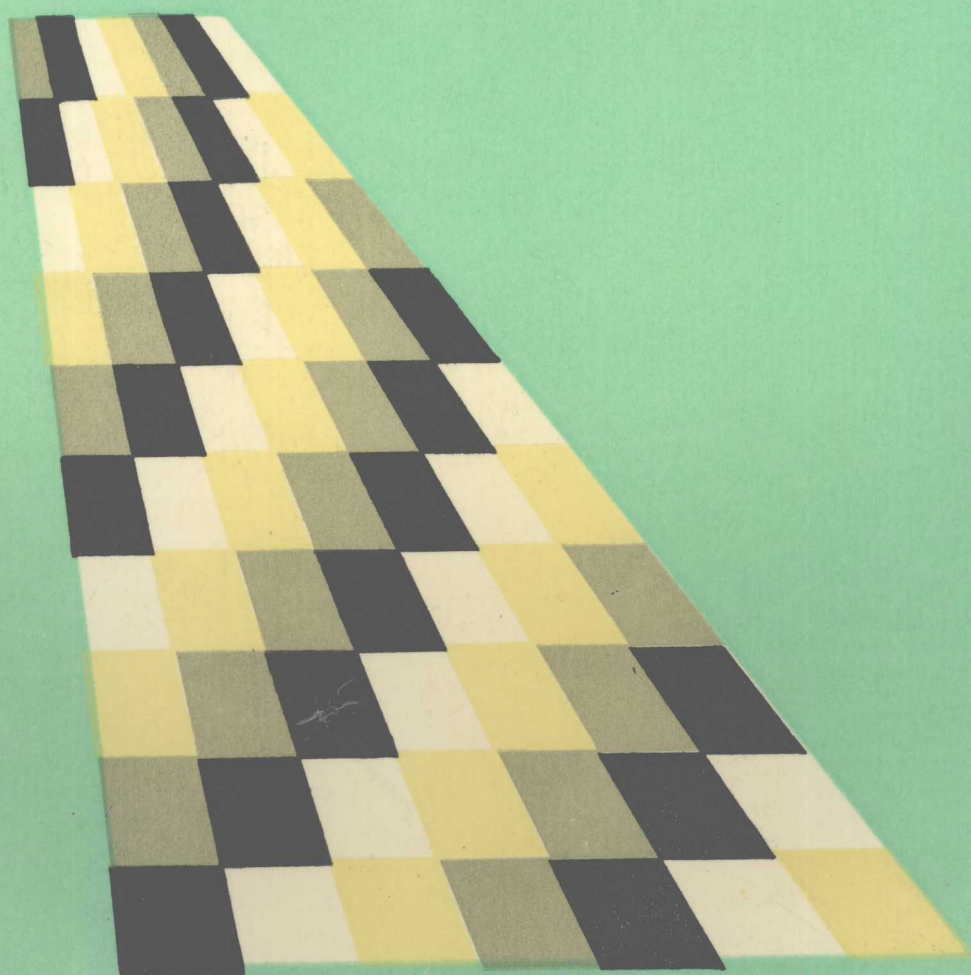


实用化工厂机器管理

(第 2 卷)

机器失效分析和故障排除

〔美〕海因茨·P.布洛克 F.K.盖特纳 编著



实用化工厂机器管理

(第2卷)

机器失效分析和故障排除

〔美〕 海因茨·P·布洛克 编著
弗雷德·K·盖特纳
程以德 等译

化学工业出版社

(京)新登字039号

内 容 介 绍

《实用化工厂机器管理》主要介绍化工和石油化工企业中机器的购置、安装、调试和维修技术,分四册出版。全书的特点是技术先进,实用性强。

本书专门介绍化工厂机器的失效分析和故障排除技术。包括失效分析和故障排除制度、冶金失效分析、机器零部件失效分析、机器故障排除、振动分析、解决机械问题的普遍程序,解决机械问题的统计学方法、潜行分析、作为教育工具的定型故障报告及组织成功的失效分析和故障排除。

《实用化工厂机器管理》的读者主要是化工和石油化工厂的机械工程师、管理人员及中技以上水平的技术工人,也可供有关工业部门的机械设计、制造、维修人员和大专院校机械专业师生参考。

本书由程以德、余成钢、徐胜生、杨琪琪、黄力行、是本仁、陈仪中翻译,许宾贤、徐胜生、卢鹏翔校核,程以德、陈仪中对全书进行了复校。

Heinz P. Bloch, Fred K. Geitner

Practical Machinery Management for Process Plants (Vol. 2)

Machinery Failure Analysis and Troubleshooting

Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1983

实用化工厂机器管理

(第2卷)

机器失效分析和故障排除

程以德 等译

责任编辑:李建斌

封面设计:郑小红

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里3号)

北京通县京华印刷厂印刷

开本787×1092¹/₁₆印张24³/₄插页1字数623千字

1994年12月第1版 1994年12月北京第1次印刷

印数1—1000

ISBN 7-5025-1293-4/TQ·727

定价39.00元

前 言

避免机械可能发生的损坏对于工艺装置的安全和可靠的运行是必要的。机器失效故障能够借健全的技术规范、设备选择、检验和设计上的常规检查等而得以避免。当故障一旦发生，对故障主要原因的准确判断是避免将来再发生故障的绝对必要条件。

本书要求从各种验证过的途径来说明失效，它提供了文件上记载的众多失效事故的充分的综合剖析，分析了用以说明事故经过的程序，这些事故导致了机器零部件或系统损坏。因为要论述每一种可想到的失效类型是不可能的，所以，本书的构成在于讲授失效的鉴别和分析的各种方法，应用于可能发生的所有实际问题场合。对于失效分析和排除需要一种一致的研究方法，因为经验表明所有经常发生的工艺机械问题是永远不能充分解释清楚的；它们仅是“解决了”而“恢复生产”而已。生产上的压力往往不考虑全面分析情况的需要，而使问题及其潜在的因素以后又返回来侵扰人们。

如果潜在的问题预料到了，而且避免了，只有在这时，设备停机时间和零部件的损坏风险才能减少。如果我们仅用传统的分析方法，这就往往不可能达到这个要求。因此应用其它方法去消除或减少工厂设备的破坏和人员的间接伤害，这才是适当的。这方法的目标包括多数零部件或系统及对电器/电子系统潜路分析技术的应用，以及其它各方面。

在一些化工厂中，现有的组织机构和管理方式容许机器的故障和破坏停留在一个“常规”的水平上。本书指出如何得到一种通用的方法来评价失效管理经验达到什么水平才认为是可以接受的和令人满意的。再者，本书还指出组织机构如何较好地致力于机器失效分析和排除的全部工作，最终使维修事故减少。最后，本书举一些成功的范例论证致力于失效分析和故障排除的进程和结果如何能够提供资料从而得到监控。

H. P. Bloch

Houston, Texas

F. K. Geitner

Sarnia, Ontario

(翻译：程以德 校核：许宾贤)

目 录

前 言

第一章 失效分析和故障排除制度

故障排除作为失效分析的延续 (1) 机器失效的原因 (2) 机器失效的根本原因 (6)

第二章 冶金失效分析

冶金的失效分析方法论 (8) 螺栓联接的失效分析 (10) 轴的失效 (14) 轴的应力集中因素 (20) 表面变化失效分析 (25) 磨损失效分析 (29) 参考文献 (34)

第三章 机器零部件失效分析

轴承损坏 (36) 滚动轴承损坏及其原因 (38) 轴承损坏中的负荷路线的模型和它们的意义 (40) 轴承故障排除 (54) 轴颈和摇摆块止推轴承 (64) 齿轮损坏分析 (76) 初步研究 (77) 齿轮理论性能的分析评定 (77) 冶金学的评定 (78) 通用机械设计 (78) 润滑 (78) 由其它系列部件引起的缺陷 (78) 磨损 (78) 撕伤 (82) 表面疲劳 (85) 制造工艺带来的损坏 (88) 断裂 (90) 有润滑的联轴器故障分析 (93) 齿轮联轴器损坏分析 (94) 齿轮联轴器损坏机理 (94) 机械密封损坏原因的判定 (99) 润滑剂问题 (110) 润滑事故分析 (111) 用真空脱水方法净化润滑油 (113) 六个必要的润滑油分析项目 (115) 定期取样和调节的日常工作 (118) 润滑油分析结果 (120) 计算出的效益对费用比 (121) 润滑脂失效分析 (121) 符号说明 (123) 参考文献 (123)

第四章 机器故障排除

机器故障排除的矩阵方法 (130) 泵的故障排除 (136) 离心式压缩机、鼓风机和排风机的故障排除 (144) 往复式压缩机的故障排除 (149) 发动机的故障排除 (155) 汽轮机的故障排除 (158) 燃气轮机的故障排除 (162) 电动机的故障排除 (165) 工艺过程故障排除 (166) 参考文献 (169)

第五章 振动分析

数据收集 (172) 时间波形分析 (192) Lissajous图谱 (环形轨道) 分析 (197) 振幅对时间关系曲线的分析 (203) 分析数据的磁带记录及重放 (204) 相位分析 (207) 对振源作特别的处理以减小工厂噪音 (221) 数据解释 (231) 如何使用图表 5-116 (235) 特定类型机械的振动问题 (255) 轴的裂纹探测 (267) 连续监测和诊断 (271) 往复机械的振动 (272) 对机械规定安全运转限制 (278)

第六章 机械问题解决的普遍程序

情况分析 (282) 原因分析 (287) 行动筹划 (293) 决策 (295) 制订应变计划 (303) 参考文献 (306)

第一章 失效分析和故障排除制度

故障排除作为失效分析的延续

多年来,“失效分析”一词与断裂力学和腐蚀损坏分析的活动联系起来是有其特定意义的。这些活动是由一些静止工艺设备检查组来进行的。图1-1所示为一材料失效分析步骤的基本纲要。这与应用在我们这个工艺机械失效分析的方法方面基本上是一样的;然而,这些方法不限定在冶金的研究上。这里,失效分析要确定机械零件的失效模式及其最可能的原因。图1-2说明机械零件失效模式分析的普遍意义。它在大型汽轮机制造厂的生产改进中是与质量、可靠性和安全性的成果分不开的。

通常,机器故障表现为因果反应链。链的端部常是一种性能缺陷,通常称之为征兆、故障,或简单叫做“问题”。故障排除工作规定了反应链的环节,然后把基于失效(表面)分析得出的最可能的失效原因与一个现存的或潜在的问题的根本原因联系起来。为了所有实际目的,失效分析和排除活动时常彼此交织在一起,没有任何清楚的界限。

但是,如我们以后将见到的,有很多事例,故障排除本身就足以找到问题的根本原因。这些事例表现为性能上的缺陷,不带有明显的失效模式。间断发生的事故和缺陷是一些典型

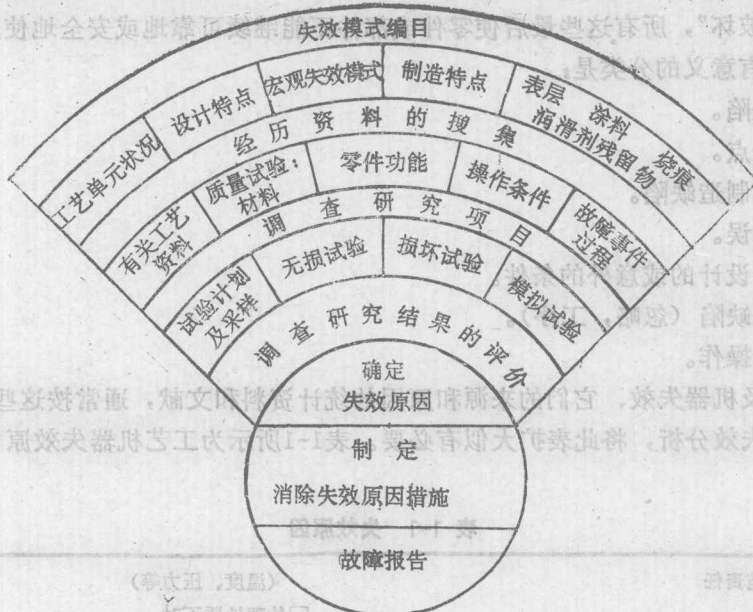


图 1-1 失效分析步骤——材料工艺学 (参考文献1.)

1. 未来损坏事故的避免。

2. 在度过下述各方面寿命循环时,机械要有安全性、可靠性和维修性的保证。

- 工艺设计和规范。
- 设备的原来设计和制造。
- 运输和储存。
- 安装和投料试车。
- 运行和维护。
- 更换。

由此甚为明显地可以看出失效分析和故障排除是高度合作的过程。因为许多不同的方面包含在一起,而它们的目标有时又相异,所以,对工艺机械的许多故障事故作系统的一致性的说明和了解是重要的。

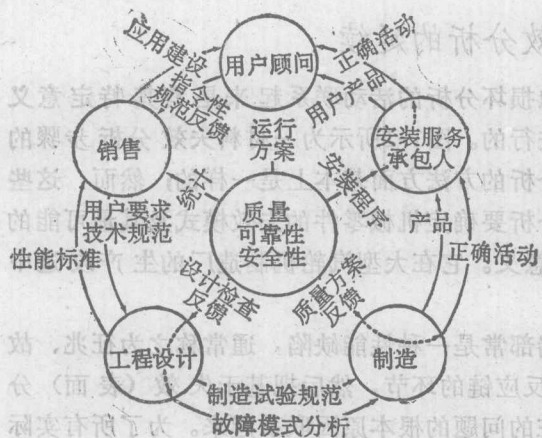


图 1-2 失效分析和“质量轮”

机器失效的原因

以最简单的方式说,失效可定义为机械的一个零件或部件的任何改变导致它不能满意地执行它的应有的功能。在最终失效之前常见的阶段是:“初发故障”、“初期损坏”、“损坏”、“恶化”及“破坏”,所有这些最后使零件或部件不能继续可靠地或安全地使用。

失效原因有意义的分类是:

1. 设计缺陷。
2. 材料缺点。
3. 工艺和制造缺陷。
4. 组装错误。
5. 不符合设计的或意外的条件。
6. 维修的缺陷（忽略，工序）。
7. 非正常操作。

所有的涉及机器失效、它们的来源和原因的统计资料和文献，通常按这些分类。

对实际的失效分析,将此表扩大似有必要。表1-1所示为工艺机器失效原因有代表性的

表 1-1 失效原因

设计和技术规范责任

应用

- ☐
- 低容量

- ☐
- 超容量

- ☐物理条件不对

(温度、压力等)

- ☐物理性质不对

(克分子量等)

- ☐
- _____

技术规范

☐ 不适当的润滑系统☐ 不完全的控制仪表☐ 不适当的联轴器☐ 不适当的轴承☐ 不适当的密封☐ 不完全的停车装置☐ _____☐ _____

材料

☐ 腐蚀和/或侵蚀☐ 快速磨损☐ 疲劳☐ 强度超过☐ 擦伤☐ 错误的硬化处理方法☐ _____☐ _____

设计

☐ 不好的管道支撑☐ 不适当的管道柔性☐ 管道尺寸过小☐ 不适当的基础☐ 不完全的地质资料☐ 液体吸入^①☐ 不适当的排液☐ 设计错误☐ _____☐ _____

售方责任

材料

☐ 裂缝或缺陷☐ 材料不适当☐ 处理不适当☐ _____

设计

☐ 技术规范不适当☐ 错误选择☐ 设计错误☐ 不适当或错误润滑☐ 不适当排液☐ 临界速度☐ 不适当强度☐ 不适当的控制和保护装置☐ _____

制造

☐ 焊接错误☐ 不适当热处理☐ 不适当硬度☐ 错误的表面光洁度☐ 不平衡☐ 润滑油路未开☐ _____

组装

☐ 装配不当☐ 不适当公差☐ 零件漏装☐ 零件错装☐ 零件/螺栓不紧☐ 对中不良☐ 不平衡☐ 不适当轴承接触☐ 不适当试验☐ _____

储运责任

装运准备

☐ 油系统不干净☐ 不适当排水☐ 未用保护涂料☐ 错用涂料☐ 装备不干净☐ _____

保护

☐ 不周全保护☐ 盐的腐蚀☐ 雨水和潮湿腐蚀

- ☐ 包装不好
☐ 未放干燥剂②
☐ 灰尘等污染
☐ _____

物理损坏

- ☐ 装货时损坏
☐ 搬运损坏
☐ 支撑不牢
☐ 卸货时损坏
☐ _____

安装责任

基础

- ☐ 沉降
☐ 不当或不完全的灌浆
☐ 开裂或分离
☐ _____

管道

- ☐ 不对中
☐ 不够干净
☐ 支撑不当
☐ _____

组装

- ☐ 不对中
☐ 组装损坏(工艺)
☐ 有缺陷的材料
☐ 螺栓联接不当
☐ 联接错误
☐ 外来物留在内部
☐ 工人手艺不好
☐ _____

操作和维护责任

- ☐ 温度的
☐ 机械的
☐ 不正当开车
☐ _____

操作

- ☐ 未燃(蒸发)的料液
☐ 操作波动
☐ 控制错误
☐ 控制系统不动作或未投入使用
☐ 操作错误
☐ _____

辅机系统

- ☐ 公用设备故障
☐ 不完整的仪表
☐ 电子控制故障
☐ 气动控制故障
☐ _____

润滑

- ☐ 油内有脏物
☐ 供油不足
☐ 润滑剂错用
☐ 油内有水
☐ 油泵失灵
☐ 油压低
☐ 油路堵塞
☐ 不当过滤
☐ 污染的油
☐ _____

工人手艺

- ☐ 不当公差
☐ 焊接错误
☐ 不当表面光洁度
☐ 不当配合
☐ 一般手艺不好
☐ _____

组装

- ☐ 机械的损伤
☐ 零件错装
☐ 零件遗漏
☐ 不对中
☐ 螺栓联接不当
☐ 不平衡
☐ 管道受力
☐ 外来物留在内部
☐ 用材料不对
☐ _____

预防性维修

- ☐ 延期
☐ 预定时间太长
☐ _____

损坏, 破坏, 或损坏的零件

- ☐ 振动
☐ 短路
☐ 开路
☐ 套筒轴承

根本失效模式，造成磨损，是因。上目取前金部取前等分态主类有知左易效失候一续表

- ☐密封
- ☐联轴器
- ☐轴
- ☐小齿轮
- ☐大齿轮
- ☐回转齿轮
- ☐壳体
- ☐转子
- ☐叶轮
- ☐挡板
- ☐活塞
- ☐隔膜
- ☐轮
- ☐叶片
- ☐叶根

- ☐叶片围带
- ☐迷宫轴封
- ☐推力轴承
- ☐活支轴瓦块
- ☐滚柱/滚珠轴承
- ☐十字头活塞
- ☐气缸
- ☐曲拐轴
- ☐曲轴
- ☐评论:

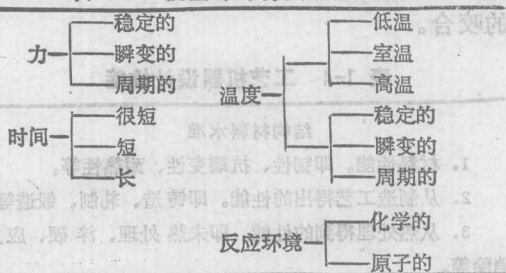
① 这可能指地基泡水而软化。——译者注

② 原文Dessicant可能为Desiccant之误。——译者注

表 1-2 机器失效模式分类

变形——即塑性的、弹性的等
 断裂——即开裂、疲劳断裂、凹坑等
 表面变化——即发裂、汽蚀、磨损等
 材料变异——即污染、腐蚀、磨损等
 位移——即松弛、卡住、过大间隙等
 泄漏
 污染

表 1-3 机器零部件失效机理因素



汇总。此表清楚地表明失效的原因必须划分责任范围。如果不这样划分，则对多数失效分析的前表所列的目标或将不能识别。

失效原因常常决定于与其有关的一个或多个特定的失效模式。这成为任何失效分析活动的中心概念。失效模式(FM)是一台机器的零件或组合件出现故障的表象、方式或式样。表1-2列出根本失效模式，这在所有发生故障的石油化工工艺装置中有99%会碰到这些。

在以下几节中，此表将扩大，使它能够用于每一天里的失效分析。失效模式不要和失效原因相混，因为前者是一项失效事故的结果，而后者是其原因。失效模式也可以说是原因和效应这一长链的结果，最后导致功能上的故障，就是属于作为机器设备一部分的一种征兆，麻烦或运行的病症。

在上述意义上，常用的其它术语是“缺陷种类”、“缺陷”或“故障机理”。“失效机理”一词常被描述为冶金、化学、摩擦学的工艺方法所导致的一种特定的失效模式。例如，失效机理已经发展到可解说下述故障的因果关系链：滚柱轴承组合件的微振磨损(FM)、泵叶轮的汽蚀(FM)、齿轮的齿表面上的初始麻点(FM)，在此只举出这一些。机器零部件失效机理的基本因素总是力、时间、温度及一种反应环境。这些因素中的每一个因素可再分细目如表1-3所示。

对于应用来说，这样定义的失效机理必须是失效模式定义的不变部分。它们将告诉如何

和为什么一种失效模式或许发生在化学的或冶金的项目上。但是,即使如此,失效的根本原因仍未确定。

机器失效的根本原因

前面所述向我们指出:在任何失效事故中总是有几个原因和结果存在。我们需要得出因果关系链的一个实用点——只要不是离开始点很远——在此点上排除或修正一些因素,将会解决这个问题。

作为齿轮主要失效模式之一的齿面咬合损伤可能是一个好的例子。用它自己的意义明确的失效机理来说,齿面咬合是粘着磨损的一种严重形式,如果在齿轮齿面之间有足够厚的油膜,粘着磨损是不可能发生的。最后这句话会给我们关于根本原因的线索(即使隐藏在粘着磨损故障机理中有一因果关系的长链存在)。那么,什么是根本原因呢?我们知道齿面咬合常常是十分突然发生的,这与长时间形成的麻点这一种失效模式形成对比。所以,我们不能在润滑油系统的设计中或是在润滑油本身寻找其根本原因。——就是说,在那个特定的齿轮组如果以前没有发现咬合,突然和间断缺油润滑可能为其原因。是不是根本原因呢?不是,我们还必须要找它,因为我们要找出能阻止咬合重现或继续的要素,不管它已消失还是已经改变了。是否因为这套特定的装置对备用油泵定期试验导致润滑油压力突然和瞬间消失呢?最后,我们会得出一点,在设计、操作、或维护等实践中总会有一种改变就能停止齿轮齿面的咬合。

表 1-4 工艺机器设计性能

结构材料水准
1. 材料性能。即韧性、抗蠕变性、耐热性等。
2. 从制造工艺得出的性能。即铸造、轧制、锻造等。
3. 从热处理得到的性能。即未热处理、淬硬、应力消除等。
4. 表面性能。即机械加工、磨削、抛光等。
5. 从腐蚀和磨损的保护措施得出的性能。即涂镀、搪瓷、涂料等。
6. 从联接方法上得到的性能。即焊接、缩紧、滚涨等。
零部件水准
7. 从形状和型式得出的性能。即筒形、球形、打孔等。
零件、部件、和组合水准
8. 服务的适应性,即易于堵塞、磨损、振动等。
9. 组合形式得到的性能,即铆接、销子、螺栓联接等。
10. 组合质量,即埋头螺钉、接合面贴合、紧固、锁定等。

我们要记住,在每个可想象的情况中,用简单地加强零件的办法对解决机器故障是无能为力的。有些情况,一种适应性强的设计的零件在某些苛刻操作条件下比刚性零件要耐用些。

表1-5总结机器失效模式与其相关的直接原因或设计参数的缺陷以结束本章。

(翻译:程以德 校核:许宾贤)

机器失效根本原因的消除须在设计、操作、维修上想办法。就其传统方式说,后者在失效分析和故障防止上是经常予以强调的。我们的意见是,故障趋向长期间的减少只能由技术条件和设计的改进来完成。我们将在第7章中看到,只有设计上的改变才能得到需要的结果。那么,如何做这项工作呢?在查明失效模式之后,无论如何,我们要把发生故障的机器零件予以改进,使它更能抵御事故的发生。这可通过查核设计参数(见于表1-4所示)予以尽可能的修正。一旦正面的答案已经得到,根本原因也就已经确定,我们就能决定在材料、零件、组合件或系统哪一方面要求减少其易受损害的弱点。当我们表达我们的行动计划时,我们将试验一下机械人员的格言是否有效:

每逢无把握,努力去探索。

熟悉事物中,求解消疑惑。

表 1-5 机械失效模式——工艺装置

变 形	断 裂 分 离	表 面 / 材 料 变 化	位 移																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
变 形	断 裂 分 离	表 面 / 材 料 变 化	位 移	粘 结	磨 损	腐 蚀	疲 劳	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变	应 力	应 变

设计参数
故障“直接”原因

抗拉强度	屈服强度	抗压强度	剪切屈服强度	疲劳强度	延伸率 %RA	夏比 (Charpy) 能量	弹性模数	蠕变速度	K _{1c}	抗侵蚀	电动势 (EMF) 序	硬度	热膨胀系数	熔点	导热性	从制造工艺而得的性能	从腐蚀保护而得的性能	从热处理而得的性能	从磨损保护而得的性能	从形状和式样而得的性能	从组装的型式和质量而得的性能	静态力	动态力	滑动摩擦系数	时间	温度	化学环境
------	------	------	--------	------	---------	----------------	------	------	-----------------	-----	-------------	----	-------	----	-----	------------	------------	-----------	------------	-------------	----------------	-----	-----	--------	----	----	------

表 1-4 材料性能

表 1-4 设计性能

表 1-3

第二章 冶金失效分析

金属零部件的失效分析多年来已为冶金界所关注。石油化工厂常常拥有一支优秀的“静止设备”检验人员队伍。在机器零部件失效分析过程中，他们的服务工作证明是具有重大意义的。冶金检验人员的力量在于解决使用中的失效问题。它们的主要失效模式及其原因如下：

1. 变形和扭曲
2. 断裂和分离
 - a. 塑性断裂。
 - b. 脆性断裂。
 - c. 疲劳断裂。
 - d. 环境影响断裂。
3. 表面和材料变化
 - a. 腐蚀。
 - 均匀腐蚀。
 - 麻点腐蚀。
 - 晶间腐蚀。
4. 应力腐蚀裂纹。
5. 氢破坏。
6. 腐蚀疲劳。
7. 高温损坏。
 - a. 蠕变。
 - b. 应力断裂。

对这些机器零部件失效的详细分析取决于金相检验，这属于一个高度专业化的研究领域。有关这方面分析的深入讨论，请参阅本章末所列的参考文献。

冶金的失效分析方法论

一个机器失效分析人员即使缺乏进行损坏零部件冶金方面详细分析的专业知识，他仍须对分析的各个阶段负责。他的工作是明确损坏事故的根本原因，从而采取纠正或预防行动。冶金失效分析时，必须进行哪些工作的检查表示于表2-1。

在着手进行调查研究前先制订一个失效分析计划是绝对必要的。在实际调查研究之前如不用充分时间去仔细考虑失效的背景并研究其全面的特点，那么，大量时间和精力将会浪费掉。

在表2-1所列各种步骤的进程中，常常会形成一些初步结论。如果在早期检验中，冶金失效上可能的基本原因已经很明显了，那么，其余的调查研究就必须集中在证实这个可能的原因并排除其它可能性上。调查研究将按照图2-1所示的逻辑程序进行，而且，每一阶段的

表 2-2 冶金失效检验核对表^{*}

1. 是否已经建立失效(分析)程序?	11. 温度是否成为失效的原因?
2. 如果失效包含裂纹或断裂, 裂纹是否已定?	12. 磨损是否为失效的原因?
3. 裂纹是在表面或在表面之下?	13. 腐蚀是否为失效的原因? 哪种类型的腐蚀?
4. 裂纹是否与一应力集中点相联?	14. 材料使用是否得当? 是否需要更好的材料?
5. 出现的裂纹有多长?	15. 剖面(尺寸)对工作等级是否足够?
6. 载荷的强度如何?	16. 材料的质量是否符合规范的要求?
7. 载荷的类型: 静态的、周期性的、间断性的?	17. 材料的机械性能是否符合规范的要求?
8. 应力的定向如何?	18. 损坏件是否正确地进行了热处理?
9. 失效机理如何?	19. 损坏件的制造是否正确?
10. 失效发生时, 工作的近似温度如何?	20. 零部件的组装或安装是否正确?

表 2-3 冶金失效报告的主要部分
(摘自参考文献 2)

1. 损坏件的描述。	5. 失效的机械和冶金方面研究。
2. 损坏时的工作条件。	6. 冶金质量的评价。
3. 在此之前的工作历史。	7. 失效原因机理的总结。
4. 零部件的制造工艺历史。	8. 避免类似失效的建议。

螺栓联接的失效分析

机器失效的分析者在其专业生涯中的某些时间内将必须处理螺纹紧固或螺栓联接的故障。也就在此时, 他将会发现“螺母和螺栓”这一基本课题忽然变得出乎意料地复杂起来。

在机器失效分析行业中, 任何人在对待螺栓联接的设计和运用方面的态度必须赶上时代的要求。因为它们在工程结构中常常是最薄弱的环节。这里正是机器泄漏、损坏、滑动、破裂、松弛或者失效的地方。

许多因素影响螺栓联接的损坏。看一看现有的统计数字就可知道, 我们所遇到的螺纹紧固问题的变化范围是很大的。注意下述情况: 在1964~1970年期间, 一家大的欧洲机器保险公司的研究中心, ATZ*, 分析了螺纹紧固损坏导致机器破坏的132个实例。这些实例的失效原因和失效模式的分布率示于表2-4。

现在请看一下在空间实验室计划实施过程中, 有关联接损坏的一份研究报告。报告中的统计数字见表2-5。

从表中可看出, 为了解决我们的问题, 我们必须在自己的工厂里将机器故障列表存档, 以便透彻的了解在我们特定的周围环境中, 引起失效的主要因素是什么。

螺栓联接为什么会损坏?

对这个问题给予一个详尽的答案超出了本书的范围。但是, 我们可以对此作一综述, 以便读者在面对一项螺栓联接损坏时可以询问必要的问题。

联接损坏有多种方式, 但是, 在所有已经发生的损坏事例中是因为联接件出现下列问题:

1. 相对滑动(位移)。
2. 分离(位移)。
3. 螺栓及/或联接件破坏(断裂)。

* Allianz技术中心, Ismaning/Munich(联邦德国)。

表 2-4 螺纹紧固的失效原因和模式
(摘自参考文献4)

失效原因	失效分布率, %
产品问题	50.0
操作问题	40.0
组装问题	10.0
失效模式	
疲劳损坏	40.0
蠕变损坏	20.0
突然损坏	
• 脆性	10.0
• 塑性	20.0
• 腐蚀	10.0

表 2-5 空间实验室计划中螺栓联接失效原因一览
(所有紧固件都已拧紧.摘自参考文献 5)

失 效 原 因	失效分布率, %
产品问题	
设计不当	24.0
零件在操作中损坏	23.0
零件不合格	10.0
组装问题	
组装不当	29.0
预加载荷不正确	14.0

表 2-6 螺栓联接失效模式

	初始原因 (因素)	静载荷下的断裂	疲劳损坏	振动松弛	接头泄漏
设计 和 制 造	与振动轴线有关的螺栓轴线方向			•	
	联接衰减			•	
	卸载效应		•	•	
	牙根圆弧半径		•		
	螺栓/联接刚性比		•		•
	螺纹退刀纹		•		
	圆角尺寸和式样		•		
	螺母扩张	•			
	配合不佳	•			
	咬住	•			
组 装 工 作	零件光洁度		•		
	不正确的热处理	•			
	刀痕		•		
	接合表面的条件				•
	衬垫条件				•
	紧螺栓顺序				•
	螺纹润滑	•	•	•	
操 作 条 件	使用工具的类型	•			
	不适当的预加负荷			•	•
	负荷偏差的大小	•	•		
	温度循环				•
	腐蚀	•	•	•	•