



安全工程技术丛书

# 过程设备安全管理与检测

◎ 戴光 李伟 张颖 编著



化学工业出版社  
教材出版中心

安全工程技术丛书

# 过程设备安全管理与检测

戴光 李伟 张颖 编著



化学工业出版社  
教材出版中心

· 北京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

过程设备安全管理与检测/戴光,李伟,张颖编著.  
北京:化学工业出版社,2005.3  
(安全工程技术丛书)  
ISBN 7-5025-6759-3

I. 过… II. ①戴…②李…③张… III. ①化工  
过程-化工设备-设备管理②化工过程-化工设备-检测  
IV. TQ051.07

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 018982 号

---

安全工程技术丛书  
过程设备安全管理与检测  
戴光 李伟 张颖 编著

责任编辑:程树珍

文字编辑:宋薇

责任校对:李林

封面设计:于兵

\*

化学工业出版社 出版发行  
教材出版中心  
(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)  
发行电话:(010) 64982530  
<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销  
北京市昌平振南印刷厂印刷  
三河市延风装订厂装订  
开本 787mm×1092mm 1/16 印张 21¼ 字数 497 千字  
2005 年 4 月第 1 版 2005 年 4 月北京第 1 次印刷  
ISBN 7-5025-6759-3/X·603  
定 价:38.00 元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

# 《安全技术丛书》编写委员会

主任委员 高金吉

副主任委员 丁信伟

委 员 (按拼音字母排序)

毕明树 陈 旭 戴 光 高增梁 黄卫星

涂善东 魏新利 张建伟 郑津洋

## 参加本书编写人员

戴 光 李 伟 张 颖 龙飞飞

杨志军 丛 蕊 祝 娟 赵俊茹

# 前言

过程工业具有连续的生产过程，并具有易燃、易爆、高温、高压和工艺严格的特点，是中国国民经济的重要支柱产业之一。生产装置由静设备、动设备、电气设备、仪器仪表和工艺管道组成，布局紧凑，组成了一个功能完备的生产体系。如果这一体系中的某个单元或设备出了问题都将危及到企业的安全生产。而且随着生产装置日趋自动化、大型化，突发事件和非正常的停工都将造成巨大的经济损失。

过程工业的硬件基础是设备，而设备正常运行的基础是安全，没有安全就没有一切。因此，最根本的是加强安全管理，通过现代化的无损检测手段，找出设备的薄弱环节，把事故消灭在萌芽状态，提高整个生产装置的系统安全可靠性。

传统的过程设备管理，主要是采用设备安全的日常管理和定期检查，制定一系列的安全管理法规，在过程设备设计过程中引入安全装置等。毫无疑问这些安全管理手段对保证设备的安全运行非常重要，但是只靠这些方法已不能适应现代化过程生产对过程设备安全管理的新要求。现代过程设备的安全管理是以事故预防为工作中心，一方面加强分层次的全员安全管理理念，开展广泛的风险预测、评价，分级确定各类危险源和制定事故的紧急预案；另一方面，采用现代的无损检测/监测技术和评价方法，及时发现和修复设备中存在的危险性缺陷，确保过程设备的安全运行。

编著者在查阅国内外大量相关文献的基础上，结合多年的研究成果和工程实践编著了本书。书中系统地介绍了过程设备安全的重要性、过程工业安全管理的内容及现代过程工业安全管理的模式及管理体制，全面深入地介绍了过程设备的各种无损检测技术的原理、适用范围及检测程序，并给出了应用实例。该书突出了过程设备安全管理与检测的相关性、实用性和科学性，可作为高等院校过程装备与控制工程、安全、化工及相关工程类专业的教材，也可供安全管理及检测人员参考。

由于时间仓促，书中难免有不妥之处，恳请读者指正！

编著者  
2004年12月

## 内 容 提 要

过程设备是过程工业生产的重要物质技术基础。它的安全状况直接影响过程工业的安全生产及经济效益。本书以现代系统安全管理为基础,系统介绍了现代安全管理的基本原理及基本方法,阐述了现代过程工业安全管理的内容、模式及管理体制,重点介绍了过程设备安全管理及检查的基本原则和方法、现代过程设备风险检查及重大危险设备的风险评价。全面深入的介绍了过程设备的各种无损检测技术的原理、适用范围及检测程序,并给出了应用实例。

本书突出了过程设备安全管理与检测的相关性、实用性和科学性,可作为高等院校过程装备与控制工程、安全、化工及相关工程类专业的教材,也可供安全管理及检测人员参考。

# 目 录

|                       |    |
|-----------------------|----|
| <b>1 绪论</b>           | 1  |
| 1.1 过程设备安全的重要性        | 1  |
| 1.2 过程设备对安全管理的新要求     | 2  |
| 1.3 过程设备检测技术与进展       | 3  |
| 1.3.1 过程设备对检测技术的新要求   | 3  |
| 1.3.2 过程设备检测技术及其进展    | 5  |
| <b>2 过程工业与安全管理</b>    | 7  |
| 2.1 过程工业生产与安全         | 7  |
| 2.1.1 过程工业生产的特点       | 7  |
| 2.1.2 安全在过程工业中的重要地位   | 9  |
| 2.2 安全管理的基本原理及内容      | 10 |
| 2.2.1 安全管理的定义         | 10 |
| 2.2.2 事故及其分类          | 12 |
| 2.2.3 事故致因理论          | 24 |
| 2.3 安全管理的核心——事故的预防与控制 | 34 |
| 2.3.1 事故预防与控制的基本原则    | 34 |
| 2.3.2 事故预防的基本方法       | 35 |
| 2.3.3 事故的应急救援         | 37 |
| 2.4 过程工业中的安全管理        | 48 |
| 2.4.1 过程工业安全管理的特点     | 48 |
| 2.4.2 过程工业安全管理须遵循的原则  | 50 |
| 2.4.3 过程工业安全管理的主要内容   | 52 |
| 2.4.4 过程工业安全管理的重要意义   | 53 |
| <b>3 现代过程工业的安全管理</b>  | 56 |
| 3.1 现代过程工业安全管理模式      | 56 |
| 3.1.1 安全目标管理          | 57 |
| 3.1.2 安全信息管理          | 61 |
| 3.1.3 职业健康安全管理体系      | 67 |
| 3.2 中国的安全生产方针和管理体制    | 75 |
| 3.2.1 中国的安全生产方针       | 75 |
| 3.2.2 中国的安全管理体制       | 76 |
| 3.3 过程工业安全法规及标准       | 81 |

|          |                              |            |
|----------|------------------------------|------------|
| 3.3.1    | 中国的安全法规体系 .....              | 82         |
| 3.3.2    | 过程工业的安全管理法规 .....            | 84         |
| 3.3.3    | 过程工业的安全管理制度 .....            | 87         |
| 3.3.4    | 过程工业的职业健康安全标准 .....          | 90         |
| 3.4      | 过程工业灾难性事件及应急管理 .....         | 92         |
| 3.4.1    | 过程工业中的灾难性事件 .....            | 93         |
| 3.4.2    | 化学危险品的安全管理 .....             | 95         |
| 3.4.3    | 化学危险品灾难性应急计划及实例 .....        | 109        |
| <b>4</b> | <b>过程设备的安全管理 .....</b>       | <b>116</b> |
| 4.1      | 过程设备安全管理的重要意义 .....          | 116        |
| 4.1.1    | 过程设备在过程工业中的重要地位 .....        | 116        |
| 4.1.2    | 过程设备安全生产的现状分析 .....          | 119        |
| 4.1.3    | 过程设备安全管理的重要意义 .....          | 122        |
| 4.2      | 过程设备的安全检查 .....              | 123        |
| 4.2.1    | 过程设备安全检查的意义 .....            | 123        |
| 4.2.2    | 过程设备安全检查的主要内容 .....          | 125        |
| 4.2.3    | 过程设备安全检查的注意事项 .....          | 129        |
| 4.2.4    | 过程设备的风险检查 .....              | 135        |
| 4.3      | 重大危险设备的风险评价 .....            | 143        |
| 4.3.1    | 重大危险设备风险评价的目的 .....          | 143        |
| 4.3.2    | 风险评价基本内容及程序 .....            | 143        |
| 4.3.3    | 常用风险评价方法 .....               | 149        |
| 4.4      | 重大危险设备定量概率风险评价实例 .....       | 181        |
| 4.4.1    | 常压炉的危险源辨识 .....              | 181        |
| 4.4.2    | 火灾爆炸危险指数 ( $R&EI$ ) 评价 ..... | 182        |
| 4.4.3    | 常压炉火灾爆炸事故严重度的计算 .....        | 184        |
| 4.4.4    | 常压炉火灾爆炸事故树分析 .....           | 185        |
| 4.4.5    | 常压炉定量概率风险评价 .....            | 187        |
| 4.4.6    | 评价结论及风险控制 .....              | 188        |
| <b>5</b> | <b>过程设备安全管理与无损检测技术 .....</b> | <b>190</b> |
| 5.1      | 无损检测技术在过程设备安全管理中的重要作用 .....  | 190        |
| 5.1.1    | 无损检测技术概述 .....               | 190        |
| 5.1.2    | 无损检测技术是过程设备安全的保障 .....       | 193        |
| 5.1.3    | 无损检测技术在过程设备安全管理中的重要地位 .....  | 194        |
| 5.2      | 过程设备的定期检验 .....              | 194        |
| 5.2.1    | 定期检验目的 .....                 | 194        |
| 5.2.2    | 定期检验内容 .....                 | 195        |
| 5.2.3    | 定期检验程序 .....                 | 196        |



|          |                           |            |
|----------|---------------------------|------------|
| 5.2.4    | 检验报告 .....                | 196        |
| <b>6</b> | <b>过程设备常规无损检测技术 .....</b> | <b>197</b> |
| 6.1      | 超声检测技术 .....              | 197        |
| 6.1.1    | 超声检测技术简介 .....            | 197        |
| 6.1.2    | 超声检测基本知识 .....            | 198        |
| 6.1.3    | 超声检测基本方法 .....            | 199        |
| 6.1.4    | 超声检测仪器 .....              | 201        |
| 6.1.5    | 超声检测评价标准 .....            | 205        |
| 6.1.6    | 超声检测应用实例 .....            | 206        |
| 6.2      | 射线检测技术 .....              | 208        |
| 6.2.1    | 射线检测技术简介 .....            | 208        |
| 6.2.2    | 射线检测基本原理 .....            | 209        |
| 6.2.3    | 射线检测设备与技术 .....           | 210        |
| 6.2.4    | 射线检测评价标准 .....            | 212        |
| 6.2.5    | 射线检测应用实例 .....            | 215        |
| 6.3      | 磁粉检测技术 .....              | 216        |
| 6.3.1    | 磁粉检测技术简介 .....            | 216        |
| 6.3.2    | 磁粉检测基本原理 .....            | 217        |
| 6.3.3    | 磁粉检测方法及程序 .....           | 218        |
| 6.3.4    | 磁粉检测设备 .....              | 221        |
| 6.3.5    | 磁粉检测评价标准 .....            | 221        |
| 6.3.6    | 磁粉检测应用实例 .....            | 222        |
| 6.4      | 渗透检测技术 .....              | 223        |
| 6.4.1    | 渗透检测技术简介 .....            | 223        |
| 6.4.2    | 渗透检测基本原理 .....            | 224        |
| 6.4.3    | 渗透检测基本方法 .....            | 226        |
| 6.4.4    | 渗透检测程序与操作要点 .....         | 228        |
| 6.4.5    | 渗透检测材料 .....              | 229        |
| 6.4.6    | 渗透检测评价标准 .....            | 230        |
| 6.4.7    | 渗透检测应用实例 .....            | 230        |
| 6.5      | 漏磁检测技术 .....              | 230        |
| 6.5.1    | 漏磁检测技术简介 .....            | 231        |
| 6.5.2    | 漏磁检测的原理 .....             | 231        |
| 6.5.3    | 漏磁检测设备 .....              | 235        |
| 6.5.4    | 漏磁检测应用实例 .....            | 236        |
| 6.6      | 无损检测技术的综合应用 .....         | 239        |
| 6.6.1    | 表面检测 .....                | 239        |
| 6.6.2    | 超声检测 .....                | 239        |
| 6.6.3    | 射线检测 .....                | 240        |

|          |                                     |            |
|----------|-------------------------------------|------------|
| 6.6.4    | 磁粉检测 .....                          | 240        |
| 6.6.5    | 漏磁检测 .....                          | 240        |
| <b>7</b> | <b>过程设备状态监测 I —— 声发射检测 .....</b>    | <b>241</b> |
| 7.1      | 声发射检测原理、特点与研究进展 .....               | 241        |
| 7.1.1    | 声发射及检测原理 .....                      | 241        |
| 7.1.2    | 声发射检测技术的特点 .....                    | 241        |
| 7.1.3    | 过程设备声发射检测、评估的合理性及难度 .....           | 243        |
| 7.2      | 声发射表征参量与源定位 .....                   | 245        |
| 7.2.1    | 非统计和统计参量的表征方法 .....                 | 245        |
| 7.2.2    | 声发射源定位 .....                        | 247        |
| 7.3      | 声发射检测仪器 .....                       | 253        |
| 7.3.1    | 声发射仪器硬件性能的研究进展 .....                | 254        |
| 7.3.2    | 声发射仪器软件功能的研究进展 .....                | 255        |
| 7.4      | 声发射检测方法 .....                       | 258        |
| 7.4.1    | 检测仪器的选择 .....                       | 258        |
| 7.4.2    | 检测仪器的设置和校准 .....                    | 258        |
| 7.4.3    | 传感器的选择和安装 .....                     | 259        |
| 7.4.4    | 仪器调试和参数设置 .....                     | 260        |
| 7.4.5    | 加载程序 .....                          | 260        |
| 7.5      | 压力容器声发射检测应用实例 .....                 | 264        |
| 7.5.1    | 声发射检测前的准备工作 .....                   | 264        |
| 7.5.2    | 仪器的安装、调试与数据采集 .....                 | 265        |
| 7.5.3    | 声发射数据的分析和源的分类 .....                 | 265        |
| 7.5.4    | 压力容器声发射检测应用实例 .....                 | 266        |
| 7.6      | 声发射检测用于其他过程设备的实例 .....              | 270        |
| 7.6.1    | 立式储罐腐蚀状态的声发射在线检测与评价 .....           | 270        |
| 7.6.2    | 转动设备的声发射检测 .....                    | 274        |
| 7.6.3    | 泄漏探测和监测 .....                       | 276        |
| 7.6.4    | 焊接过程的声发射监测 .....                    | 278        |
| 7.6.5    | 阀门泄漏的声发射检测 .....                    | 282        |
| <b>8</b> | <b>过程设备状态监测 II —— 其他检测新技术 .....</b> | <b>285</b> |
| 8.1      | 红外诊断技术 .....                        | 285        |
| 8.1.1    | 红外诊断技术概述 .....                      | 285        |
| 8.1.2    | 红外诊断技术基本知识 .....                    | 286        |
| 8.1.3    | 红外诊断仪器 .....                        | 290        |
| 8.1.4    | 红外诊断技术的应用范围 .....                   | 291        |
| 8.1.5    | 红外诊断应用实例 .....                      | 292        |
| 8.2      | 磁记忆检测技术 .....                       | 294        |

|            |                  |     |
|------------|------------------|-----|
| 8.2.1      | 磁记忆检测概述 .....    | 294 |
| 8.2.2      | 磁记忆检测基本原理 .....  | 295 |
| 8.2.3      | 磁记忆检测研究现状 .....  | 298 |
| 8.2.4      | 磁记忆检测的应用范围 ..... | 299 |
| 8.2.5      | 磁记忆检测仪器 .....    | 299 |
| 8.2.6      | 磁记忆检测应用实例 .....  | 302 |
| 8.3        | 应力测量技术 .....     | 304 |
| 8.3.1      | 应力测量概述 .....     | 304 |
| 8.3.2      | 电阻应变计法 .....     | 307 |
| 8.3.3      | 应力应变换算 .....     | 308 |
| 8.3.4      | 应变测试法的适用范围 ..... | 309 |
| 8.3.5      | 应力应变检测设备 .....   | 311 |
| 8.3.6      | 应力应变检测应用实例 ..... | 312 |
| 8.4        | 噪声及其检测 .....     | 315 |
| 8.4.1      | 噪声检测概述 .....     | 315 |
| 8.4.2      | 噪声测量与评价 .....    | 316 |
| 8.4.3      | 噪声检测设备 .....     | 319 |
| 8.4.4      | 噪声检测应用实例 .....   | 321 |
| 参考文献 ..... |                  | 326 |

# 1

## 绪 论

### 1.1 过程设备安全的重要性

按照国际公约的约定,社会经济过程中的全部产品一般分为三类,即硬件产品(hardware)、软件产品(software)和流程性材料产品(processed material)。在新世纪初,世界上各主要发达国家和中国都已把“先进制造技术”列为优先发展的战略性高技术之一。先进制造技术主要是指硬件新产品的先进制造技术和流程性材料产品的先进制造技术。

过程工业主要以流程性材料为处理对象,是现代国民经济的支柱产业之一。过程工业遍及几乎所有现代工业生产领域,如化学工业、化肥、石油化工、生物化工、制药、农药、染料、食品、炼油、轻工、热电、核工业、公用工程 and 环境保护等。

从 20 世纪 60 年代开始,由于过程工业特别是化学工业、石油化学工业为代表的高能化、自动化大型生产装置在世界范围内的迅速发展,灾害性爆炸事故、火灾事故、大范围人群中中毒事故不断出现,这些灾害所造成的严重后果和社会问题远远超过了事故本身。以石油化工行业为例,中国石油和化学工业从石油、天然气等矿产资源的勘探开发到石油化工、天然气化工、煤化工、盐化工、农用化工、国防化工、精细化工等,已经形成具有 20 多个行业、可生产 4 万多个品种、门类比较齐全、品种大体配套并有一定国际竞争能力的工业体系。据 2000 年的统计,石油化工生产销售收入 13000 多亿元,占全国工业的 13.6%;原油一次加工能力 2.76 亿吨,居世界第三位;乙烯和合成树脂生产能力居世界第五位;合成橡胶为第四位;化肥第一、染料第一、农药第二、纯碱第二、氯碱第三、硫酸第三。随着我国化工行业的迅速发展,化工行业的企业规模、数量和就业人数也有了较大的增长,截止到 2002 年 10 月底,全国 31 个省(区、市)危险化学品从业单位 289670 家,其中生产单位 2 万多家,储存单位 1 万多家,经营单位 10 万多家,运输单位近万家,使用单位 12 万多家,废弃处置单位 600 多家,其中剧毒化学品从业单位 1 万多家。仅危险化学品生产环节从业人员人数就达 517.4 万。由于危险化学品所固有的易燃易爆、有毒有害的特性,使得盛装这些介质的过程设备的安全问题尤其重要。我国的石油化工行业安全形势比较严重,各类事故和职业危害频繁,已成为制约我国石油化学工业健康发展的重要问题,全国各类伤亡事故总数居高不下,并呈现不断上升的趋势。据统计,2000 年发生化学事故 416 起,2001 年发生化学事故 564 起,2002 年发生化学事故 592 起。2000 年因化学事故伤亡 2156 人,2001 年伤亡 1421 人,2002 年伤亡 1551 人。

因此,在高科技越来越密集、经济规模越来越宏大的今天,避免过程工业灾难性事故成

为一个国家经济顺利发展的前提条件，已成为过程工业安全运行的核心问题。人类文明和社会进步要求生产过程具有更高的安全性、可靠性和稳定性。

过程设备是过程工业进行生产的重要物质技术基础，也是过程工业中的重大危险源。过程工业中进行的各种化学、物理过程往往在密闭状态下连续进行，在这些过程中都需要使用多种设备、机器，如各种型式的换热设备、反应设备、塔设备、干燥设备、分离设备、储罐、压缩机和泵等，以完成生产过程中的各种化学反应、热交换、不同成分的分离、各种原料（包括中间产物）的传输、气体压缩、原料和产品的储存等。随着过程工业向大型化、连续化、自动化方向发展，过程设备的工作条件也越来越恶劣，工作环境也越来越复杂。

随着机械制造技术的发展，虽然可以提供承受高压、超高压、高温、超高温、高转速、大流量和耐腐蚀的过程设备和机器，甚至可以提供成套的大型过程装置，国家也采取了一系列措施，加强安全生产工作，但由于过程设备的使用环境复杂、工作条件恶劣、不安全因素增加，加之设计中考虑不周、维护管理水平低劣以及安全意识不强、安全生产的极端重要性认识不足等原因，发生的重大伤亡事故仍相当频繁，特大事故也时有发生，已成为影响安全生产的主要因素，直接威胁着人民生命财产安全。以大型化肥、炼油装置为例，据 1990～1999 年全国 29 个省、自治区、直辖市以上全民企业的不完全统计，共发生设备与机器事故 1152 起，占全部重大伤亡事故的 31.3%。从伤亡人数来看也是十分惊人的。因此，开展过程工业安全管理及检测技术研究，强化过程工业现代化安全生产管理，抓好职工的安全知识教育，提高领导干部的管理水平与安全责任心，加强过程设备的安全管理、风险评估和危险性缺陷的检测、状态监测，确保过程设备长期、安全、稳定地运行，是过程工业安全生产所要解决的主要问题。

## 1.2 过程设备对安全管理的新要求

安全是人类生存发展过程中永恒的主题。人类在不断发展进化的同时，也一直与生存发展活动中存在的安全问题进行着不懈的斗争。人类社会的发展史在某种意义上也可以看成是解决安全问题的奋斗史。

从 18 世纪中叶，蒸汽机的发明引起了一场工业革命，同时也揭开了安全科学研究的序幕。但是安全作为一门科学，是以 1929 年，美国的安全工程师海因里希（W. H. Heinrich）发表了著名的《工业事故预防》（Industrial Accident Prevention）一书为代表。该书系统地阐述了安全管理的思想和经验，根据当时的工业安全实践总结出“海因里希十条”工业安全公理。数十年来，该理论得到世界上许多国家安全工作者的认可，成为他们从事事故预防和安全管理工作的理论基础。

随着工业发展速度的加快，环境污染和重大工业事故相继发生，职业危害也日益严重。与此同时，人们对职业安全与健康这一在现代科学技术和工业发展中的重大课题，越来越给予广泛的关注。据不完全统计，到 20 世纪 70 年代，许多西方国家建立了与安全科学有关的组织和科研机构。从内容上看，涉及到安全原理、安全工程、卫生工程、人机工程、灾害预防处理、预防事故的经济性、职业病理论分析和科学防范等。美国的安全科学研究与教育发展较快，到 20 世纪 70 年代末，一部分大学设立了卫生工程、安全工程、安全管理、毒物学和安全教育方面的硕士和博士学位。日本在安全科学的研究方面虽起步较晚，但发展却较快，它注重吸收世界各国的经验和教训，在安全工程学这一科学技术层面上进行了研究和发

展。现在日本国内与安全工程有关的大学教育系和研究机构达 76 个, 杂志 36 种, 学会和协会 33 个。由于坚持安全工程学的研究和实践, 日本近 20 年来产业事故频率、死亡人数逐年下降, 持居世界最低水平。由此可见, 为了解决生产过程中的安全和劳动者健康, 世界各国对安全科学的研究已有足够的深度和广度。安全科学作为一门真正的交叉科学工作者正日益受到越来越多的重视。

安全科学的发展从理论上讲大体分为如下三个阶段。

① 经验型阶段 (事后反馈决策型): 长期以来, 人们认为安全仅仅以技术形式依附于生产, 从属于生产, 仅仅在事故发生后进行调查研究、统计分析和整改措施, 以经验作为科学, 安全处于被动局面, 人们对安全的理解与追求是自发的、模糊的。

② 事后预测型 (预期控制型): 人们对安全有了新的认识, 运用事件链分析、系统过程化、动态分析与控制等方法, 达到防治事故的目的。总之, 传统的安全技术建立在事故统计基础上, 这基本属于一种纯反应式的。安全科学缺乏理性, 人们仅仅在各种产业的局部领域发展和应用不同的安全技术, 以致对安全规律的认识停留在相互隔离、重复、分散和彼此缺乏内在联系的状态。

③ 综合系统论 (综合对策型): 认为事故是人、技术与环境的综合功能残缺所致, 安全问题的研究应放在开放系统中, 建立安全的科学性、系统性、动态性。从事故的本质中去防治事故, 揭示各种安全机理并将其系统化、理论化, 变成指导解决各种具体安全问题的科学依据。在这一阶段, 安全科学不仅涉及人体科学和思维科学, 而且涉及行为科学、自然科学和社会科学等所有大的科学门类。

由于现代化过程生产工艺相当复杂, 生产条件要求十分严格, 介质具有易燃、易爆、有毒、腐蚀等特性, 生产装置趋向大型化, 以及生产过程的连续性、自动化程度的提高等, 使生产过程中设备发生事故的可能性增大, 而且造成的危害和损失也极为惨重。因此, 如何应用现代安全科学知识保证过程设备的安全运行与管理, 是提高过程工业安全性的首要问题。

传统的过程设备管理, 主要是采用加强设备安全的管理和定期检查, 制定一系列的安全管理法规, 在过程设备设计过程中引入安全装置等。毫无疑问这些安全管理手段对保证设备的安全运行非常重要, 但是只靠这些方法已不能适应现代化过程生产对过程设备安全管理的新要求。现代过程设备的安全管理对事故的预防是工作的核心, 发现问题比解决问题更重要。重要的是采用现代的无损检测技术, 及时查找出过程设备运行过程中可能存在的危险源, 针对这些危险情况提出相应的改进、预防和维修措施, 进而提高设备安全运行的可靠性, 确保过程工业的安全生产。

## 1.3 过程设备检测技术与进展

### 1.3.1 过程设备对检测技术的新要求

过程设备是一种工业中广泛使用而又比较容易发生事故的特殊设备, 因此, 过程设备最根本的两大问题是安全性和经济性。从现代安全管理科学的角度分析, 过程设备从方案论证、设计、制造、交付使用、检测与维修, 直到最后停用或拆除应是一个全寿命过程, 如图 1-1 所示。在过程设备全寿命过程中, 特别要防止在运行过程中继续发展的危险性缺陷, 这

种缺陷一旦由于各种原因（如应力腐蚀或疲劳等）而发生失稳扩展，就会导致过程设备提前失效，缩短过程设备的使用寿命，并发生严重的泄漏或爆炸事故。据国内外有关资料分析，因裂纹而导致事故约占总失效事故的 89%。这表明，在加强过程设备安全管理的同时，更要注重过程设备中危险性缺陷的无损检测、状态监测与综合评估，从源头避免事故的发生，减少这类事故所造成的损失。

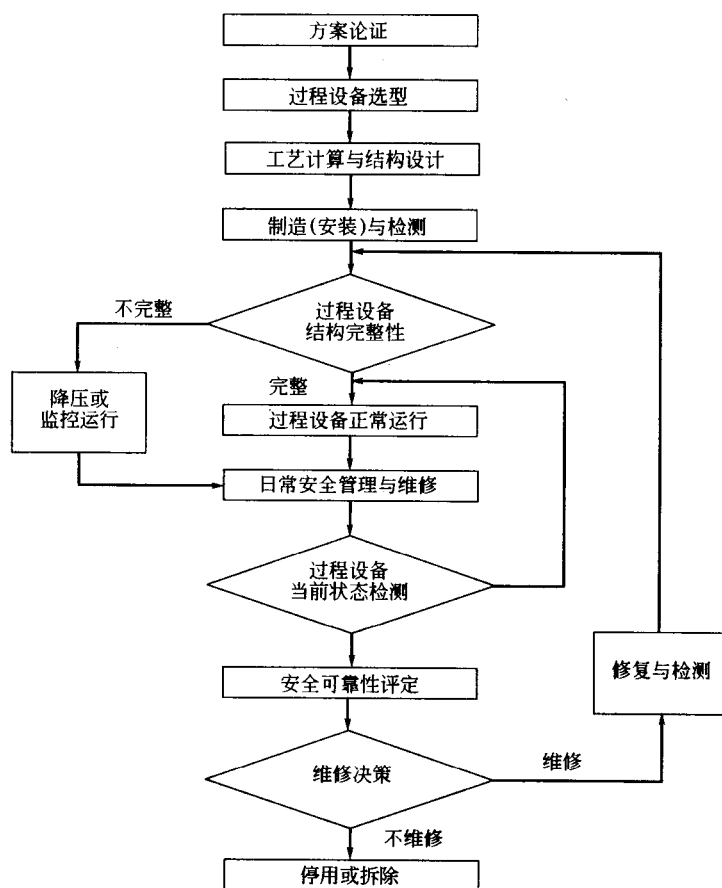


图 1-1 过程设备全寿命过程

无损检测技术是在物理学、电子学、电子计算机技术、信息处理技术、材料科学等学科的成果基础上发展起来的一门综合性技术。无损检测技术已成为国民经济发展不可缺少的共性技术；是保证在役设备安全可靠运行的重要手段；是现代工业产品制造全过程控制质量的关键技术；是发展高科技产品的重要条件之一。

现代无损检测技术可分为常规检测技术和状态检测/监测技术，安全管理和无损检测技术贯穿于过程设备的全寿命运行周期中，对保证过程设备的质量、可靠性和安全运行发挥着重要作用，是保证过程设备“安全、稳定、长期、满负荷、优质”生产的有力武器。尤其是近年来新兴的过程设备状态无损检测技术，如声发射检测/监测技术、磁记忆诊断技术、红外检测技术、漏磁检测技术、超声扫描检测技术、转动设备故障诊断技术等，通过与现代安全风险评估技术相结合，实现过程设备的风险检验与预测，大大提高了设备的安全可靠性和运行经济性。

### 1.3.2 过程设备检测技术及其进展

无损检测是在不破坏被检测材料、零部件或设备的情况下,应用一定的检测技术和分析方法,对原材料、半成品、成品零部件、设备中的零部件、在役设备等的结构、几何关系、物理性能、状态特性以及各种工艺参数等加以测定,并按一定的准则对其做出评价的过程。无损检测是随着现代工业和科学技术的发展而不断发展起来的。1906年,南非的 C. McCann 与 R. Colson 共同研制了第一台钢丝绳电磁无损检测装置,它对于减少当时南非的金矿由于钢丝绳断裂而引起的事故起到了一定的作用;1919年,世界上第一台磁粉探伤仪问世;为了提高钢管的生产质量,1930年,德国研制成功了便携式 X 射线探伤仪。

第二次世界大战以后,人们开始认识到产品质量的重要性,无损检测技术也得到了迅速发展。为了检验厚设备,研制了高能 X 射线探伤装置。1950~1954年,德国的福斯特 (Forster) 博士发表了一系列论文,开创了现代涡流检测方法和设备的研究工作,从此涡流检测技术有了较快的发展并为生产检验所采纳。许多学者从不同方面进行了广泛而深入的研究,取得了大量成果。经过各国科技工作者的不懈努力,无损检测技术得到了很大进展,并形成了五种常规无损检测方法,即超声检测 (Ultrasonic)、射线检测 (Radiographic)、涡流检测 (Eddy Current)、磁粉检测 (Magnetic Particle)、渗透检测 (Penetrant)。同时,声发射检测 (Acoustic Emission) 和红外检测 (Infrared) 也逐渐被采用。这一阶段,研究的重点放在如何得到稳定、可靠、明显的缺陷信息检测方法 & 检测装置上,如探伤传感器的研制等。

到了 20 世纪 80 年代后期,随着微电子技术和电子计算机技术的不断发展,人们开始注重无损检测仪器的微计算机化和智能化,计算机模式识别技术、人工智能技术的迅速发展为这类仪器的产生提供了坚实的理论基础。X 射线、 $\gamma$  射线和中子射线的计算机辅助层析摄影术 (CT 技术) 在无损检测界已经得到应用,出现了数字化的超声检测仪并已开始走向实用化阶段,用于高速自动化检测漏磁的漏磁探伤装置和多频多参量涡流测试仪也获得了迅速发展,在某些项目上达到了在线和实时检测的目的。

无损检测技术是应生产实践需要而产生的,并直接服务于生产实践的各个环节,因此,生产的发展推动着这门学科的发展。同时,它的进展和发现又推动着生产水平的提高,这一相辅相成的关系使得无损检测技术充满活力。另一方面,无损检测技术是一门交叉学科,各种无损检测方法的基本原理几乎涉及到现代物理学的各个分支,它的发展需要相关学科的发展为基础。例如,计算机技术的产生和发展,使得无损检测技术得到突飞猛进的发展,超声成像技术、工业计算机断层扫描技术等就是它们相互接合的结晶。相关学科的理论研究成果可迅速转化为生产力,既激发了理论研究的活力,新理论和新技术也会迅速在这一技术中得到应用。因此,可以说无损检测技术水平从一个侧面反映了一个国家科学技术的发展水平。

目前,无损检测技术已明显地表现出下列发展趋势。

- ① 由定性检测向定量检测和直接显示缺陷图像的方向发展。
- ② 在线自动化检测和仪器的智能化。
- ③ 与断裂力学相结合,对重要工程构件的寿命进行评价。
- ④ 和材料的物性评价相结合,在新材料的设计、加工和工程应用中得到迅速发展。

无损检测技术对现代工业的重大意义,还在于它在新材料和新加工方法研究中的关键性作用。对新材料的加工和装配,也相应提出了新的成形、连接等工艺方法,这些新材料和加



工方法往往由于材料本身或加工工艺过程的特殊性，而必须进行无损检测。实践表明，研究新的检测方法往往比研究制造工艺本身更为重要，因为新的检测方法可以使新材料、新工艺的优化设计变得更为有效。美国为了保持它在世界科技上的领先地位，十分重视对无损检测的高科技化研究。美国有近 10 个无损检测中心，100 多所大学设置了无损检测课程，政府实施研究计划，分别由各大学、中心实验室进行前沿性基础研究，而由各大公司进行应用和开发。日本认为，“现代工业是建立在无损检测基础之上的”，并在工业中坚持普遍采用无损检测技术，使得其产品占有广泛的国际市场。由此可见，无损检测技术是现代工业发展必不可少的重要内容。

中国自 20 世纪 50 年代以后开始了无损检测技术的研究，先后开展了渗透检测、涡流检测、超声检测等无损检测技术的基本原理和应用技术的研究，制成了用于探伤、材料分选等用途的无损检测设备，建立了无损检测仪器生产的专业工厂。在航空航天、冶金、机械、石油化工等部门，无损检测技术的应用已日益增加并日趋成熟。近 10 年来，由于工业发展的刺激，中国的无损检测技术得到了较快发展。但总的看来，无损检测技术是中国发展较为薄弱的环节之一。中国国民生产总值只及日本的  $1/4$  左右，这种现象的原因之一，是由于中国产品质量上存在问题而导致大量产品报废。据测算，中国企业不良品年损失约 2000 亿元。若能在生产过程中采用无损检测技术，及早发现不良品，则可以将损失减到最低程度。如第一、第二汽车制造厂仅对连杆进行无损检测一项，赔偿费用就不采用前下降了 99.7%，每厂每年因此可节省数十万元。又如上海热电设备行业大量采用无损检测技术后，每年的经济效益以百万元计。从产品质量来看，无损检测所带来的经济效益将直接表现在产品的市场竞争能力上。无损检测是提高产品质量的有力工具，是免受国外同类产品冲击的重要条件。这在我国经济与世界经济接轨后具有更重要的意义。

无损检测还将给中国工业发展带来巨大的社会效益，无损检测技术的实施能够有效确保设备的安全运行。现代工业的发展趋势之一，是集机、电、光与计算机为一体的现代设备，工作在高温、高压、高速和重载荷下。在这种条件下，如果不对零件进行无损检测，使得零部件带缺陷运行，则必然降低系统的安全性和可靠性，甚至导致恶性事故，不仅会造成巨大的经济损失，而且可带来严重的社会影响。如 1986 年前苏联切尔诺贝利核电站泄漏事故，死亡 5000 人以上，核污染遍及欧洲大陆。国内以锅炉和压力容器为例，据不完全统计，近 10 年间发生爆炸事故 2254 起，停炉停产重大事故 20000 起，除了造成直接经济损失 4 亿~5 亿元外，间接经济损失 80 亿~100 亿元，因事故而丧生约 1200 人，受伤约 4900 人。而据评估，在目前现役的 130 多万台锅炉和固定式压力容器，仍有 30 万~40 万台存在着各种缺陷或超期服役现象，极需在无损检测的基础上，对它们进行全面的安全评估，避免或减少重大事故的发生。

总之，无损检测技术发展的历史，清楚的记载了人类对物体各种特性的认识过程。无损检测技术随着科学技术的发展而发展，可以说是先进科学技术的集锦。无损检测技术也促进了工业以致整个经济的发展，因而，无损检测技术水平从某种意义上讲，可以作为衡量一个国家经济发展的程度以及现代科学技术发展水平的标志之一。