



材料失效分析课程的 “七性”案例教学法与深度学习

杨振国

(材料科学系)



提 要

1. 材料失效分析课程的基本概况
2. 材料失效分析概念的新诠释
3. “七性”案例教学法的内涵和特色
4. “七性”案例教学法的应用效果
5. 总结语



1. 材料失效分析课程的基本概况



1. 材料失效分析课程的基本概况

1.1 课程概述

材料失效分析是通过检测与分析来找到材料失效根本原因的一门综合性学科。它涉及面广，应用性强，不仅可以保障社会稳定和安全生产，**而且为新材料的研发和现有材料的改性从理论上指明方向**，其工程价值、科学意义和社会经济效益都是相当显著的。

材料失效分析课程主要采用案例教学方式，**不仅让学生掌握材料失效分析的基础知识，而且懂得如何运用现有的基础知识分析解决工程实际问题**，学生的创新能力和综合能力可以得到有效的培养和提高。



1. 材料失效分析课程的基本概况

1.2 课程背景

课程是从2011年起为材料系**材料物理、材料化学、电子科学与技术**三个专业开设的专业选修课，2013年起**理论与应用力学、自然科学试验班、技术科学试验班、生命科学**等一些专业的学生也选修该课程。这**学期选修人数达到了40人**（原设定人数30名）。

课程通过重点讲解几十个重大工程失效案例，不仅扩大了学生的见识，而且提供了分析解决问题的综合方法，学生获益良多，因而该课程在2013年被评为**复旦大学精品课程、2016年获评为上海市精品课程**。



1. 材料失效分析课程的基本概况

1.3 教学目标

课程讲解时**基础理论和工程应用并重**，通过典型案例分析和批判性讲授，使学生的五种基本能力：**学习能力、创新能力、动手能力、综合知识运用能力和表达能力**得到了有效的训练和提高。

并且，通过案例的深度讲解，引导学生树立远大理想，勇担社会责任，促进综合素质的提高，达到**知识传授、能力培养和素质教育三位一体**的教学目的，为国家高技术领域和工程技术领域输送专有人才。

1. 材料失效分析课程的基本概况

1.4 教学内容

课程分基础理论和案例分析二部分。大致如下：

第一章	材料失效分析概论	4	学时
第二章	材料的断裂失效形式与机理	4	学时
第三章	材料的腐蚀失效形式与机理	2	学时
第四章	材料的磨损失效形式与机理	2	学时
第五章	材料表征分析方法	4	学时
第六章	重大设备的失效分析	20	学时

基础理论介绍了材料失效分析的一些基本概念，案例分析提供了若干重大工程实例。通过案例教学，重点讲解了我们在核电、火电、风电、石化、化工、冶金、汽车、微电子、印制电路、城市管网等十个行业承担完成的几十项重大失效案例的具体分析。



1. 材料失效分析课程的基本概况

● 课程基本信息

教学团队：杨振国、方晓生、蒋益明、江素华

课程类型：专业选修课（36学时）

课程代码：MATE130025.01

课程内容：理论（16学时）+ 案例（20学时）

课程网址：<http://jpkc.fudan.edu.cn/s/348/t/710/>



1. 材料失效分析课程的基本概况

1.5 教学形式

课程的课件是在参考国内外教材基础上，主要结合主讲老师近年来提出的一些**新概念和承担完成的几十项重大工程失效案例**为教案进行讲授的。

- **授课形式**：小班上课+课堂讨论
- **考核形式**：开卷方式
- **成绩评定**：期末演讲(40%)+读书报告(30%)+平时成绩(30%)



2. 材料失效分析概念的新诠释



2. 材料失效分析概念的新诠释

2.1 失效的定义

- 《新华词典》的定义*

丧失功效或效力。 * 《新华词典》，1982，p757.

- 国标GB3187-82 《可靠性基本名词术语及定义》的定义

失效：产品丧失规定的功能，对可修复产品通常称为故障。

- 《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.



2. 材料失效分析概念的新诠释

● 《美国金属学会手册》的定义*

按照《ASM Handbook》的定义，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) 受到严重损伤而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.

2. 材料失效分析概念的新诠释

2.2 失效新定义*

失效 (failure) 是产品因**微观结构或外观形态**发生变化而不能满意地达到设计规定的功能。



- 根据失效的严重性，可以分别称为事件 (incident)、事故 (accident) 或故障 (fault)。

* 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 全国失效分析学术会议论文集专辑, 2013, 49 (S2): 1-3.



2. 材料失效分析概念的新诠释

2.3 失效分析内容

材料失效分析是为查明构件失效原因并采取预防措施而开展的一切技术活动。它涉及五项内容：

- (1) 判定失效模式 (failure mode)
- (2) 鉴定失效机理 (failure mechanism)
- (3) 界定失效缺陷 (failure defect)
- (4) 确定失效起因 (failure cause)
- (5) 提出解决对策 (countermeasure)

2. 材料失效分析概念的新诠释

2.4 失效分析的内在关系

● 失效分析是确定构件的失效模式、失效机理、失效缺陷与失效起因之间的相互关系。

◆ 失效模式

失效模式是指构件失效后的外观表现形式，即可观察的并可测量的失效的宏观特征。比如：脆性断裂、疲劳开裂、接触磨损等。

根据构件失效的外观特征，应该有五种失效模式：

(1) 断裂 (fracture)

(2) 腐蚀 (corrosion)

(3) 磨损 (wear)

(4) 畸变 (distortion)

(5) 衰减 (attenuation): 微结构随时间、环境等渐变劣化



2. 材料失效分析概念的新诠释

◆ 失效机理

失效机理是致使构件失效所发生的物理、化学的变化过程，即失效的微观机制。比如：腐蚀模式下的电偶腐蚀、缝隙腐蚀、点蚀、晶界腐蚀等。

◆ 失效缺陷

失效缺陷是导致构件损伤或损坏的实际缺陷。比如：裂纹、腐蚀坑、磨损带、分层等。

◆ 失效起因

失效起因是促使失效机理起作用的关键因素。比如：超载、疲劳载荷、电化学腐蚀、微动磨损等。



2. 材料失效分析概念的新诠释

2.5 泰坦尼克号的失效案例解析

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，可载客3000多人，总耗资7500万英镑。船体结构设计采取了双壳层和十六个相互隔离的水密舱等安全措施，因而当时被认为是一艘“永不沉没的”巨轮。

它的处女航是在1912年4月10日从英国南安普顿出发前往纽约，航速为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相撞，由于船体右侧六个前仓壳体全部裂开，2小时47分后沉没海中。

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最大的海事事件。



(a) 展览馆外观



(b) 展览馆入口处



(c) 原建造现场

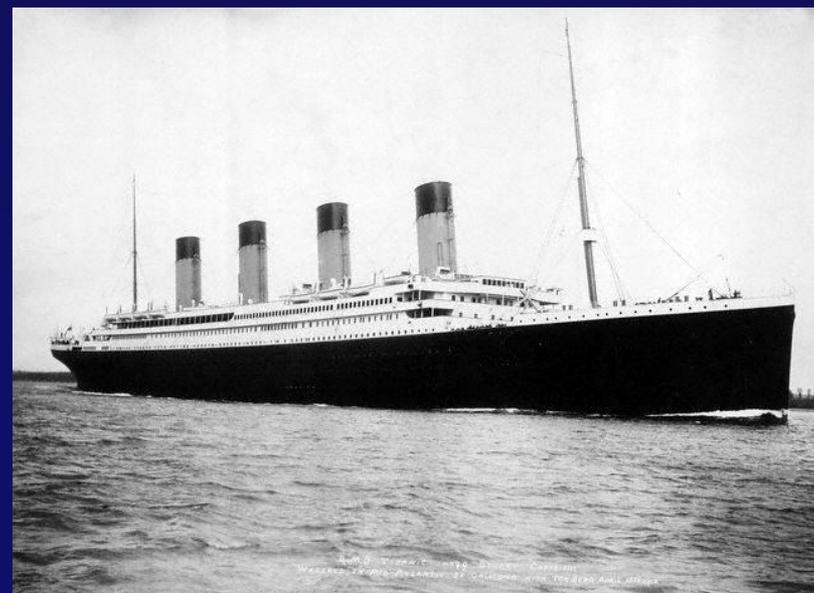
图1 泰坦尼克号展览馆 (2012年3月对外开放)



(a) 航行路线



(b) 起航时



(c) 航行中

图 2 泰坦尼克号处女航

失事地点



(a) 冰山撞击地点

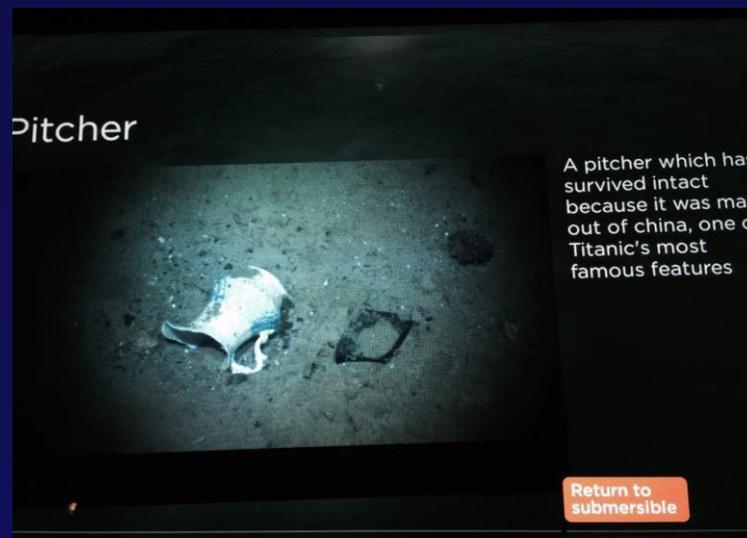


(b) 船体沉没时断裂状况

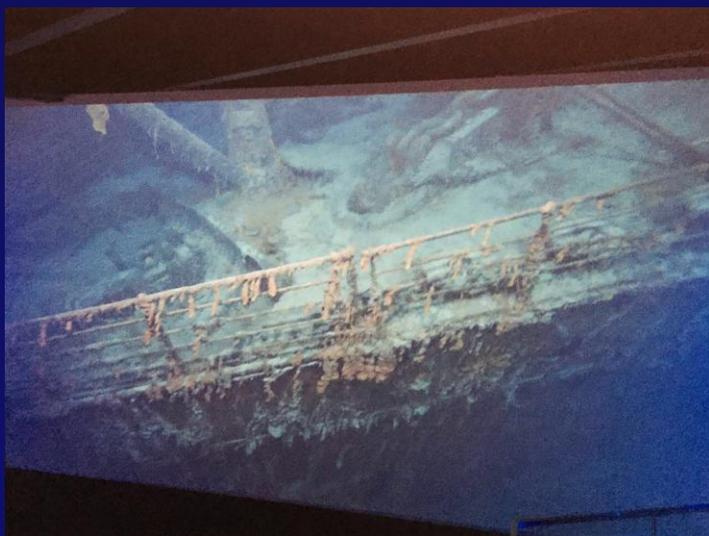
图 3 泰坦尼克号沉没过程



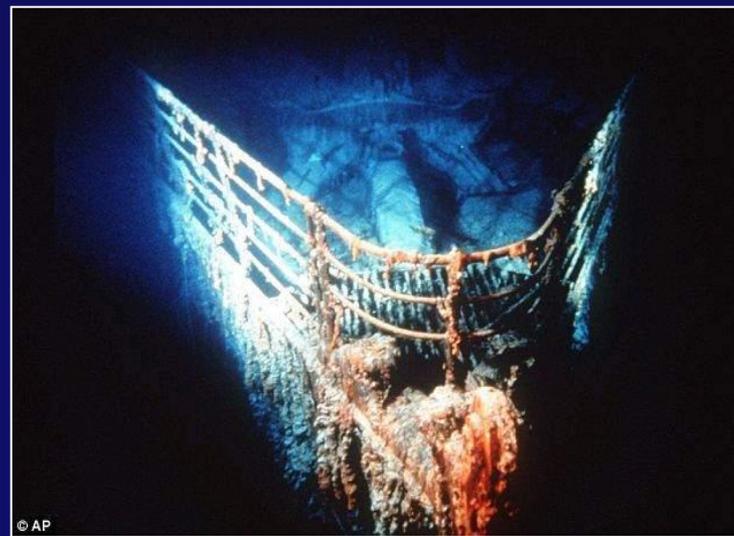
(a) 望远镜



(b) 陶壶



(b) 船栏



(c) 船头

图 4 北大西洋海底下的泰坦尼克号遗物 (3900m)

● 泰坦尼克号断裂过程的解析

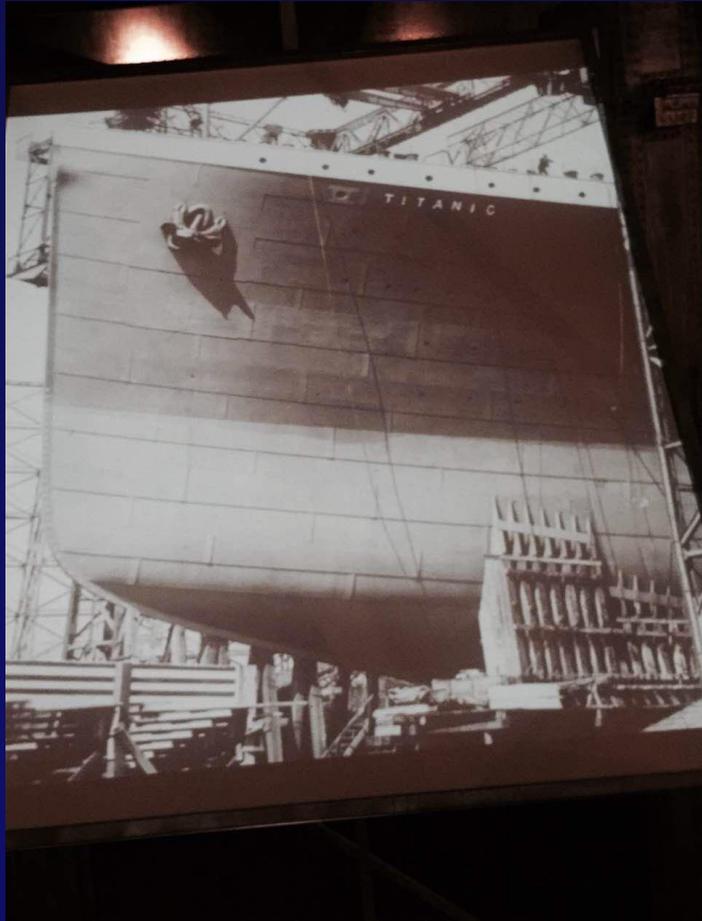


(a) 船体铆钉连接结构



(b) 船体铆接外观形貌

图 5 泰坦尼克号船体及其连接形式



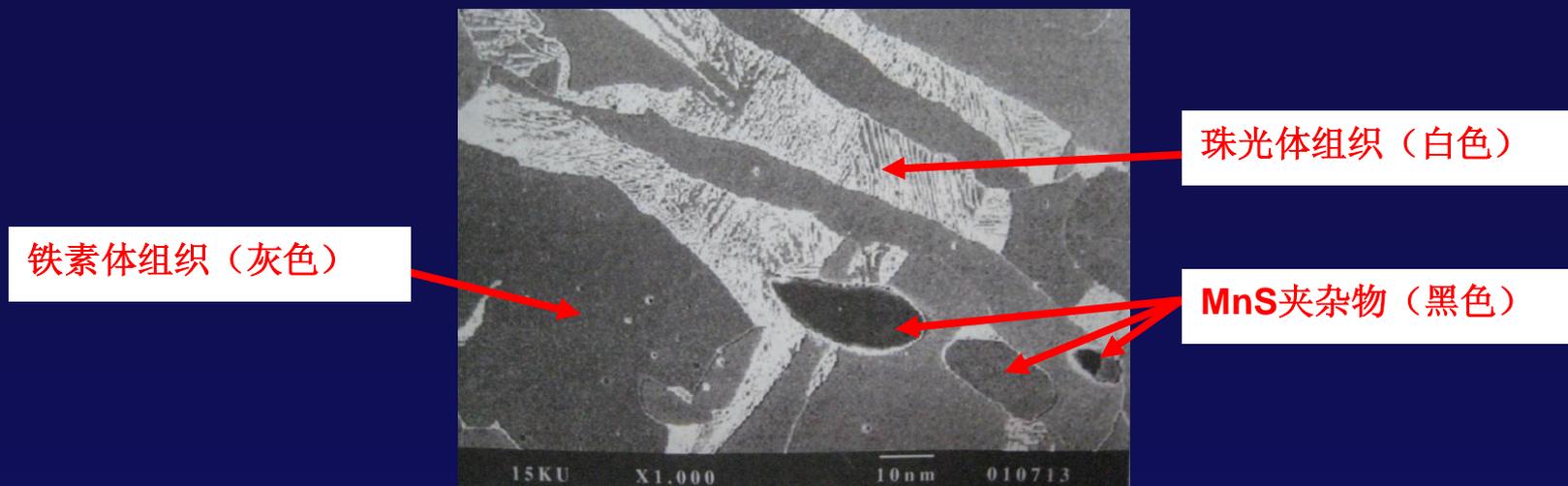
(a) 船头外形



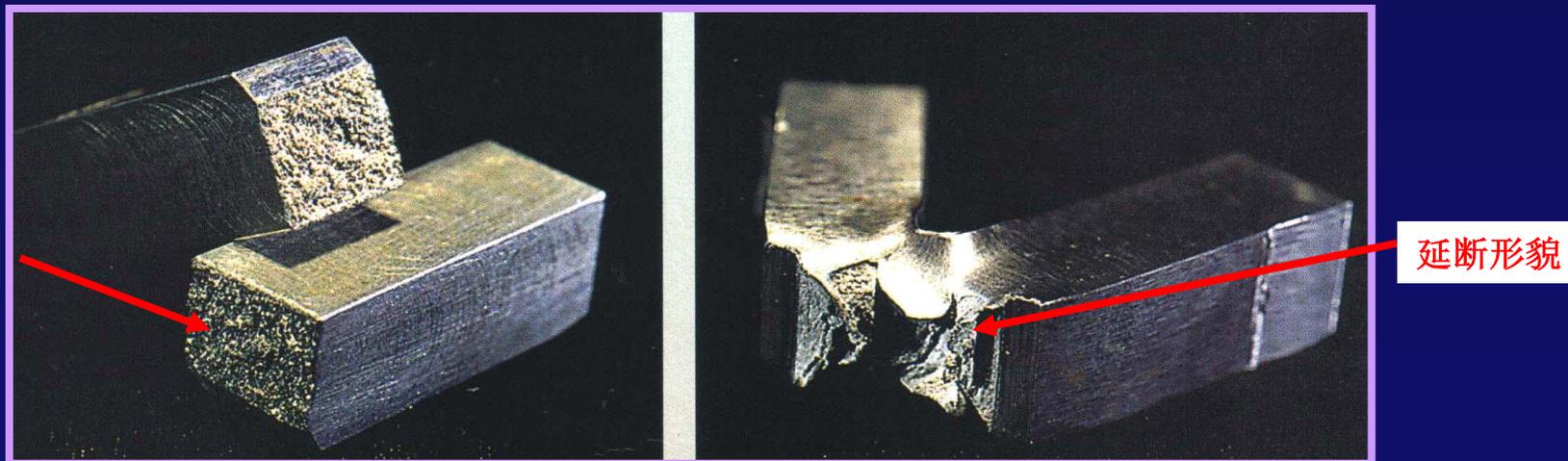
(b) 船尾螺旋桨

图 6 泰坦尼克号的超大型结构

● 泰坦尼克号船板备用件性能检测



(a) 壳体的金相组织



(b) 壳体的冲击断口

(c) 现代船板的冲击断口

图 7 泰坦尼克号船板壳体的金相组织及冲击断口



2. 材料失效分析概念的新诠释

● 事故调查结论

在对泰坦尼克号船板备用件进行性能检测后，发现有大量的MnS夹杂物，其纵横向韧脆转变温度分别为 32°C 、 56°C ，而当时的水温是 -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)，这是因为船板和铆钉中都含有大量的MnS夹杂物、超标P元素和航速偏快。船板在冰山的持续碰撞下，在夹杂物、铆钉等应力集中处引发了许多裂纹并开裂(失效缺陷)，随后这些裂纹发生快速疲劳扩展，彼此连接成大裂缝(失效机理)，最终导致船板的整体断裂。

因此，泰坦尼克号的失效是由于冰山的撞击力、船板与铆钉的断裂韧性低和航速本身过快等相互作用下发生的低应力脆性断裂所引起(失效起因)。

2. 材料失效分析概念的新诠释

2.6 失效分析的内在关系

任何材料的失效都会经历从**产品到构件**、从**构件到损伤**的二个阶段，即“**六品**”“**五件**”、“**四化**”。理解它们的本质含义及内在关系，对失效分析至关重要。

- **六品（产品）**

制品、成品、半成品、物品、次品、废品。

- **五件（构件）**

零件、部件、**组件**、元件、器件。

- **四化（损伤）**

劣化(微观)、**退化**(细观)、**脆化**(宏观)、**老化**(外观)。



2. 材料失效分析概念的新诠释

● “3P” 安全保障理念

工程结构件不可能达到100%的无缺陷，存在一些不完整性，最终影响使用的安全性。

因此，为了确保结构件在全寿命周期内安全使用并避免意外事故的发生，结构件必须采用“3P”的安全保障理念，进行设计、保护和维护：

(1) Prevention (预防)

(2) Protection (防护)

(3) Prediction (预测)



2. 材料失效分析概念的新诠释

2.7 失效分析的复杂性

产品质量控制通常实行“五要素”法或“六要素”法管理：

“人、机、料、法、环”（4M1E分析法）



“人、机、料、法、环、测”（5M1E分析法）

但产品的失效分析则更为复杂：

分析人员不仅要有专业知识，而且也懂工程知识，同时熟悉标准、规范、规程，甚至包括管理知识。

2. 材料失效分析概念的新诠释

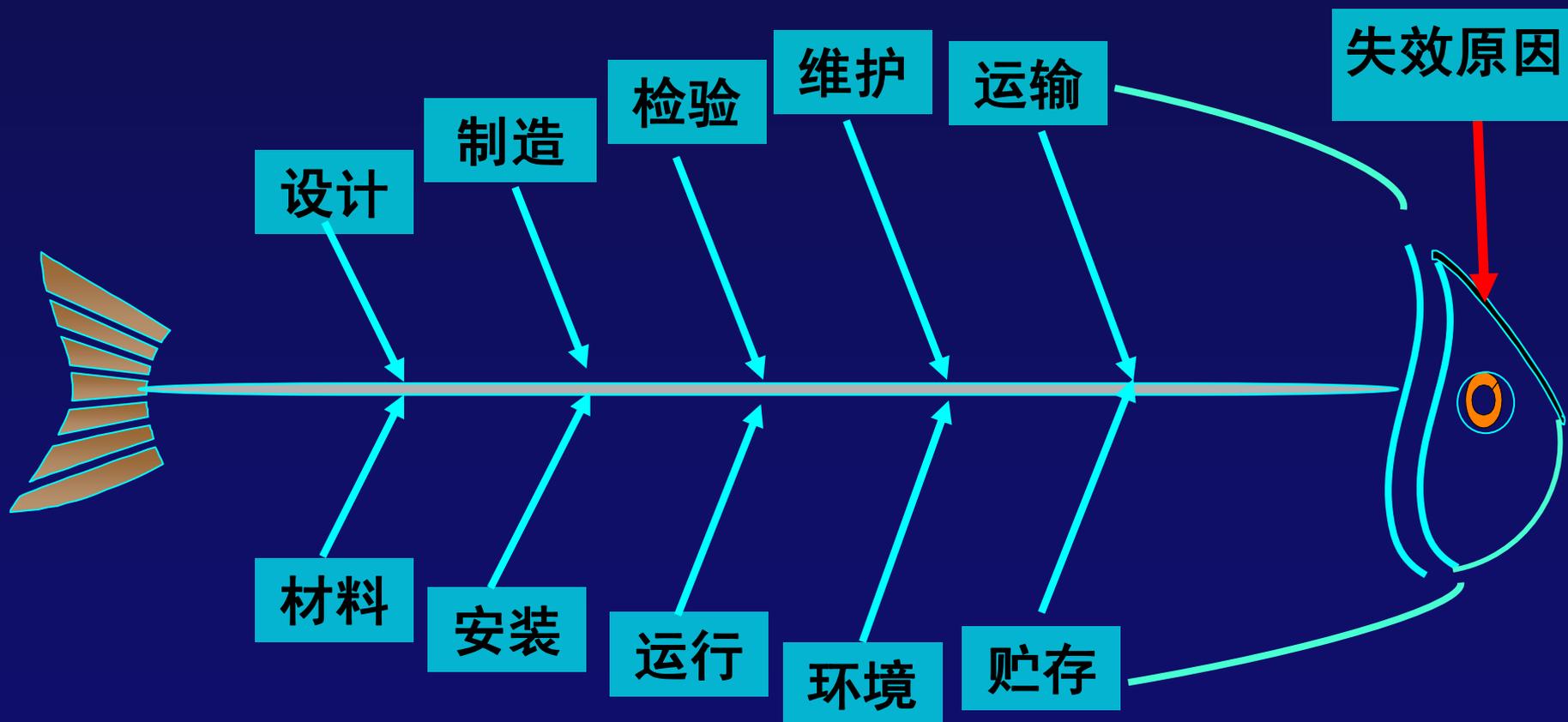
2.8 失效分析的复杂性

从结构完整性考虑，一个构件的失效通常涉及十种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) 贮存 (storage)
- (10) 运输 (transportation)

2. 材料失效分析概念的新诠释

● 构件失效的鱼骨图分析法





3. “七性”案例教学法的内涵和特点



3. “七性”案例教学法的内涵和特点

3.1 案例的综合性

- (1) 核电装置的失效分析
- (2) 火电装备的失效分析
- (3) 风电设备的失效分析
- (4) 石化装置的失效分析
- (5) 化工设备的失效分析
- (6) 冶金设备的失效分析
- (7) 汽车部件的失效分析
- (8) 微电子封装的失效分析
- (9) 印制电路的失效分析
- (10) 城市管网的失效分析



3. “七性”案例教学法的内涵和特点

例如：核电装置的典型案例有：

- (1) 核电厂 RCW热交换器传热钛管的失效分析与治理方案
- (2) 核电厂凝汽器钛管异常减薄的失效分析与解决对策
- (3) 核电厂汽轮机EH系统油动机密封圈意外泄漏的失效分析
- (4) 核电厂乏燃料存放水闸门减速器异常断裂的失效分析
- (5) 核电厂消氢系统工艺管道泄漏的失效分析与解决方案
- (6) 核电厂汽轮机系统循环水泵地脚螺栓断裂的失效分析
- (7) 核电厂汽轮机系统凝升泵角接触滚子轴承的失效分析
- (8) 核电厂闸阀连杆异常断裂的失效分析
- (9) 核电厂硼酸再循环泵轴外断裂的失效分析
- (10) 核电厂冷却循环水泵磨损的失效分析与对策
- (11) 核电厂核岛高分子材料电缆线辐照损伤的老化寿命评估

3. “七性”案例教学法的内涵和特点

● 案例引用的参考文献

- (1) Zhen-Guo Yang*, Yi Gong, Jian-Zhong Yuan. Failure analysis of leakage on titanium tubes within heat exchanger in a nuclear power plant. Part I: Electrochemical corrosion. *Materials and Corrosion*, 2012, 63 (1): 7-17.
- (2) Yi Gong, Zhen-Guo Yang*, Jian-Zhong Yuan. Failure analysis of leakage on titanium tubes within heat exchanger in a nuclear power plant. Part II: Mechanical degradation. *Materials and Corrosion*, 2012, 63 (1): 18–28.
- (3) Fei-Jun Chen, Chen Yao, Zhen-Guo Yang*. Failure analysis on abnormal of heat-transfer titanium tubes of condensers in nuclear power plant Part I: corrosion and wear. *Engineering Failure Analysis*, 2014, 37: 29-41.
- (4) Fei-Jun Chen, Chen Yao, Zhen-Guo Yang*. Failure analysis on abnormal wall thinning of heat-transfer titanium tubes of condensers in nuclear power plant PartII: erosion and cavitation corrosion. *Engineering Failure Analysis*, 2014, 37: 42-52.

3. “七性”案例教学法的内涵和特点

- (5) **Xiao-Lei Yang, Qun Ding, Zhen-Guo Yang***. Failure analysis of O-ring gasket of electric hydraulic system in nuclear power plant. *Engineering Failure Analysis*, 2017, DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.04.021.
- (6) **Tong-Tong Bi, Zhen-Guo Yang***. Failure analysis on speed reducer shaft sluice gate in nuclear power plant. *Engineering Failure Analysis*, 2017, Accepted.
- (7) **Yi Gong, Shi-Meng Hu, Jing-Lu Fei, Xiao-Lei Yang, Zhen-Guo Yang*** Ai-Hua Guo, Xiu-Qiang Shi, Yong-Cheng Xie. Comparative study on degradation of ethylene-propylene rubber for nuclear cables from gamma and beta irradiation. *Polymer Testing*, 2017, 60: 102-109.
- (8) **Qun Ding, Zhen-Guo Yang***. Failure analysis of abnormal fracture of boric acid pump shaft in 1000MW nuclear power plant. *Engineering Failure Analysis*, 2017, submitted
- (9) **Jing-Lu Fei, Qun Ding, Zhen-Guo Yang***. Failure analysis of valve stem fracture in 300MW nuclear power plant. *Engineering Failure Analysis*, 2017, to be submit



3. “七性”案例教学法的内涵和特点

再比如，石化装置的典型案例有：

- (1) 年产109万吨聚乙烯装置急冷油/稀释蒸汽换热器管子的腐蚀失效分析和整改方法
- (2) 高压聚乙烯装置循环气体冷却器爆裂的腐蚀失效分析
- (3) PTA聚酯装置干燥器的失效分析与解决对策
- (4) 加氢精制PTA聚酯装置的失效分析及治理方案
- (5) 受火损伤后石化设备HDPE管道的试验分析与寿命评定



3. “七性”案例教学法的内涵和特点

● 案例引用的参考文献

- (1) Yi Gong, Zhen-Guo Yang*, Xin-Hao Meng. Failure analysis of one peculiar ‘Yin-Yang’ corrosion morphology on heat exchanger tubes in purified terephthalic acid (PTA) dryer. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 31: 203-210.
- (2) Yi Gong, Chao Yang, Cheng Yao, Zhen-Guo Yang*. Acidic/Caustic Alternating Corrosion on Carbon Steel Pipes in Heat Exchanger of Ethylene Plant. *Materials and Corrosion*, 2011, 62(10): 967-978.
- (3) Yi Gong, Jing Zhong, Zhen-Guo Yang*. Failure analysis of bursting on the inner pipe of a jacketed pipe in a tubular heat exchanger. *Materials and Design*, 2010, 31(9): 4258-4268.



3. “七性”案例教学法的内涵和特点

● 案例引用的参考文献

- (4) Yi Gong , Jiang Cao, Xin-Hao Meng, Zhen-Guo Yang*. Pitting corrosion on 316L pipes in terephthalic acid (TA) dryer. *Materials and Corrosion*, 2009, 60 (11): 899-908.
- (5) Si-Min Guo, Zhen-Guo Yang*, Xiao-Ying Tang and Yan-Tian Zhu, Safety assessment of high density polyethylene pipe with thermal damages. *Plastics, Rubber and Composites: Macromolecular Engineering*, 2017, 46(4): 173-183.



3. “七性”案例教学法的内涵和特点

3.2 “七性”案例教学法的内涵

- **知识性**：按照教学大纲要求，完成所有规定的知识点讲授
- **思想性**：对于一些基本概念，从不同视角进行诠释和质疑
- **趣味性**：就相关理论，采用通俗语言解释难懂的专用术语
- **逻辑性**：阐述层次分明，理清概念与理论间的内在关系
- **前瞻性**：针对学科发展，适时介绍技术进展和研究动态
- **实用性**：精心挑选案例，介绍理论应用于工程的成功实例
- **互动性**：活跃课堂气氛，提出问题让学生参与讨论和思考

3. “七性”案例教学法的内涵和特色

3.3 “七性”案例教学法的特色

(1) 教学理念

坚持以学生为本，实现知识传授、能力培养、素质教育三位一体的综合教育；通过案例分析，揭示我国当今存在的一些问题，鼓励学生树立理想，敢于担当，勇于创新，培养学生有社会责任感，具有良好的素养和品质。

(2) 教学方法

采用混合型教学方式，比如专业教育与素质教育相结合、理论讲解与工程案例相结合、书面作业与期末演讲相结合等，通过课堂讨论和互动，促进学生深层学习和思考，训练培养了学生的表达能力、分析能力和综合能力。



3. “七性”案例教学法的内涵和特色

(3) 教学内容

对现有失效分析学科进行批判性讲授，例如，颠覆性地提出了材料失效新定义，材料失效模式新诠释，失效原因的鱼骨图分析法，失效模式、失效机理与失效预防间内在关联的“六品”、“五件”、“四化”、“3P”等一系列新颖表述法，引导学生敢于质疑和探究；再结合工程案例分析，诠释了如何运用现有的基础知识去分析解决工程问题的创新过程，让学生感悟深切，触类旁通，举一反三，不仅吸引学生对材料失效分析感兴趣，而且通过深层学习，学生的创新能力和综合分析能力得到了有效的训练和提高。



4. “七性”案例教学法的应用效果



4. “七性”案例教学法的应用效果

4.1 学生评价（2015年春季盲评原文）

学年学期	选课号	课程代码	课程名称	课程老师	教学班
2014-2015年第02学期	MATE130025.01	MATE130025	材料失效分析	杨振国	材料失效分析

1: 我对该课程感到满意的是?

- 2015-06-12 16:28 杨老师在课堂上思路清晰，设计了很多互动性的问题，每个人都能积极的参与到课堂中，课堂效果较好。同时也注重与学生合作分析问题，充分激发学生思维活跃，学到了很多当前材料失效分析领域的问题。
- 2015-06-12 17:36 对于这门课程，我很满意。这堂课不同于大学里上的其他课程，老师在自己工作经验的基础上，总结出了一套独一无二的材料失效分析方法，它教会我的是实实在在的技能，不会仅仅浮于理论。激发学习兴趣很重要的一个手段就是及时得到反馈。课堂中，老师分出了很多时间让我们分析实际碰到的失效案例，能够把课堂所学的知识马上运用到实际中，这激发了我对这个领域的兴趣。
- 2015-06-12 21:51 杨老师教学认真，治学严谨，讲课生动，思路清晰，注重理论与实践相结合，注重学生能力的提高。
- 2015-06-12 22:03 杨老师上课激情澎湃，绘声绘色，还穿插许多有趣小故事，即便每周两节课也会印象深刻！课程内容丰富，涵盖面广，时效性高。总之，很庆幸选上这门课，能学到很多专业知识，也很享受杨老师的演讲魅力~~~
- 2015-06-14 19:29 这门课程是一门很有价值的课程。首先，对案例的分析将理论和实际相结合，随后对现实中发生的种种问题，结合理论以及实验数据，实事求是地给出客观且准确的结论，有助于培养学生实事求是的精神；其次老师对于各个案例中凸显的问题进行了细致的分析，不仅指出了自然的现象，同时也一再警示我们要考虑人为因素的影响，培养了学生敢于质疑、观察仔细的品质；最后，这门课程让我们接触到了生产生活中可能遇到的许多问题，对我们以后投入生产建设工作积累了许多宝贵经验。
- 2015-06-15 21:44 感觉这样的专业选修课上的很有意义，虽然我才是个大二的学生，基础知识不如大三的学长学姐，可是每节课仍然听得津津有味，感觉受益匪浅。这门课的评估方式不是死板的考试，而是自己翻译文献、查找资料，并在课上完成对文献的讲解，同时回答老师的问题，类似论文答辩，这样的方式很灵活很有挑战性，能够真正考察学生的水平，希望这样的专业课更多一些。

4. “七性”案例教学法的应用效果



学年学期	选课号	课程代码	课程名称	课程老师	教学班
2014-2015年第02学期	MATE130025.01	MATE130025	材料失效分析	杨振国	材料失效分析

1: 我对该课程感到满意的是?

- 2015-06-17 15:05 杨老师非常细心，讲的内容也非常有条理。
- 2015-06-17 15:46 老师讲课讲的慷慨激昂很有激情带动大家的学习气氛很棒哒~~~~~
- 2015-06-18 10:43 这门课挺好的。我第一次尝试翻译英文文献，感觉收获很大。重在能力的培养。这门课非常系统而全面地介绍了失效分析的步骤、模式、机理等，佐以实际的案例分析，将理论与实际相结合，知识与趣味兼具，在这一学期中非常愉快且有收获地进行了学习。
- 2015-06-18 15:49 一学期的课程学习让我收获颇丰，对材料失效分析有了比较系统的了解，从材料失效分析的基本概念、基本内容、材料失效分析工作者应该具备的素质，到材料失效模式，再到具体讲断裂、腐蚀、磨损的失效形式与机理，再到材料表征分析的方法，最后结合几个典型的实际失效案例为我们讲解应该怎样从零开始一步步去分析判断。杨老师的授课十分详细，逻辑非常清晰，能让我们很容易的接受与理解，同时杨老师很好得结合实际，结合自己在实际失效案例中的亲身体会与经验，更让我们觉得内容十分丰富，感觉班上的同学们在上这门课的时候都有很认真听讲，积极讨论。最后，课程考核是文章翻译与做pre的形式在众多的选修课中比较少见，但我感觉这个形式能更好的让同学们体验到材料失效分析究竟是什么样子的，同时可以了解更多课外的知识，督促大家自己去理解与体验何为失效分析，提出自己的见解。总之这是一门很推荐的专业选修课，感谢杨老师一学期的精彩授课与细心辅导！
- 2015-06-30 22:02

2: 我感到该课程需要改进的是?

- 2015-06-12 22:04 如果有机会实地考察，亲自到失效现场分析就更好了！
- 2015-06-17 15:05 没有什么问题了



4. “七性”案例教学法的应用效果

4.2 评教得分

学期	选修人数	本课程评教分	材料系平均分
2011年秋季	18	4.62	4.77
2012年秋季	30	4.92	4.88
2013年秋季	30	4.87	4.63
2014年春季	24	4.92	4.57
2015年春季	29	4.79	4.47
2016年春季	34	4.76	4.56
2017年春季	40		



4. “七性”案例教学法的应用效果

4.3 同行评价

上海市教学名师、国家精品课程负责人、华东理工大学唐松超教授，同济大学教学名师、国家精品课程负责人许乾慰教授，国家精品课程《材料科学基础》教材合编者及主讲人、上海交通大学戎咏华教授，长江学者特聘教授、上海市精品课程《大学物理》负责人、复旦大学教学名师侯晓远教授四位专家，对课程网站、教学课件、教学方法、教学视频等进行了综合性评定。

他们的总体评价是：本课程的教学内容有创意，教学方法有新意，教学方式有特色，教学效果较显著，在国内同类课程中处于前列水平。



4. “七性”案例教学法的应用效果

四位专家评议原件：

《材料失效分析》课程

评审意见

《材料失效分析》是一门涉及许多科学领域的综合性学科，应用性强，涉及面广，是材料类专业重要的专业课，这对训练和培养学生的学习动手能力、实践能力、综合能力和专业素养都很有帮助。

评审人细致审阅了复旦大学《材料失效分析》课程的申报表、教学视频、PDF课件、网站资料及学生评价等，认为这门课有以下三个明显的优势：

首先，主讲人杨振国教授长期从事教学工作，科研经历丰富，曾连续三届应邀在“全国失效分析学术会议”上作大会报告，这种科研与教学的有机结合，使课程讲解变得生动有趣，案例引人入胜，对学生有很大的吸引力和感召力；其次，课程采用了传统板书与多媒体相结合、基础理论与生活实例相结合、简单案例和复杂案例相结合、启发式和互动式相结合、基础介绍和技术讲座相结合、专业教育和素质教育相结合、基本介绍和科研成果相结合及文献研讨与周末演讲相结合等多种教学方法和方式，教学方法有创意，特色明显，有效地调动了学生的学习兴趣，教学效果显著；第三，授课内容丰富、多样、实用及系统，具有前瞻性和新颖性，精选了主讲老师完成的几十项重大失效分析课题为教案，深入浅出地讲解了如何运用已有的基础知识去分析解决实际问题的具体过程和方法，这种以研促教的教学方式，课堂感染力强，教学效果很好，学生易接受，有效训练了学生的创新思维能力和综合分析能力。

因此，我认为该课程把理论教学与工程实际有机地融合在一起，教案很有特色、内容新颖实用，把知识性、趣味性、逻辑性、创新性和实用性融为一体，有效地培养了学生的创新能力和综合能力，是一门优秀的特色课，已完全达到精品课程的要求，特予推荐。

华东理工大学材料科学与工程学院
国家精品课程《高分子科学与工程实验》负责人



唐颖超教授
2013年3月13日

课程评价意见

《材料失效分析》是一门理论与实际结合很密切的课程，学生通过学习材料的失效模式、失效机理及分析方法等理论知识，理解和掌握分析和解决工程应用实际问题的能力。复旦大学开设的这门课程所使用的案例，全部来自于生产实际，既有核电、火电、石化、化工、钢铁等工业装置的重大失效案例，也有汽车、印制电路板等新兴行业复合材料构件和PCB盲孔等失效案例，涉及到多个交叉学科领域和技术门类，体现出复旦大学在解决工程实际问题为社会所做出的重大贡献。

本课程教学团队结构合理，采用国内外最优秀的教材，并由教学、科研经验丰富的杨振国教授担任主讲，方晓生教授和蒋益明教授承担部分教学任务。杨教授长期从事失效分析研究，连续多年在全国失效分析大会上做大会报告，为国内同行所称道，他也是《材料科学导论》精品课程的主讲老师，其教学方式深受学生们的欢迎。而两位年青教授在电子材料的研发方面也很有造诣，这样组成的教学团队使课程的教学保持了活力，吸引力强，同时保证了教学的延续性。在教学方法上，该课程既注重理论教学，更强调将理论用于实际解决问题，把如此多的实际案例引入到教学中，学生从中可学到许多分析方法和思路，促进了分析能力和创新能力的提高，这种以研促教的教学方式在国内同类课程中尚属首次，从学生反馈的结果来看，学生评价高，取得了很好的教学效果。

该课程教学文件齐全，资料丰富，教学团队合理，讲授知识重点突出，教学方式新颖，特别是结合实际案例的教学方法，非常有利于启发学生的创造性思维，增强学生对材料研究的兴趣，整体上已达到了精品课程的要求。因此，我推荐该课程参与复旦大学精品课程的评价。

同济大学材料学院
国家精品课程《材料研究方法》负责人



许范慈教授
2013年3月11日

《材料失效分析》课程

的评价意见

材料失效分析是一门新兴的综合性学科，在许多领域有广泛的应用，也是为材料科学的工程应用提供了必要的基础。

杨振国教授主持的《材料失效分析》，相比与国内其他同类课程，在教学内容、教学方法、教学效果和师资队伍等方面有以下四个特点：

- 1、内容丰富和实用。不仅讲授了传统金属材料的失效问题，还教授了非金属材料及复合材料的失效问题，教案新颖，内容全面，案例丰富，学生从中可以学到许多实用知识和分析方法，培养学生具有扎实的专业知识和综合素养；
 - 2、讲授方式先进和有效。特别强调理论和实际相结合，采用生活中一些熟悉的实例诠释不同材料的失效本质，把一些复杂的概念具体化和形象化，学生易于掌握和理解，使其掌握基本的理论概念，学会分析问题的基本能力。
 - 3、教学方法现代化。所有内容采用了多媒体课件讲解，内容完整，图文并茂，而且把讲解案例预先告知学生，使其课前准备，从而在课堂上积极参与讨论和分析，教学效果良好，学生的分析能力和创新能力得到了有效的训练和提高；
 - 4、师资力量雄厚。课程组成了一支学术水平高、乐于教学并能紧密跟踪学科发展前沿的教学团队；三位教师都在材料研究领域取得成就的科研人员，上课认真负责，案例讲解生动，对学生有很大的吸引力，从而增强了学生对材料研究和表征分析的兴趣。
- 根据公示的课程网站内容和申报材料，我认为复旦大学的《材料失效分析》课程整体上处于国内同类课程的前列水平，已达到精品课程的要求，同意申报。
- 建议杨振国教授的教学团队在讲课的基础上编写具有自身特色的《材料失效分析》教材，以便后申报上海市精品课程。

上海交通大学材料学院

国家精品课程《材料科学基础》教材合编者



戎咏华教授
2013年3月

评审意见

《材料失效分析》这门课具有很强的实用性，将理论知识与工程实际有机地结合起来。课程选用的大量教案都是主讲老师完成的相关企业委托的真实案例，有很强的实践指导意义和工程价值。同时，本课程作为选修课，教学上注重启发学生的思维方式和分析能力的培养，考核上的创新模式训练学生的综合能力和创新能力，这是复旦大学理论与实践相结合的课程典范，教学方法值得推广。

该课程教学团队由三位教授组成，整体实力雄厚。负责人杨振国教授是中国失效分析领域的知名专家，有丰富的科研经历，从事教学工作也有二十余年，主讲过《材料科学导论》、《材料化学II》及《现代复合材料》等多门课程；方晓生教授是复旦大学千人计划引进人才，对纳米材料功能器件的可靠性有深入的研究；蒋益明教授担任上海市腐蚀学会理事，对电子材料的腐蚀失效机理掌握许多实际案例。教学团队成员相互配合，共同探究出一套适合学生的教学模式，每章课件制作精良，思考题能促进学生的进一步学习和探索，而丰富的拓展阅读资料有助于学生拓展知识面、激发学生对材料研究的兴趣。

总之，从《材料失效分析》课程网站上看到，授课老师的教学态度、讲授视频、课件制备、阅读材料及学生评价等给我留下了很好的印象，课程已经符合精品课程的标准，故推荐其申请复旦大学精品课程。



复旦物理学系
侯晓生教授
2013年3月

4. “七性”案例教学法的应用效果

4.4 社会评价

(1) 新闻报刊报道

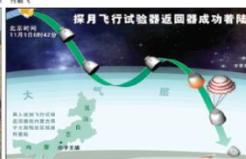
《科技日报》(2014.11.2)、《解放日报》(2013.11.4)、《文汇报》(2012.10.30) 等专题报道了杨振国在失效分析和新材料领域取得的成就。



能把电脑屏幕卷起来的新工艺诞生

【最新发现与创造】
“柔性显示”是未来显示技术发展的一个重要方向。中国科学院上海硅酸盐研究所杨振国团队，在柔性显示材料领域取得重要突破，成功研制出了一种新型柔性显示材料。该材料具有优异的柔韧性、透明度和导电性，可用于制造可弯曲、可折叠的显示屏。这一研究成果为未来便携式电子设备的发展提供了新的思路。

探月三期再入返回试验圆满成功 中国成为回收绕月飞行器的第三个国家



【中国航天】
嫦娥三号探测器于12月14日成功着陆月球表面，这是中国首次实现月球软着陆。此次任务的成功，标志着中国成为继苏联和美国之后，第三个成功回收绕月飞行器的国家。嫦娥三号的成功着陆，为后续月球探测任务奠定了坚实基础。





4. “七性”案例教学法的应用效果

(2) 专业刊物介绍

- **中国电镀协会 (2017.4.14) 和中国表面处理网 (2017.4.12)**，以“复旦大学杨振国：以人为本、兴趣为重、培养优秀高技术人才”为题，分别报道了他在培养高技术人才方面所作的贡献
- **《理化检验/物理分册》 (2015.9.15)** 以题为“材料专业好老师：复旦大学杨振国教授访谈”，介绍了他在培养学生方面所展示的奉献精神
- **《材料与测试》专业网 (2015.12.2)**，以“失效分析专家深度揭秘泰坦尼克号的失效事故”为题，介绍了杨振国关于泰坦尼克号失效过程的深度解析和分析



4. “七性”案例教学法的应用效果

(3) 业界学术认可

- 杨振国连续五届应邀在每二年一次的“全国失效分析学术会议”作大会报告 (2007、2009、2011、2013、2015)
- 聘任中国机械工程学会理事 (2016.11)
- 聘任中国机械工程学会失效分析分会副理事长 (2015.10)
- 聘任中国科协全国金相与显微分析学科科学传播专家团队首席专家 (2014.11)
- 聘任上海市安全生产核心专家 (2013.5)
- 每年应邀为中国机械工程学会、中国印制电路协会、国家钢铁产品质量监督检验中心等所属的一些二级分会、专业技术人员作专题学术报告和技术培训讲座若干次



4. “七性”案例教学法的应用效果

4.5 教学成果

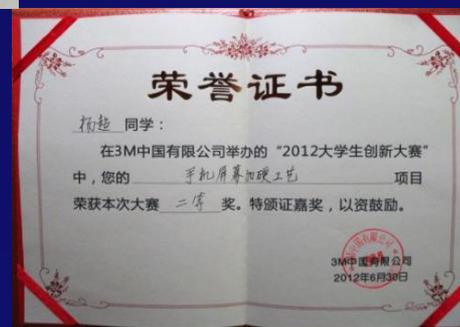
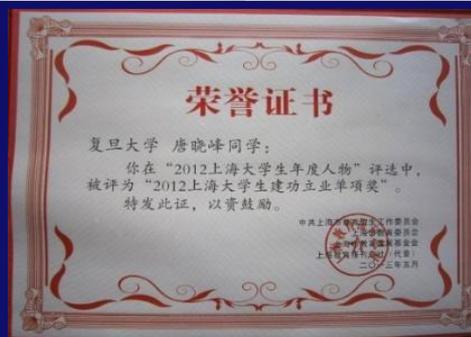
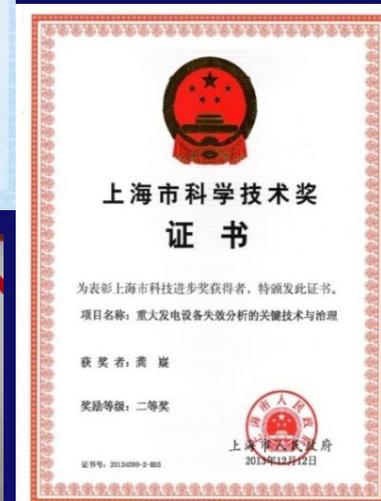
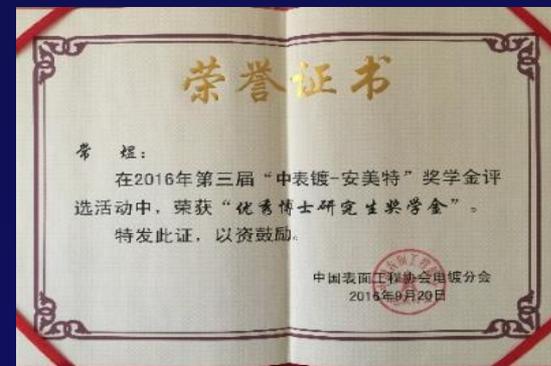
(1) 学生获奖 (* 仅以杨振国指导的学生就有10人次)

- 1) 毕彤彤获“首届全国失效分析大奖赛特等奖”(唯一), 2016.12
- 2) 杨晓蕾获“首届全国失效分析大奖赛一等奖”(第三), 2016.12
- 3) 常煜获“中国表面工程协会优秀博士生奖学金”(第一), 2016.8
- 4) 唐晓峰获“上海市两新组织优秀党员”, 2016.5
- 5) 唐晓峰获“上海市青年五四奖章”, 2015.6
- 6) 常煜、朱熠民获“全国大学生创新创业金奖”, 2014.11
- 7) 龚嶷、祝凯获“上海市科技进步二等奖”, 2014.4
- 8) 常煜、王冬雨获“全国大学生发明挑战杯一等奖” 2013.10
- 9) 唐晓峰获“上海大学生建功立业单项奖”, 2013.5
- 10) 杨超获“3M杯全国大学生创新大赛二等奖”, 2012.16

4. “七性”案例教学法的应用效果



● 学生获奖证书





4. “七性”案例教学法的应用效果

(2) 精品课程

- 1) 杨振国 胡新华、张 群、胡林峰. 《材料科学导论》获评为上海市精品课程. 上海市教委, 2015.5 .
- 2) 杨振国 方晓生、蒋益明、江素华. 《材料失效分析》获评为上海市精品课程. 上海市教委, 2016.5.



4. “七性”案例教学法的应用效果

(3) 教改论文

- 1) 胡林峰、张群、杨振国. 《材料科学导论》实验内容的更新与发展. 东北大学学报(社会科学版), 2013, 15(S2): 59-62.
- 2) 毕彤彤、杨振国*. 批判性教学—《材料失效分析》新诠释. 中国高校科技, 2017, 343(6): 印刷中.
- 3) 杨振国*、毕彤彤. 材料失效分析课程互动式教学的实践与拓展. 教育教学探索, 2017, (10): 排版中.
- 4) 朱熠民、杨振国*. 教学相长、与时俱进 — 交互式教学在《材料科学导论》中的实践与改革. 大学教育, 2017, (10): 排版中.
- 5) 杨晓蕾、杨振国*. 培养创新复合型人才 — 《材料失效分析》课程教学探索与实践. 大学教育, 2017, (10): 排版中.
- 6) 范圣男、杨振国*. 《材料科学导论》课程的教改探索与实践. 教育教学探索, 2017, (11): 排版中.
- 7) 龚嶷、杨振国*. “二领二悟”特色教学理念及其在材料科学与工程中的教改实践. 2017, 已完稿.
- 8) 杨振国. “七性”案例教学法的内涵、特点及实践. 2017, 基本完稿

4. “七性”案例教学法的应用效果

(4) 编写国际手册一章 (Elsevier)

Handbook of Materials Failure Analysis With Case Studies from the Oil and Gas Industry

Edited by

Abdel Salam Hamdy Makhlouf

Mahmood Aliofkhazraei



AMSTERDAM • BOSTON • HEIDELBERG • LONDON
NEW YORK • OXFORD • PARIS • SAN DIEGO
SAN FRANCISCO • SINGAPORE • SYDNEY • TOKYO

Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier



Failure analysis of heat exchanger tubes in petrochemical industry: Microscopic analysis approach

CHAPTER

16

Zhen-Guo Yang, Yi Gong

Department of Materials Science, Fudan University, Shanghai, China

CHAPTER OUTLINE

1	Introduction	330
2	Case 1: Pitting Corrosion of PTA Equipment From Inappropriate Maintenance Practices	331
2.1	Background	331
2.2	Failure Analysis	332
2.2.1	Visual Observation	332
2.2.2	Materials Examination	334
2.2.3	Process Media Detection	334
2.2.4	Microscopic Analysis	336
2.3	Discussion	338
2.4	Conclusion	340
3	Case 2: Acidic/Caustic Alternating Corrosion of Ethylene Plant From Operational Mistakes	341
3.1	Background	341
3.2	Failure Analysis	343
3.2.1	Visual Observation	343
3.2.2	Materials Examination	344
3.2.3	Process Media Detection	344
3.2.4	Microscopic Analysis	346
3.2.5	Discussion	350
3.3	Conclusion	351
4	Conclusion	351
	References	352



4. “七性”案例教学法的应用效果

(5) 主编会议论文集: 复旦学报, 2012, 51(2): 131-255

2011 年全国电子电镀及表面处理学术会议

为促进我国电子电镀及表面处理行业的持续发展、交流国内外先进技术并提高我国电子电镀及表面处理的研究水平,由中国电子学会电子制造与封装技术分会电镀专业委员会、上海市电子学会电子电镀专业委员会联合主办、台湾李国鼎科技发展基金会与上海市电镀协会协办的“2011 年全国电子电镀及表面处理学术交流会”于 2011 年 11 月 20 日~22 日在上海复旦大学隆重召开。复旦大学化学系郁祖祺教授担任本届大会名誉主席、材料科学系杨振国教授担任大会主席。

出席本届会议的有来自德国、日本、新加坡、台湾、香港及全国 18 个省、直辖市的高校、研究所、企业、厂商、协会、学会等 200 余名代表。前任日本电化学学会会长、国际电化学学会副会长早稻田大学教授 T. Osaka、德国纽伦堡技术大学教授 W. Jillek、台湾阿托科技公司(ATOTECH)黄盛郎博士、新加坡 Epson Industrial PteLtd 方书农博士等国内外 30 余名专家、教授应邀在会上作了主旨报告,他们的报告受到了代表们的一致称赞。会议还同时设立电子电镀、环保技术、常规电镀及电子产品失效分析等分会场进行了学术交流和讨论。这不仅为参会同行提供了学术交流良好的平台,而且为中外同行结交新朋友、加深彼此的认识和合作提供了机会,对促进我国电子电镀及表面处理行业的技术创新、产品开发乃至企业转型等很有意义。

本届会议共收到应征论文 100 余篇。为了达到更好的学术交流,大会专家组对所有的论文进行了评审,从会议论文集中遴选出 24 篇优秀论文,刊出在本专辑上。



2011 年全国电子电镀及表面处理学术会议留影
2011-11-20~22 于复旦大学

复旦学报(自然科学版)

第 51 卷 第 2 期 2012 年 4 月

目次

2011 年全国电子电镀及表面处理学术会议优秀论文专辑

利用电镀铜填充微米盲孔与通孔之应用	秦维平(131)
无电解沉积用于太阳能电池(英文)	林智宇,陈成森,万其超(139)
凝汽器钛管外壁异常减薄的失效分析	姚 骅,杨振国,袁建中,陈超芳,郑立军(148)
电镀镍金板无法键合金线的失效分析	陈飞强,严 石,杨振国,李志东,陈 蔚(154)
电沉积方法制备 Zn-Ni 多层膜的研究	张英杰,刘宇星,董 鹏(159)
电化学沉积法制备超疏水镍薄膜	田菲菲,胡安民,李 明,毛大立(163)
环保型低浓度硫酸盐三价铬电沉积厚膜的研究	侯峰岩,屠振密,屠云腾(168)
Cu-Ni-P 合金镀层的制备及性能	白新波,王 为(173)
几种含氮有机物分子结构与电化行为关联	高学明,陈莹莹,孙红旗,陈 泰,贺岩峰(179)
基于单轴微拉伸的 TSV 铜力学性能研究	李君刚,汪 红,王 溯,王慧颖,程 萍,屠振密,丁桂甫(184)
Mg-Nd-Zn-Zr 合金表面超疏水 SiO ₂ 薄膜的制备及其表征	王少华,谢益璇,刘丽华,郭兴伟,丁文江(190)
化学镀 Ni-P 基体的磷含量对亚硫酸盐镀金体系置换镀金层表面形貌的影响	刘海萍,李 正,毕四富,于元春,滕祥国,屠振密(196)
铜板/离子液体-Grignard 混合溶液体系中电沉积镍的初探	刘慧斌,许源荣,周 蔚,印仁和,成旦红,大内李雄(201)
连铸结晶器铜板电沉积 Ni-Co-Mo 技术的研究	吕春雷,侯峰岩,谭兴海,王庆新,邢祖谦(206)
Mn ²⁺ 掺杂不锈钢基 β-PbO ₂ 电极制备及电催化性能	石凤滨,陈步明,郭忠斌,袁飞刚,刘建华(213)
添加剂对 AZ31B 镁合金氧化膜性能的影响	陈 利,屠晓华,卫中领,沈 钰,范松岩,吴建一(218)
铝合金表面电镀镍的耐腐蚀性能	韩登峰,鲁道荣,周 洋(222)
镀锡板表面黑灰形成机理的研究	梁 博,周庚瑞,唐 杰,潘红良(227)
填充银纳米线自修复型导电胶	陶 宁,吴海平,杨振国(231)
化学镀金(ENIG)表面浸润性不良的失效分析	严 石,陈飞强,杨振国,李志东,陈 蔚(236)
多晶铂电极在离子液体中的界面微分电容研究	王艳玲,杨 靖,周 蔚,曹为民,印仁和,大内李雄(240)
镍硼电极及 FeS 催化剂对煤电解液化的催化作用	姜 虹,刘怀有,周 蔚,印仁和(245)

研究简报

锂离子电池隔膜材料中离子扩散问题的随机行走模拟	柯佳颖,傅应强,陈蔚蔚,陈天南,张世界,王洪波,赵健伟(251)
全膜法处理电镀含镍漂洗水的零排放技术	潘文明,张水水(255)
彩图页	[I ~ VI]

期刊基本参数: CN31-1330/N * 1955 * b * 16 * 128 * zh+en * P * ¥18.00 * 1500 * 24 * 2012-04

责任编辑:朱崇业

4. “七性”案例教学法的应用效果

4.6 应用业绩

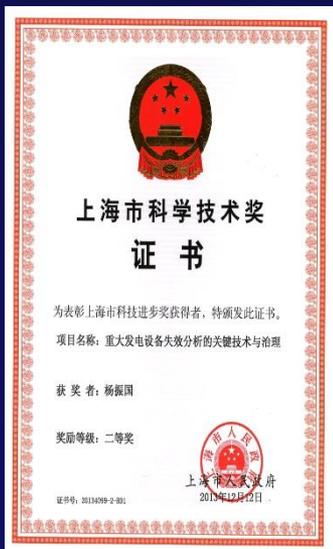
开发的失效分析技术已在**核电、火电、风电、石化、化工、冶金、汽车、微电子、印制电路、城市管网**等十个行业获得应用，完成重大失效分析课题100余项，取得了显著的社会经济效益。



4. “七性”案例教学法的应用效果



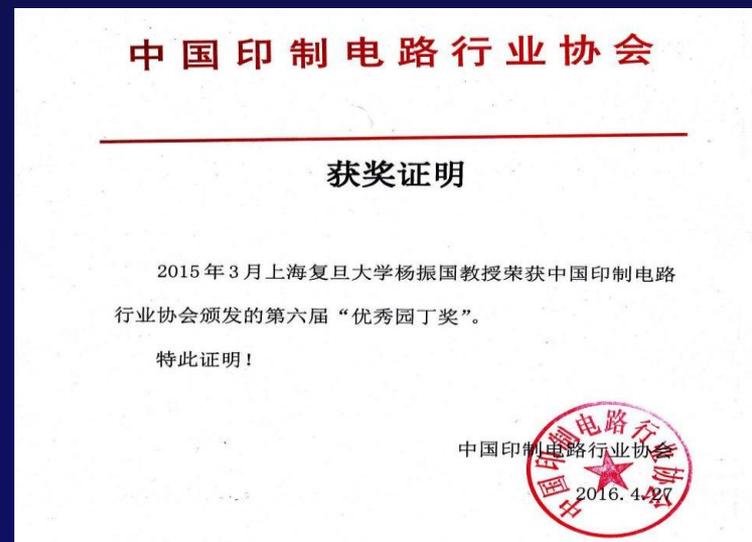
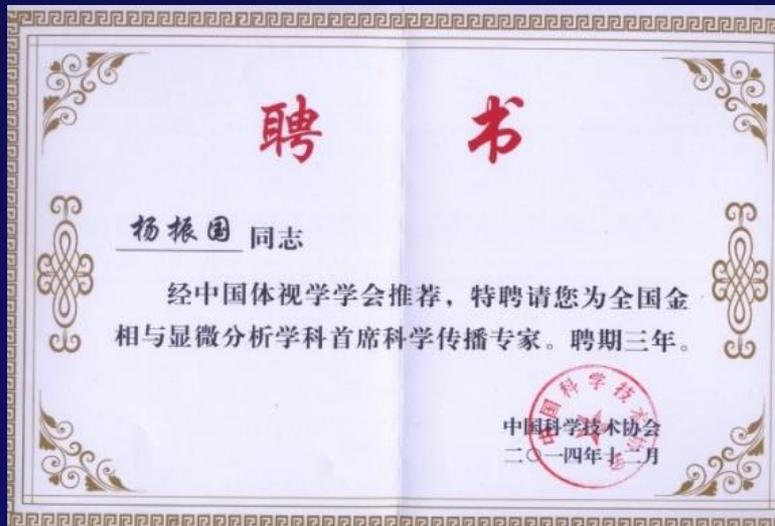
4.7 科研获奖 (近五年)





4. “七性”案例教学法的应用效果

4.8 教学荣誉





4. “七性”案例教学法的应用效果

4.9 其他工作 (*自2011年本课程实施起)

- (1) 国际期刊发表论文数： 66篇，其中SCI论文 63篇
- (2) 授权国家发明专利数： 19件
- (3) 编制批准国家行业标准一项： YB/T4610-2016
- (4) 江苏省“双创”人才 (2014. 11)



5. 总结语



5. 总结语

(1) “七性”案例教学法是“新工科”模式下教改方法的一种有益尝试和探索，旨在培养学生的创新能力和综合素质，提高分析解决工程实际问题的综合能力。

(2) 通过批判性讲授，诠释材料失效分析的基本概念、基础理论和分析方法，可以潜移默化地引导学生敢于质疑、大胆探索，对提高学生的创新能力和思维能力很有裨益。

(3) 以典型工程实例为基础的案例教学，展示了如何运用已有的基础知识去分析解决工程实际问题的创新过程，达到事半功倍的效果，不仅促进了学生的深层学习和思考，而且有效培养和提高了学生的综合分析能力。



谢谢!

联系人： 杨振国

单 位： 复旦大学材料科学系

邮 件： zgyang@fudan.edu.cn

电 话： 021-65642523

手 机： 13601688242

简介

杨振国：复旦大学二级教授、博士、博导，复旦北泰城市管网安全研究中心主任。1988年4月获博士学位，1994年4月~1995年5月在德国德累斯顿聚合物研究所做博士后，1996年2月~1997年6月在德国慕尼黑技术大学任客座教授，2009年2月~2009年7月在德国纽伦堡科技大学做访问教授，1997年9月回国后在复旦大学材料科学系任教至今。

现任中国科协全国金相与显微分析学科科学传播专家团队首席专家、中国机械工程学会失效分析专家、上海市安全生产核心专家、江苏省双创人才，中国机械工程学会理事，中国机械工程学会失效分析分会副理事长，中国印制电路协会全印制电子分会副会长，中国体视学学会金相与显微分析分会、中国表面工程协会电镀分会常务理事，中国硅酸盐学会玻璃钢分会、中国石油和石化工程研究会理事；兼任《电子电镀》杂志副主编，《玻璃钢/复合材料》、《理化检验/物理分册》、《印制电路信息》等杂志编委。

目前从事复合材料、失效分析和印制电子等领域的研究。曾获省部级科技进步奖11项；申请国家发明专利30余件，其中已授权24件；发表期刊论文240多篇，其中SCI/EI论文140余篇；撰写国际材料失效分析手册一章《Handbook of Materials Failure Analysis》（Elsevier）；编制批准国家行业标准一项（YB/T4610-2016《树脂陶瓷复合钢管》）；曾获上海市育才奖、中国印制电路协会优秀“园丁”奖、复旦大学优秀研究生导师奖、复旦大学优秀共产党员等；主持主讲的“材料失效分析”、“材料科学导论”两门课程都获评为上海市精品课程；在核电、火电、风电、石化、化工、冶金、汽车、微电子、印制电路、市政管网等10个行业承担完成重大失效分析课题100余项，连续五届应邀在每二年举行一次的“全国失效分析学术会议”上作大会报告。