



教育部高等学校  
材料科学与工程教学指导委员会规划教材

● 丛书主编 黄伯云

# 材料失效诊断、 预测和预防

主 编 钟群鹏  
副主编 张 峥 骆红云

## Failure Diagnosis Prediction and Prevention of Materials



中南大学出版社  
[www.csupress.com.cn](http://www.csupress.com.cn)



教育部高等学校  
材料科学与工程教学指导委员会规划教材

● 丛书主编 黄伯云

# 材料失效诊断、 预测和预防



主 编 钟群鹏  
副主编 张 峥 骆红云

Failure Diagnosis  
Prediction and Prevention of  
Materials



中南大学出版社  
[www.csupress.com.cn](http://www.csupress.com.cn)

---

图书在版编目(CIP)数据

材料失效诊断、预测和预防/钟群鹏主编. —长沙:中南大学出版社,  
2008. 12

ISBN 978-7-81105-706-5

I. 材... II. 钟... III. 工程材料 - 失效分析 - 高等学校 - 教材  
IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 001589 号

---

材料失效诊断、预测和预防

主编 钟群鹏

---

☐责任编辑 谭 平

☐责任印制 汤庶平

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-8876770

传真:0731-8710482

☐印 装 中南大学湘雅印刷厂

---

☐开 本 787×960 1/16 ☐印张 23.25 ☐字数 498 千字

☐版 次 2009 年 2 月第 1 版 ☐2009 年 2 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-81105-706-5

☐定 价 42.00 元

---

图书出现印装问题,请与出版社调换

# 内 容 简 介

本书是教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会规划教材,根据教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会相关的课程“教学基本要求”编写。

失效诊断、预测和预防是从失败入手着眼于成功和发展的科技领域;是从过去入手着眼于未来和进步的科技领域。材料的失效诊断、预测和预防已越来越被人们所重视。

本书主要阐述了材料失效诊断、预测和预防的基本概念、基本理论和方法,共分5章,第1章简要介绍失效分析的基本概念、基本内容、地位与作用等;第2章主要阐述断口分析、裂纹分析、痕迹分析、腐蚀和磨损产物分析以及综合分析等材料失效诊断的技术和方法;第3章主要阐明以失效模式为基础的材料失效预测的基本理论和方法以及材料失效预测的力学和数学方法;第4章阐述包括断裂、疲劳及失稳等多种失效模式材料(构件)的确定性和概率安全评估技术以及方法,风险评估技术和方法;第5章阐述基于材料设计技术、机械设计技术、材料(构件)监检测技术等的材料失效预防技术和方法等。

本书可作为高等学校材料科学与工程专业本科生或研究生教材,也可供相关领域的科技人员以及高等院校相关专业的师生参考。

# 教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会规划教材

## 编 审 委 员 会

### 主 任

黄伯云(教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会主任委员、中国工程院院士、中南大学教授、博士生导师)

### 副主任

姜茂发(分指委\*主任委员、东北大学教授、博士生导师)

吕 庆(分指委副主任委员、河北理工大学教授、博士生导师)

张新明(分指委副主任委员、中南大学教授、博士生导师)

陈延峰(材物与材化分指委\*\*副主任委员、南京大学教授、博士生导师)

李越生(材物与材化分指委副主任委员、复旦大学教授、博士生导师)

汪明朴(教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会秘书长、中南大学教授、博士生导师)

### 委 员

(以姓氏笔画为序)

于旭光(分指委委员、石家庄铁道学院教授)

韦 春(桂林工学院教授、博士生导师)

王 敏(分指委委员、上海交通大学教授、博士生导师)

介万奇(分指委委员、西北工业大学教授、博士生导师)

水中和(武汉理工大学教授、博士生导师)

孙 军(分指委委员、西安交通大学教授、博士生导师)

刘 庆(重庆大学教授、博士生导师)

刘心宇(分指委委员、桂林电子科技大学教授、博士生导师)

刘 颖(分指委委员、北京理工大学教授、博士生导师)

朱 敏(分指委委员、华南理工大学教授、博士生导师)

---

注：\* 分指委：全称教育部高等学校金属材料工程与冶金工程专业教学指导分委员会；

\*\* 材物与材化分指委：全称教育部高等学校材料物理与材料化学专业教学指导分委员会。

曲选辉(北京科技大学教授、博士生导师)  
任慧平(教育部高取高专材料类教学指导委员会主任委员、内蒙古科技大学教授)  
关绍康(分指委委员、郑州大学教授、博士生导师)  
阮建明(中南大学教授、博士生导师)  
吴玉程(分指委委员、合肥工业大学教授、博士生导师)  
吴化(分指委委员、长春工业大学教授)  
李强(福州大学教授、博士生导师)  
李子全(分指委委员、南京航空航天大学教授、博士生导师)  
李惠琪(分指委委员、山东科技大学教授、博士生导师)  
余志明(中南大学教授、博士生导师)  
余志伟(分指委委员、东华理工学院教授)  
张平(分指委委员、装甲兵工程学院教授、博士生导师)  
张昭(分指委委员、四川大学教授、博士生导师)  
张涛(分指委委员、北京航空航天大学教授、博士生导师)  
张文征(分指委委员、清华大学教授、博士生导师)  
张建新(河北工业大学教授)  
张建勋(西安交通大学教授、博士生导师)  
沈峰满(分指委秘书长、东北大学教授、博士生导师)  
杨贤金(分指委委员、天津大学教授、博士生导师)  
陈文哲(分指委委员、福建工程学院教授、博士生导师)  
陈翌庆(材物与材化分指委委员、合肥工业大学教授、博士生导师)  
周小平(湖北工业大学教授)  
赵昆渝(昆明理工大学教授、博士生导师)  
赵新兵(分指委委员、浙江大学教授、博士生导师)  
姜洪义(武汉理工大学教授、博士生导师)  
柳瑞清(江西理工大学教授)  
聂祚仁(北京工业大学教授、博士生导师)  
郭兴蓬(材物与材化分指委委员、华中科技大学教授、博士生导师)  
黄晋(分指委委员、湖北工业大学教授)  
阎殿然(分指委委员、河北工业大学教授、博士生导师)  
蒋青(分指委委员、吉林大学教授、博士生导师)  
蒋建清(分指委委员、东南大学教授、博士生导师)  
潘春旭(材物与材化分指委委员、武汉大学教授、博士生导师)  
戴光泽(分指委委员、西南交通大学教授、博士生导师)

# 总 序



材料是国民经济、社会进步和国家安全的物质基础与先导,材料技术已成为现代工业、国防和高技术发展的共性基础技术,是当前最重要、发展最快的科学技术领域之一。发展材料技术将促进包括新材料产业在内的我国高新技术产业的形成和发展,同时又将带动传统产业和支柱产业的改造和产品的升级换代。“十五”期间,我国材料领域在光电子材料、特种功能材料和高性能结构材料等方面取得了较大的突破,在一些重点方向迈入了国际先进行列。依据国家“十一五”规划,材料领域将立足国家重大需求,自主创新、提高核心竞争力、增强材料领域持续创新能力将成为战略重心。纳米材料与器件、信息功能材料与器件、高新能源转换与储能材料、生物医用与仿生材料、环境友好材料、重大工程及装备用关键材料、基础材料高性能化与绿色制备技术、材料设计与先进制备技术将成为材料领域研究与发展的主导方向。不难看出,这些主导方向体现了材料学科一个重要发展趋势,即材料学科正在由单纯的材料科学与工程向与众多高新科学技术领域交叉融合的方向发展。材料领域科学技术的快速进步,对担负材料科学与工程高等教育和科学研究双重任务的高等学校提出了严峻的挑战。为迎接这一挑战,高等学校不但要担负起材料科学与工程前沿领域的科学研究、知识创新任务,而且要担负起培养能适应材料科学与工程领域高速发展需求的、具有新知识结构创新型高素质人才的重任。

为适应材料领域高等教育的新形势,2006—2010 年教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会积极组织材料类高等学校教材的建设规划工作,成立了规划教材编审委员会,编审委员会由相关学科的分教学指导委员会主任委员、委员以及全国 30 余所影响力和代表性的高校材料学院院长组成。编审委员会分别于 2006 年 10 月和 2007 年 5 月在湖南张家界和中南大学召开了教材建设研讨会和教材提纲审定会。经教学指导委员会和编审委员会推荐和遴选,逾百名来自全国几十所高校的具有丰富教学与科研经验的专家、学者参加了这套教材的编

写工作。历经几年的努力，这套教材终于与读者见面了，它凝结了全体编写者与组织者的心血，充分体现了广大编写者对教育部“质量工程”精神的深刻体会，对当代材料领域知识结构的牢固掌握和对高等教育规律的熟练掌握，是我国材料领域高等教育工作者集体智慧的结晶。

这套教材基本涵盖了金属材料工程专业的主要课程，同时还包含了材料物理专业和材料化学专业部分专业基础课程，以及金属、无机非金属和高分子三大类材料学科的实验课程。整体看来，这套教材具有如下特色：①根据教育部高等学校教学指导委员会相关课程的“教学大纲”及“基本要求”编写；②统一规划，结构严谨，整套教材具有完整性、系统性，基础课与专业课之间的内容有机衔接；③注重基础，强调实践，体现了科学性、实用性；④编委会及作者由材料领域的院士、知名教授及专家组成，确保了教材的高质量及权威性；⑤注重创新，反映了材料科学领域的新知识、新技术、新工艺、新方法；⑥深入浅出，说理透彻，便于老师教学及学生自学。

教材的生命力在于质量，而提高质量是永恒的主题。希望教材的编审委员会及出版社能做到与时俱进，根据高等教育改革和发展的形势及材料专业技术发展的趋势，不断对教材进行修订、改进、完善，精益求精，使之更好地适应高等教育人才培养的需要，也希望他们能够一如既往地依靠业内专家，与科研、教学、产业第一线人员紧密结合，加强合作，不断开拓，出版更多的精品教材，为高等教育提供优质的教学资源和服务。

衷心希望这套教材能在我国材料高等教育中充分发挥它的作用，也期待着在这套教材的哺育下，新一代材料学子能茁壮成长，脱颖而出。

董伯云

# 前言

---



从人类认识客观世界的历史长河来说,人的认识是有限的,而客观世界是无限的。失效是人们的主观认识与客观事物相互脱离的结果,失效发生与否是不为人们的主观意志为转移的,因此,失效是绝对的,而安全则是相对的。失效分析是人们认识客观物理本质和规律的逆向思维探索,是对正向思维研究的不可缺少的重要补充,是变失效(失败)为安全(成功)的基本关键,是人们深化客观事物认识的知识源泉。失效分析、改进提高、再失效分析研究、再提高发展,如此往复循环、螺旋上升、发展飞跃,就是人类科学技术发展历史,乃至社会历史的全过程,因此,广义地说,人类的科学技术发展史、社会发展史就是与广义失效不断作斗争,变失效(失败)为安全(成功)的历史。

当今,科学技术是第一生产力,高科技的发展已成为国民经济和国防科技发展的主要关键和依托,而高科技的发展也依赖于高科技发展中的失效分析预测和预防,因此,高科技的发展更需要失效诊断、预测和预防技术的进一步强化,并将失效诊断、预测和预防列为高科技的发展领域之内。总之,失效诊断、预测和预防是从失败入手着眼于成功和发展,是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(失败、故障)问题,是人们走上成功、科技发展少走弯路的捷径之一。

基于以上原因,失效诊断、预测和预防领域的研究越来越为人们所重视,该领域的知识需求也越来越广泛,编写组编写了该教材,以期能对工科学校的本科高年级及硕士阶段失效诊断、预测和预防方面的学生培养提供一个较为系统的参考。本书最大的特点是不仅详细阐述了有关材料失效诊断的各种技术、方法、思路和过程,同时还深入探讨了各种含缺陷材料和结构的安全评定及失效的预测预防技术,即阐述了从“事故后分析处理”变到“事故前评估与预测”的一整套理论和方法。

本书共分5章,第1章简要介绍失效分析的地位、作用、基本概念、基本理论和方法等,由钟群鹏院士和有移亮撰写;第2章主要阐述断口分析、裂纹分析、痕迹分析以及综合分析

等材料失效诊断的技术和方法,由张峥教授和傅国如高工撰写;第3章主要阐明以失效模式为基础的材料失效预测的基本理论和方法以及材料失效预测的力学和数学方法,由骆红云教授和孙永庆博士撰写;第4章阐述包括断裂、疲劳及失稳等多种失效模式材料(构件)的确定性和概率安全评估技术,以及风险评估技术,由骆红云教授撰写;第5章阐述基于材料设计技术、机械设计技术、材料(构件)检测技术等的材料失效预防技术,由张峥教授撰写。在本书的编写过程中武汉大学王志成副教授参与了教材整体结构的设计。本书的出版得到了中南大学出版社周兴武老师的大力支持,作者在此一并致谢。

编者

2009年1月于北京

# 目 录

|                                     |      |
|-------------------------------------|------|
| 第1章 概论 .....                        | (1)  |
| 1.1 失效与失效分析的基本概念 .....              | (1)  |
| 1.1.1 失效与失效分析相关术语 .....             | (1)  |
| 1.1.2 失效的分类 .....                   | (1)  |
| 1.2 失效分析预测预防的地位与作用 .....            | (5)  |
| 1.3 失效分析预测预防的特点和属性 .....            | (6)  |
| 1.3.1 失效分析的特点和属性 .....              | (6)  |
| 1.3.2 失效分析预测预防与相关学科、技术之间的关系 .....   | (6)  |
| 1.3.3 失效分析预测预防应注意的事项和对人员素质的要求 ..... | (7)  |
| 1.3.4 失效分析预测预防的技术工作 .....           | (8)  |
| 1.4 失效分析预测预防的步骤和程序 .....            | (12) |
| 1.5 失效分析预测预防的常用分析思路 .....           | (15) |
| 1.6 失效的事后处理及失效预防 .....              | (18) |
| 第2章 失效诊断技术和方法 .....                 | (26) |
| 2.1 断口诊断技术和方法 .....                 | (26) |
| 2.1.1 断口准备 .....                    | (26) |
| 2.1.2 断口形貌诊断技术和方法 .....             | (29) |
| 2.1.3 断口定量诊断技术和方法 .....             | (42) |
| 2.2 裂纹诊断技术和方法 .....                 | (52) |
| 2.2.1 裂纹的无损检测 .....                 | (52) |
| 2.2.2 裂纹产生先后顺序诊断技术和方法 .....         | (53) |
| 2.2.3 裂纹的形貌诊断 .....                 | (54) |
| 2.2.4 裂纹综合诊断 .....                  | (60) |
| 2.3 痕迹诊断技术和方法 .....                 | (65) |
| 2.3.1 痕迹及痕迹分析概述 .....               | (65) |
| 2.3.2 痕迹的发现和显现技术及方法 .....           | (66) |
| 2.3.3 痕迹的提取、固定、清洗、记录及保存技术和方法 .....  | (66) |

|            |                             |              |
|------------|-----------------------------|--------------|
| 2.3.4      | 痕迹的鉴定 .....                 | (67)         |
| 2.3.5      | 痕迹的模拟再现 .....               | (78)         |
| 2.3.6      | 痕迹的综合分析 .....               | (78)         |
| 2.4        | 腐蚀和磨损产物的诊断技术和方法 .....       | (79)         |
| 2.4.1      | 腐蚀和磨损产物的形貌诊断 .....          | (80)         |
| 2.4.2      | 腐蚀和磨损产物的成分诊断 .....          | (80)         |
| 2.4.3      | 腐蚀和磨损产物的结构诊断 .....          | (80)         |
| 2.5        | 综合诊断技术和方法 .....             | (81)         |
| 2.5.1      | 失效模式(性质)诊断技术和方法 .....       | (81)         |
| 2.5.2      | 失效原因诊断技术和方法 .....           | (111)        |
| 2.5.3      | 失效机理诊断技术和方法 .....           | (125)        |
| <b>第3章</b> | <b>材料失效预测学 .....</b>        | <b>(132)</b> |
| 3.1        | 基于材料(构件)失效模式的预测技术和方法 .....  | (132)        |
| 3.1.1      | 金属材料基于失效模式的预测技术和方法 .....    | (132)        |
| 3.1.2      | 非金属构件的失效预测 .....            | (155)        |
| 3.2        | 材料(结构)失效力学预测技术和方法 .....     | (162)        |
| 3.2.1      | 材料(结构)失效经典力学预测预防技术和方法 ..... | (163)        |
| 3.2.2      | 材料(结构)失效断裂力学预测技术和方法 .....   | (172)        |
| 3.2.3      | 材料(结构)疲劳失效预测理论和方法 .....     | (181)        |
| 3.2.4      | 材料(结构)损伤力学失效预测技术和方法 .....   | (190)        |
| <b>第4章</b> | <b>材料安全评估学 .....</b>        | <b>(201)</b> |
| 4.1        | 概述 .....                    | (201)        |
| 4.1.1      | 安全评估的概念 .....               | (202)        |
| 4.1.2      | 安全评估的一般原则 .....             | (203)        |
| 4.1.3      | 失效模式的判别 .....               | (203)        |
| 4.1.4      | 安全评估的方法的选择 .....            | (203)        |
| 4.1.5      | 安全评估技术的发展趋势 .....           | (204)        |
| 4.2        | 确定性断裂安全评估技术和方法 .....        | (204)        |
| 4.2.1      | 目前国内外规范中通用失效评估曲线 .....      | (205)        |
| 4.2.2      | 静载条件下确定性安全评估方法 .....        | (206)        |
| 4.2.3      | 疲劳失效确定性评定技术和方法 .....        | (232)        |
| 4.2.4      | 其他失效模式的确定性安全评估技术和方法 .....   | (243)        |

|                                |              |
|--------------------------------|--------------|
| 4.3 概率安全评估方法 .....             | (249)        |
| 4.3.1 概述 .....                 | (249)        |
| 4.3.2 概率安全评估中主要参数的统计特性分析 ..... | (251)        |
| 4.3.3 静载下(含平面缺陷)概率安全评估方法 ..... | (255)        |
| 4.3.4 疲劳载荷下概率安全评估方法 .....      | (257)        |
| 4.4 工业风险评估及其主要方法和应用 .....      | (263)        |
| 4.4.1 概述 .....                 | (263)        |
| 4.4.2 风险评估的主要任务 .....          | (265)        |
| 4.4.3 风险评估的主要技术和方法 .....       | (268)        |
| 4.4.4 风险评估的主要工业应用 .....        | (274)        |
| 4.4.5 风险评估的主要进展 .....          | (279)        |
| <b>第5章 失效预防技术和方法 .....</b>     | <b>(282)</b> |
| 5.1 失效的工程预防技术和方法 .....         | (282)        |
| 5.1.1 抗断裂失效设计技术 .....          | (282)        |
| 5.1.2 制造工艺及质量控制技术 .....        | (284)        |
| 5.1.3 表面防护与强化工艺技术 .....        | (289)        |
| 5.1.4 故障排除与修理技术 .....          | (294)        |
| 5.2 抗失效的材料选择和材料设计技术和方法 .....   | (297)        |
| 5.2.1 抗变形失效材料的选择和设计方法 .....    | (298)        |
| 5.2.2 抗断裂失效材料的选择和设计方法 .....    | (302)        |
| 5.2.3 抗腐蚀失效材料的选择和设计方法 .....    | (308)        |
| 5.2.4 抗磨损失效材料的选择和设计方法 .....    | (312)        |
| 5.3 抗失效的机械设计技术和方法 .....        | (324)        |
| 5.3.1 抗脆断设计技术和方法 .....         | (324)        |
| 5.3.2 抗韧断设计技术和方法 .....         | (330)        |
| 5.3.3 抗疲劳设计技术和方法 .....         | (331)        |
| 5.3.4 抗环境失效设计技术和方法 .....       | (341)        |
| 5.4 可靠性设计技术和方法 .....           | (344)        |
| 5.4.1 可靠性设计基本概念 .....          | (344)        |
| 5.4.2 可靠性设计方法 .....            | (349)        |
| <b>参考文献 .....</b>              | <b>(351)</b> |

# 第1章 概 论

## 1.1 失效与失效分析的基本概念

### 1.1.1 失效与失效分析相关术语

(1) 失效：机电产品丧失功能的现象称为失效。

(2) 失效分析预测预防：分析诊断失效的模式、原因和机理，研究采取补救预测和预防措施的技术活动和管理活动。

(3) 失效学：研究机电产品失效的诊断、预测和预防理论、技术和方法的交叉综合的分支学科。失效学与相关学科的边界还不够明确，它是一个发展中的新兴学科。

(4) 风险：是失效的可能性与失效后果的乘积。风险评估就是对系统发生失效的危险性进行定性和定量的分析。

(5) 失效件和废品：失效件是指进入商品流通领域后发生的故障，而废品则是指进入商品流通领域前发生的质量问题。废品分析采用的方法常与失效件分析方法一致。

(6) 失效和可靠：失效是可靠的反义词。机电产品的可靠度  $R(t)$  是指时间  $t$  内还能满足规定功能的产品比率，即  $n(t)/n(0)$ 。累积失效概率  $F(t)$  就是时间  $t$  内的不可靠度，即  $F(t) = 1 - R(t) = [n(0) - n(t)]/n(0)$ 。

(7) 失效和事故：失效强调过程，而事故则突出后果。如由于涡轮叶片的疲劳断裂失效，导致某型号的  $\times$  等事故。

(8) 失效分析和状态诊断：失效分析是指事后的分析，而状态诊断是针对可能的主要失效模式、原因和机理方面事先的，即在线、适时、动态的诊断。

(9) 失效分析和安全评定：失效分析是指事故后的失效模式、原因和机理诊断，而安全评定是指事故前，按“合于使用”原则的安全与否的评价。

### 1.1.2 失效的分类

失效可以按以下三种方法分类，即从技术观点、质量管理和可靠性工程的观点和经济法观点进行分类。

按技术观点进行分类便于对失效进行机理研究、分析诊断和采取预防对策；按质量管理的观点进行分类便于管理和反馈；按经济法的观点进行分类则便于事后处理。本书将主要讨

论从技术观点的分类。

### (1) 按失效分析的技术观点分类

从失效分析的技术观点进行分类主要是按失效模式和失效机理分类。失效模式是指失效的外在宏观表现形式和规律。失效机理则是引起失效的微观的物理化学变化过程和本质。按失效模式和失效机理相结合对失效进行分类就是宏观与微观相结合、由表及里地揭示失效的物理本质和过程，因而它是一种研究的重要分类方法。

机械失效分类见表 1-1。在表 1-1 中，左边为失效模式或失效机理，右边为断口（表面）形态，实线为通常情况下的对应关系，虚线为特定情况下的对应关系。值得指出的是，单一模式或单一机理的失效较少见。大多数的失效是多因素、多种机理及复杂模式的“复合型失效”。表 1-1 右边各种机理之间的连线表示它们之间的交互作用。在按“失效分析的技术观点”分类中，还有人按失效零件或部件的类型和按引起失效的工艺环节分类的。前者便于应用于机械零、部件的可靠性设计和评估，后者则有利于机械零、部件的质量控制。

### (2) 按质量管理和可靠性工程观点分类

质量管理乃是人们为了保证、改进和提高质量而从事的计划、组织、协调、审查、检验等一系列控制的活动。失效则是产品质量控制网“三性”（健全性、严密性和散布性）发生偏差（弱网、漏网和无网）的反映，失效分析就是对质量控制网“三性”的实地检验（图 1-1）。因此，失效分析是质量管理的重要组成部分之一。可靠性工程是运用系统工程的思路和方法，权衡经济利弊，把设备（或系统）的失效率降低到可接受的程度，从而进行合理的设计（可靠性设计）和管理的一门技术。因此，可靠性工程实质上就是预测、预防和控制失效的技术工作和管理活动，而失效分析则是可靠性工程的技术基础。失效从质量管理和可靠性工程的观点分类就是要从失效发展过程和速度、失效的工程含义（即失效的整体性、可修复性和相关性）来分类。具体分类如下：

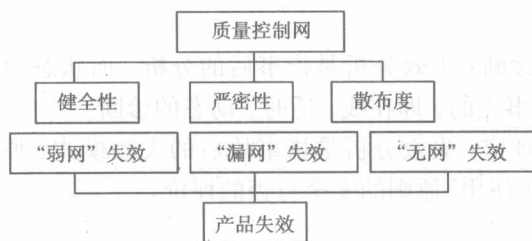


图 1-1 产品失效与质量控制网“三性”关系

### 1) 按产品失效的发展过程分类

如果我们以失效率——单位时间内发生失效的比率——来描述产品失效的发展过程，那

## 机理失效

么,在不进行预防性维修的情况下,设备、元件的失效率 $\lambda$ 与其工作(使用)时间 $t$ 之间有如图1-2所示的典型失效率曲线。因为这种曲线的形状与浴盆相似,故称为“浴盆曲线”。

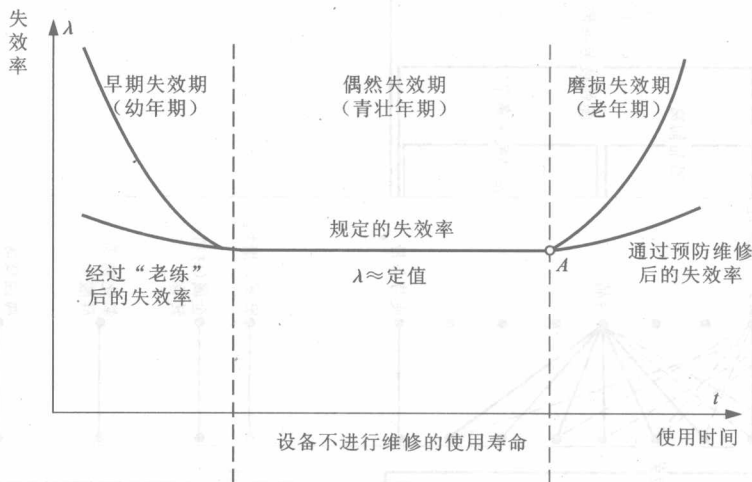


图1-2 设备不进行预防维修时的典型失效率曲线——浴盆曲线

按照“浴盆曲线”形状,即按照产品失效发展过程,可以将整个失效过程分为三个时期:

①早期失效期 在产品的使用初期,容易暴露由于设计和制造上的缺陷而导致失效,因此产品的早期失效率很高。随着使用时间的延长,失效率则很快下降。产品的早期失效期相当于人的“幼年期”。如果在产品出厂之前,进行旨在剔除这类缺陷的“老练”的过程,即进行可靠性试验,那么在产品以后的使用时,从一开始便可使失效率大体保持恒定值。

②偶然失效期 在理想的情况下,产品在发生磨损或老化以前,应是无“失效”的,但是由于环境的偶然变化、操作时的人为偶然差错或者由于管理不善造成的“潜在缺陷”,仍有产品的偶然失效。产品的偶然失效率是随机分布的、很低的和基本上是恒定的,故又称为随机的失效期。偶然失效期相当人的“青壮年期”,这一时期是产品的最佳工作时期。偶然失效率的倒数即为无失效的平均时间。

③磨损失效期 经过偶然失效期后,设备中的元件已到了寿命终止期,于是失效率开始急剧增加,这标志产品已进入“老年期”,这时的失效叫做磨损失效,又称为耗损失效。如果在进入磨损失效期之前,进行必要的预防维修,它的失效率仍可保持在偶然失效率附近,从而延长产品的偶然失效期。

产品失效按其发展过程分类对可靠性工程来说是十分有用的。

2) 按产品失效发生的速度分类

①突然失效;②渐进失效;③间歇失效。