

压力容器失效分析

吴粤燊编著



北京经济学院安全工程系

1987、10

前 言

《压力容器失效分析》除了简单介绍有关失效分析的目的、重要性及基本原则等基础知识外，重点论述压力容器失效分析的思路和方法。包括传统中常用的分析方法和现代管理科学中所采用的系统工程的分析方法。这些方法既可以用于事前分析（失效预防或事故预测），也可以用于事后分析（事故调查分析）。书中最后一章有典型的压力容器事故实例分析。

本书可供安全技术人员、设备管理人员、压力容器安全监察检验人员参考，也可作为高等院校安全工程专业的教材。

由于作者水平有限，书中会存在不少缺点错误。恳切地希望广大读者在使用过程中给予批评和指正。

目 录

第一章 概论.....	(1)
§ 1 — 1 失效分析简述.....	(1)
§ 1 — 2 压力容器的失效分析.....	(13)
第二章 传统的容器失效分析方法.....	(26)
§ 2 — 1 基于断裂型的分析.....	(26)
§ 2 — 2 基于断裂时载荷状态的分析.....	(43)
第三章 系统工程的分析方法.....	(55)
§ 3 — 1 事故树形分析法.....	(55)
§ 3 — 2 “鱼骨”图分析法.....	(68)
第四章 压力容器失效事故分析程序与实例.....	(73)
§ 4 — 1 失效事故分析的程序、内容与实施方法.....	(73)
§ 4 — 2 容器失效分析方法应用实例.....	(79)

第一章 概 论

§1—1 失效分析简述

一、失效与失效分析

(一) 失效

机器设备或其结构零件在使用期限内达不到设计规定的正常工作能力，也就是失去设计规定的效能，称为“失效”。所以严格讲来，失效不仅是机器设备的破坏、故障，而且也应包括设备生产能力、工作效率等的衰减。但在通常情况下，失效主要还是指机器设备或零件的损坏。

机器零件的失效主要有三种类型。一是过量变形，包括过量的弹性变形和过量的塑性变形；二是表面状态和尺寸的变化，包括零件表面腐蚀磨损和零件尺寸的改变；三是断裂，包括各种型式的破断开裂。

(二) 失效分析

失效分析是指运用各种手段和措施，研究失效的特征或机理，探清失效的型式或过程，以查明机件失效的原因，从而找出解决或预防的有效措施。

(三) 失效分析的意义和作用

从上述的失效分析定义可知，失效分析的目的是查找机器零件失效的直接原因，并提出防止事故的对策。所以失效分析对保证设备正常运行和安全生产有着重要的意义和重大的作用。

失效分析的主要作用可以概括为以下四个方面。

1. 找出了事故预防对策 通过失效分析，全面查明了事故发生的原因，包括直接的和间接的原因，或者是主要因素和次要因素。这样就可以针对这些原因在各有关的环节中找到防止发生类同事故的相应措施。其中主要包括：

(1) 从机件设计不完善而造成事故的教训中，找到改进设计结构的具体对策；

(2) 从产品质量不良而引起事故的教训中，找到改变制造工艺条件、消除设备缺陷的具体对策；

(3) 从使用不当而发生事故的教训中，找出正确操作、合理维护的具体对策；

(4) 从设备管理混乱而导致事故的教训中，找出加强设备管理的具体对策。

2. 明确了事故责任 失效分析弄清了事故过程，查明了事故原因，事故的责任者自然就明确了。这样就可以根据情节轻重、损失大小和内外有别的原则进行适当的处理：

(1) 对负有事故主要责任的职工进行批评教育、经济上或行政上的处分，直至追究其刑事责任；

(2) 对引进设备的质量事故，根据失效分析可向外商索赔，或提出技术仲裁；

(3) 对具有故意破坏嫌疑的设备事故，失效分析结果可作为公安机关进行侦破工作的重要线索和依据。

3. 提高了企业(社会)的技术水平或管理水平 通过失效分析，可以归纳总结出大量的经验教训，加深对各种关键设备或零部件的特性或失效方式的认知，摸清设备的安全运行规律

和可靠性,使企业(社会)的技术水平或管理水平得到进一步提高:

(1) 根据一些常见的失效类型或部件的失效分析所积累的经验,可以总结一套失效理论或对设备(或部件)可靠性进行评估的方法。例如构件(特别是大型焊接构件)的脆性断裂就是根据大量实际失效事例进行分析而逐步认识其规律的;

(2) 对仿制产品或其关键部件进行失效分析,有利于“吃透”引进技术,防止照搬照抄外国的技术条件,为提高设备效率,延长设备寿命或改进产品的設計提供了依据;

(3) 对新产品在設計过程中的试运行或模拟試驗的人造失效进行失效分析,可以摸清其失效特征和失效过程(或类型),做为选材和制订工艺条件的依据。

4. 为制订法规提供依据 大量失效失折总结出的经验教训和摸索到的自然规律可作为建立各种法规和规划的依据或重要参考资料,其中包括:

(1) 制订或修订现行技术规程、规范和标准;

(2) 制订各种经济法,如产品质量法、安全法等等;

(3) 制订国家或地区的开发规划和经济发展规划。

(四) 失效分析的内容与分类

失效分析的内容很多,也有各式各样的分类方法:

从分析的目标和角度来看,有失效统计分析和失效过程(直接原因)分析。前者以某一类失效事件(设备)为分析目标,根据失效统计的原始数据资料,从大量的失效事件中分析探索这一类失效事件(设备)的各种因素,并从中总结出预防这一类失效事件发生的有效措施;后者以某一次失效事件(设备)为分析目标,根据失效后的各种现象,分析失效的过程和产生的原因,并从中获得预防失效的办法或措施。

在失效过程和原因的分析中,又可以划分为事前分析和事后分析。前者是在失效现象未发生前,根据一般规律和经验以及设备的具体情况(使用条件、有无缺陷等),预测设备是否会失效,或发生什么样类型的失效,所以也可称为“失效预测”,目的是寻求防止失效的办法或措施;后者是在失效发生以后,根据各种现象,通过检测、分析鉴定,查明失效的原因。

按照造成失效的各种原因是否包括管理方面的因素在内,又可以分为广义的失效分析和狭义的失效分析等。

(五) 失效分析与其它学科之间的关系

失效分析目前正在逐步发展成为一门独立的学问——失效学。这是一门涉及与应用其它学科最多的多边缘学科。而且它与其中的许多学科又可以互为依据,相互促进。例如断口学是失效分析的重要基础,而失效分析中的一些结果,又可以丰富断口学的内容;焊接工艺知识有助于提高失效分析效率与水平,而由于焊接工艺而造成的失效,通过分析结果的反馈,又可以改进或提高焊接工艺水平;断裂力学理论常常用作失效分析的断裂判据,而断裂失效分析又可以验证断裂理论。

图1-1表示失效分析与其它学科的关系。(1)图中单箭头表示别的学科作为失效学的基础或依据,双箭头表示两种学科相辅相成,互为依据。

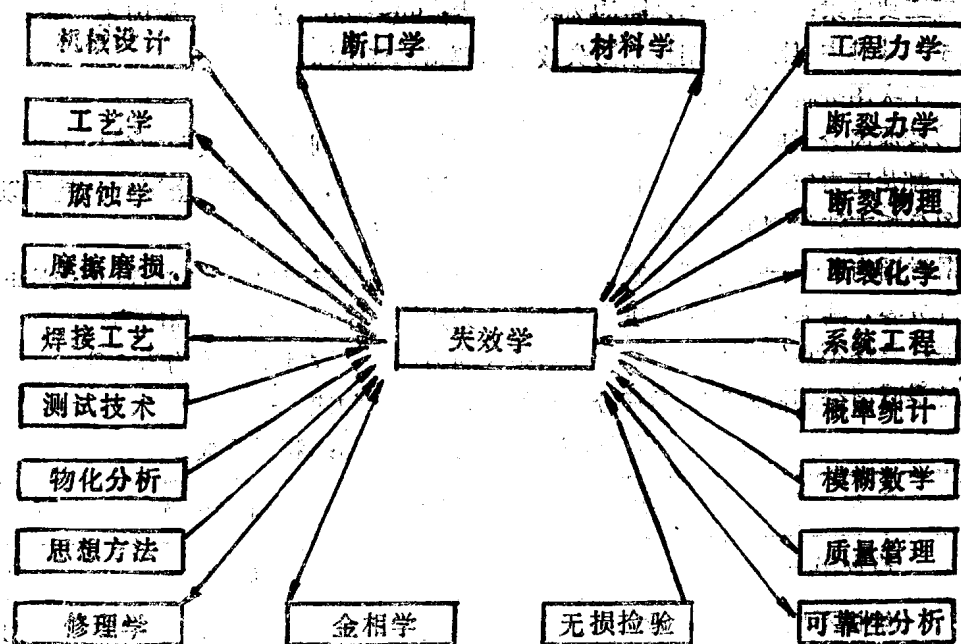


图 1—1 失效学与其它学科的关系

二、失效统计分析

统计分析是失效的宏观分析方法。有关的管理部门或领导机构可以从大量的失效事件中进行分类统计，摸清事故规律，找出主要矛盾，最后作出决策。

下面简述常用的两种失效统计分析方法。

(一) 主次图

主次图又称排列图，最先是意大利经济学家Pareto博士用以统计分析社会财富占有分布情况，所以也称为Pareto曲线。这种分析方法目前已在质量管理分析、可靠性分析、事故统计分析等许多方面得到了广泛的应用。

1. 分析程序与方法 应用主次图进行统计分析，一般按下列程序进行分析：

(1) 将所要统计分析范围内的失效事件按不同的目的进行分析统计列出。分析的方法则根据实效分析的目的而定。例如按技术原因分类或管理原因分类；也可以按失效设备或构件的用途或型式分类。

(2) 计算出各类项目的相对百分数和按大小顺序排列的累积百分数。计算方法是：

$$\text{某一失效项的相对百分数} = \frac{\text{某项失效件数}}{\text{累积失效总数}} \times 100\%;$$

$$\text{累积百分数} = \frac{\text{前若干项的失效件数}}{\text{累积失效总数}} \times 100\%;$$

$$\text{累积失效总数} = \text{统计分析范围内的总失效件数}。$$

(3) 作出失效主次图。在横座标上列出各分类项目，在纵座标上标注上失效件数（左）和累积相对百分数。在座标内用直方图表示各分类项目的件数，并按各若干项的累积相对百分数的座标点连成折线。

(4) 从主次图上可以直接分出失效的主次因素。通常的划分方法是：累积百分数在80%

以內的为主要因素；80~90%之間的为次要因素，90~100%之間为一般因素。

(5) 针对主要因素，制订预防失效的主要措施或办法。

2. 主次图分析实例

(1) 按原因分类的主次图 我国化工容器的使用量特别大，尤其是在氮肥工业中，很多主要设备都是压力容器。如何加强对这些压力容器的管理，保证其安全运行，就可以通过这种主次图分析方法找到关键所在。

根据对国内五十一个中型合成氨厂的调查统计，共发生失效事故260件。按失效的最主要原因进行分类，其大小顺序是：违章作业造成失效的为151件；维护不周的为43件；设备腐蚀的为24件；检修不良的为20件；制造缺陷造成的为16件，设计不完善的为6件。

按各类原因分别计算其相对百分数和累积百分数列如表1—1。

表1—1 各种原因的相对百分数和累积百分数

序 号	原因分类	件数	累计件数	相对百分数	累积百分数
1	违章作业	151	151	58.1	58.1
2	维护不周	43	194	16.5	74.6
3	设备腐蚀	24	218	9.2	83.8
4	检修不良	20	238	7.7	91.5
5	制造缺陷	16	254	6.2	97.7
6	设计不完善	6	260	2.3	100

根据上表所列的数据，可以作出图 1—2 的压力容器失效原因主次图。

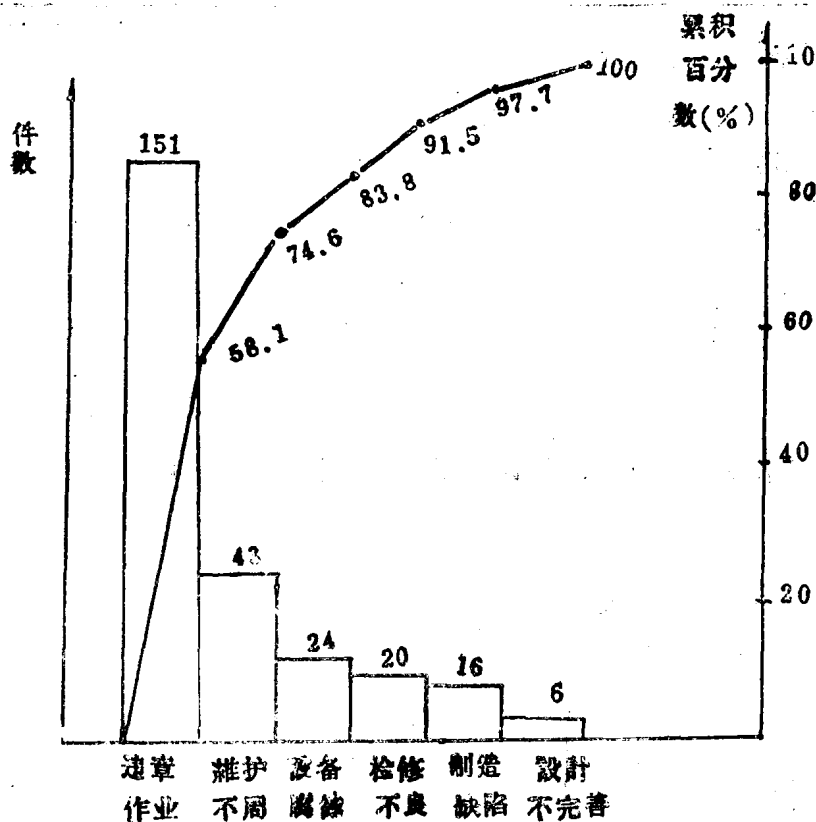


图 1—2 中型合成氨厂压力容器失效原因主次图

从图中可以看出，失效的主要因素是违章作业和维护不周。设备腐蚀是次要因素。而检修不良、制造缺陷和设计不完善则为一般因素。因此当前这类企业的压力容器安全工作应重点抓设备的使用管理。包括严格贯彻安全操作规程和设备维护制度等。

在按原因分类的失效统计分析中，往往会迁到这样的问题，即一件设备失效事故的主要原因有时不是一个，而是两个或多个。在这种情况下，以按设备失效原因的件次进行统计比按设备失效件数进行统计更为适宜。因为按失效原因件次进行统计在实用效果上更能满足需要，容易抓住主要薄弱环节，提出有针对性的预防失效措施。按失效原因件次统计就是按引起失效的一种或几种关键因素分别统计。一台设备的失效主要因素有两个，每一种原因就作为一件次来统计。

例如，据统计，我国在1975年至1979年的五年期间，发生破裂失效的大型球形容器为24台。如果按最直接的原因进行分类统计，则为：应力腐蚀造成的有9台，火灾引起的有5台，组装焊接缺陷直接造成的有4台，选材用材失误的有3台，超压破裂的有2台，其它原因造成的为1台。但是其中很多台破裂的球罐也与组装焊接缺陷有密切关系。例如应力腐蚀引起破裂的9台容器都存在程度不同的组装焊接缺陷。而且正是这种缺陷产生的应力集中，加速器壁的应力腐蚀，促使容器破裂失效。这些球形容器的破裂失效事故，按失效件数统计和按失效原因件次统计的结果列如表1—2。

表 1—2 球形容器破裂失效原因分类统计

失效原因	件 数	相对百分数	件 次	相 对百分数
组装焊接缺陷	4	16.7	21	45.7
应力腐蚀	9	37.5	11	23.9
选材用材失误	3	12.5	6	13.0
火 灾	5	20.8	5	10.9
超 压	2	8.3	2	4.3
其 它	1	4.2	1	2.2
合 计	24	100	46	100

按这两种统计方法作出的失效原因主次图分别如图 1—3 (a) 和 (b)。

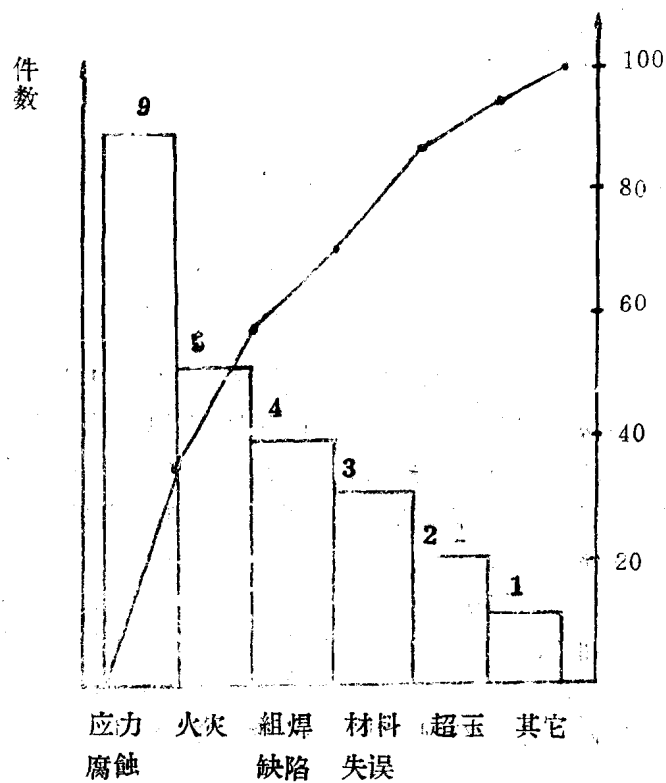


图 1—3 (a)

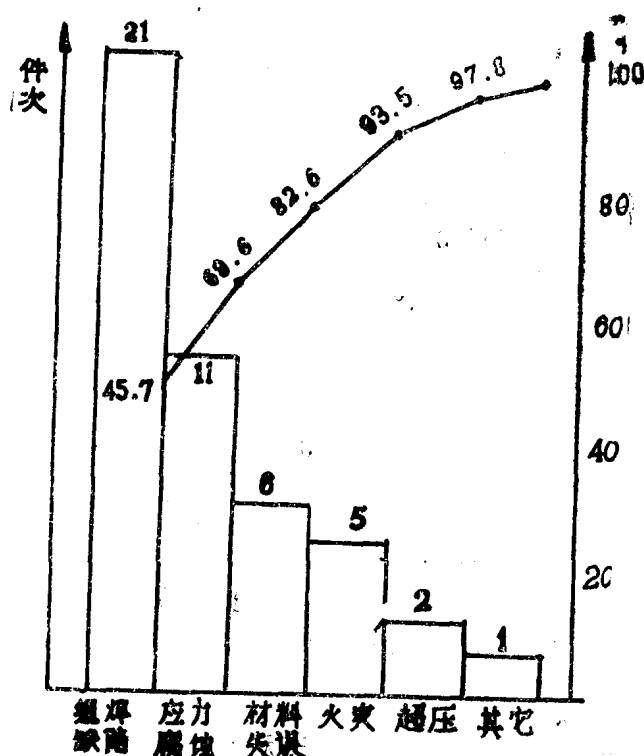


图 1—3 (b)

图 1—3 球形容器失效原因主次图

从图 1—3 可以看出，用两种不同的统计方法作出的主次图是不同的。按失效件数进行统计的结果，失效的主要因素是应力腐蚀、火灾、组装焊接缺陷；而按原因件次统计，主要因素则是组装焊接缺陷和应力腐蚀。相比之下，后一种方法得出的主要因素明确，也符合实际情况。在这类容器失效事件中，组装焊接缺陷显然应该是首要因素，而偶然出现的火灾，则不应为主要因素。

(2) 按设备类型分类的主次图 作主次图统计分析时，如何分类，是**根据需要、也就是根据分析所要达到的目的来确定的。例如某地区的气瓶失效事故较多，五年内共发生气瓶破裂失效30件。要通过统计分析确定应重点抓哪些种类的气瓶。按气瓶种类进行分类统计的失效件数是：民用液化石油气体气瓶16件，低压液化气体气瓶8件，溶解乙炔气体气瓶3件，压缩气体气瓶2件，高压液化气体气瓶1件。这样，按作图分析程序可以作出如图 1—4 的各类气瓶事故主次图。

由图 1—4 可以看出，民用液化石油气体气瓶和液化气体气瓶是主要因素。所以抓气瓶的安全工作，重点首先应放在这两种气瓶的各个环节上。

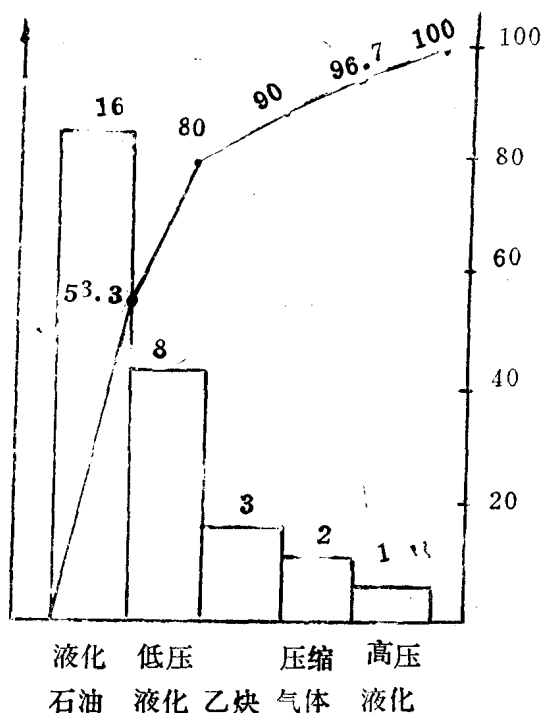


图 1-4 各类气瓶事故主次图

(二) 失效率

在上述的各类气瓶失效事例统计中，破裂失效最多的是民用液化石油气体气瓶。但并不能由这些统计数字得出结论，液化石油气体气瓶要比其它的气瓶更容易失效（发生事故）。因为其中还有各类气瓶的实际使用量问题。要对比各类设备、系统或装置部件的失效状况大小（难易），就得用失效率。

失效率，或称事故率、故障率，是指设备、系统或装置部件在工作（运行）一定的时期后，单位时间内发生失效事故或故障的概率。常用 λ 表示。失效率与工作（运行）时间有关，所以是时间的函数，可记为 $\lambda(t)$ 。

失效率的单位一般用时间单位表示，用得较多的是 $\%/10^3$ 小时。但对于一些可靠性较高，即失效率较小的设备或部件，这单位还是太大。所以这样的一些元件就有一个专用的单位，称为菲特（Fit），相当于 10^{-9} /元件·小时。

压力容器的失效（事故）率的单位目前用 $1/\text{台} \cdot \text{年}$ 。它表示一台容器运行一年内平均统计所发生的失效（事故）件数。由统计期间的失效（事故）容器件（台）数除以容器实际运行的台数与年数的乘积计算而得。当然，这一单位是相当大的，应该有一个较小的专用单位。

例如，上面所述的气瓶事故较多的地区，五年内平均每年投入使用的各类气瓶数是：民用液化石油气体气瓶为320,000个，低压液化气体气瓶为28,000个，溶解乙炔气瓶为5000个，压缩气体气瓶为54,000个，高压液化气体气瓶为12,000个。则各类气瓶的事故率可列如表1-3。

表 1—3 某地区各类气瓶的事故率

类别 项目	液化石油 气体气瓶	低压液化 气体气瓶	溶解乙炔 气 瓶	压缩气 体气瓶	高压液化 气体气瓶
五年内 事故件数	16	8	3	2	1
气 瓶 数	3.2×10^5	2.8×10^4	5×10^3	5.4×10^4	1.2×10^4
失 效 率	$5 \times 10^{-5}/\text{台} \cdot \text{年}$	$3.33 \times 10^{-4}/\text{台} \cdot \text{年}$	$6 \times 10^{-4}/\text{台} \cdot \text{年}$	$3.7 \times 10^{-5}/\text{台} \cdot \text{年}$	$8.3 \times 10^{-5}/\text{台} \cdot \text{年}$

由表 1—3 可以看出,失效(事故)率最高的是溶解乙炔气瓶和低压液化气体气瓶,而不是民用液化石油气体气瓶。也就是说,就这一地区而言,这五年内最容易发生失效事故的,是溶解乙炔气瓶和低压液化气体气瓶。

如果要分析观察设备的失效状况或趋势,或者要检验安全管理工作或措施贯彻执行的效果,衡量的指标也应是设备失效率,而不是失效件(台)数。仍以压力容器为例,设某地区从 1979 年至 1985 年内历年的容器(包括民用液化石油气体气瓶)使用量和破裂失效台数如表 1—4 所示。

表 1—4 压力容器失效事故情况统计

年度 项目	1979年	1980年	1981年	1982年
失效台数	10	11	11	13
运行台数	4.8×10^5	5.5×10^5	6×10^5	7.5×10^5
失效率	$2.08 \times 10^{-5}/\text{台} \cdot \text{年}$	$2 \times 10^{-5}/\text{台} \cdot \text{年}$	$1.83 \times 10^{-5}/\text{台} \cdot \text{年}$	$1.73 \times 10^{-5}/\text{台} \cdot \text{年}$
1983年	1984年	1985年		
12	14	14		
7.5×10^5	8.5×10^5	9×10^5		
$1.6 \times 10^{-5}/\text{台} \cdot \text{年}$	$1.65 \times 10^{-5}/\text{台} \cdot \text{年}$	$1.56 \times 10^{-5}/\text{台} \cdot \text{年}$		

根据表 1—4 的数据可以作出该地区的容器失效台数与失效率曲线,如图 1—5。图中虚线是历年来失效容器台数的变化情况,实线表示历年来容器失效率的变化情况。由图中可以看出,尽管失效的容器台数都是逐年增加,有上升的趋势,但容器的失效率实际是逐年下降的。

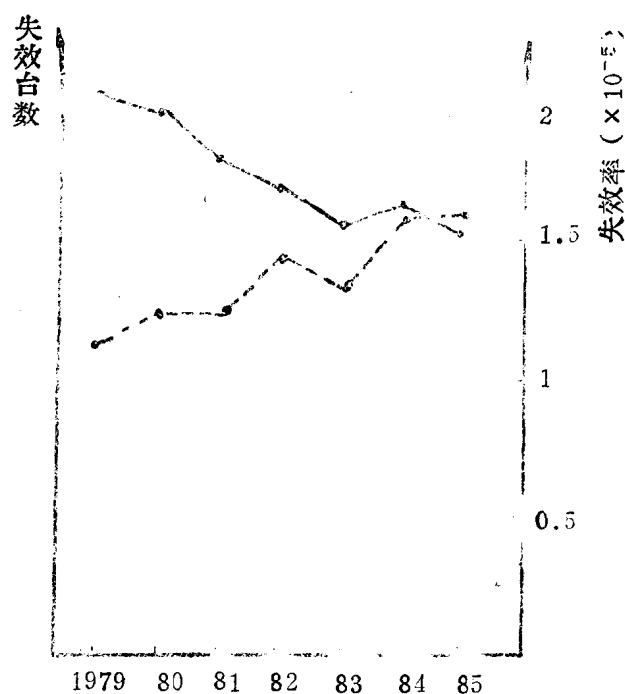


图 1-5 压力容器失效台数与失效率曲线

三、失效分析的思想方法

设备失效分析一般包括失效统计分析和失效过程(原因)分析两大类。有关前一种分析方法前面已作了简单的介绍。本书主要是讨论研究后一种分析方法。在这一节中,先简要说明进行失效分析的思想方法。

失效分析是一项十分严谨的工作,分析结论的正确与否至关重要,因为错误的失效分析结论往往会导致严重的后果。

失效分析也和对其它事物的分析一样,必须坚持客观、全面,防止主观、片面,只分有析出发点正确,才能得出正确的结论。

下面介绍在失效分析的思想方法上通常应该遵守和运用的基本原则和基本方法。

(一) 基本原则

1. 整体观念原则,所谓整体观念原则就是进行失效分析时始终把失效事件作为一个“整体”来考虑。因为设备的失效往往是多方面的因素造成的,最主要包括三个方面,即物(设备);环境(包括使用条件)和人。这三方面的因素又是相互联系的。所以设备一旦失效,就要把它们(设备、环境、人)当作一个系统来考虑,即所谓三为一体地进行分析,既要考虑设备本身存在的问题,包括失效机件的缺陷与质量情况和与它有联系的邻近部件的状态;也要考虑管理和操作人员的情况,包括人员的思想情况、技术水平和身体状况。不但要考虑正常时的状态,还得考虑异常状态。例如人的操作失误就可能与它的健康或疲劳程度有关;更要考虑周围环境和使用条件(工作压力、温度、介质的特性)对失效的机件有什么影响。不但要考虑在正常条件下的影响,还得考虑有可能产生的异常情况所带来的影响。这样,

把各方面可能存在的失效因素全面作了考虑以后,再根据调查或试验、检验所得的结果,采用“消元法”把其中不可能存在的因素逐一验证排除,最后再对余下的因素再进行认真的分析研究。如果没有“整体观念”,仅限于分析破坏的部件,或囿于在正常条件下找原因,就往往得不出结论或分析结论错误。例如,日本有一批盛装一氧化碳的气瓶,使用几个月后即有几个发生爆炸事故。对失效的气瓶进行检验,气瓶有足够的設計强度裕度,瓶体无表面腐蚀和其它严重缺陷,通过对失效过程的分析,认为没有人员的影响因素。对断口分析鉴定是应力腐蚀引起的失效。但干燥的一氧化碳对瓶体材料一般是不会产生应力腐蚀裂纹的,只有含水分的一氧化碳才会发生。而根据气体制造厂的工艺流程和历来的检验数据表明,所装的气体,水分含量是微量的。经过反复调查,原来这批气瓶在充装前,放在室外露天处,受雨水等的渗入而使瓶内的介质具备了应力腐蚀的条件,最后导致气瓶爆炸破裂事故。

2. 动态观点原则 所谓“动态观点原则”就是进行失效分析时要按照一切事物都在不断地变动的观点来考虑问题。不但是部件所承受的载荷,所处环境条件,如温度、湿度、介质中的杂质等随时在变化,而且部件本身内的状态,如裂纹、腐蚀等缺陷也在不断变化,操作人员的各种素质也是在不停地改变着。不能用一切事物都是停止不动的观点来分析问题。例如,某厂有一台高压容器,1954年安装时进行了试验压力为 400 kgf/cm^2 的耐压试验。1959年,系统大修,应进行定期的全面检验。有人事前就认为没有必要作耐压试验,因为安装前已经进行过。结果在 338 kgf/cm^2 的耐压试验压力下,整个容器爆破。事后他们又觉得惊奇,认为不应该在比前一次试验压力低那么的压力下破裂。这就是因为没能按“动态观点原则”去分析问题,实际上容器内的裂纹经过几年来的运行已经有了很大的扩展,设备的状态已经发生了根本的变化。

3. 从现象到本质的原则 进行失效分析,不能只找到产生失效的现象就算完结,而必须透过失效现象找到失效的本质问题。只有这样才能吸取教训,提出解决办法或预防措施。例如某研究院的一个液化环氧乙烷($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$)气瓶,充装后一直在仓库内存放,结果在无任何人触动以及环境没有任何明显变化的情况下突然发生爆炸,并有碎片飞出。经检查,气瓶本身无严重腐蚀、裂纹、缺陷等,气瓶有显著的塑性变形。各种迹象表明,气瓶属于延性破裂,这是比较容易得到的结论。但这不过是一个现象的论断,而不是失效本质的结论。从这个论断中不能总结出具体经验教训,也提不出有效的事故预防措施。而必须通过失效机制,从这种现象追溯到它的本质,即是什么原因导致它发生延性断裂的。经调查,破裂的气瓶瓶壁温度明显高于室温及附近气瓶的温度。而温度的升高是由于瓶内的单体,部分发生聚合,产生大量的热,引起其余的液体迅速蒸发,形成很高的内压,导致气瓶的破裂。虽然瓶内介质曾经加有阻聚剂,但充装气体已经过了很长时间,阻聚剂估计已经失效。由此得出的分析结论就是:气瓶的破裂是由于所装介质易于聚合。虽加有阻聚剂,但充装后贮存时间过长,阻聚剂失效,导致瓶内的介质部分聚合、放热,使液体大量蒸发形成内压升高所致。并由此得到的教训和措施是:盛装易于发生聚合反应的介质的容器,不但要添加阻聚剂,而且贮存的时间不能太长。

4. 一分为二原则 进行失效分析坚持一分为二的原则,就是不要主观武断,对某些产品或某些单位盲目崇拜,对这些方面的失效因素没有进行考虑。例如我国某石化公司引进的装置设备中,有一台环状圆筒形高压大型汽包,外商设计制造成多角尖状圆筒形。从受力分析

来看,这种结构是很不合理的。因为在斜口连接处由于结构形状的严重不连续而存在很大的弯曲应力。我有关人员不盲目相信国外某权威公司所作的“空头保证”和所谓先进设计结构的吹嘘。通过认真的科学分析与计算,和关于设备安全可靠性的论证(事前失效分析),与外商进行了长达三年之久的谈判、辩论,最后对方终于承认设计失误,同意重新供货。所以对引进设备的失效分析,应该坚持一分为二的观点,不论盲目地认为,引进的设备,本身质量一定没有问题,几年来的实践证明,引进的设备中有不少存在缺陷,有些还是严重缺陷,甚至造成了重大事故。

5. 纵横交汇原则 导致设备失效的因素是多方面的,而且同样的条件在不同的使用(服役)阶段内所产生的效应也不完全一样。一般的机电设备,在它整个使用(服役)阶段内失效率的高低,普遍服从所谓“浴盆曲线”,也就是说在使用期限内,初期和后期阶段比较容易失效,而在中期阶段的失效则是偶然的。这是从设备本身的特点来分析的。但还必须考虑其它的因素的影响。因为同样的外界条件(压力、温度、介质等)在不同的使用(服役)阶段内对引起失效所起的作用则是不同的,而且没有统一的规律。

(二)基本方法

1. 系统方法 系统方法又称相关性方法,就是把失效类型、失效模式、断口形貌特征、运行工艺条件、制造材料特性、制造工艺过程、使用和维护情况等,放在一个研究系统中,从总体上加以考虑,从而从中发现在设计结构、制造质量、材料选用、使用维护等方面可能引起失效的因素,并据此深入进行测试分析(包括模拟试验或失效重现试验),找出确切的失效原因。系统方法的前提和出发点是整体性原则,基本特点是从普遍到特殊,从一般到个别,从单项分析到综合联系,逐步缩小范围。为了使失效分析工作既不会误失方向,也不致于“大海捞针”,要求尽可能地搜集与全局性有关的资料和测试信息数据,正确地确定分析系统的范围。

2. 抓关键方法 从设备或部件的失效现象中首先寻找发现具有明显特征而又对失效分析起主要作用的因素,然后由此进一步深入分析查证。例如断裂失效,有可能时,可以首先查找断裂源,然后由裂源所在的部位、断口形貌、部件的受载型式等分析造成断裂的原因。

3. 对比方法 将失效的系统、设备或装置部件与条件相同或相似而并没有发生失效的其它系统、设备或装置部件相对比,从中找出它们在某些方面的差异,然后从这些差异条件中找原因。或者通过对其它相同或相似的系统和设备等进行测试分析,查找这些设备有无失效前的征兆。例如上面谈到的一氧化碳气瓶断裂失效,就是通过对比方法,查找出与它条件相同(同批制造、同时投入使用、充装同样的气体)的其它气瓶没有发现问题,只是有几个和它同时放在室外临时存放且同时充装的气瓶,通过检验发现有应力腐蚀裂纹,从而由此追查 to 气瓶断裂的直接原因是充装前渗入雨水。

4. 历史方法 通过查阅档案资料,或向有关的各类人员进行调查,了解与所分析的失效设备同样的使用条件和构造的其它设备的过往运行状况,包括出现过什么异常现象、是否发生过失效事故、什么样的失效类型、由什么原因引起的等等,以摸索这类设备容易发生的失效原因,并由此作出推断,再进行深入分析验证。即运用归纳法和演绎法。

5. 逻辑方法 根据已经掌握的设备资料,包括设计、材料、制造、使用和检验的情况等,和失效现场的调查观察材料,以及分析测试所获得的数据信息,进行分析、比较、综合、

归纳和概括,作出判断和推论,查找可能引起失效的原因。

进行失效分析时,应根据分析对象的具体情况、包括设备、环境和人员的情况和失效现场的状况等,运用其中的一种方法,或几种方法同时兼顾使用。方法运用得当,就可以缩小分析系统的范围,提高分析工作效率,得出正确的分析结论。否则就会走弯路,范围搞得太大,浪费时间、精力和费用,还可能耽误其它工作的进程。

§ 1—2 压力容器的失效分析

一、压力容器

要对压力容器进行失效分析,必须首先熟识压力的基本情况,因此在本节先介绍一下压力的定义或范围、种类和结构形状。

(一) 定义或范围

压力容器又称受压容器,是指工作时需要并能够承受流体压力的密闭式容器。但在工业生产中,承载压力的容器是很多的。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。于是许多国家就把这样的一些容器作为一种特殊设备对待,由专门机构对它们的设计、制造、使用、检验和管理等进行安全监督,并有专门的技术规范和安全管理规程。这样的一种作为特殊设备的压力容器,当然需要划定一个范围,不可能也没有必要将所有承载压力的容器(例如高储水塔)都作为特殊设备。习惯上,我们所说的压力容器,就是指这一类作为特殊设备的容器。

压力容器既然指的是那些比较容易发生事故、特别是事故危害比较大的特殊设备,那么它的范围就应该从发生事故的可能性和事故危害的严重性来考虑。一般来说,压力容器发生破裂爆炸时,其危害的严重程度与容器的工作介质、工作压力和容积等都有关。

根据我国《压力容器安全监察规程》的规定,该规程适用于同时具备下列三个条件的容器:

- (1) 最高工作压力 $P_w \geq 1$ 公斤力/厘米² (不包括静压力,下同);
- (2) 容积 (V) ≥ 25 升,且 $P_w \times V \geq 200$ 升·公斤力/厘米²;
- (3) 介质为气体、液化气体和最高工作温度高于标准沸点(指在一个大气压力下的沸点)的液体。

上述三个条件也可以作为压力的范围或定义。

(二) 压力的种类

压力的种类形式很多,有许多种分类方法。例如,按容器的相对壁厚(壁厚与壳体直径之比)分,有薄壁容器和厚壁容器;按壳体承受压力的方式分,有内压容器和外压容器;按容器的工作壁温分,有高温容器、常温容器和低温容器;按壳体的几何形状分,有球形容器、圆筒形容器和其它特殊形状的容器等;按容器的制造方法分,有焊接容器、锻造容器、铆接容器、铸造容器、还有各种组合式容器等;按构造材料分,有钢制容器、铸铁容器、有色金属容器和非金属容器;按容器的放置方式分,有立式容器和卧式容器等。

从压力的使用特点和安全管理方面考虑,压力容器一般分为两大类,即固定式容器和移动式容器。

1. 固定式容器 固定式容器是指除了用于运输气体的盛装容器以外的所有容器。这类

容器有固定的安装和使用地点，工艺条件和使用操作人员也比较固定。容器一般不是单独装设，而是用管道与其它设备相连。

固定式容器按它的最大工作压力又分为低压容器、中压容器、高压容器和超高压容器四种。最高工作压力小于16公斤力/厘米²的为低压容器；压力为16至小于100公斤力/厘米²的为中压容器；压力为100至1000公斤力/厘米²的为高压容器；1000公斤力/厘米²以上的为超高压容器。低压容器大多用于基本化工、机械制造、冶金、采矿等行业；中压容器多用于石油化工；高压容器则主要用于氮肥工业和一部分石油化学工业；超高压容器目前使用的还不太多，除实验设备外，用于工业生产的，大部分是高分子聚合设备。

根据工艺用途和作用，压力容器又可以分为盛装（贮运）容器、反应容器、换热容器和分离容器四大类。盛装容器主要用来贮存作为生产用原料或产品的有压气体或液化气体。工作介质在容器内一般不发生化学的或物理性质的变化。常见的有球形、立式或卧式圆筒形贮罐；反应容器主要是为两种以上的工作介质进行化学反应提供一个密闭的空间。反应操作可以是连续性或间歇性的，器内常装设有工艺附件，如加热或冷却装置、搅拌装置等。常见的有反应锅、聚合釜、合成塔等；换热容器主要为两种介质在器内进行热量交换，以达到生产工艺过程中所需要的将介质加热或冷却的目的。常见的有列管式换热器、板式换热器等；分离容器是让介质通入容器内，利用降低流速、改变流动方向或用其它物料吸收、过滤等方法来分离气体中的混合物，以达到净化气体或提取其中有用物料的目的。常见的有分离器、吸收塔、洗涤器等。

2. 移动式容器 移动式容器属于贮运容器，主要用来盛装运送气体或液化气体。容器在气体制造厂充装气体，然后运送到用气单位使用。这类容器没有固定的用气地点，一般也没有专责的操作人员，使用环境经常变动，管理比较复杂，所以比较容易发生事故。移动式容器按其容积大小及结构分为气瓶、气桶和槽车三种。

气瓶是使用得最为普遍的一种移动式容器。它的容积较小，一般都在200升以下，常用的为40升。气瓶的两端不相对称，分头部和底部。头部缩颈收口装阀，形状如瓶，因而得名。按所装气体的特性，气瓶又可分为压缩气体气瓶、液化气体气瓶和溶解气体气瓶。压缩气体气瓶一般都以较高的压力充装气体，目的是为了增大气瓶的单位容积装气量，提高它的利用率和运输效率。常用的充装压力为150和125公斤力/厘米²，所装的压缩气体有 O_2 、 N_2 、 H_2 、空气、甲烷以及 Ar 、 Ne 、 He 等惰性气体。

液化气体气瓶充装时都是以低温液态灌装。有些液化气体的临界温度较低，装入瓶后会受环境温度的影响而全部气化。而有些则因临界温度较高，瓶内始终保持气液两相平衡状态。前者的工作压力决定于气体充装量；后者的最高工作压力则为所装介质在最高使用温度下的饱和蒸气压力。所以前一种液化气体气瓶都是高压的，称为高压液化气体气瓶或低临界温度液化气体气瓶。常用的有二氧化碳、乙烷、氟里昂-13等；后一种液化气体气瓶都是低压的（最高温度下的饱和蒸气压力不超过100公斤力/厘米²），称为低压液化气体气瓶或高临界温度液化气体气瓶，常用的有氨、氯、二氧化硫等。

溶解气体气瓶是专供盛装乙炔用的气瓶。由于乙炔气体极不稳定，故必须把它溶解在溶剂（常用的是丙酮）中。这种气瓶的内部装满多孔性物质，用以吸收溶剂。充装时将乙炔气体加压灌装入瓶内，乙炔即被溶剂所溶解而贮存在瓶中。溶解气体气瓶的工作压力一般不超过