



中国腐蚀与防护学会
著作出版基金

材料延寿与可持续发展

现代陶瓷材料 选用与设计

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写
葛昌纯 沈卫平 编 著



化学工业出版社



中国腐蚀与防护学会
著作出版基金

材料延寿与可持续发展

现代陶瓷材料 选用与设计

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写
葛昌纯 沈卫平 编 著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书全面介绍了陶瓷材料的选用、设计和延寿问题,主要说明了陶瓷材料的类型、特性及用途,详细说明了功能陶瓷材料的选用与设计、陶瓷材料在各行业的应用特点与设计;同时结合资源的合理利用与环境保护,说明了陶瓷材料在其他材料应用中的作用和测试方法等。

本书适用于各专业应用陶瓷材料及无机非金属材料的科研开发人员、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代陶瓷材料选用与设计/葛昌纯,沈卫平编著. —北京:
化学工业出版社, 2017. 12
(材料延寿与可持续发展)
ISBN 978-7-122-30887-0

I. ①现… II. ①葛…②沈… III. ①陶瓷-工程材料-
设计 IV. ①TB321

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 263498 号

责任编辑:刘丽宏 段志兵 王清颢
责任校对:王素芹

文字编辑:孙凤英
装帧设计:王晓宇

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 装:三河市延风印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张11½ 字数212千字 2017年12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: 68.00 元

版权所有 违者必究

《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—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

中国航发北京航空材料研究院

化学工业出版社

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”。

这实际上是涉及到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；涉及到人口的不断增长、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、摩擦磨损磨蚀、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、维修和管理人员会有所启示、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三十多年来，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。

“材料延寿”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、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

材料是用于制造各种物品的天然或人造物质。根据基本组元和微观组织结构的不同,材料分为无机非金属材料、金属材料、高分子材料及由此三类材料组合而成的复合材料。无机非金属材料是除金属材料、高分子材料以外的所有均质材料的总称。陶瓷是最重要的无机非金属材料之一。

在公元前 6000~公元前 5000 年中国发明了原始陶器。中国商代(约公元前 17 世纪初~约公元前 11 世纪)有了原始瓷器,并出现了上釉陶器。

18 世纪工业革命以后,随着建筑、机械、钢铁、运输等工业的兴起,陶瓷材料有了较快的发展,出现了电瓷、化工陶瓷、金属陶瓷用陶瓷原料等。

20 世纪以来,随着核能、太阳能、风能、电子、计算机、通信、激光、红外、光电子学、高端装备制造、航海、航空、航天、生物医学和环境保护等新技术的兴起,对材料提出了更高的要求,促进了特种陶瓷材料的迅速发展。20 世纪 30~40 年代出现了高频绝缘陶瓷、铁电陶瓷、压电陶瓷、铁氧体(又称磁性瓷)和热敏电阻陶瓷等。20 世纪 50~60 年代开发了碳化硅和氮化硅等高温结构陶瓷、氧化铝透明陶瓷、 β -氧化铝快离子导体陶瓷、气敏和湿敏陶瓷等。

以陶瓷为代表的无机非金属材料有与金属材料和高分子材料不同的微观结构、不可替代的特性,尤其是其功能特性,对我国经济建设有金属材料和高分子材料不可替代的特殊贡献。我国提出了要大力发展新能源、节能环保、信息、通信、汽车、航空航天、卫星、轨道交通、装备制造、生物医学工程、农业等技术。上述技术的发展不仅需要了解包括陶瓷在内的无机非金属材料所独有的特性,也需要掌握其选用和设计知识,以延长材料结构和功能的服役寿命。

本书主要介绍陶瓷材料的选用、设计和延寿问题,主要涉及其力学性能、物理性能,同时结合资源的合理利用、环境保护,详细说明了陶瓷材料的分类、性能及功能陶瓷材料的选用与设计、各类型陶瓷在各行业的应用特性、在其他材料应用中的作用等。因本书定位于陶瓷材料选用与设计,所以

简化了制备工艺的内容。

现代陶瓷材料种类繁多，功能丰富，研发活跃，本书只能选择其中部分内容编写。希望本书对各行业应用陶瓷材料的科技工作者有所帮助。

由于水平有限，书中不当之处在所难免，敬请读者提出宝贵意见。

作者感谢丛书主编李金桂先生的信任，感谢化学工业出版社为本书出版所做的努力。

编著者

I 目录 I

第 1 章 概述

1.1 陶瓷材料的分类	001
1.2 陶瓷材料的性能与应用	002
1.3 陶瓷材料延寿思路	003
参考文献.....	007

第 2 章 陶瓷材料的类型与特点

2.1 日用陶瓷	008
2.1.1 强化日用瓷	009
2.1.2 耐热日用瓷	009
2.2 卫生陶瓷	009
2.3 功能型建筑陶瓷	010
2.3.1 自洁陶瓷	010
2.3.2 抗菌陶瓷	011
2.3.3 太阳能陶瓷	012
2.3.4 红外辐射陶瓷	012
2.3.5 防静电瓷砖	012
2.3.6 发光陶瓷	013
2.3.7 负离子瓷砖	013
2.3.8 调湿陶瓷	013
2.3.9 多孔功能性瓷砖	014
2.3.10 其他功能性瓷砖	014
2.4 工业陶瓷	015
2.4.1 化工陶瓷	015
2.4.2 机械设备用陶瓷	016
2.4.3 可加工陶瓷	017
2.4.4 可再生陶瓷	019

2.4.5 多孔陶瓷	020
2.5 高韧性陶瓷	022
2.6 超塑性陶瓷	022
2.7 高温结构陶瓷和超高温陶瓷	024
2.7.1 氧化物陶瓷	024
2.7.2 氮化物陶瓷	029
2.7.3 碳化物陶瓷	036
2.7.4 硼化物陶瓷	042
2.7.5 硅化物陶瓷	045
2.7.6 复相陶瓷	046
2.7.7 碳氮化物陶瓷	048
2.7.8 三元层状化合物陶瓷	049
2.8 耐火材料	051
2.8.1 硅酸铝质	051
2.8.2 氧化硅质	055
2.8.3 氧化镁质	056
2.8.4 尖晶石	057
2.8.5 氧化锆质	058
2.8.6 其他耐火材料	058
参考文献	060

第3章 功能性陶瓷材料的选用与设计

3.1 声功能陶瓷材料	064
3.2 热功能陶瓷材料	065
3.2.1 绝热陶瓷材料	065
3.2.2 红外陶瓷	071
3.2.3 热功能陶瓷	074
3.3 电功能陶瓷材料	082
3.3.1 电绝缘陶瓷	082
3.3.2 介电陶瓷	082
3.3.3 铁电和压电陶瓷	087

3.3.4 导电陶瓷	094
3.3.5 半导体陶瓷及半导体陶瓷敏感材料	095
3.3.6 超导陶瓷	096
3.3.7 热电陶瓷	096
3.4 光功能陶瓷材料	099
3.4.1 透明陶瓷	099
3.4.2 激光陶瓷	103
3.4.3 闪烁陶瓷	104
3.4.4 上转换发光陶瓷	105
3.4.5 远红外辐射陶瓷	105
3.5 核功能陶瓷材料	106
3.5.1 核反应堆陶瓷	106
3.5.2 核燃料陶瓷	107
3.6 生物医用陶瓷材料	108
3.6.1 自洁功能陶瓷	108
3.6.2 纳米仿生骨	109
3.6.3 牙科陶瓷材料	110
参考文献	110

第4章 陶瓷材料在各行业的应用

4.1 能源领域	113
4.2 环保领域	116
4.3 建筑领域	118
4.4 信息领域	118
4.5 生物医用领域	120
4.5.1 生物陶瓷的应用	120
4.5.2 牙科可切削陶瓷材料	120
4.5.3 陶瓷材料在人工关节置换术中的应用	123
4.5.4 生物活性陶瓷复合材料	126
4.6 新能源汽车领域	128
4.6.1 特种陶瓷材料在汽车上的应用	129

4.6.2 多孔陶瓷在汽车尾气处理中的应用	130
4.7 高端装备制造领域	131
4.8 海洋领域	131
参考文献	132

第5章 智能(机敏)陶瓷材料的选用

5.1 机敏陶瓷材料	134
5.1.1 压敏电阻陶瓷材料	134
5.1.2 形状记忆陶瓷	138
5.2 智能陶瓷材料	139
参考文献	140

第6章 陶瓷材料基本性能的测定方法

6.1 强度的测定	141
6.2 弹性模量的测定	143
6.3 硬度的测定	144
6.4 断裂韧性的测定	144
6.5 疲劳断裂的测定	146
6.6 抗热震性(抗热冲击性)的测定	147
6.7 无损检测	147
参考文献	148

第7章 陶瓷材料的延寿理论

7.1 陶瓷材料的增韧机理	151
7.1.1 模量转移	152
7.1.2 预应力	152
7.1.3 裂纹偏折和阻碍	152
7.1.4 裂纹桥连	152
7.1.5 拔出	152
7.1.6 裂纹屏蔽	153
7.1.7 能量耗散	153
7.2 陶瓷材料的延寿设计	153
7.2.1 强韧化设计	154

7.2.2 抗热震（热冲击）性设计	155
7.2.3 大尺度结构的优化设计	158
7.2.4 抗高速侵彻的优化设计	159
7.3 陶瓷材料的寿命预测	159
7.3.1 亚临界裂纹扩展的寿命预测	159
7.3.2 疲劳断裂的寿命预测	160
7.3.3 蠕变的寿命预测	162
7.3.4 热冲击或热震的寿命预测	164
7.3.5 高速侵彻的寿命预测	167
参考文献	167

第1章 概 述

1.1 陶瓷材料的分类

陶瓷按发展历史可分为传统陶瓷和现代陶瓷。传统陶瓷用黏土质、长石质、滑石质、锂辉石质和骨灰质等天然原料制成，按原料和烧制温度又分为陶和瓷。现代陶瓷又称为精细陶瓷、特种陶瓷或高性能陶瓷。精细陶瓷与传统陶瓷的区别是一般以氧化物、氮化物、硅化物、硼化物、碳化物等为主要原料，后续的制造工艺实施严格控制，可以制造得到实际中需要的具有不同性能要求的陶瓷材料。

陶瓷按化学成分可分为硅酸盐陶瓷、氮化物陶瓷、碳化物陶瓷、硼化物陶瓷、硅化物陶瓷等。

陶瓷按特性可分为结构陶瓷和功能陶瓷。结构陶瓷主要具有优越的强度、硬度、绝缘性、耐高温、耐氧化、耐腐蚀、耐磨耗、高温强度及生物相容性等结构特性，这些结构特性的实现取决于化学键。功能陶瓷主要具有优越的热、声、电、磁、光、核等功能特性，这些功能特性的实现往往取决于其内部的电子运动状态或原子核结构，又称电子陶瓷。

陶瓷按用途可分为日用陶瓷、艺术陶瓷、工业陶瓷、生物医用陶瓷等。工业陶瓷又可分为建筑-卫生陶瓷、化工陶瓷、电瓷、特种陶瓷、可加工陶瓷、超高温陶瓷等。耐火材料是一种专用于高温环境，为抗热冲击多采用颗粒级配结构的陶瓷材料。

陶瓷材料的分类见表 1-1。

表 1-1 陶瓷材料的分类

结构陶瓷	传统陶瓷	日用陶瓷
		艺术陶瓷
		卫生陶瓷
		建筑陶瓷
		工业陶瓷
		砂轮、磨料
	精细陶瓷	高温结构陶瓷
		超高温陶瓷