故障和操作不当引起的过程故障(即流动异常)。故障检测是确定故障种类、位置及检测时机;故障隔离是故障检测后进行的。当设备因结垢、腐蚀、振动、超载等原因发生难以预测的机械故障时,就难以对设备的操作状态正常与否作出正确判断。一旦设备出现这些机械和操作故障,采用常规在线测试数据也难以确定“病灶”所在。

过程装置故障判据的依据是:在规定的条件下和规定时间内,不能完成规定的功能;在

规定的条件下和规定时间内,某些性能指标不能保持在规定的范围内;在规定的条件下和规定时间内,引起对人员、环境、能源和物资等方面的影响超出了允许范围;技术协议或其他文件规定的故障判据。显然,过程装置严格遵照设计意图进行操作和生产时,出现危险的可能性很小。

原发性故障,即故障源;引发性故障,即这类故障是由其他故障引发的,当原发性故障消失时,这类故障也自然消失。

突发性故障,为突然发生的故障,是由于外界环境因素发生突变或者受到偶然的外力作用影响,且此种影响超出机械设备所能够承受的极限,因此出现故障和事故。突发性故障具有故障前无明显征兆、故障发生规律离散、故障可预测性差等特点。累积性故障是由于设备自身或者外界不利因素影响长期积累,到达一定临界点时,机械设备即出现故障。累积性故障的主要原因是设备自身老化、长期使用导致的磨损以及腐蚀、设备材料疲劳等,具有故障前有明显征兆、事故发生规律明显、故障可预测性强,且与设备使用时间和设备使用环境存在明显的相关性。

从故障概念衍生出来事故概念。事故是造成人员伤亡、职业病、设备损坏、财产损失或环境损害的意外事件。按照造成事故发生的主要原因将事故类别分为设备缺陷、设备材质缺陷、设计选型有误、误操作、电力系统故障、原料质量下降和违规操作事故等。发生事故起数较多的是设备缺陷事故、违规操作和误操作事故,设备事故一般由设备选型有误和设备材质缺陷引起,而操作事故大多是由误操作或是违规操作引发。人为原因,引起责任事故;安装不当和检修不良,造成设备损坏的,属于质量事故;自然灾害等原因使设备损坏的,属于自然事故。过程装置事故大多是由于系统的“变化”所引起的,例如:液位偏高、流量过大、机泵故障等;管道、压力容器因窜气、超压和腐蚀泄漏引发的潜在危险;设备存在噪声危害;高温管道和高温设备存在烫伤危害。有些“变化”可能是自发的,可也能是外部作用(包括人为因素)的结果。事故的类型可分为泄漏、穿孔、破裂。损伤,是指容器在外部机械力、介质环境、热作用等单独或共同作用下,造成的材料性能下降、结构不连续或承载能力下降等的现象。损伤是一个过程。控制系统发生严重瘫痪,或沿线管、泵、站、阀等设备完全报废或发生重大穿孔、破裂、泄漏的意外事件都应当称之为失效,是由于物理、化学和生物等变化作用引发的。失效,是损伤积累到一定程度,容器强度、刚度或者功能不能满足使用要求的状态。发生损伤后不一定失效,而失效发生一定存在损伤。

失效的模式有断裂、失稳、疲劳、腐蚀、屈曲等。尤其是生产所用的原料、催化剂、干燥剂和其他生产辅助剂以及产品和中间产物等大多具有一定磨蚀性,在高温高压及高速搅动中完成反应、分离等过程。此种高温高压状态加上物料的腐蚀性,再经过高速搅动反复冲刷等,会使设备管路腐蚀变薄甚至引起泄漏。此外,生产过程中的黏度较大的原料,容易聚合结垢。过程装置内结垢是值得注意的问题,虽然结垢不至于造成装置的非正常停车,但经过长时间的生产,这些物质会堵塞管路,使管路、塔炉等压差增大,设备运行效率降低,将严重影响装置的长周期运行,增加安全风险,因此应该重视过程装置内的结垢问题的处理。

对运行过程中损伤模式的识别,有助于定期检验方案的制定,利于在设备发生失效前及时进行修复或报废处理等。ISO 16528 对于锅炉和压力容器将失效模式分为三大类,14种:短期失效模式(脆性断裂、韧性断裂、超量变形引起的接头泄漏、超量局部应变引起的裂纹形成或韧性撕裂、弹性、塑性或者弹塑性失稳);长期失效模式(蠕变断裂、蠕变失稳、冲刷或腐蚀、环境助长开裂);循环失效模式(扩展性塑性变形、交替塑性、弹性应力疲劳或

弹-塑性应变疲劳、环境助长疲劳)。

设备故障可以分为：电气设备故障、仪表控制系统故障、机械系统故障、管道故障、机组系统故障、通信故障、公用工程故障和其他故障。其中，控制系统故障包括软件失效、元件失效和控制支持系统失效（如电力系统、仪表风系统）；机械系统故障包括磨损、腐蚀、振动、缺陷和超设计限制使用。其中，缺陷可分为先天缺陷和使用缺陷。先天缺陷有设计缺陷和制造、安装、修理、改造缺陷，例如：介质循环不良、自由膨胀受阻、局部过热和应力集中，钢材缺陷、几何尺寸缺陷、焊接缺陷等。使用缺陷指“裂纹、起槽、变形（如鼓包）、腐蚀、磨损、泄漏、水垢”。水垢造成局部过热（超温），或造成水循环破坏，鼓包变形是局部过热的结果；裂纹、起槽属于疲劳裂纹，裂纹也可以是长时间高温蠕变裂纹或是苛性脆化应力腐蚀裂纹；腐蚀、磨损造成壁厚减薄，电化学腐蚀、局部磨损可造成泄漏。常见的腐蚀为氧腐蚀、垢下腐蚀、低温腐蚀，尤其是停炉引起的氧腐蚀。操作缺陷指违反操作规程，对压力、水位监视不严，严重缺水后进水等异常操作情况。安全附件缺陷指安全阀、压力表、水位表及高低水位报警和低水位联锁失灵等。安全附件如果错误选用、失灵及超期未校验，则会埋下事故的隐患。著名的海恩法则和实践告诉我们，每一起严重事故背后隐藏着 29 起小事故、300 起未遂事故和 1000 起事故隐患。日本曾经掀起“消灭 300”运动，其目的就在于此。安全管理缺陷主要指使用上的管理缺陷，如无操作上岗证、无管理制度、无操作规程、定期检验超期、安全阀未校验等。

故障、事故的起因往往归纳为：内、外腐蚀，应力腐蚀，第三方破坏，误操作，材料缺陷，施工缺陷，设备故障等。

设备的重大缺陷指的是极有可能发展成紧急缺陷，但是设备还能在短期内进行正常运行。一旦设备存在重大缺陷，必须进行消缺处理。而设备紧急缺陷指的是设备在运行过程中存在会威胁到工作人员生命安全、设备安全，造成严重安全故障事故的重大缺陷。一旦设备发生紧急缺陷，必须立刻停止设备运行，安排专业检修人员进行全面排查故障，直到设备能再次投入正常使用。

影响故障的基本因素中，人为因素最重要。操作规程和方法不合适，也将导致系统或设备故障。疲劳、磨损、蠕变、腐蚀，都与时间有依赖关系，也对故障的产生有影响。故障类别包括：电、化学、机械、热等原因。也可以将故障分为原发、诱发和指令三类故障。发生固有故障时，如果元件仍在其设计参数内工作，则此时的故障为原发故障。如果是环境应力或者工作应力过度，也就是外部故障导致故障，则此时的故障为诱发故障。如果在错误的时间或者错误的地点实施了纠正行为，则此时的故障为指令故障。例如，过早的开车、过晚的停车导致的故障，就是指令故障。被动的故障通常与传输的能量、物料、信号、载荷有关，如管道、轴承、电线等。主动故障与动态事件有关，例如阀门、机械泵、电动机等。故障模式是在一定的工作和环境条件下设备故障时可以观察到的失效后的状态，是随着包括人为因素在内的外因的变化而演变的，也是故障研究中应充分反映的特征。一个故障模式对应的故障原因可能不仅仅是一种，每个原因都应该归结为最底层元件的故障原因。运行中的补偿措施（Compensating Provision in Operation）是：针对某一故障模式，为了预防其发生而采取维修措施，或一旦出现该故障模式后操作人员应采取的最恰当的补救措施。一般可以通过统计、试验、分析、预测等方法获取过程装置的故障模式。可从过程装置在过去的使用中所发生的故障模式为基础，再根据该过程装置使用环境条件的异同进行分析修正，进而得到该过程装置的故障模式。对引进国外的过程装置，应向外商索取其故障模式。故障模式的严重度

(严重程度)类别(或等级)评价时,把导致人员死亡、装置毁坏,重大财产损失和重大环境损害的,定为“灾难性”。显然,对于过程装置,任何一个元件发生故障都可能带来灾难性事故。

GJB/Z 1391—2006《故障模式、影响及危害性分析指南》分析了所有可能出现的故障模式。典型的故障模式(简略的)有:提前工作;在规定的时间内不工作;在规定的非工作时间内工作;间歇工作或工作不稳定;工作中输出消失或故障(如性能下降等)。典型的故障模式(较详细的)有44种:结构故障(破损)、超出允差(下限)、滞后运行、折断、捆结或卡死、意外运行、输入过大、动作不到位、共振、间歇性工作、输入过小、动作过位、不能保持正常位置、漂移性工作、输出过大、不匹配、打不开、错误指示、输出过小、晃动、关不上、流动不畅、无输入、松动、误开、错误动作、无输出、脱落、误关、不能关机、(电的)短路、弯曲变形、内部漏泄、不能开机、(电的)开路、扭转变形、外部漏泄、不能切换、(电的)参数漂移、拉伸变形、超出允差(上限)、提前运行、裂纹、压缩变形。

设备常见故障模式:运动设备部件的磨损、声音异常、振动异常、晃动、温升异常、泄漏等;静止设备部件的松动、变形、断裂、龟裂、腐蚀、材质变化等;电气设备的绝缘击穿、温度异常、绝缘裂化或烧损、短路、断线等。

设备一旦发生事故,具有较大的危险性,因此存在着极大的风险隐患。风险是某一特定危险情况发生的可能性和后果的组合。运行装置所面临的风险主要是装置在事故状态下发生爆炸、着火、中毒及设备损坏,生产损失等。隐患是潜在的可能导致人员伤亡、设备损坏、生产中断、环境破坏、产品质量不合格、引起法律责任等的状态。典型的损坏模式有:穿透、碎片冲击、剥离、电击穿、裂缝、烧毁(外因攻击起火引起)、断裂、毒气污染、卡住、细菌污染、变形、核污染、起火、局部过热、爆炸等。

老化是由于自然力的作用或者保养不善而导致设备工作能力下降的现象。安全阀等在恶劣的工作环境中长期运行老化加快。此外,一些电气仪表元件也随着生产时间的延长出现老化,故障增加。一些关键元件的故障将会带来严重的安全隐患。

不同的部位存在的故障隐患不同。对过程装置所进行的检测、修理、故障排除、定期检修、技术改造工作(过程装置的制造厂家的保修或因设计制造原因的索赔修理不属于维修范围),是一项专业性、技术性很强的工作。必须能够及时发现设备的异常或故障,采用合理的维修技术;对已经存在的问题必须能够正确分析和处理,及早提出问题的解决方案,避免更大的损失,这就是开展过程装置故障处理技术研究的目的。

过程装置故障处理所期望的目标是:缺陷为零、故障为零、事故为零。故障和事故,都是不希望发生的。其中,故障是过程装备丧失功能后的状态。故障后,一旦造成人员伤亡、职业病、设备损坏、财产损失、环境损害,则故障衍生成事故。

过程装置基于其构造与功能,可分为以下类型:简单系统由若干物理元件组成,元件间的联系是确定的,系统的输出与输入之间存在着由构造所决定的定量的或逻辑的因果关系;复合系统由多个简单系统作为元素组合而成,这种组合可以是多层次的,层次之间的联系都是确定的,因而在功能上,复合系统的特点与简单系统的特点是相同的;复杂系统由多个子系统作为元素组合而成,这种组合是多层次的,在子系统内、层次之间的联系可能是不确定的;在功能上,系统的输出与输入之间存在着由构造所决定的一般并非严格的定量的或逻辑的因果关系。过程装置故障的传播方式:横向传播,例如某一元件的故障引起层内其他元件的功能失常,纵向传播,即元件的故障相继引起部件—子系统—系统的故障。为了达到安全

运行的目标,过程装置需要有保持温度稳定、保持压力稳定、保持液位稳定、保持流量稳定等功能。单一设备或工艺过程出现故障或偏差,极易借助生产系统之间的相互依存、相互制约关系,产生连锁效应,由一种故障引发一系列的故障甚至事故、灾害,同时从一个地域空间扩散到另一个更广阔的地域空间,这种呈链式有序结构的故障(或异常事件)传承效应称为故障链,所造成的危害和影响远比单一故障事件大而深远。过程装置的临近工厂发生重大事故,属于外部事件,也可能对过程装置所在的工厂产生影响。即使同一个工厂,很多过程装置也是高度关联的。这时,仅在一个过程装置内采取适当的减缓措施可能不一定消除其真正的原因,事故仍会发生。很多事故的发生是因为一个过程装置内做小的局部修改时未预见到由此可能引发的另一过程装置的连锁效应。确定初始事件时,宜对后果的原因进行审查,确保该原因为后果的有效初始事件;应将每个原因细分为具体的失效事件,如“冷却失效”可细分为冷却剂泵故障、电力故障或控制回路失效。过程装置中,静设备、动设备及仪表连锁各自构建独立,但又存在着密不可分的相互作用、风险传递关系。静设备与管道是构成系统的框架和主体,动设备是系统的动力来源,仪表连锁是系统的神经网络,任何一个环节偏离正常或失效都将影响其他体系的正常运行,给其他系统带来风险,甚至发生事故。尽管涉及重大失效可能性和失效后果的装置基本上设置了安全连锁系统(SIS)(安装有毒有害气体检测仪、超压泄放装置、温度与压力传感器等),但是系统中静设备、动设备或仪表连锁的非正常运行,如换热器窜流、泵的转速不稳定、机组的不规则振动、仪表的不足或失效都可能导致系统内相关设备的失效。再如:罐区一旦发生事故,将会对上下游的工艺都产生影响,连带着相关装置都需要停产,损失不小。某一部位的故障可能引起其他部件出现异常,例如转子轴系某轴承的故障有时会导致其他轴承的振动增大,而该轴承本身的振动变化反而不明显。

维修可以确保过程装置的可靠性及安全性。维修是使产品保持或恢复到规定状态所进行的全部活动。典型的维修包括准备、诊断(故障隔离和检验)、更换(拆卸和安装)、调整和校准、保养、检验以及原件修复7个步骤。其中,修复就是更换已经磨损的零部件,尽可能恢复设备的性能、精度和生产能力,即换件修理,使原件功能恢复。在修理过程中,采用更换新零部件的方法进行修理,具有更换维修时间短,维修质量有保障的优势,但过度使用换件修理时,维修工作受备件供应制约;过剩维修把尚能正常使用的零件也更换了,造成维修成本过高。但是,对于大型过程工业生产的停机损失,往往远高于因定期维修对于某些零部件过早更换所造成的经济损失。定期维修特别适合那些费用低、易更换的零部件。

对于许多类型的设备,制造、组装或检修的不合理,使得安装或检修后的试运转故障概率比以后的有效寿命期内的故障高得多。典型的故障处理活动就是维修。例如,某石化公司化纤厂PTA装置,高速泵的机封、高速轴、中速轴、滑动轴承频繁损坏,每年的检修费用都在百万元以上。其中,多次检修完上线试运行3~5min即将齿轮箱烧坏。在试车过程中,操作规程和设备技术文件规定是先开辅助油泵且齿轮箱油压达到0.2~0.3MPa后,在泵启动后(内置主油泵)主油泵开始工作这时辅助油泵自动停止工作,此时油压显示在0.18MPa,随着油温的升高油压很快下降到0.1MPa,而油压的正常范围是0.12~0.4MPa。正是因为油压偏低滑动轴承就得不到充分的润滑而导致齿轮箱烧坏。故障现象分析时,根据出现的问题列出了可能影响设备油压低的因素并一一排查处理。首先,对于油路系统仔细观察、渗漏检查没有发现漏点;更换新油冷器、油冷却器串联,问题没有解决;逐个检查各润滑点喷油嘴口,符合要求;更换新滑动轴承来排除滑动轴承与传动轴的配合间隙过大这个因

素；高速轴的窜量，通过摩擦片底下加减垫片来解决；抢修的时候更换一次旧减压阀，制作一套试压工具，经过试压证明减压阀的承受压力范围是正常的，可以排除这个因素；对主油泵进行解体测量各部位间隙，经过测量发现油泵滑动轴承间隙过大，齿轮端面间隙偏大，传动轴也磨损，所以对它们进行了修复；加工新传动轴，通过磨床达到表面粗糙度要求。对于传动轴两端的滑动轴承，设计如下的方案并且实施：材料选择耐磨性比较好的镍锡青铜合金，使滑动轴承与传动轴的径向间隙控制在 0.04mm 。对于齿轮啮合间隙过大的问题，选择在磨床上一次加工两个啮合齿的端面的方案，确保齿轮的两个端面的平行度和粗糙度均达到要求。油泵壳内端面也进行车床加工，为了达到表面粗糙度要求，制作研磨工具进行手工研磨内端面。齿轮与壳体配合间隙控制在 0.02mm ，最后重新组装，通过盘车检查轻松自如；将齿轮箱组装上线安装后在线试验：首先启动辅助油泵油压为 0.2MPa ，启动高速泵后油压瞬间值为 0.35MPa ，辅助油泵停止运转后主油泵油压为 0.3MPa ，当齿轮箱油温达到 55°C 时油压为 0.25MPa ，完全满足设备的操作要求。尽管如此，依靠频繁的检修、短运行周期来保证所谓的安全，使得对一部分设备往往过度检验，而对某些设备却缺乏针对失效模式进行深入检验造成检验不足，所以事故率较高；常常头痛医头，脚痛医脚，维护成本高，而效率却很低。确保制造过程中遗留的缺陷和在使用中产生的缺陷与损伤在预定的服役时间内不要影响装置的安全，是过程装置故障分析与处理的目的。检维修的过程是：发现缺陷或损伤的检测过程；针对缺陷判定能否继续使用和使用多久的容限或缺陷合于使用的评定过程；在线监控与保护性措施的实施过程。

过程装置中常见的不利后果主要为：火灾、爆炸、中毒、机器设备破裂、变形、老旧、温度检测和报警失效、压力检测和报警失效、流量检测和报警失效、产品质量不合格等。过程装备细分为过程设备、过程流体机械。其中，过程设备习惯称为过程静设备；过程流体机械习惯称为过程动设备，包括离心式压缩机、往复式压缩机、离心泵、往复泵、汽轮机、主风机等。从检修频率来看，以过程动设备较高。动设备的主要失效模式是密封或轴承等部件损坏。动设备的风险主要是由于设备功能故障而引起的经济损失和由其引发的二次事故。对于建成的设备，设备不可靠性的主要原因可追溯到设计不良、维护不足、操作不当等。设备故障（含缺陷）是造成化学灾害及安全事故的主要原因之一。事故统计分析表明，化工和石油化工业 40% 以上的事故是因设备问题所致，因此确保设备的完整性非常重要。设备运行期间发生故障通常是由于维修不足或不能预测故障造成的。随着过程装备的大型化、复杂化、重型化、集成化、原料来源日趋复杂、流程的紧密化、高速化、自动化和智能化，对过程装备检修周期的延长，过程装置故障处理技术的含量越来越高。一些关键设备一旦因故障停机，损失将是十分巨大，值得重视。基于状态监测所获得的信息 + 已知的结构特性和参数 + 环境条件 + 设备的运行历史（包括运行记录和曾发生过的故障及维修记录等），对设备可能要发生的或已经发生的故障进行预报和分析、判断确定故障的性质、类别、程度、原因、部位，指出故障发生和发展的趋势及其后果，提出控制故障继续发展和消除故障的调整、维修、治理的对策措施，并加以实施，最终使设备复原到正常状态。

0.1 过程典型静设备

按照用途和结构特征，过程静设备通常是容器、塔器、换热器、反应釜、固定床反应

器、流化床反应器和管式炉等。中华人民共和国《特种设备安全法》将压力管道与锅炉、压力容器等一道列入涉及生命安全、危险性较大的特种设备。压力管道是指利用一定压力输送气体或液体的管状设备。当前,承压类特种设备不断向高参数方向发展,设计边界不断拓展,如出口压力为 35MPa,出口温度达到 630℃ 的电站锅炉;内直径达 5000mm、壁厚达到 340mm,工作压力为 20MPa、工作温度为 454℃ 的煤液化加氢反应器;设计温度达 -253℃ 的 300m³ 液氢储罐等。关键的静设备例如:大型塔器、特殊材质压力容器、反应器、换热设备、大型加热炉、大型储存设备、冷箱、特种阀门。某集团 22 个生产厂仅煤化工设备数量达到几十万台。某石化公司有在用压力容器 5125 台、在用压力管道 17255 条 (2044.81km)、在用锅炉 20 台等。某气田主要分为主体、区块两部分,普光主体 16 座集气站,16 条酸气管道共计 37.78km,管网截断阀室 29 座;区块 7 座集气站,7 条酸气管道共计 23.84km,管网截断阀室 18 座。乙烯裂解炉裂解气大阀的最大公称直径 1200mm,重约 24t。天然气球罐容积已达 1 万立方米;乙烯球罐容积已达 2000m³。对于一个千万吨炼油厂,液态烃球罐数量一般在 30~50 台。影响球罐失效的因素涉及设计、制造、组装、使用等各个环节。据不完全统计,我国球罐在使用中爆炸、破裂以及在水压时破裂的事故率达 2% 左右。液化天然气储罐容积已达 20 万~25 万立方米。大型原油储罐容积已达 15 万~20 万立方米。成品油储罐单台容积为 10 万~15 万立方米。锻环式加氢反应器最大外径 6800mm、厚度 450mm、最大长度 90m、重达 2000 多吨。煤液化装置中的加氢反应器的最高温度达 456℃,最高工作压力达 20MPa。反应器催化剂活性大幅下降后,即使不断改变反应温度,反应器运行指标仍难以达到要求时,装置必须停工并更换催化剂,装剂量大,装剂工作耗时长。高效缠绕管式换热器最大换热面积超过 2.5 万平方米。

芬兰和马来西亚学者对 364 起静设备事故进行研究后发现,最常引发事故的设备依次为管道 (25%)、反应器 (14%)、储罐 (14%)、压力容器 (10%)、传热设备 (8%) 和分离设备 (7%),这 6 种设备导致的事故占了总数的 78%。

压力高的容器容易发生裂纹扩展。过程静设备常常会发生内壁腐蚀、密封失效等故障。静设备可能发生的 6 种失效模式有:总体塑性变形 (Global Plastic Deformation)、渐进塑性变形 (Progressive Plastic Deformation)、失稳 (Instability/Buckling)、疲劳 (Fatigue)、失去平衡 (Loss of Equilibrium)、蠕变 (Creep)。其中,蠕变失效是指结构长期在高于蠕变温度以上工作,使得发生断裂或过量变形。承受着交变应力作用时,随着操作过程升温升压、降温降压易在缺陷和结构不连续处产生疲劳破坏。事实上应该还有一种失效模式——脆性断裂,但对于这种失效模式,如同在许多其他标准中一样,不是通过设计校核的方法,而是通过采取一定的制造工艺和检验手段,从而保证材料的韧性来加以防止。除此之外,失效模式还有:塑性垮塌 (Plastic Collapse)、局部失效 (Local Failure)、棘轮 (Ratcheting)。

损伤机理可以是:减薄、应力腐蚀开裂,此外设备制造遗留问题、机械疲劳、人因失误、机械损伤以及设备功能性失效 (如导轨断裂或倾斜、安全联锁装置失效等) 等因素同样会导致设备出现失效。减薄腐蚀速率大于 0.254mm/a 的设备或管道,值得关注。

根据《质检总局关于 2016 年全国特种设备安全状况情况的通报》,截至 2016 年底,全国特种设备总量达 1197.02 万台中,锅炉 53.44 万台、压力容器 359.97 万台;气瓶 14235 万只、压力管道 47.79 万千米。按损坏形式划分,承压类设备 (锅炉、压力容器、气瓶、压力管道) 事故的主要特征是爆炸或泄漏着火等。锅炉事故发生在使用环节 16 起、安装环节 1 起、修理环节 1 起,其中,违章作业或操作不当原因 7 起,设备缺陷和安全附件失效原因