

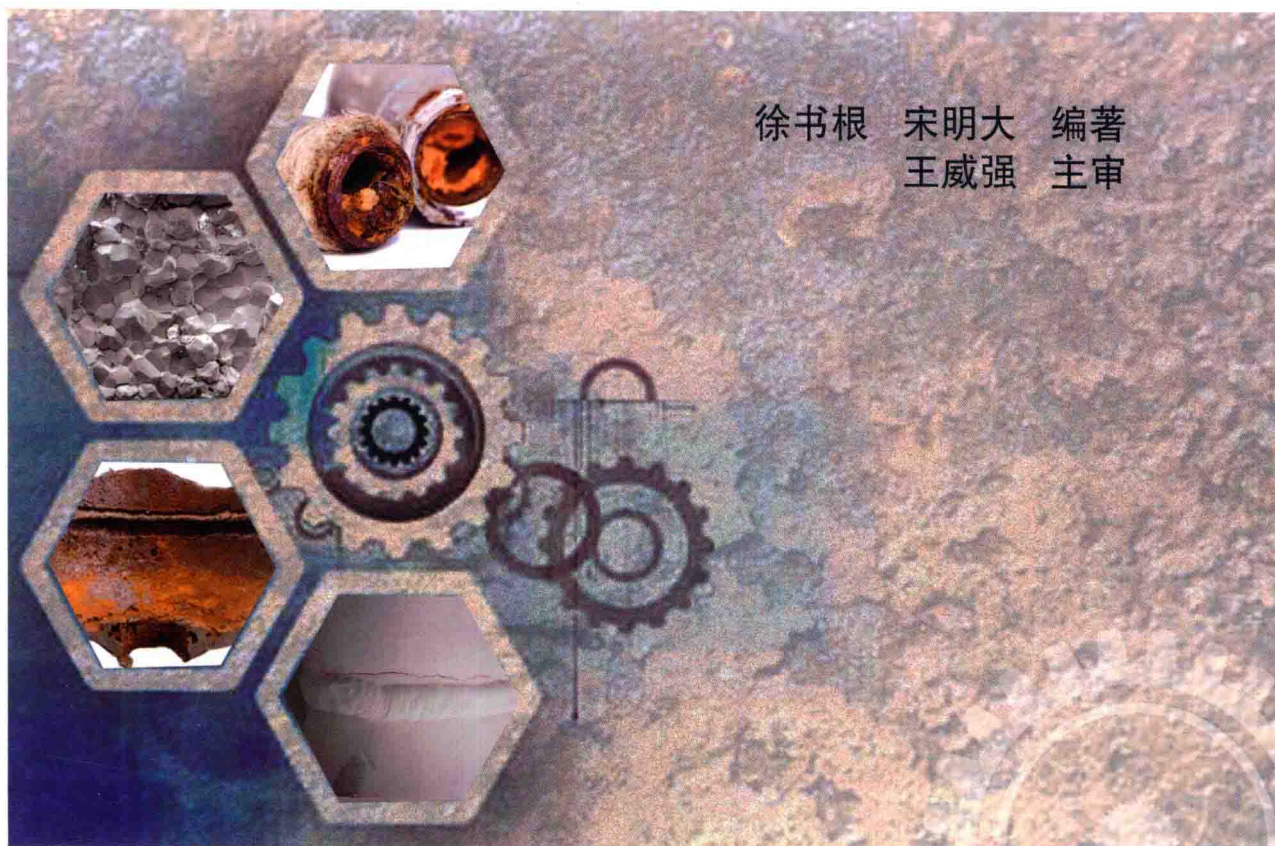


普通高等教育“十三五”规划教材

石油化工卓越工程师规划教材（试用）

过程设备失效分析

徐书根 宋明大 编著
王威强 主审



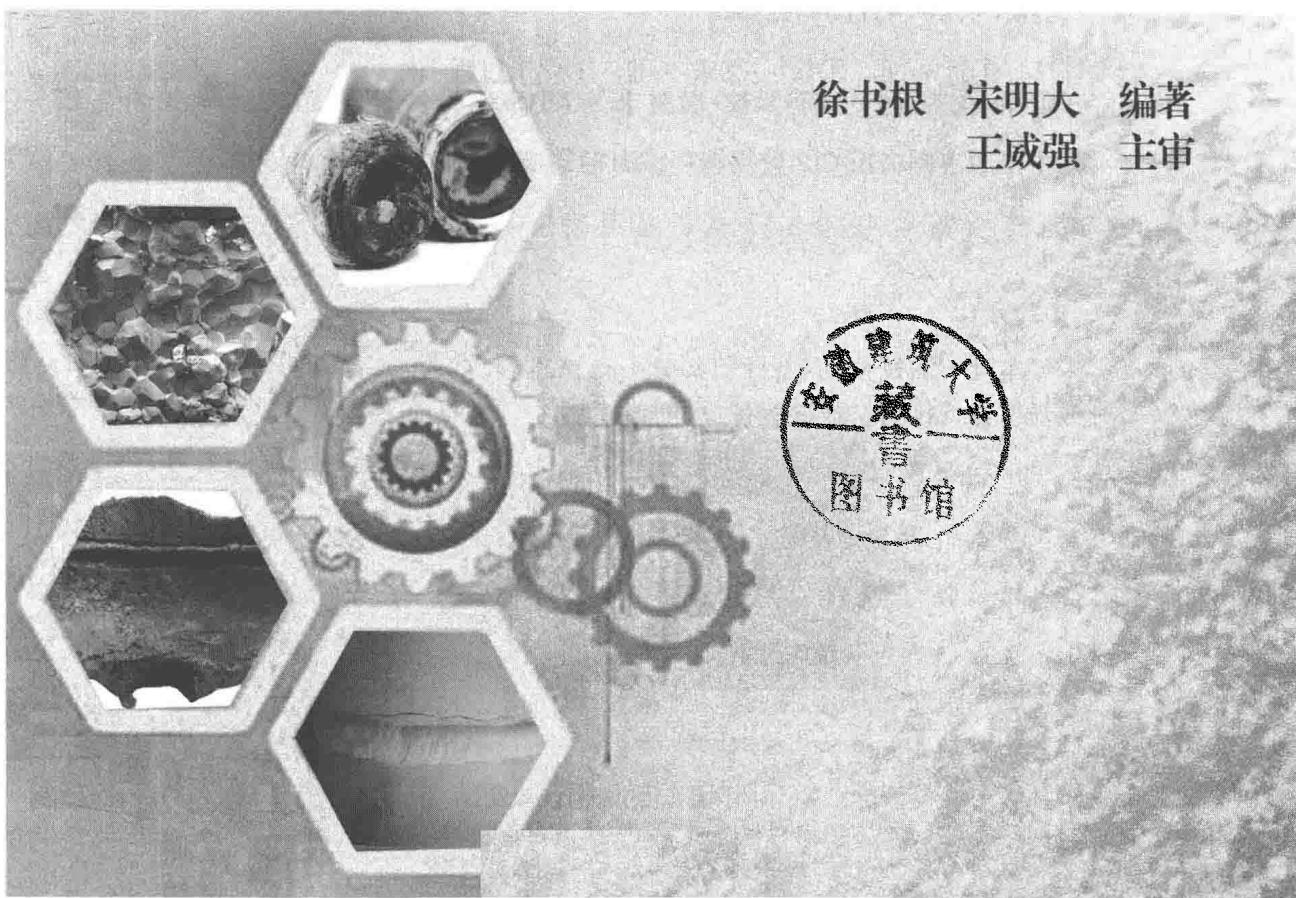
中国石化出版社

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

普通高等教育“十三五”规划教材
石油化工卓越工程师规划教材（试用）

过程设备失效分析

徐书根 宋明大 编著
王威强 主审



中国石化出版社

内 容 提 要

《过程设备失效分析》主要介绍过程设备失效分析的基础知识和失效案例。全书分为6章。第1章为绪论,介绍了失效与失效分析的概念、失效分析的意义与发展;第2章为过程设备缺陷及失效分析测试方法;第3章为过程设备的断裂失效模式及判断;第4章为过程设备典型腐蚀失效模式及特征;第5章为过程设备的失效分析的思路与方法;第6章为过程设备失效分析案例。

本书紧扣过程设备失效分析,紧密结合工程案例,深入浅出地讲述过程设备失效及失效分析的相关知识,可作为高等院校过程装备与控制工程专业及其他相关专业教材,也可供相关工程技术人员学习与参考。

图书在版编目(CIP)数据

过程设备失效分析 / 徐书根, 宋明大编著. —北京:
中国石化出版社, 2017. 11
普通高等教育“十三五”规划教材
石油化工卓越工程师规划教材: 试用
ISBN 978-7-5114-4721-0

I. ①过… II. ①徐… ②宋… III. ①化工过程-化
工设备-失效分析-高等学校-教材 IV. ①TQ051

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 272545 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:北京市朝阳区吉市口路9号
邮编:100020 电话:(010)59964500

发行部电话:(010)59964526

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

E-mail:press@sinopec.com

北京柏力行彩印有限公司印刷

*

787×1092 毫米 16 开本 13 印张 320 千字
2017 年 11 月第 1 版 2017 年 11 月第 1 次印刷
定价:30.00 元

前 言

过程装备与控制工程是为适应先进过程工业的发展而设置的学科交叉型专业。以其专业内涵而言,主要培养学生掌握过程装备设计、制造、运行和管理等方面的相关知识。过程设备服役条件具有特殊性,内部盛装的介质往往具有毒性或易燃易爆,并且受到介质压力、温度、腐蚀性的影响。在苛刻的运行环境中,过程设备一旦失效,最终结果一般会造成内部介质的泄漏,导致人员伤亡、财产损失和环境危害,后果非常严重。因此,掌握过程设备失效模式、找出失效原因并提出有效的对策,具有重要的工程价值。

随着专业卓越工程师计划和工程教育专业认证的推进,对教材的工程性和研究性提出了更高的要求,有必要编写一部通俗易懂、案例丰富、有鲜明专业特色的过程设备失效分析教材,供过程装备与控制工程及其相关专业的师生使用。

在本书的编写过程中,参考并博取了专家学者及所列参考文献中的基础知识、学术观点和学术心得。本书所涉及的过程设备,以金属设备为主,其失效分析依赖于金属材料的失效机理及金相和断口特征,现场宏观照片和金相及断口照片是反映其失效的主要依据。因此,尽量选用清晰度高的一手图片,是本书的一大特色和亮点。另外,为了各章节的篇幅均衡,在内容的编排中,将断裂失效、腐蚀失效单独分列成章,并将失效案例单独列为一章,方便使用过程中基础知识的学习和案例的分析使用。

全书分6章:第1章为绪论,介绍了失效与失效分析的概念、失效分析的意义与发展;第2章为过程设备缺陷及失效分析测试方法;第3章为过程设备的断裂失效模式;第4章为过程设备的腐蚀失效模式;第5章为过程设备的失效分析的思路与方法;第6章为过程设备失效分析案例,涵盖了书中所讲授的绝大多数的失效模式及分析方法。

本书第1~第4章、案例6.4、案例6.6、案例6.10和案例6.11由中国石油大学(华东)徐书根编写,第5章、案例6.1、案例6.5、案例6.7和案例6.8由

山东省特种设备检验研究院有限公司宋明大编写，案例 6.2、案例 6.3、案例 6.9 和案例 6.12 由山东大学王威强编写。王威强为本书的编排提出了宝贵的意见，并担任本书主审。研究生孟维歌、韦洋、王胜昆、孙志伟、黄生军、张元和王冲等为本书的资料收集、稿件校对和图片整理等做了许多工作。

本书在编写过程中得到了中国石油大学(华东)赵延灵、蒋文春和王振波的帮助指导，在此表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请读者批评指正。

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 失效与失效分析的概念	(1)
1.2 过程设备常见的失效模式	(2)
1.3 过程设备的失效原因	(3)
1.4 过程设备失效分析的意义	(5)
1.5 失效分析的发展	(6)
1.6 我国失效分析的现状和差距	(7)
第2章 过程设备缺陷及失效分析测试方法	(9)
2.1 过程设备常见缺陷	(9)
2.2 失效分析检测方法	(21)
第3章 过程设备断裂失效	(30)
3.1 断口基础知识	(30)
3.2 韧性断裂	(40)
3.3 脆性断裂	(44)
3.4 疲劳断裂	(52)
3.5 蠕变变形及断裂	(64)
第4章 过程设备腐蚀失效	(72)
4.1 腐蚀的危害与分类	(72)
4.2 全面腐蚀	(75)
4.3 点蚀	(77)
4.4 缝隙腐蚀	(80)
4.5 电偶腐蚀	(82)
4.6 晶间腐蚀	(85)
4.7 露点腐蚀	(88)
4.8 冲蚀磨损	(90)
4.9 氢脆	(92)
4.10 氢腐蚀	(94)

4.11 应力腐蚀开裂(SCC)	(97)
4.12 腐蚀疲劳	(104)
第5章 过程设备失效分析的思路与方法	(108)
5.1 失效分析的思路	(108)
5.2 过程设备失效分析的程序	(112)
5.3 过程设备失效原因的判断	(113)
第6章 过程设备失效分析典型案例	(122)
6.1 韧性断裂——有机热载体炉爆管失效分析	(122)
6.2 脆性断裂——氨分离器出口 20 钢高压管爆破失效分析	(126)
6.3 疲劳断裂——螺旋板换热器开裂	(134)
6.4 疲劳断裂——双螺杆泵轴断裂	(140)
6.5 蠕变断裂——高温过热器管失效分析	(146)
6.6 全面腐蚀——余热锅炉管均匀腐蚀	(150)
6.7 点蚀——天然气管道点蚀	(158)
6.8 电偶腐蚀——溶剂罐排污管裂口失效分析	(167)
6.9 氢腐蚀——20 钢异径管断裂失效分析	(176)
6.10 应力腐蚀开裂——MTP 反应预热器不锈钢换热管泄漏失效分析	(179)
6.11 应力腐蚀开裂——制氢转化炉过热段炉管开裂失效分析	(186)
6.12 应力腐蚀开裂——层板包扎尿素合成塔爆炸失效分析	(194)
参考文献	(201)

在化工、石油化工、电力等过程工业中使用的设备具有共同的特点,如大部分设备由容器及其连接管道构成。这些容器大部分为回转壳体,所承受的载荷复杂多样,如整体分布的内部压力载荷,局部承受的机械载荷,还有由于温度梯度形成温差应力载荷。高温和低温造成设备材料性能的变化,设备内部的介质环境对材料本身具有腐蚀作用。在载荷、温度和介质环境的作用下,过程设备的失效形式非常复杂。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。研究与掌握过程设备的失效规律,可以大大提高过程设备的设计水平、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,保障安全生产。

1.1 失效与失效分析的概念

过程设备及其构件在使用过程中,由于载荷、时间、温度、环境介质和操作等因素的作用,失去其原有功能的现象时有发生。这种丧失其规定功能的现象称为失效。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。在过程设备中,失效包含两个层次,一是完全丧失规定的功能,如压力容器发生爆炸,回转壳体已经不复存在;二是还能运行,但是已经达不到规定的功能,如容器因为腐蚀减薄,虽然还可以使用,但是其承载压力却大大降低;容器出现裂纹,虽然还有一定的使用寿命,但是安全可靠性大大降低。

“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,一旦造成事故就很严重,甚至是灾难性的。如容器出现裂纹,但是在还未泄漏或者爆破之前被发现,及时停车处理,这对容器而言,已经出现了失效,但是未造成严重事故。

我国过程设备数量巨大。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 年年底,全国共有锅炉 53.44 万台,压力容器 359.97 万台,气瓶 14235 万只,压力管道 47.79 万公里。

过程设备及其构件的失效是经常发生的,某些突如其来的断裂失效还往往带来灾难性的破坏,给生命财产造成巨大的损失,这在国内外工业发展史上是屡见不鲜的。

1984 年 12 月 3 日凌晨,在印度博帕尔市的美国联合碳化物公司所属的一家化工厂,由于安全装置失灵,系统升压导致储罐管路破裂,泄出大量毒气。该市 50 万居民中有 20 万人受到毒气的侵害,直接致死 2000 余人,2 万人需要住院治疗。有关方面要求美国公司赔偿 150 亿美元的损失费。

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,5000多人受伤,1000多人下落不明,该事故至今原因不明。

2005年3月21日21时26分,山东某化肥厂多层包扎尿素合成塔爆炸,造成4人死亡,32人重伤,经济损失2900多万元。

2007年11月17日13时许,山东某化肥厂的氨分离器出口到冷交换器进口间长约14.3m的 $\phi 273 \times 40$ mm 20钢高压钢管发生粉碎性破裂,事故造成企业直接经济损失500万元。

对设备及其构件在使用过程中发生各种形式失效的特征及规律进行分析研究,从中找出产生失效的主要原因及防止失效的措施,称为失效分析。一旦失效发生后,能否在短期内找出失效的原因,做出正确的判断,从而找到解决问题的途径,这表明了一个国家或科技人员的科学技术水平与管理水平。

过程设备失效给社会 and 人类带来的损失与威胁,迫使人们与失效进行长期的斗争。失效总是首先从设备或构件最薄弱的部位开始,而且在失效的部位必然会保存着失效过程的信息,通过对失效件的分析,明确失效类型、找出失效原因,采取改进和预防措施,防止类似的失效在设计寿命范围内再发生,对设备及其构件在以后的设计、选材、加工及使用都有指导意义,这就是失效分析的目的。失效分析是与失效做斗争的有效方法。失效分析的目的不在于造出具有无限使用寿命的装备,而是确保装备在给定的寿命期限内不发生早期失效,或只需要更换易损构件,或把装备的失效限制在预先规定的范围之内,希望对失效的过程进行监测、预警,以便采取紧急措施,避免机毁人亡的灾难。

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,并进行事故处理。

1.2 过程设备常见的失效模式

过程设备失效模式有多种分类方法。如按照失效时变形的大小、失效时金属在晶体中的断裂途径、失效与时间的关系、失效的机理或形态综合分类等。但是由于失效是一个较为广义的概念,一种失效模式分类方法很难涵盖所有的失效模式,这里主要介绍两种失效模式分类方法。

1.2.1 根据失效时间特点分类

根据过程设备失效的时间特点,失效可分为突发型失效和退化型失效。突发型失效又称短期失效,是指设备在丧失功能之前基本保持所需功能,但由于某种原因在某个时刻突然失效,如韧性断裂、脆性断裂和失稳等。退化型失效是随着工作时间的延长,设备的性能参数逐渐下降,直到超过某一临界值而导致的失效。退化型失效还可以分为两类:一类是由长期载荷引起的,如蠕变断裂和腐蚀断裂等;另一类是由循环载荷引起的,如疲劳断裂等。

1.2.2 根据失效机理或形态综合分类

不局限于断裂、腐蚀等狭义的失效,过程设备失效模式根据失效机理或形态综合分类,

分为：过度变形失效、断裂失效、表面损伤失效、失稳失效和密封失效五类。

(1) 过度变形失效

由于设备或其构件的变形大到足以影响其正常工作而引起的失效，称为过度变形失效。过度变形失效可以分为3类：弹性变形失效、塑性变形失效和蠕变变形失效。例如，露天立置的塔在风载荷等的作用下，若发生过大的弯曲变形导致塔盘的倾斜，会影响塔的正常传热传质工作。如果塔盘刚度不足，过度挠曲而使塔盘上流体分布明显不均匀，会引起气体穿过塔盘时分布不均，严重时会影响传质或传热过程的正常功能。即便塔盘的变形仍在弹性范围内，此时也应判为失效，即过量弹性变形失效。又如杆类零件过度伸长或弯曲变形，壳体部件局部鼓凸或凹陷，法兰盘明显扭转，以至能明显观察到有残余塑性变形，最终导致不安全或密封处的泄漏，则应判为过量塑性变形失效。

在本书中，设备的弹性和塑性变形在韧性断裂失效章节做了简单介绍，蠕变变形失效与蠕变断裂一并进行讲述，因此未单独列出章节进行介绍。

(2) 断裂失效

从断裂表现出的形态、或引起断裂的原因、或断裂的机理进行综合考虑的混合分类方法，可以分为韧性断裂、脆性断裂、疲劳断裂、蠕变断裂和腐蚀环境断裂等。断裂是过程设备重要的失效模式，在本书中会重点讲解。

(3) 表面损伤失效

主要包括表面摩擦和表面腐蚀两类。表面损伤失效既涉及环境、载荷和应力性质，也和材料的性能有关。磨损失效有其独特的损失机理，本书中仅介绍过程设备中常见的冲蚀，并归入腐蚀失效大类中进行讲解。

(4) 失稳失效

在压应力作用下，过程设备突然失去其原有的规则几何形状引起的失效称为失稳失效。弹性失稳的一个重要特征是弹性挠度与载荷不成比例，且临界压力与材料的强度无关。主要取决于设备的尺寸和材料的弹性性质，但当设备中的应力水平超过材料的屈服强度而发生非弹性失稳时，临界压力还与材料的强度有关。失稳失效特征明显，比较容易判断，一般可以通过设计和正确操作加以避免，且在过程装备设计中有较为详尽的介绍，因此本书不再介绍。

(5) 密封失效

除了上述针对设备本身的失效模式外，密封失效或者称之为泄漏失效，在过程设备中非常普遍。密封失效引起介质的泄漏，不仅会造成中毒、爆炸和燃烧等事故，而且会造成环境污染。动密封失效在泵和压缩机等流体机械中较为普遍；静密封失效一般是由于法兰密封系统的失效引发的宏观现象，同样设备本身的穿孔和穿透性裂纹也会带来泄漏失效。因此，从失效机理上说，密封失效并非一种独立的失效机理，是其他失效模式带来的一种宏观后果。

需要指出，在多种因素作用下，过程设备有可能同时发生多种形式的失效，即交互失效，如腐蚀介质和交变应力同时作用时引发的腐蚀疲劳、高温和交变应力同时作用时引发的蠕变疲劳等。

1.3 过程设备的失效原因

过程设备及其构件在设计寿命内发生失效，失效的原因是多方面的，大体上认为是由设

计不合理、选材不当及材料缺陷、制造工艺不合理、使用操作和维修不当等四方面引起的，可以是单方面的原因，也可能是交错影响，要具体分析。

1.3.1 设计不合理

由于设计上考虑不周密或认识水平的限制，构件或设备在使用过程中失效时有发生，其中结构或形状不合理，构件存在缺口、小圆弧转角、不同形状过渡区等高应力区，未能恰当设计引起的失效比较常见。

例如，受弯曲或扭转载荷的轴类零件在变截面处的圆角半径过小就属设计缺点。又如，容器碟形封头的设计，按 GB 150 规定的强度公式进行强度尺寸计算，原要求过渡区尺寸 $r/D \geq 0.06\%$ ，后修订为按 $r/D \geq 0.10\%$ 进行结构设计，减少过渡区失效的发生。无折边锥形封头使用范围半锥角 $\alpha \leq 30^\circ$ 也是失效得来的教训。不久前某酒精厂蒸煮锅上封头采用 $\alpha = 80^\circ$ 的无折边锥形封头，在 0.5MPa 的工作压力下操作发生爆炸引起事故。

某厂引进的大型再沸器，结构为卧式 U 形管束换热器，由于管束上方汽液通道截面过小，形成汽液流速过高，造成管束冲刷腐蚀失效。

总之，设计中的过载荷、应力集中、结构选择不当、安全系数过小（追求轻巧和高速度）及配合不合适等都会导致构件及设备失效。过程设备的设计要有足够的强度、刚度、稳定性，结构设计要合理。

分析设计原因引起失效尤其要注意：对复杂构件未作可靠的应力计算；或对构件在服役中所承受的非正常工作载荷的类型及大小未作考虑；甚至于对工作载荷确定和应力分析准确的构件来说，如果只考虑拉伸强度和屈服强度数据的静载荷能力，而忽视了脆性断裂、低循环疲劳、应力腐蚀及腐蚀疲劳等机理可能引起的失效，都会在设计上造成严重的错误。

1.3.2 选材不当及材料缺陷

过程设备的材料选择要遵循使用性能原则、加工工艺性能原则及经济性原则，使用性能原则是首先要考虑的。特定环境中的构件，对可预见的失效模式要为其选择足够的抵抗失效的能力。如对韧性材料可能产生的屈服变形或断裂，应该选择足够的拉伸强度和屈服强度；但对可能产生的脆性断裂、疲劳及应力腐蚀开裂的环境条件，选用高强度的材料往往适得其反。在符合使用性能的原则下选取的结构材料，对构件的成形要有好的加工工艺性能。在保证构件使用性能、加工工艺性能要求的前提下，经济性也是必须考虑的。

选材不当引起的过程设备的失效已引起很大的重视，但仍有发生。如构件高温蠕变失效屡见不鲜，某厂的火管锅炉，壳体材料为 16MnR，火管材料为 10G 无缝钢管，流体入口温度超过 1000℃，出口温度为 240℃，压力为 4MPa。这种结构的火管，经一段时间使用后，局部过热而烧穿。如此高温的炉管选用 10G 钢是不合理的，后改用 Cr、Mo 元素含量高的合金钢管子。又如，某厂原使用引进的管壳式热交换器一台，壳体及管子均为 18-8 奥氏体不锈钢，基于生产需要按原图纸再加工一台，把壳体改为低碳钢与 18-8 铬镍复合钢板，管子仍为 18-8 铬镍钢，投入使用即发生壳体横向开裂，分析原因表明，管壳因材料热膨胀系数差异引起过大的轴向温差应力，是热交换器壳体材料选用复合钢板后又未对换热器结构作改进所造成的失效。

过程设备所用原材料一般经冶炼、轧制、锻造或铸造，在这些原材料制造过程中所造成的缺陷往往也会导致早期失效。冶炼工艺较差会使金属材料中有较多的氧、氢、氮，并有较多的杂质和夹杂物，这不仅会使钢的性能变脆，甚至还会成为疲劳源，导致早期失效。轧制

工艺控制不好,会使钢材表面粗糙、凹凸不平,产生划痕、折叠等。铸件容易产生疏松、偏析、内裂纹,夹杂沿晶间析出引起脆断,因此过程设备要求强度高的重要构件较少用铸件。由于锻造可明显改善材料的力学性能,因此,许多受力零部件尽量采用锻钢,如高颈对焊法兰、整锻件开孔补强等。而锻造过程中也会产生各种缺陷,如过热、裂纹等,使构件在使用过程中失效。

1.3.3 制造工艺不合理

过程设备及其构件往往要经过机加工(车、铣、刨、磨、钻等)、冷热成形(冲、压、卷、弯等)、焊接、装配等制造工艺过程。若工艺规范制订欠合理,则金属设备或构件在这些加工成形过程中,往往会留下各种各样的缺陷。如机加工常出现的圆角过小、倒角尖锐、裂纹、划痕;冷热成形的表面凹凸不平、不直度、不圆度和裂纹;在焊接时可能产生的焊缝表面缺陷(咬边、焊缝凹陷、焊缝过高)、焊接裂纹、焊缝内部缺陷(未焊透、气孔、夹渣),焊接的热影响区更因在焊接过程经受的温度不同,使其发生不同的组织转变,有可能产生组织脆化和裂纹等缺陷;组装的错位、不同心度、不对中及强行组装留下较大的内应力等。所有这些缺陷如超过限度则会导致构件以及设备早期失效。

1.3.4 使用操作不当和维修不当

使用操作不当是过程设备失效的重要原因之一,如违章操作,超载、超温、超速;缺乏经验、判断错误;无知和训练不够;主观臆测、责任心不强、粗心大意等都是不安全的行为。某时期统计260次压力容器和锅炉事故中,操作事故194次,占74.5%。

过程设备是要进行定期维修和保养的,如对过程设备的检查、检修和更换不及时或没有采取适当的修理、防护措施,也会引起过程设备早期失效。

1.4 过程设备失效分析的意义

1.4.1 深化对设备失效机理的认识

失效分析是对事物认识的一个复杂过程,通过多学科交叉分析,找到失效的原因,不仅可以防止同样的失效再发生,而且能更进一步完善装备构件的功能,并促进与之相关的各项工作的改进。

对金属材料构件各种失效机理的认识都是通过对装备构件发生的各种失效进行分析,提高对客观规律的认识。失效、认识(失效分析)、提高、再失效、再认识、再提高,由此促进科学技术的发展。

1.4.2 提高过程设备的质量

装备及其构件的质量是非常重要的,以质量求信誉,以质量求效益,通过对装备构件的失效分析,是提高质量的有力措施。

装备构件的质量往往是通过各种试验检测进行考核。试验室内再好的模拟试验也不可能做到与装备构件服役条件完全相同。任何一次失效都可视为在实际使用条件下对装备构件质量检查所做的科学试验,失效越是意想不到的,越能给人们意想不到的启示,引导分析复杂多变的过程及影响因素下装备构件质量的偏差,找出被忽略的质量问题。由此从设计、材料、制造等各方面进行改进,便可提高装备及其构件的质量。

1.4.3 具有高经济效益和社会效益

装备及构件失效带来直接及间接的经济损失,进行失效分析找出失效原因及防止措施,使同样的失效不再发生,这无疑减少了损失,带来了经济效益;提高装备构件质量,使用寿命增加,维修费用降低及高的产品质量信誉等都带来经济效益;失效分析能分清责任,为仲裁和执法提供依据;失效分析揭示了规章、制度、法规及标准的不足,为其修改提供依据。科学技术是生产力,失效分析有力地推动科学技术的发展,在这个方面失效分析给整个社会带来的经济效益和社会效益是难以估计的。

1.4.4 为事故责任裁决提供依据

过程设备的失效原因可能来自于设计、制造、检验、安装和使用维护的任何一方。当发生设备失效时,究竟哪一方或者哪几方需要为事故负责,需要负何种程度的责任,都需要失效分析给出失效的直接原因和根本原因。因此,失效分析可为裁决事故责任、侦破犯罪案例、开展技术保险业务、修改和制订产品质量标准等提供可靠的科学技术依据。

1.5 失效分析的发展

1.5.1 初级失效分析阶段

应该说从人类使用工具开始,失效就与产品相伴随。由于远古时代的生产力极为落后,产品也极为简陋,出现失效之后的解决办法只是更换。因此,失效是与产品相伴随的,但失效分析不是随着产品的出现而出现的。公元前 2025 年到世界工业革命前可以看作失效分析的第一阶段,即与简单手工生产基础相适应的失效分析的初级阶段。这个时期是简单的手工生产时期,金属制品规模小且数量少,其失效不会引起重视,失效分析基本上处于现象描述和经验阶段。

1.5.2 近代失效分析阶段

以蒸汽动力和大机器生产为代表的工业革命给人类带来巨大物质文明的同时,也不可避免地给人类带来了前所未闻的灾难。约在 170 年前,越来越多的蒸汽锅炉爆炸事件发生,在总结这些失效事故的经验教训后,英国于 1862 年建立了世界上第一个蒸汽锅炉监察局,把失效分析作为仲裁事故的法律手段和提高产品质量的技术手段。随后在工业化国家中,对失效产品进行分析的机构相继出现,在这一时期,失效分析也大大推动了相关学科,特别是强度理论和断裂力学学科的创立和发展。

通过对大量锅炉爆炸和桥梁断裂事故的研究,Charpy 发明了摆锤冲击试验机,用以检验金属材料的冲击韧性;Wohler 通过对 1852~1870 年期间火车轮轴断裂失效的分析研究,揭示出金属的“疲劳”现象,并成功地研制了世界上第一台疲劳试验机;20 世纪 20 年代,Griffith 通过对大量脆性断裂事故的研究,提出了金属材料的脆断理论;在 1940~1950 年间发生的北极星导弹爆炸事故、第二次世界大战期间的“自由轮”脆性断裂事故,大大推动了人们对带裂纹体在低应力下断裂的研究,从而在 20 世纪 50 年代中后期产生了断裂力学这一新型学科。然而由于科学技术的限制,这一时期虽然有失效分析的专门机构,但其分析手段仅限于宏观痕迹以及对材质的宏观检验,未能从微观上揭示失效的本质,断裂力学仍未能能在工程材料断裂中很好地应用。

1.5.3 现代失效分析阶段

20 世纪 50 年代, 由于科学技术发展突飞猛进, 作为失效分析基础学科的材料科学与力学的迅猛发展, 断口观察仪器的长足进步, 特别是分辨率高、放大倍数大、景深长的扫描电子显微镜的先后问世, 为失效分析技术向纵深发展创造了条件, 铺平了道路, 并取得了辉煌的成果。随后大量现代物理测试技术的应用, 如电子探针 X 射线显微分析、X 射线及紫外线光电子能谱分析、俄歇电子能谱分析等, 促使失效分析登上了新的台阶。失效分析现处在第三阶段的历史发展时期, 这是现代失效分析阶段。

随着科学技术和制造水平的不断进步, 尤其是断裂力学、损伤力学、产品可靠性及损伤容限设计思想的应用和发展, 使得产品的可靠性越来越高, 产品失效引起的恶性事故数量相对减少但危害及影响越来越大, 产品失效的原因很少是由于某一特定的因素所致, 呈现复杂的多因素特征, 这就需要从设计、力学、材料、制造工艺及使用等方面进行系统的综合性的分析, 也就需要有从事设计、力学、材料等各方面的研究人员共同参与, 其解决办法是从降低零件所受的外力(包括环境等)与提高零件所具有的抗力两方面入手, 以达到提高产品使用可靠性的目的。

从 20 世纪 80 年代中后期开始, 失效分析开始逐渐形成一个分支学科, 而不再是材料科学技术的一个附属部分。这一时期失效分析领域发展的主要标志是失效分析的专著大量出现, 全国性的失效分析分会相继成立。1987 年成立了中国机械工程学会失效分析工作委员会, 1994 年成立了中国航空学会失效分析专业分会和中国科协工程联失效分析与预防中心。空军的内部刊物《飞行事故和失效分析》杂志于 1990 年创刊, 一些材料和机械类期刊, 如《压力容器》和《金属热处理》中也大都设立了失效分析专栏。德国成立丁阿利安兹技术中心(AZT), 是专门从事失效分析及预防的商业性研究机构。失效分析方面的英文国际期刊《Engineering Failure Analysis》也于 1994 年创刊。中国的失效分析方面的期刊《失效分析与预防》于 2006 创刊, 是南昌航空大学和中国航空工业第一集团公司北京航空材料研究院合办的关于失效分析与预防的学术刊物。

这一时期失效分析的主要特点就是集断裂特征分析、力学分析、结构分析、材料抗力分析以及可靠性分析为一体, 逐渐发展成为一门专门的学科。

1.6 我国失效分析的现状和差距

1.6.1 失效分析的重视与普及程度有待提高

失效分析是一门边缘学科, 它与多种学科和技术有关。失效分析工作在中国起步较晚, 科技人员特别是化工企业管理人员没有充分认识到失效分析的重要性, 对失效分析工作的重视程度远低于国外发达国家。目前国内全面开展失效分析工作的行业很少, 涉及的领域有限, 有限数量的专业机构在从事失效分析研究和服务工作。

失效分析是从失败入手, 着眼于成功和发展; 从过去入手, 着眼于未来和进步的科学技术领域, 并且正向失效学这一分支学科方向发展。重视这一分支学科的发展, 有意识地运用它已有的成就来分析、解决和攻克相关领域中的失效问题, 是人们走上成功, 科技发展少走弯路的捷径之一。面对这样一个现状, 需要现有的失效分析科技工作者不断宣传失效分析的作用, 普及失效分析的基础知识, 让越来越多的人了解失效分析、认识到失效分析的重要

性,同时失效分析科技工作者和相关研究机构需要加强联合,这样才能扩大失效分析队伍的整体影响。

1.6.2 失效分析人员水平差别较大

失效分析是一门综合性的技术学科,涉及材料学、力学、摩擦学、腐蚀学和机械制造工艺等。失效过程是一个十分复杂的过程,特别是一个大系统的失效,一般工作条件复杂、可疑点较多、难度也大,对失效分析人员的要求是知识面要广,并具有一定深度,以及丰富的实践经验。失效分析是从结果推断失效原因的过程,常常是一果多因,因而失效分析工作需要正确的分析思路和程序,它可以帮助分析人员快速、准确地查明失效的原因和机理。鉴于失效分析工作的重要性、复杂性和特殊性,失效分析人员应在实践中逐步培养,从事失效分析工作的科技人员需要具有敏锐的观察力和熟练的分析技术。

目前我国失效分析专家和工程师数量还远远不能满足需要,分析人员的水平和能力参差不齐。因此,迫切需要加强失效分析技术人员的培训,失效分析人员的能力和水平是在工作实践中不断提高的,也需要加强失效分析技术人员间的技术交流,这样可以不断提高失效分析人员素质和水平,提高整个行业及国家的失效分析能力和水平。

1.6.3 加强失效分析新技术和新方法的研究

失效分析的发展趋势:简单的断口分析逐步发展为综合分析;单一服役条件下失效的诊断逐步发展为复杂服役条件下失效的诊断;由定性分析向定量分析过渡;变事后分析为事先分析;从单一模式的安全评定向多参数、全过程的安全评定发展;使失效分析从“手艺”技术向失效学学科体系发展;变失效诊断为失效模式、原因和机理的诊断;从失效预测向剩余寿命、安全状况和可靠性的预测过渡;失效预防向工程预防、抗失效设计和专家系统发展。

因此,需要不断引入新分析手段和分析方法。随着科学技术的进步,新材料、新工艺和新技术不断应用,会有新的失效模式不断出现,国内研究单位常常忽视了研制阶段的失效分析工作,特别是在研究产品可能出现的失效模式和应采取的措施方面资金和技术力量投入少。

因此,在新材料、新工艺和新技术研发的同时,应该加强失效模式的研究,变被动的事后分析为主动的事先的诊断和预防。

1.6.4 设立注册失效分析专家制度和成立专门失效分析机构

借鉴国外设立注册失效分析专家(注册失效分析师)和成立专门失效分析机构进行事故原因分析的经验,设立我国自己的涵盖多领域的注册失效分析专家(注册失效分析师)制度,成立失效分析机构,接受政府、事发单位或相关方、保险公司委托,有偿开展事故和特种设备失效的事前、事中和事后研究。对于政府委托而言,其费用主要来源于安全生产与职业卫生风险抵押金或强制保险以及违法罚款。这样做不仅有利于事故或失效分析理论水平的提高和经验的积累,也有利于分析的公正性和独立性,以及对于事故和失效分析结果的可追溯性。政府设立基金主要支持失效分析机构等单位从事失效分析的科学研究工作。政府在事故调查与处理过程中的主要责任是组织抢险救援、调查过程的监督、事故性质的认定、各方赔偿和责任追究,而对事故原因的分析则主要依赖于注册失效分析专家和失效分析机构。

作为一个合格的失效分析工作者，必须具备扎实的失效分析专业基础知识，其中包括过程设备用材的金属学知识和与失效相关的材料测试方法。本章主要是把与失效及失效分析密切相关、且使用频数较高的重要内容提纲挈领地作简单的介绍，以便理解后续相关的失效分析知识。

2.1 过程设备常见缺陷

过程设备在制造过程或在服役期间的失效，其原因与设备用材在制造和使用过程中材料的微观组织缺陷和宏观缺陷密切相关。常见材料的微观组织缺陷主要有金相组织在温度作用下的劣化、轧制缺陷和非金属夹杂。宏观缺陷主要表现为焊接缺陷和机械加工缺陷。了解这些缺陷的成因和形貌，能够帮助确定过程设备的失效原因。

2.1.1 金相组织缺陷

1) 脱碳

钢材加热时，金属表层的碳原子被烧损，造成金属表层的碳成分低于内层，这种现象就称为脱碳。其中，降低了含碳量的表面层叫做脱碳层。一般的锻造和轧制都是在大气中进行的，加热及锻、轧过程中钢件表层会强烈烧损而出现脱碳层，如图 2-1 所示。

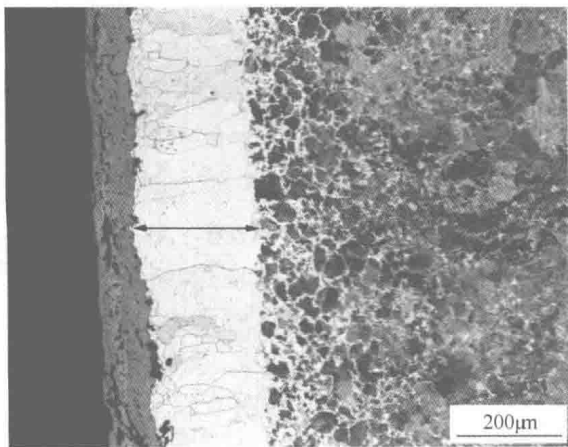


图 2-1 钢的脱碳层

脱碳层的硬度、强度降低，受力时易开裂而成为裂源。大多数零件，特别是要求强度高、受弯曲力作用的零件，要避免脱碳层。因此，锻、轧的钢件应进行去除脱碳层的切削加工。

2) 珠光体球化

压力容器用碳素钢和低合金钢，在常温下的组织一般为铁素体加珠光体。珠光体晶粒中的铁素体及渗碳体是呈薄片状相互间夹的。片状珠光体是一种不稳定的组织，当温度较高时，原子活动力增强，扩散速度增加，片状渗碳体便逐渐转变为珠状，再积聚成大球团，这种现象即为珠光体球化，如图 2-2 所示。材料发生珠光体球化后，其屈服点、抗拉强度、冲击韧性、蠕变极限和持久极限均会下降。



图 2-2 珠光体球化前后对比

3) 石墨化

钢在高温、应力长期作用下，由珠光体内渗碳体分解出游离石墨的现象叫做石墨化，如图 2-3 所示。在渗碳体的不断分解下，这些石墨不断聚集长大，形成石墨球。时间愈长，石墨化愈严重。石墨化现象只在高温下发生，低碳钢当温度在 450℃ 以上、0.5Mo 钢约在 480℃ 以上长期工作后都可能发生石墨化。此时，钢会发生不同程度的脆化，强度与塑性降低，石墨化严重时可导致高温运行设备发生失效。

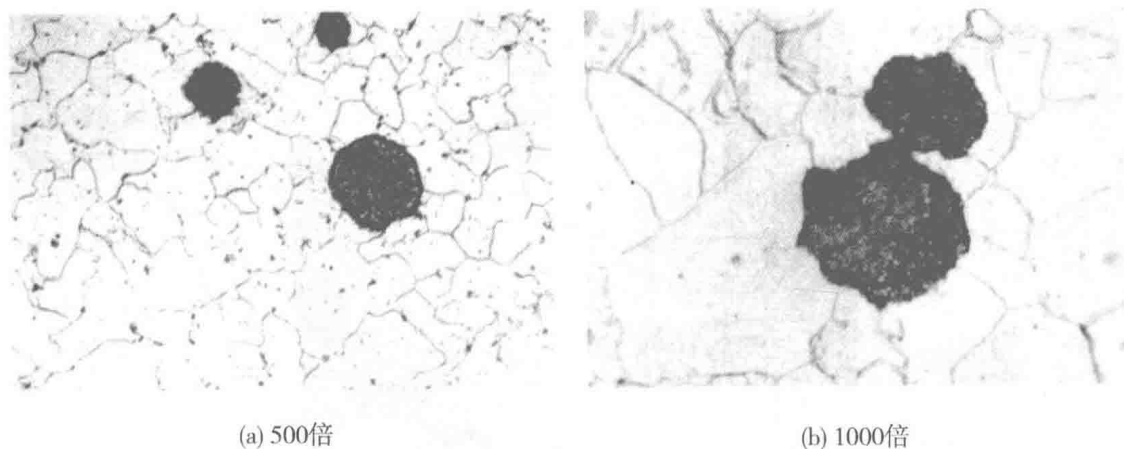


图 2-3 过热器管(20 钢)的石墨化

钢的石墨化一般要进行分级，以区别其危害性。我国根据钢中石墨化的发展程度，一般将石墨化分为四级：

1 级：轻度石墨化；2 级：明显石墨化；3 级：显著石墨化；4 级：严重石墨化。