



《材料失效分析》

(Materials Failure Analysis)

主讲教师：杨振国

单 位：材料科学系

办 公 室：先进材料楼 407室

联系方式：zgyang@fudan.edu.cn
65642523 (O)

课程基本信息



教学团队：杨振国、龚嶷、蒋益明、方晓生

课程类型：专业选修课（36学时）

课程代码： MATE130025.01

课程内容： 理论介绍 (12h) + 案例分析 (24h)

课程网址： <http://fdjpkc.fudan.edu.cn/d201339/main.htm>

成绩评定： 平时成绩 + 读书报告 + PPT介绍
(30%) (30%) (40%)

第一章 材料失效分析概论



1.1 概述

1.2 材料失效分析的基本内容

1.3 失效模式与失效机理的相互关系

1.4 材料失效分析的主要特点

1.5 材料失效分析程序及要求

1.6 材料失效分析学科发展史

1.1 概述

1. 基本情况

● 失效事故遍及各个行业，造成经济损失和人员伤亡巨大，海陆空到处都有，比较典型的失效案例有：

✓ 1912年4月14日，英国“泰坦尼克号”豪华邮轮与冰山相撞后不到3小时就沉没于海中的特大海事事故；

✓ 1986年1月28日，美国“挑战者号”航天飞机因O型橡胶密封圈泄漏导致升空爆炸的特大航天事故；

✓ 2015年8月12日，我国天津港危险品仓库因湿润剂缺失引起硝化棉干燥自燃、进而导致硝酸铵爆炸的特大火灾事故，等等。

● 这些事故触目惊心，损失巨大，故失效问题一直引起各国政府及学者的广泛关注和研究。

1.1 概述

● 国际工程界有普遍共识：各种失效所引起的经济损失占到各国GDP的 2~4%。

以我国为例，最近二年GDP分别是：99.09万亿元（2019）、101.59万亿元（2020）；若以4%估算，2019年的经济损失是3.96万亿元、2020年则是4.06万亿元。可见，失效导致经济损失巨大、造成人员伤亡，而且影响社会安定！

● 因此，失效分析赋予失效分析工作者重要的社会责任和担当，并且带来很大的社会经济效益，重要性是不言而喻的。

1.1 概述



2. 失效分析的作用

● 材料失效分析是以材料为载体，通过综合分析找到产品失效的根本原因，并提出有效措施防止同类事故的重复发生。它的作用及意义主要有：

- (1) 查明事故的根本原因，确定事故的主要责任；
- (2) 防止同类事故重复发生，保障人员财产安全；
- (3) 吸取经验教训，提高管理水平和人员素质；
- (4) 促进材料的技术进步，从理论上指明方向。

1.2 材料失效分析的基本内容

1. 失效的定义

(1) 《新华词典》的定义*

✓ 丧失功效或效力。

* 《新华词典》，1982，p757.

(2) 国标GB3187-82: 可靠性基本名词术语及定义

✓ 失效：产品丧失规定的功能，对可修复产品可以称为故障。

1.2 材料失效分析的基本内容

(3) 《材料大辞典》的定义*

- ✓ 失效，又称复合材料的破坏，指复合材料在经过某些物理、化学过程后（如载荷作用、材料老化、温度和湿度变化等）发生了尺寸、形状、性能的变化而丧失了规定的功能。

* 师昌绪主编. 材料大辞典. 化学工业出版社, 1994, p851.

1.2 材料失效分析的基本内容

(4) 《美国金属学会手册》的定义*

✓ 《ASM Handbook》的定义是：服役的任何结构件出现以下三种状态之一时即为失效：

- (1) 完全不能修复时；
- (2) 仍可以使用，但不能满意地达到规定的功能时；
- (3) 受到严重损伤，不能继续安全可靠地使用时。

* ASM Handbook. Vol.11: Failure Analysis and Prevention (10th Ed.). ASM International, 2002, p2884.

1.2 材料失效分析的基本内容

2. 失效的新定义*

✓ 失效是产品因外观形态或微观结构发生变化而不能达到设计规定的功能。



* 杨振国. 论失效分析的本质及其内在关系. 理化检验-物理分册. 2013, 49 (S2): 1-3. (第五届全国失效分析学术会议大会特邀报告)

1.2 材料失效分析的基本内容

3. 材料失效分析的内容

● 材料失效分析的目的在于确定失效模式、失效形式、失效缺陷、失效机理与失效原因的相互关系以及解决对策，它有六项内容：

- (1) 明确 失效模式 (failure mode)
- (2) 确定 失效形式 (failure form)
- (3) 鉴别 失效缺陷 (failure defect)
- (4) 鉴定 失效机理 (failure mechanism)
- (5) 判定 失效原因 (failure cause)
- (6) 提出 解决对策 (countermeasure)

1.2 材料失效分析的基本内容

4. 失效模式新分类

(1) 失效模式（宏观尺度）

✓ 构件失效后的外观形貌，即可观察并且可测量的失效的宏观特征。

比如：脆性断裂、疲劳开裂、接触磨损、超载变形等。

1.2 材料失效分析的基本内容

● 根据构件失效的外观形貌，应有五类失效模式：

(1) 断裂 (fracture)

(2) 腐蚀 (corrosion)

(3) 磨损 (wear)

(4) 畸变 (distortion)

✓ 构件的外观形态因变形过量而失去结构稳定性。

(5) 衰减 (attenuation)

✓ 构件的微观结构因环境、介质、载荷等作用随时间而发生劣化。

1.2 材料失效分析的基本内容

(2) 失效形式（细观尺度）

✓ 导致构件失效的具体位置及其形态特征。

以齿轮失效形式为例：齿根左侧开裂、齿轮节圆凹陷、齿轮表面磨损、齿轮顶部脱落等。

(3) 失效缺陷（不同尺度）

✓ 导致构件开裂或损坏的原始缺陷或初始缺陷。

比如：夹杂物、成分偏析、加工划痕、腐蚀坑等。

1.2 材料失效分析的基本内容

(4) 失效机理（微观尺度）

✓ 构件失效所经历的物理及化学的变化过程。即失的微观机制。

比如：腐蚀失效模式下电偶腐蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀、点腐蚀等。

(5) 失效原因

✓ 导致构件失效的关键因素。

比如：超载、疲劳载荷、冲刷磨损、电化学腐蚀等。

1.2 材料失效分析的基本内容

(6) 解决对策

✓ 提出解决方案，防止同类事故的再次发生。

解决方案不仅方法简单，而且实施后必须有效。

1.2 材料失效分析的基本内容

5. “泰坦尼克号” (Titanic) 特大海事事故解析

● “泰坦尼克号”是20世纪初世界上最大的豪华游轮。

它长260m、宽28m、高51m、吨位46328t，设计航速24节，能载客3000余人，耗资7500万英镑。船体采用双壳层结构设计并在船体前缘布置了16个互相隔开的水密舱等安全措施，因而当时被认为是一艘“永不沉没的”的巨轮。

它的首航是在1912年4月10日，从英国南安普顿出发前往纽约，航速22节（40.7 km/h），但4月14日晚11:40分在北大西洋与漂浮的大冰山意外相撞，由于船体右侧六个前仓壳体发生裂开，2小时47分后沉没在海中。

船上共有2208人，仅705人获救，1503人葬生海底，这是迄今为止世界上发生的特大海事事故。



(a) 展览馆外观



(b) 展览馆人口处



(c) 原建造现场

图1 英国贝尔法斯特泰坦尼克号展览馆 (2012年对外开放)



(a) 冰河湖景区



(b) 航行在冰河湖中



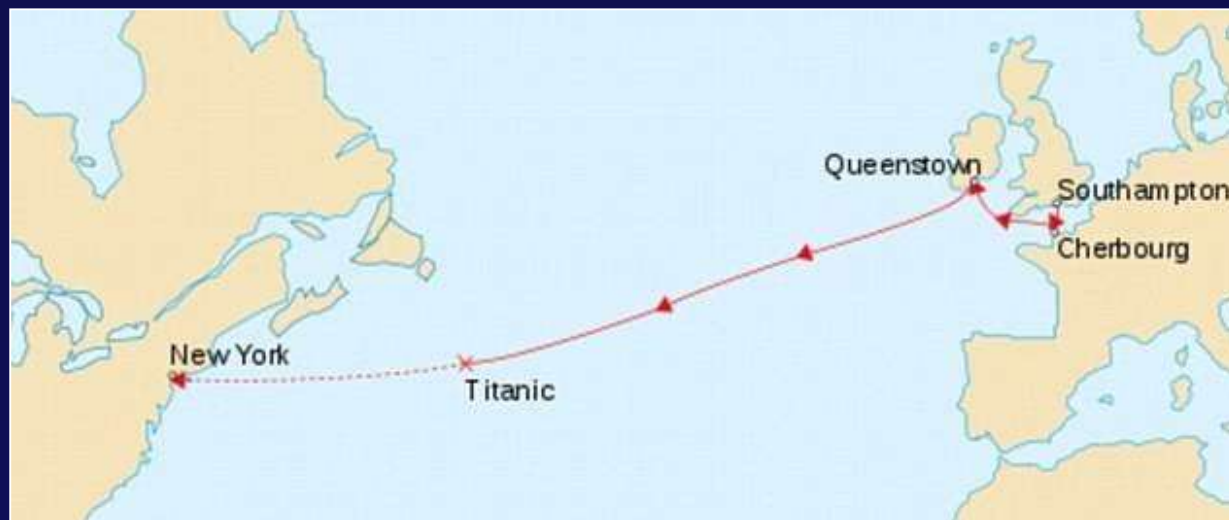
(c) 静止的大冰山



(d) 另一静止的冰山

图 2 电影《泰坦尼克号》在冰岛冰河湖摄制现场





(a) 航行路线



(b) 起航时



(c) 航行中

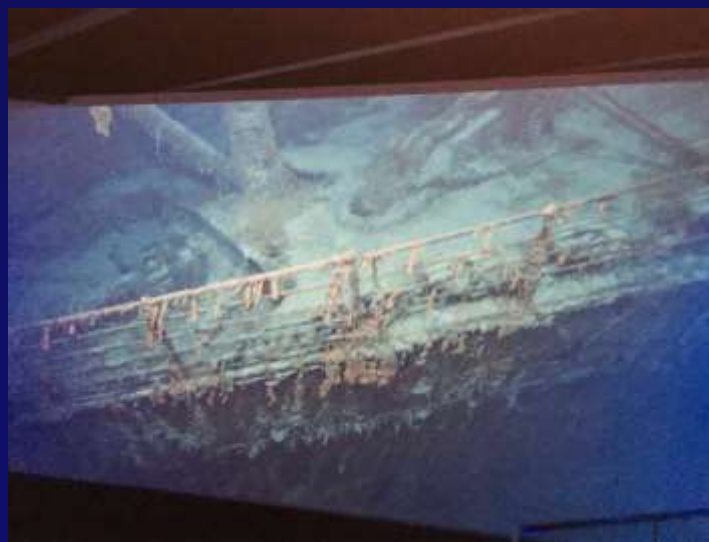
图 3 泰坦尼克号处女航



(a) 望远镜



(b) 陶壶



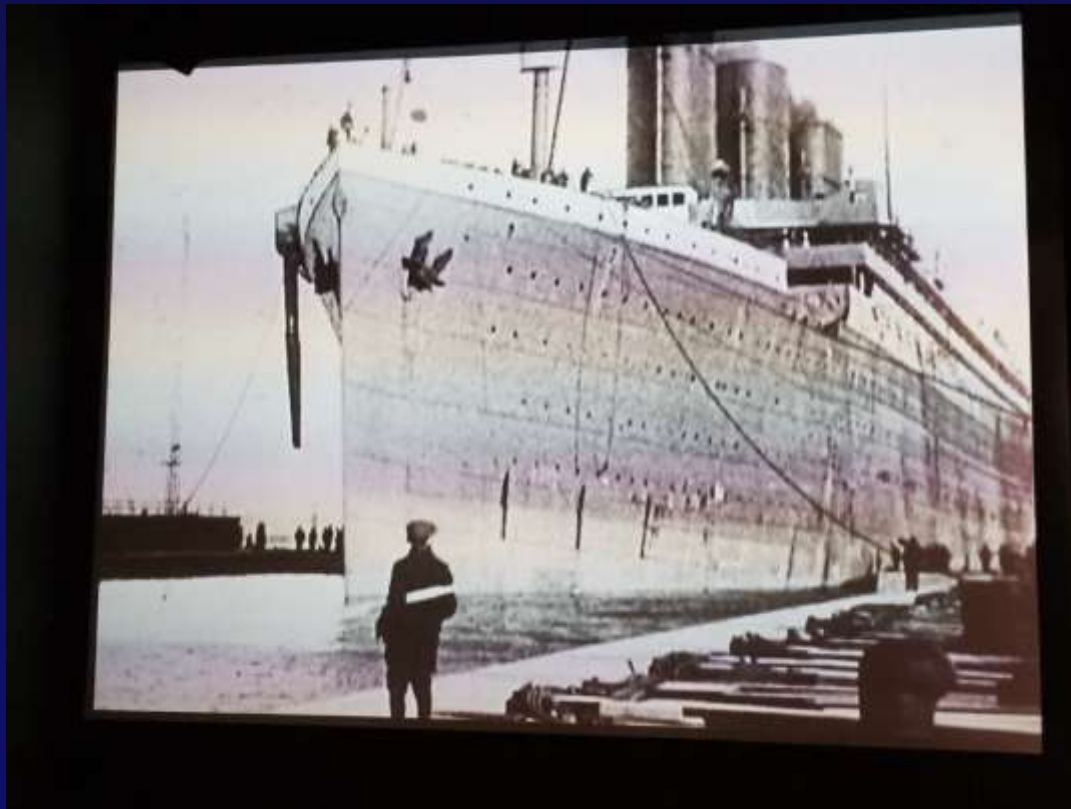
(c) 船栏



(d) 船头

图 4 北大西洋海底下的泰坦尼克号遗物 (3.9km)

● 泰坦尼克号的外观形貌

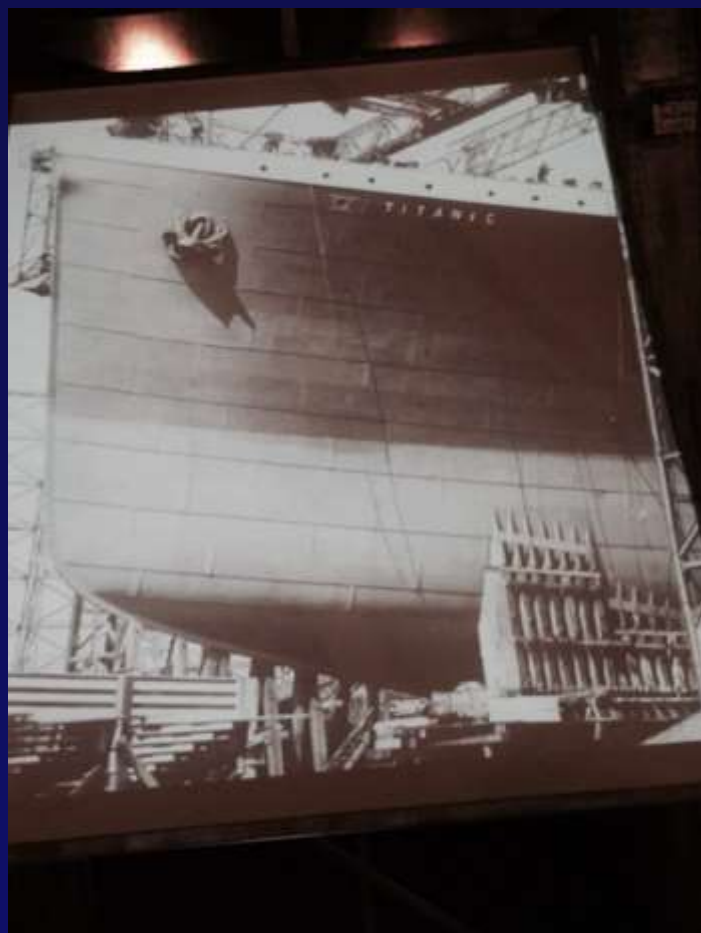


(a) 船体外貌



(b) 船体连接的铆钉
(共计300余万个铆钉)

图 5 泰坦尼克号船体与连接



(a) 船头



(b) 船尾

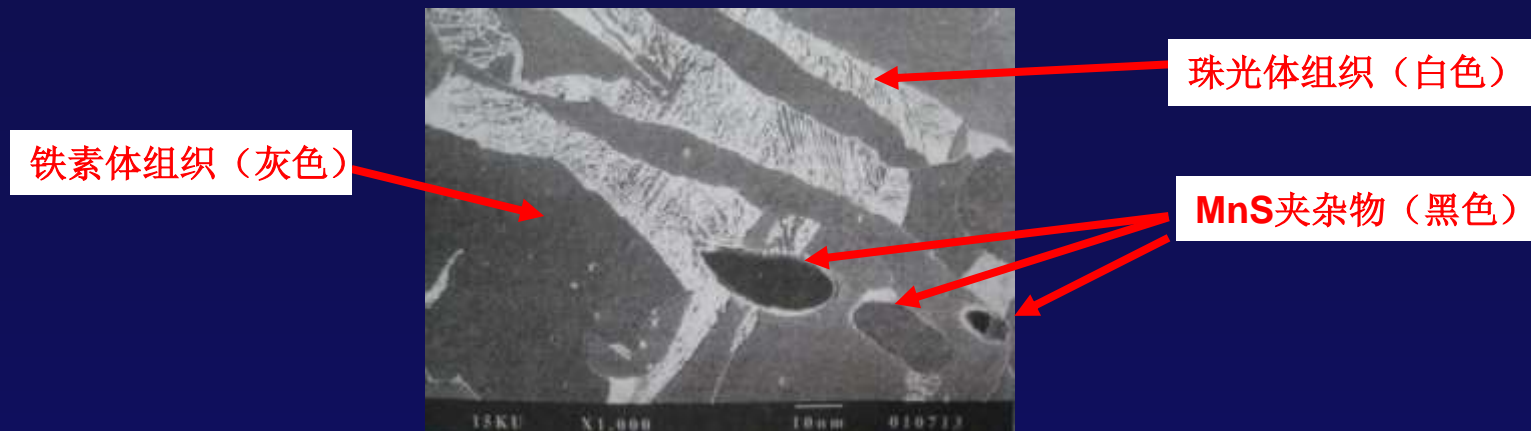
图 6 泰坦尼克号的超大型结构



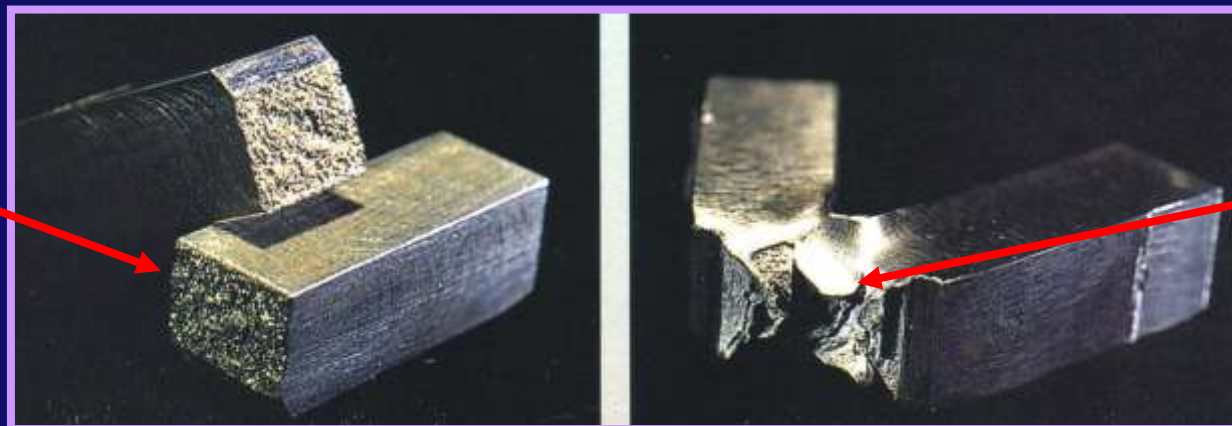
图 7 给泰坦尼克号致命一击的大冰山形貌

● 泰坦尼克号海事事故的原因分析

✓ 船板备用件性能检测



(a) 船体金相组织



(b) 船体冲击断口

(c) 现代船体冲击断口

图 8 泰坦尼克号船体的金相组织及冲击断口形貌

1.2 材料失效分析的基本内容

● 在对泰坦尼克号备用件进行性能复检后，发现船板和铆钉均含有大量超标的MnS夹杂物，船板韧脆转变温度大于 32°C ，而当时的海水温度是 -2°C 。

✓ 可以推定，泰坦尼克号与冰山相撞时的失效特征是脆性断裂（失效模式），因为铆钉和船板含有大量的MnS夹杂物及P元素，且航速过快（23节）。在冰山的撞击力作用下，船板的一些铆钉发生断裂、铆钉孔边开裂和撞击处船板裂开（失效形式）。随后，在冰山持续碰撞下，船板铆钉孔处的夹杂物、孔边机加工缺陷以及冰山撞击处的裂口（失效缺陷）因板材脆性发生了快速扩展，形成了长距离的大裂口和更多的裂缝，1~6号水密舱先后灌水，不同裂缝间连体形成更多更大的裂缝，从而导致船体前缘右侧的六个水密舱因大量进水、偏心受载而发生整体倾斜（失效机理），泰坦尼克号最终断裂成多段快速沉没于海中。

✓ 因此，泰坦尼克号的失效是在冰山撞击力、铆钉及船板的断裂韧性低及航速过快等三个因素的相互作用下发生了低应力脆性断裂（失效原因）。

附录: 泰坦尼克号特大海事事故的相关文献



- (1) Division of the History of Technology, Transportation Collections, National Museum of American History, in cooperation with the Public Inquiry Mail Service, Smithsonian Institution, "The Titanic," (Smithsonian Institution, May 1997). <http://www.si.edu/resource/faq/nmah/titanic.htm>
- (2) T. Foecke & U.S. Department of Commerce. Metallurgy of the RMS Titanic. In NIST-IR 6118. 1998.
- (3) R. Gannon. What really sank the Titanic. Popular Science, 1995, 246 (2) : 49-55.
- (4) W. H. Garzke, K. B. David, and S. Arthur. The structural failure of the Titanic. In Oceans Conference Record (IEEE), 1994, Vol. 3, pp. 138-148.
- (5) S. Hill. The mystery of the titanic: a case of brittle fracture. Materials World, 1996, 4(6): 334-335.
- (6) 杨振国. 失效分析专家深度揭秘泰坦尼克号沉没起因. 材料与测试. 2015.12.2. <http://www.mat-test.com/Post/Details/PT151202000059gMiPl?dn=1>

1.3 失效模式与失效机理的相互关系

金属的失效模式与失效机理的关系

断裂

脆性断裂：解理断裂、沿晶断裂、蠕变断裂、应力腐蚀开裂、低温脆断、氢脆、碱脆、辐照脆化等

韧性断裂：延性断裂、塑性断裂等

疲劳断裂：应力疲劳、应变疲劳、腐蚀疲劳、高周疲劳、低周疲劳等

蠕变断裂：蠕变疲劳、高温疲劳等

腐蚀

化学腐蚀：高温氧化、高温碳化、热腐蚀等

电化学腐蚀：均匀腐蚀、电偶腐蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀、点蚀、应力腐蚀开裂、疲劳腐蚀、选择性腐蚀、流体加速腐蚀、磨损腐蚀（冲蚀、气蚀）、氢腐蚀、碱腐蚀、熔盐腐蚀等

物理腐蚀：物理溶胀等

磨损

粘着磨损、磨粒磨损、疲劳磨损、微动磨损、腐蚀磨损、冲刷磨损、冲击磨损、冲蚀磨损、电蚀磨损等

畸变

弹性变形、塑性变形、粘弹性变形、翘曲变形、挠曲变形、失稳褶曲等

衰减

蠕变损伤、辐照损伤、粘弹性损耗、粘塑性损伤、环境致劣、疲劳致脆等

1.4 材料失效分析的主要特点

1. 失效分析的系统性

● 失效涉及材料从产品到构件、从构件到损伤的二个不同阶段，即**六品**、**五件**、**四化**、**3P**，正确理解其含义及其相互关系，对开展有效的材料失效分析相当重要。

(1) 六品（产品）

✓ 制品、成品、半成品、物品、次品、废品

(2) 五件（构件）

✓ 零件、部件、组件、元件、器件

(3) 四化（损伤）

✓ 劣化(微观)、退化(细观)、脆化(宏观)、老化(外观)

1.4 材料失效分析的主要特点

(4) “3P” 安全保障理念

● 工程构件不可能做到100%无缺陷，存在局部的不完整性，最终影响使用的安全性。

因此，必须采用“3P”安全保障新理念，从设计安全模式转变为安全设计模式，确保构件在全寿命使用周期内的安全性：

- 1) Prevention (预防)
- 2) Protection (防护)
- 3) Prediction (预测)

1.4 材料失效分析的主要特点

2. 失效分析的复杂性

(1) 产品的质量管理

“人、机、料、法、环” (4M1E分析法)



“人、机、料、法、环、测” (5M1E分析法)

(2) 构件的失效分析

不仅需要专业知识和工程知识，还要了解标准、规范、规程，包括管理学、心理学、工程伦理学等知识。

1.4 材料失效分析的主要特点

3. 失效分析的完整性

● 构件的失效一般涉及以下十大因素中的一种或多种：

- 1) 设计 (design)
- 2) 材料 (material)
- 3) 制造 (fabrication)
- 4) 安装 (installation)
- 5) 检验 (inspection)
- 6) 运行 (operation)
- 7) 维护 (maintenance)
- 8) 环境 (environment)
- 9) 运输 (transportation)
- 10) 贮存 (storage)

1.4 材料失效分析的主要特点

● 借鉴日本学者石川 (Ishikawa) 质量管理的鱼骨图概念，我们提出失效的鱼骨图综合分析法：

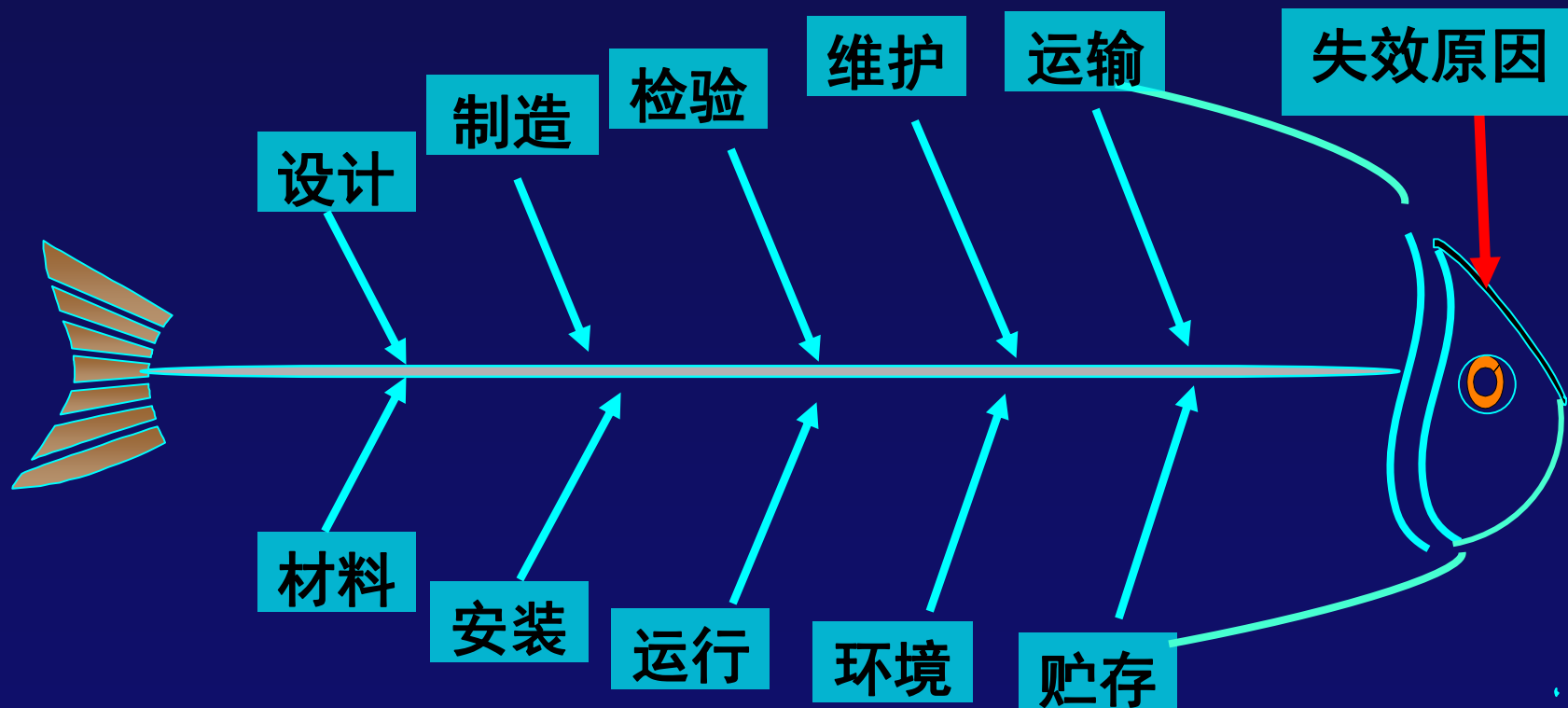


图 9 失效原因的鱼骨图综合分析法

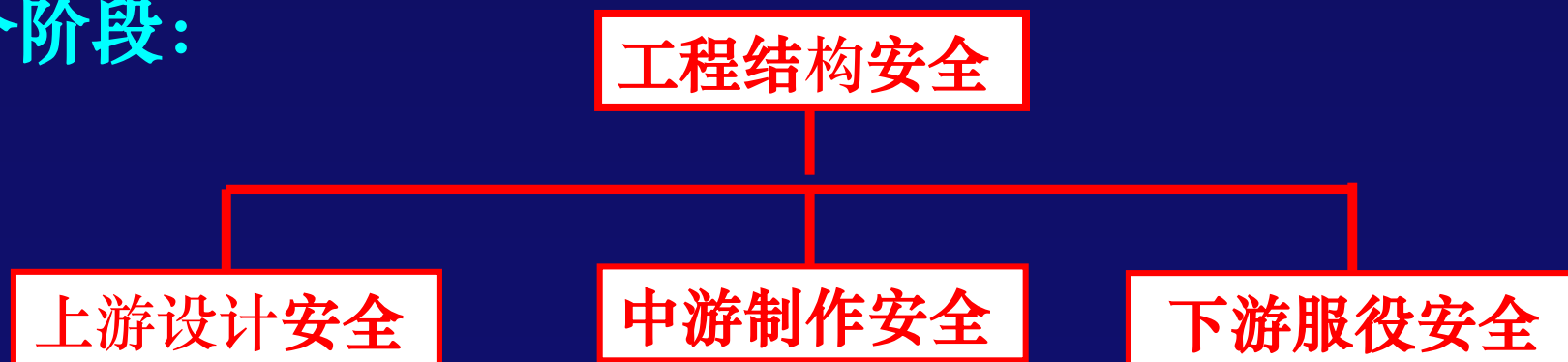
1.4 材料失效分析的主要特点

4. 失效分析的一体化

(1) 设计安全模式 (Design Safety Mode)

它是依据标准、规范、规程和手册，对工程构件（设备）进行选型式、选材料、选结构（三选）。

(2) 工程结构安全是指全寿命周期内的安全，分为三个阶段：



1.4 材料失效分析的主要特点

(1) 安全设计模式* (Safety Design Mode)

● 设计安全模式是常规设计法

由于没有充分考虑到构件在服役阶段对工况、环境等变化的适应性，有时会发生意外失效。

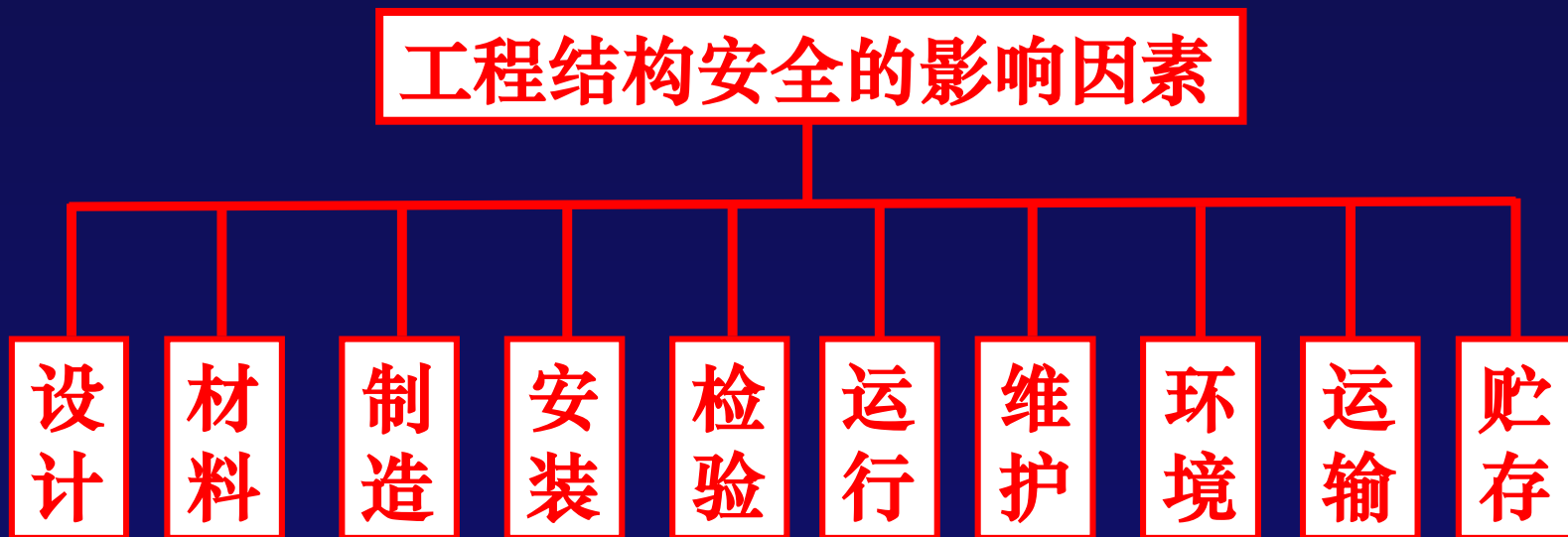
● 为了保障工程构件在全寿命周期内的安全性，特提出“安全设计模式”新理念。

这种新的安全设计模式，除包含设计安全模式的所有要素外，还有三个新特点：

* 杨振国. 论设计安全模式与安全设计模式的相互关系. 金属热处理, 2019, 49(S): 1.
(第八届全国失效分析学术会议大会特邀报告)

1.4 材料失效分析的主要特点

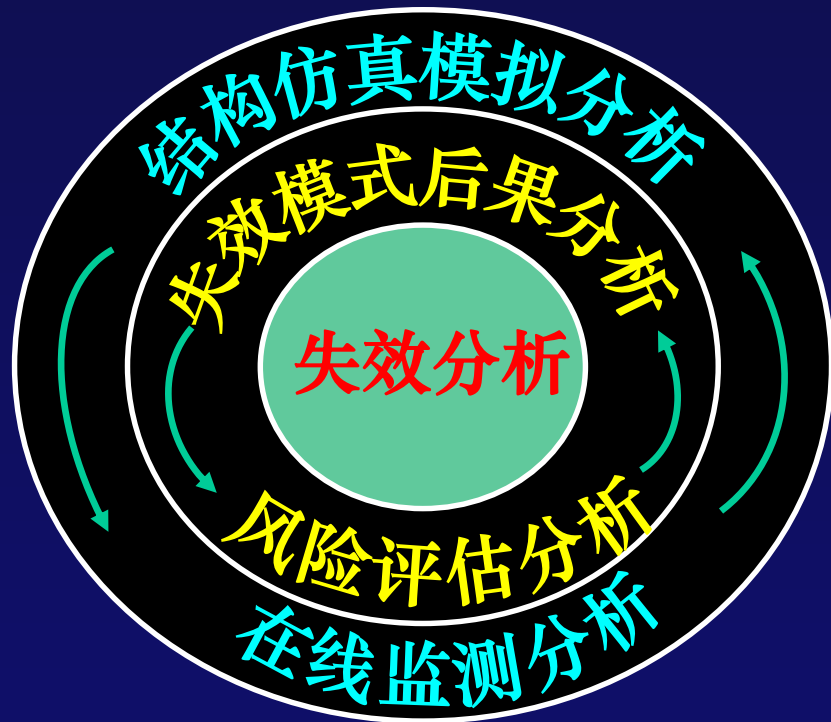
● 技术特点1：全寿命周期的完整性分析（适应性分析）



✓ 设计阶段开展工程结构的完整性分析和失效分析，评估安全影响因素，并主动采取措施，**选用合适的材料、结构和工艺**，以保障对工况、环境变化的**适应性**。

1.4 材料失效分析的主要特点

● 技术特点2： 工程结构的缺陷分析 （仿缺陷分析）

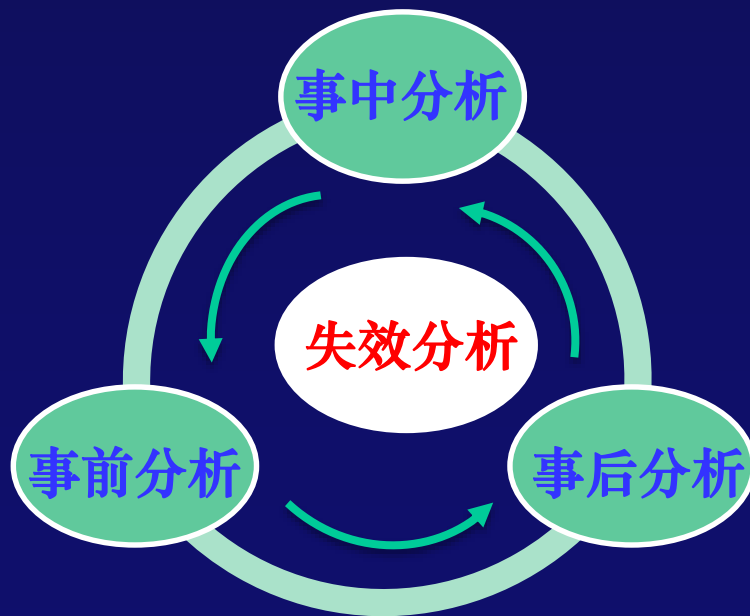


✓ 服役阶段通过仿真模拟和失效分析，知道缺陷产生的原因及其危害，提前预测预警预防，确定合理的工况参数和维护方式，保障工程结构在设计寿命内的安全性。

1.4 材料失效分析的主要特点

● 技术特点3： 失效分析的一体化应用（真缺陷分析）

✓ 为保障工程结构的本质安全，把失效分析应用于任何阶段，开展事后分析、事中分析和事前分析，保证材料可靠、结构合理、工艺适用、操作可行、维护恰当等。



1.5 材料失效分析程序及要求

1. 材料失效分析程序

- (1) 现场调查：运行史、工艺流程、图纸核查、取样等；
- (2) 外观检测：断口/缺陷宏观形态及异物等观察与分析；
- (3) 微观分析：断口/缺陷微区形貌及成分等观察与表征；
- (4) 材料测试：力学、物理、化学等性能试验和检测；
- (5) 工艺评价：介质、工况、异物等观察和评定；
- (6) 模拟试验：失效过程再现的台架试验（按需开展）；
- (7) 综合分析：依据调查和分析结果，确定失效根本原因；
- (8) 事故结论：分析快速、结果正确；
- (9) 解决方案：方法简单、实施有效。

1.5 材料失效分析程序及要求

2. 材料失效分析工作者的要求

- (1) 品德高于技术：客观公正，行为规范，敢于负责；
- (2) 调查重于理论：现场查看，观察痕迹，寻找旁证；
- (3) 团队强于个人：产学研合作，集体智慧无限；
- (4) 宏微观相结合：宏观是表象，微观是本质,分析要精准；
- (5) 综合知识并重：灵活应用，反复论证，追溯源头；
- (6) 系统完整严谨：前后一致，因果一致，推论可靠；
- (7) 快速正确有效：分析快速，结论正确，实施有效。

1.6 材料失效分析学科发展史

1. 美国的失效分析发展概况

- 美国现有300多家研究所承担失效分析课题。国防、军工、核电、宇航等领域的重大失效分析，主要由国家级研究机构承担：ORNL、NASA、PHMSA、NBS、EPRI、ASTM、ASME、API、Johnson Space Center、Kennedy Center, etc.
- 工业领域的失效分析是在各大公司和大学研究机构内进行，比如Amoco Center、MIT、NWU等。
- 美国金属学会 (ASM) 是最早出版《失效分析手册》的权威机构，从1923年起出版《金属手册》各分卷，目前共有23卷，《Failure Analysis and Prevention》(10th Ed, Vol.11, 2002) 是第11卷；ASM Int. 在21世纪初出版了国际失效分析领域的专业期刊：
✓ 《J. of Failure Analysis and Prevention》(EI, 2000)
- 从2016年2月起，ASM Int.成立了失效分析新分支机构：
Failure Analysis Society

1.6 材料失效分析学科发展史

2. 英国的失效分析发展概况

- 英国从事失效分析的知名研究机构有：
国立工程研究所(NEL), 国立物理研究所(NPL), 中央电力局(CEGB), 英国石油(BP), 英国煤气天然气公司(BG), 以及分布在许多高校实验室的失效分析研究机构。
- 1994年, Elsevier 与欧洲结构完整性学会 (ESIS) 合作, 一起出版了国际失效分析界第一本SCI期刊:
 - ✓ 《Engineering Failure Analysis》(SCI, 1994)
 - ◆ 《Case Studies in Engineering Failure Analysis (2013)(注: 该期刊从2018年起改名为 《Heliyon》)



Engineering Failure Analysis

Certificate of Outstanding Contribution in Reviewing

awarded January 2017 to

Zhen-Guo Yang

in recognition of the contributions made to the quality of the journal



1.6 材料失效分析学科发展史

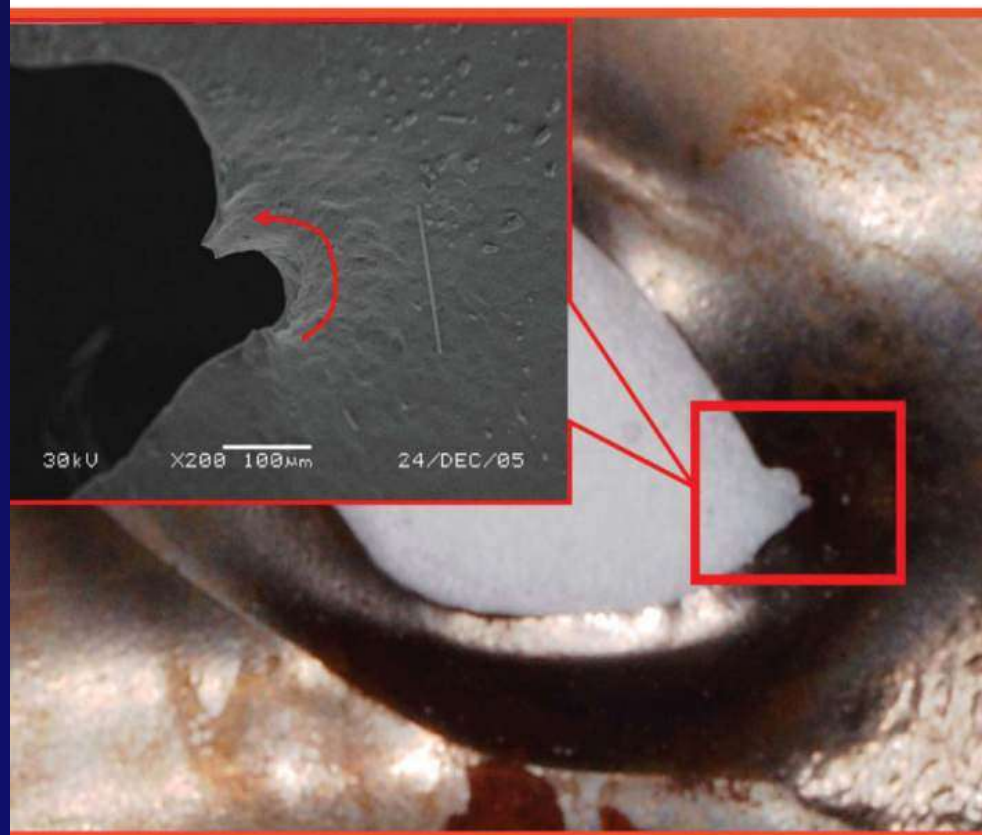
3. 德国的失效分析发展概况

- 德国共有500多个研究机构和保险公司，专门从事失效分析的研究，是世界上组织化程度最高的国家。
- 德国国家投资建设了一批材料检验中心(MPA)。国家技术监督部门(TUV)有明确要求，凡机器设备发生的任何失效，必须申报备案并开展失效原因分析。
- 从1949年起，德国出版了与材料工业腐蚀失效密切相关的国际权威期刊：
 - ✓ 《Materials and Corrosion》 (SCI, 1949)
- 同时，出版了德文版的《机械失效》杂志等。



Materials and Corrosion

1/2012



我们的论文
刊登在该杂
志的封面



www.matcorr.com



1.6 材料失效分析学科发展史

4. 中国的失效分析发展概况

● 我国从上世纪70年代起就加强失效分析研究。1980年8月，中国机械工程学会材料分会成立暨全国失效分析研讨会在北京举行，随后又举办了多次。

● 1986年8月，中国机械工程学会失效分析工作委员会成立，北航的钟群鹏院士任主任委员。以后不定期地组织召开了几次大型战略研讨会。例如，全国二十多个一级学会曾分别于1987年、1992年、1998年，联合召开了“机电装备失效分析预测预防战略研讨会”。

● 1993年，中国机械工程学会失效分析工作委员会正式更名为中国机械工程学会失效分析分会，钟群鹏院士出任理事会首届理事长和第二届理事长。

1.6 材料失效分析学科发展史

● 1994年7月，中国科协组建了全国24个一级学会参加的最高权力机构“全国失效分析和预防中心”。我国一些知名学者**师昌绪院士**、**周惠久院士**、**肖季美院士**、**钟群鹏院士**、**李鹤林院士**、**涂铭旌院士**、**徐滨士院士**、**柯伟院士**、**李依依院士**、**陈蕴博院士**、**高金吉院士**、**侯保荣院士**、**陈学东院士**等都积极从事材料失效分析研究及其学科建设。**已故失效分析大师、2010年国家最高科技奖获得者师昌绪院士**曾担任名誉主任。

● 2003年3月中国机械工程学会失效分析分会换届，中国石油集团西安管材研究院的**李鹤林院士**任第三届~第五届理事会理事长；新近成立的第六届理事长由北京航空航天大学**张峥教授**担任。

1.6 材料失效分析学科发展史

● 中国机械工程学会失效分析分会和理化检验分会从2005年起联合定期举办每二年举行一届的“全国失效分析学术会议”。每届会议由行业期刊《金属热处理》、《理化检验-物理分册》、《机械工程材料》在会前出版论文集。前八届举办地分别是：广州 (2005)、长沙 (2007)、上海 (2009)、西安 (2011)、大连 (2013)、北京 (2015)、无锡 (2017)、青岛 (2019)。

● 此外，我国其他一些行业学会，比如中国航空学会、中国力学学会、中国电子学会等，也不定期举办该学会学科范围内的失效分析研讨会或失效分析论坛会。

1.6 材料失效分析学科发展史

5. 国际失效分析会议简介

● 国际学术界以失效分析为主题词, 定期举办三种类型的失效分析会议, 涵盖了工程构件失效的各个领域:

(1) ICEFA (International Conference on Engineering Failure Analysis) “国际工程失效分析会议”:

✓ 从2004年起每二年举行一届, 侧重于结构材料的失效分析

(2) IPFA (International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits) “国际集成电路物理与失效分析会议”:

✓ 始于1987年, 2003年起每年一届, 侧重微电子器件的失效分析

(3) ISTFA (International Symposium for Testing and Failure Analysis) “国际测试和失效分析会议”:

✓ 从1974年起每年一届, 着重于电子器件失效案例分析及其测试方法

课程教学内容及其学时安排*



● 教学内容及其36学时的进度安排：

第一章	材料失效分析概论	4 学时
第二章	材料断裂失效模式与机理	2 学时
第三章	材料腐蚀失效模式与机理	2 学时
第四章	材料磨损失效模式和机理	2 学时
第五章	材料表征分析方法	2 学时
第六章	重大设备与器件的失效分析	24 学时

本课程主要参考文献



1. C. R. Brooks & A. Choudhury. Failure Analysis of Engineering Materials (中译本). McGraw-Hill, 2002.1.
2. 钟群鹏主编, 材料失效诊断、预测和预防, 中南大学出版社, 2009.9
3. ASM Handbook. Failure Analysis and Prevention (10th Ed., Vol.11) . ASM International, 2002.
4. E. S. Greenhalgh. Failure and Fractography of Polymer Composites. Woodhead Publishing Limited, 2009.
5. Lawrence C. Wagner. Failure Analysis of Integrated Circuits. Kluwer Academic Publishers, 1999.
6. 张栋等编著. 失效分析. 国防工业出版社, 2005.5.
7. Zhen-Guo Yang & Yi Gong. Chapter 16 Failure analysis of heat exchanger tubes in petrochemical industry: microscopic analysis approach. In 《Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Oil and Gas Industry》, Elsevier, 2016, pp330-352.
8. 杨振国. 材料失效分析新诠释与“七性”案例教学法. 机械工程材料, 2017, 41(S1): 1-4. (*第七届全国失效分析学术会议大会特邀报告)

第一章 练习题

1. 概述材料失效分析的意义是什么。
2. 什么叫失效？它与事故、事件、故障有什么关系？失效分析与材料失效分析本质上有什么不同？
3. 材料失效分析的作用有哪些？
4. 失效模式分哪几类？概述失效模式、失效形式、失效缺陷、失效机理、失效原因的物理含义及其相互关系。
5. 简要说明材料失效分析涉及的“六品”、“五件”、“四化”、“3P”的物理含义及其相互关系。
6. 一个构件的失效分析，一般需要考虑哪些因素？
7. 简述材料失效分析的程序及其要求。
8. 一辆自行车是由许多零部件组成的，你认为哪些零件最容易失效？失效模式和失效形式可能有哪些？
9. 一个合格的失效分析工作者应具备哪些素养？
10. 简述国内外材料失效分析学科发展史及其专业期刊。