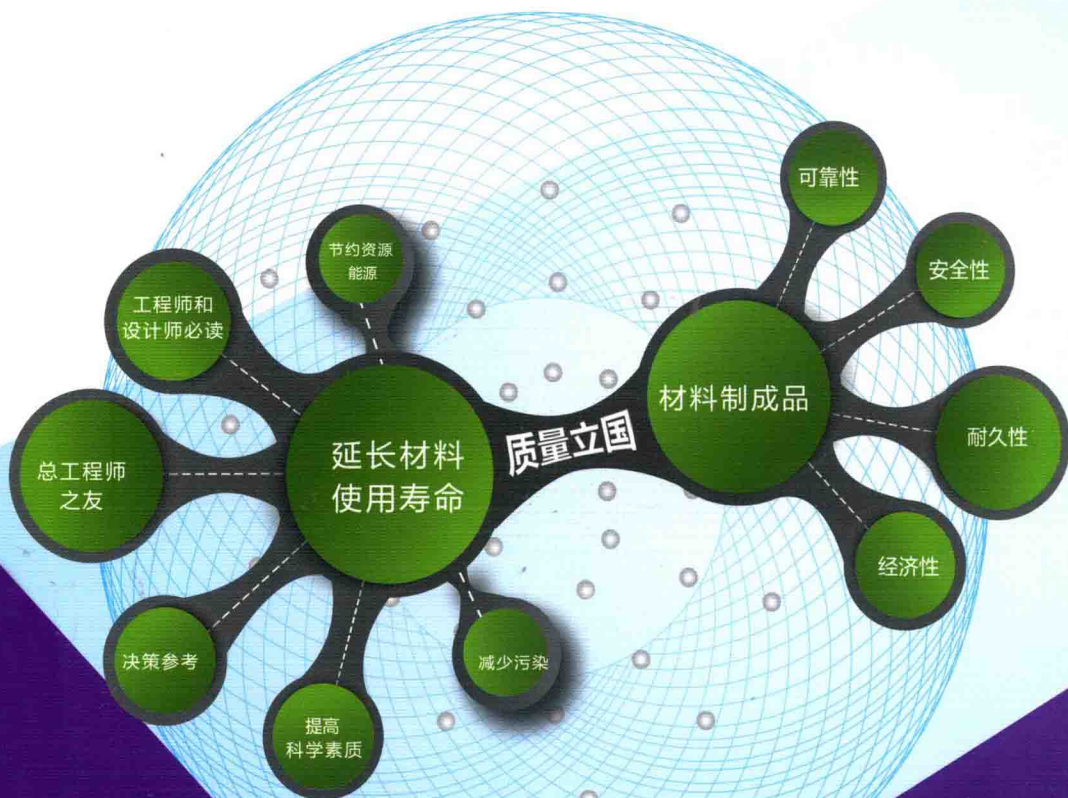




材料延寿与可持续发展

核电材料 老化与延寿

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写
许维钧 白新德 主 编



化学工业出版社



材料延寿与可持续发展

核电材料 老化与延寿

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写
许维钧 白新德 主 编



化学工业出版社

· 北 京 ·

《核电材料老化与延寿》是《材料延寿与可持续发展》丛书之一。全书从当前核电材料的实际应用及未来发展趋势出发,按照压水堆核电站(厂)主系统及主设备流程进行阐述,简明地介绍压水反应堆主系统及主要设备,阐述压水堆主设备、压水堆(PWR)二回路、三回路及其他重要设备的材料腐蚀与老化问题,介绍核电站中的非金属材料应用,分析从第一代到目前正在开发的第四代核电技术发展创新,以及压水堆核燃料元件及组件腐蚀-安全与创新问题,最后全面阐述核电厂老化管理问题。

本书适合核电领域工程设计人员、材料科学研究领域的科研开发人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

核电材料老化与延寿/许维钧,白新德主编. —北京:
化学工业出版社, 2014. 9
(材料延寿与可持续发展)

ISBN 978-7-122-21255-9

I. ①核… II. ①许… ②白… III. ①反应堆材料-
老化-研究②反应堆材料-防老化-研究 IV. ①TL34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 154804 号

责任编辑:段志兵 王清颖

责任校对:边 涛

文字编辑:刘视哲

装帧设计:王旭宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张16 彩插2 字数299千字 2015年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888 (传真:010-64519686)

售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:49.00 元

版权所有 违者必究

由于核燃料的放射性特征及可能带来的污染，核事故可能会对公众和环境造成极大的危害和影响，因而从世界上第一座核电站（厂）建造伊始，核电站（厂）的安全、可靠运行即受到核安全监管部门、设计单位、运营机构和研究单位等的高度重视。而运行工况的高温、高压（压水堆）、强辐照、动静态载荷、化学介质等因素共存的苛刻环境，不断提高的降低发电成本、减少核事故、防止核扩散等日益提高的设计要求，都使得优质材料的选用及研发成为核电站（厂）安全可靠运行的必要条件之一。

——摘自本书前言

《材料延寿与可持续发展》丛书旨在贯彻科学发展观,学习袁隆平先生将水稻高产的秘诀告诉农民获得大面积丰产丰收的精神,提出系统控制材料腐蚀、磨损和断裂的理论、原则、技术和措施。

希望各个行业的产品设计师,制造、使用和管理工程师据此有所启示、有所参考、有所作为、有所贡献,尽可能提高材料及其制品使用的可靠性、安全性、经济性和耐久性,延长使用寿命,支持国家“节约资源、能源”、“减少对环境”的污染”,支持“可持续发展”和“保卫地球”战略。

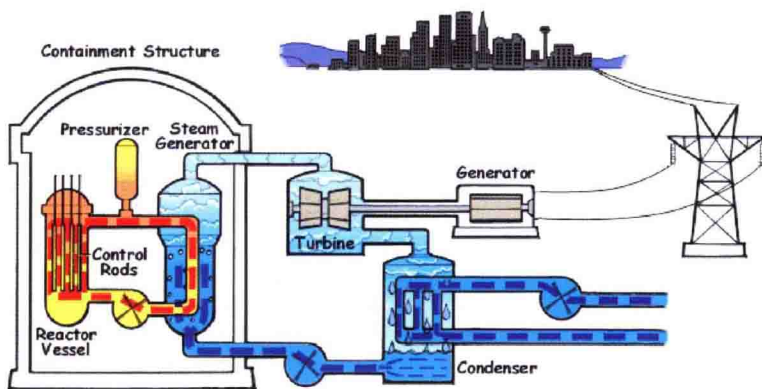


图4-1 压水堆核电站三个回路示意图（76页）

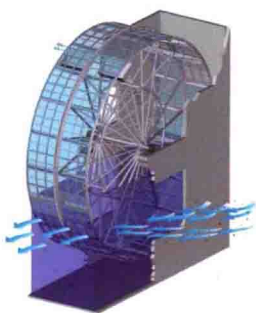


图4-18 国内某核电站旋转滤网腐蚀形貌（94页）



图4-23 某核电站凝汽器进出口管道腐蚀（97页）

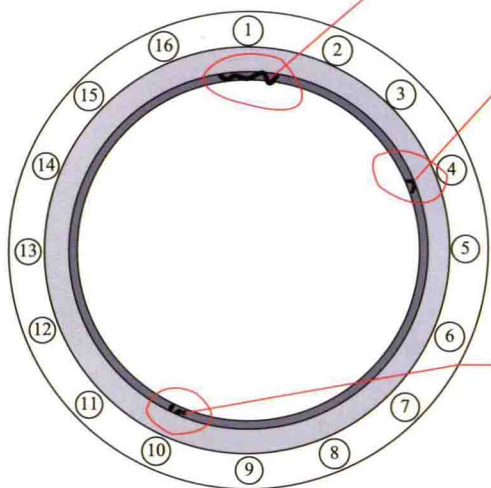


图4-22 某核电站核岛应急生水系统衬胶管道腐蚀穿孔（96页）

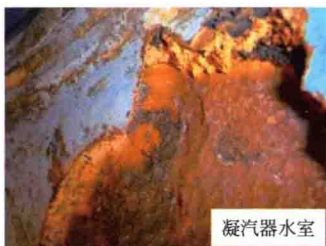


图4-24 海水系统腐蚀案例（97页）

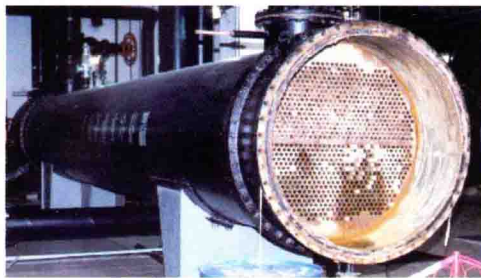


图4-25 核电厂工业水-水冷却器外观形貌（97页）

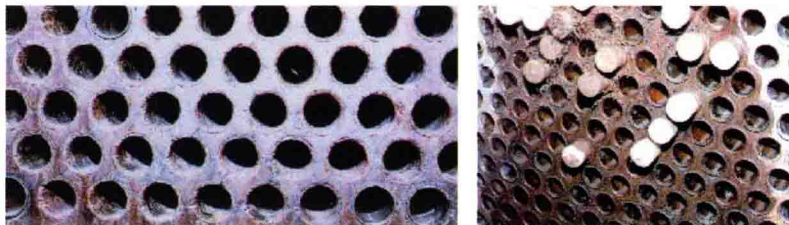


图4-26 冷却管进口端面冲刷缺损变形管板上杂物沉积（97页）

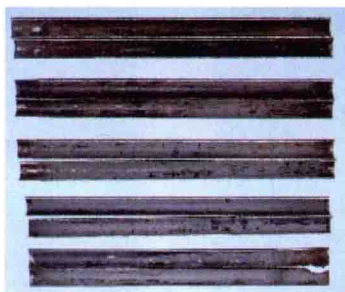


图4-27 管内泥砂沉积情况（97页）



图4-28 管内表面膜剥落情况（97页）



图4-30 SEC系统管道腐蚀形貌（98页）

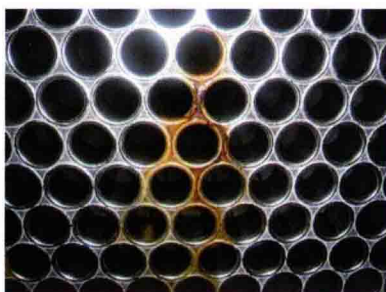


图4-32 凝汽器管板腐蚀（98页）



图4-36 凝汽器水室拉筋断裂（99页）



图4-37 凝汽器水室格栅管断裂（99页）



图4-39 埋地管线腐蚀形貌（100页）



图4-40 酸碱盐环境下的腐蚀形貌（100页）

《材料延寿与可持续发展》丛书顾问委员会

主任委员：师昌绪

副主任委员：严东生 王淀佐 干 勇 肖纪美

委员（按姓氏拼音排序）：

安桂华	白忠泉	才鸿年	才 让	陈光章	陈蕴博
戴圣龙	俸培宗	干 勇	高万振	葛昌纯	侯保荣
柯 伟	李晓红	李正邦	刘翔声	师昌绪	屠海令
王淀佐	王国栋	王亚军	吴荫顺	肖纪美	徐滨士
严东生	颜鸣皋	钟志华	周 廉		

《材料延寿与可持续发展》丛书总编辑委员会

名誉主任（名誉总主编）：

干 勇

主 任（总主编）：

李金桂 张启富

副 主 任（副总主编）：

许淳淳 高克玮 顾宝珊 张 炼 朱文德 李晓刚

编 委（按姓氏拼音排序）：

白新德	蔡健平	陈建敏	程瑞珍	窦照英	杜存山
杜 楠	干 勇	高克玮	高万振	高玉魁	葛红花
顾宝珊	韩恩厚	韩雅芳	何玉怀	胡少伟	胡业锋
纪晓春	李金桂	李晓刚	李兴无	林 翠	刘世参
卢凤贤	路民旭	吕龙云	马鸣图	沈卫平	孙 辉
陶春虎	王 钧	王一建	武兵书	熊金平	许淳淳
许立坤	许维钧	杨卯生	杨文忠	袁训华	张 津
张 炼	张启富	张晓云	赵 晴	周国庆	周师岳
周伟斌	朱文德				

办 公 室：袁训华 张雪华

《材料延寿与可持续发展》丛书指导单位

中国工程院

中国科学技术协会

《材料延寿与可持续发展》丛书合作单位

中国腐蚀与防护学会

中国钢研科技集团有限公司

中航工业北京航空材料研究院

化学工业出版社

《核电材料老化与延寿》编委会

主 任：许维钧 白新德

编 委（按姓氏拼音排序）：

白新德 陈宝山 沙仁礼 王 理 文 燕 徐雪莲

许维钧 赵万祥

主 审：陈鹤鸣 徐雪莲

I 总序言 I

在远古人类处于采猎时代，依赖自然，听天由命；公元前一万年开始，人类经历了漫长的石器时代，五千多年前进入青铜器时代，三千多年前进入铁器时代，出现了农业文明，他们砍伐森林、种植稻麦、驯养猪狗，改造自然，进入农牧经济时代。18世纪，发明蒸汽机车、轮船、汽车、飞机，先进的人类追求奢侈的生活、贪婪地挖掘地球、疯狂地掠夺资源、严重地污染环境，美其名曰人类征服自然，而实际是破坏自然，从地区性的伤害发展到全球性的灾难，人类发现在无休止、不理智、不文明地追求享受的同时在给自己挖掘坟墓。

人类终于惊醒了，1987年世界环境及发展委员会发表的《布特兰报告书》确定人类应该保护环境、善待自然，提出了“可持续发展战略”，表达了人类应该清醒地、理智地、文明地处理好人与自然关系的大问题，指出“既满足当代人的需求，又不对后代人满足其需求的能力构成危害的发展”，称之为可持续发展。其核心思想是“人类应协调人口、资源、环境与发展之间的相互关系，在不损害他人和后代利益的前提下追求发展”。

这实际上是涉及我们人类所赖以生存的地球如何既满足人类不断发展的需求，又不被破坏、不被毁灭这样的大问题；涉及人口的不断增长、生活水平的不断提高、资源的不断消耗、环境的不断恶化；涉及矿产资源的不断耗竭、不可再生能源资源的不断耗费、水力资源的污染、土地资源的破坏、空气质量的不断恶化等重大问题。

在“可持续发展”战略中，材料是关键，材料是人类赖以生存和发展的物质基础，是人类社会进步的标志和里程碑，是社会不断进步的先导、是可持续发展的支柱。如果不断发现新矿藏，不断研究出新材料，不断延长材料的使用寿命，不断实施材料的再制造、再循环、再利用，那么这根支柱是牢靠的、坚强的、是能够维护人类可持续发展的！

在我国，已经积累了许许多多预防和控制材料提前失效（其因素主要是腐蚀、摩擦磨损腐蚀、疲劳与腐蚀疲劳）的理论、原则、技术和措施，需要汇总和提供应用，《材料延寿与可持续发展》丛书以多个专题力求解决这一课题项目。有一部分专题阐述了材料失效原理和过程，另一部分涉及工程领域，结合我国已积累的材料失

效的案例和经验，更深入系统地阐述预防和控制材料提前失效的理论、原则、技术和措施。丛书总编辑委员会前后花费五年的时间，将分散在全国各个研究院所、工厂、院校的研究成果经过精心分析研究、汇聚成一套系列丛书，这是一项研究成果、是一套高级科普丛书、是一套继续教育实用教材。希望对我国各个工业部门的设计、制造、使用、维护、维修和管理人员有所启示、有所参考、有所贡献；希望对提高全民素质有所裨益、对国家各级公务员有所参考。

我国正处于高速发展阶段，制造业由大变强，材料的合理选择和使用，以达到装备的高精度、长寿命、低成本的目的，这一趋势应该受到广泛的关注。

中国科学院院士
中国工程院院士

师昌绪

I 总前言 I

材料是人类赖以生存和发展的物质基础，是人类社会进步的标志和里程碑，是社会不断进步的先导，是国家实现可持续发展的支柱。然而，地球上的矿藏是有限的，而且需要投入大量的能源，进行复杂的提炼、处理，产生大量污染，才能生产成为人类有用的材料，所以，材料是宝贵的，需要科学利用和认真保护。

半个多世纪特别是改革开放 30 多年来，我国材料的研究、开发、应用有了快速的发展，水泥、钢铁、有色金属、稀土材料、织物等许多材料的产量多年居世界第一。我国已经成为世界上材料的生产、销售和消费大国。“中国材料”伴随着“中国制造”的产品，遍布全球；伴随着“中国建造”的工程项目，遍布全国乃至世界上很多国家。材料支撑我国国民经济连续 30 多年 GDP 年均 10% 左右的高速发展，使我国成为全球第二大经济体。但是，我国还不是材料强国，还存在诸多问题需要改进。例如，在制造环境、运行环境和自然环境的作用下，出现过早腐蚀、老化、磨损、断裂（疲劳），材料及其制品在使用可靠性、安全性、经济性和耐久性（简称“四性”）方面都还有大量的工作要做。

“材料寿命”是指对材料及其制品在服役环境作用下出现腐蚀、老化、磨损和断裂而导致的过早失效进行预防与控制，以尽可能地提高其“四性”，也就是提高水平，提高质量，延长寿命。目标是节约资源、能源，减少对环境的污染，支持国家可持续发展。

材料及制品的“四性”实质上是材料及制品水平高低和质量好坏的最终表征和判断标准。追求“四性”，就是追求全寿命周期使用的高水平、高质量，追求“质量第一”，追求“质量立国”，追求“材料强国”、“制造强国”、“民富、国强、美丽国家”。

我国在“材料延寿与可持续发展”方面，做过大量的研究，取得了显著的成绩，积累了丰富的实践经验，凝练出了一系列在材料全寿命周期中提高“四性”的重要理论、原则、技术和措施，可以总结，服务于社会。

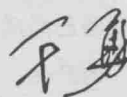
《材料延寿与可持续发展》丛书的目的就在于：总结过去，总结已有的系统控制材料提前损伤、破坏和失效的因素，即腐蚀、老化、磨损和断裂（主要是疲劳与腐蚀疲劳）的理论、原则、技术和措施，使各行业产品设计师，制造、使用和管理工程师有所启示、有所参考、有所作为、有所贡献，以尽可能地提高产品的“四性”，

延长使用寿命。丛书的目的还在于：面对未来、研究未来，推进材料的优质化、高性能化、高强度化、长寿命化，多品质、多规格化、标准化，传统材料的综合优化，材料的不断创新，并为国家长远发展，提出成套成熟可靠的理论、原则、政策和建议，推进国家“节约资源、节能减排”、“可持续发展”和“保卫地球”“科学、和谐”发展战略的实施，加速创建我国“材料强国”、“制造强国”。

在中国科协和中国工程院的领导与支持下，一批材料科学工作者不懈努力，不断地编写和出版系列图书。衷心希望通过我们的努力，既能对设计师，制造、使用和管理工程师“材料延寿与可持续发展”的创新有所帮助，又能为国家成功实施“可持续发展”、“材料强国”、“制造强国”的发展战略有所贡献。

中国工程院院士

中国工程院副院长



I 前言 I

核能发电较之火力（煤、天然气、石油）发电，在降低资源消耗、缓解交通运输压力、减少对环境的污染物排放方面具有显著的优势。与其他新能源比较，其单机组功率大、能级密度高，更加安全、清洁。几十年来，我国通过自主研发、自行设计，建造、安装多座压水堆核电站（厂）并长期安全运行，积累了宝贵的经验。目前正在建造多座第三代压水堆核电站（厂）。

由于核燃料的放射性特征及可能带来的污染，核事故可能会对公众和环境造成极大的危害和影响。因而从世界上第一座核电站（厂）建造伊始，核电站（厂）的安全、可靠运行即受到核安全监管部门、设计单位、运营机构和研究单位等的高度重视。而运行工况中高温、高压（压水堆）、强辐照、动静态载荷、化学介质等因素共存的苛刻环境，不断提高的降低发电成本、减少核事故、防止核扩散等设计要求，都使得优质材料的选用及研发成为核电站（厂）安全可靠运行的必要条件之一。尤其是在反应堆及一、二回路压力边界系统中，所有主设备和主管道均为核安全Ⅰ级部件，其结构材料的性能即直接关系到一、二回路压力边界的完整性。在材料服役中，随时间推移及辐照、介质与材料的相互作用，材料性能将逐渐劣化，即老化。材料老化及其导致的失效将影响部件、设备和系统的功能，从而影响核电站（厂）的安全、可靠运行，造成安全事故和严重经济损失及不可估量的社会影响等。

材料老化机理研究包括：对载荷、介质、温度、辐照及其耦合作用引发的材料脆化、腐蚀、质量减少及由此造成的材料脆断、开裂、腐蚀、放射性物质迁移等的研究，是核电站（厂）老化管理的重要组成部分。

上述问题及其他非设计基准事故将影响到核电站（厂）的正常、安全运行和延寿问题。延长安全运行时间可直接降低发电成本，从而获取更大的经济和社会效益。例如，使用非金属陶瓷材料二氧化铀代替抗腐蚀性能差的铀金属作为核燃料后，保证了压水堆长期安全运行。反应堆安全壳是防止放射性物质外泄到生态环境中去的重要设备，安全壳等使用的材料研究亦是重要的研究课题等。

1986年4月26日苏联的切尔诺贝利核电站发生七级严重核事故，因核电站的第4号核反应堆突然失控，引起爆炸，其辐射量相当于500颗原子弹。爆炸使

机组被完全损坏，8吨多强辐射物质泄漏，尘埃随风飘散，致使许多地区遭到核辐射的污染。2011年3月11日发生的日本福岛七级核事故造成堆芯融化、堆顶爆炸、放射物大量外泄，造成死亡及下落不明的人员近2万人，大面积地造成了日本的核污染，给日本国民经济及社会造成难以估量的危害；对周围海域及大气造成了深远影响。1979年3月28日美国三哩岛核反应堆发生冷却水和放射性颗粒外逸的严重事故，引起了公众对核电安全性的疑虑，一些国家的核电发展因此而停滞，或重新考虑核电发展计划。

由此可见，材料中的腐蚀与老化研究对保证核电站（厂）的安全运行与延寿及向可持续发展的社会提供清洁的能源十分重要。为此，我们组织编写了这本书，希望给核电专业科研、规划、设计、制造、建设、安装、运行、管理和教育领域的人员阅读和参考。

本书主要章节按照压水堆核电站（厂）主系统及主设备流程进行阐述。本书共分8章。第1章绪言（白新德、许维钧）；第2章压水堆主系统及主要设备（徐雪莲、沙仁礼）；第3章压水堆主设备的老化退化（徐雪莲、沙仁礼）；第4章压水堆二回路、三回路材料腐蚀及腐蚀案例（赵万祥、文燕、白新德）；第5章核电站中的非金属材料（沙仁礼、徐雪莲、赵万祥）；第6章核电技术创新发展（白新德、陈宝山、许维钧）；第7章压水堆核燃料元件腐蚀、安全与创新（白新德、陈宝山、许维钧）；第8章核电站（厂）的老化管理（王理）。主审：陈鹤鸣教授、徐雪莲教授级高级工程师。在这里还要说明的是，本书未包括如汽轮机等方面的材料老化、安全与延寿问题。

本书具体由中国腐蚀与防护学会能源工程委员会组织编写。编委会由中国原子能科学研究院、上海核工程研究设计院、清华大学、中核建中核燃料元件有限公司、中国核动力研究设计院、苏州热工研究院有限公司等单位的长期从事核反应堆设计、核材料研究、核电站现场事故处理及教学的研究员、教授、教授级高级工程师、高级工程师组成。

本书得到了中国腐蚀与防护学会、《材料延寿与可持续发展》丛书总主编李金桂研究员、张启富教授的关心、支持与指导，借此机会向他们表示衷心的感谢！

本书内容力图充实、广泛、易懂。由于我们水平有限，书中难免存在疏漏、缺点及不足之处，请读者和专家指正！

编著者