



材料延寿与可持续发展

现代橡胶 选用设计

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写
熊金平 编 著



化学工业出版社



材料延寿与可持续发展

现代橡胶 选用设计

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写
熊金平 编 著



化学工业出版社

· 北京 ·

《现代橡胶选用设计》是《材料延寿与可持续发展》丛书之一，全书系统地阐述了天然橡胶、通用合成橡胶和特种合成橡胶的性能和选用方法，其中对各种橡胶在工程设计和深加工过程中的问题进行了深入阐释，提出了中肯的建议；对废旧橡胶的回收和处理进行了论述。

本书可供各类过程装备、专业设备设计人员，橡胶行业产品开发技术人员阅读参考，也可供机械设计及材料专业高校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代橡胶选用设计/熊金平编著. —北京：化学工业出版社，2014. 7

(材料延寿与可持续发展)

ISBN 978-7-122-20718-0

I. ①现… II. ①熊… III. ①橡胶制品-设计
IV. ①TQ336

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 100327 号

责任编辑：段志兵

文字编辑：林 媛

责任校对：宋 玮

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 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 字数 295 千字 2014 年 8 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：46.00 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
中航工业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，将分散在全国各个科研院所、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练 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、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

橡胶是重要的工业材料，也是国家重要的战略物资之一。除了独特的高弹性外，橡胶还具有众多优异性能，例如耐疲劳性能优异，耐磨耗性能突出，耐油和耐溶剂性能极佳，耐高低温性能兼具，耐气体透过性能好，以及拥有特色鲜明的电绝缘性能等。因此橡胶被广泛用于制造轮胎、减震与密封制品、防腐蚀材料和电绝缘材料等。高达数万种的橡胶材料与制品被广泛用于国民经济各个领域，与国民经济的发展与人民生活息息相关。

实际环境中所使用的橡胶材料的寿命取决于橡胶材料本身及其所处的环境条件，这涉及橡胶材料的品种与材料的选用、制品与成品的设计、环境与条件的适应性等。为此，本书从橡胶材料的基本组成、物理化学特性等方面着手，力图为读者提供现代橡胶材料与制品的选用、设计等方面的指导。

本书是一本从材料寿命角度来论述现代橡胶材料的选用与设计的参考书籍，从天然橡胶材料着手，在论述合成通用橡胶材料的基础上，主要阐述了当代特种橡胶材料的种类、性能、选用与设计准则以及研究进展情况。本书的最后用了一章的篇幅来讲述废旧橡胶材料的回收与利用。

在本书的编写过程中，北京化工大学材料科学与工程专业 2010 级硕士研究生刘郅媛做了大量的资料收集与整理工作，北京航空材料研究院的陶正涛研究员审阅了全书，在此对他们表示深深的谢意。

本书旨在为合理选用、优化设计、正确使用橡胶材料提供很好的参考与借鉴作用。但是，由于编者水平所限，书中难免会有不妥和疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

熊金平

2014. 3.

I 目录 I

第1章 绪论

- 1.1 橡胶的种类 /001
 - 1.1.1 橡胶的基本特征 /001
 - 1.1.2 橡胶的分类 /002
 - 1.1.3 橡胶的命名 /004
- 1.2 橡胶材料的应用 /005
 - 1.2.1 橡胶在国民经济发展中的地位 /005
 - 1.2.2 现代橡胶材料的选用与设计 /007
- 1.3 橡胶材料及其制品的发展趋势 /009
 - 1.3.1 汽车橡胶制品 /009
 - 1.3.2 轮胎制品 /010
- 参考文献 /012

第2章 天然橡胶的选用与设计

- 2.1 天然橡胶的结构与性能 /014
 - 2.1.1 天然橡胶的分类 /014
 - 2.1.2 一般天然橡胶的结构 /015
 - 2.1.3 天然橡胶的性能 /015
- 2.2 天然橡胶的选用 /019
 - 2.2.1 通用天然橡胶 /019
 - 2.2.2 特制天然橡胶 /023
 - 2.2.3 改性天然橡胶 /028
- 参考文献 /033

第3章 合成通用橡胶的选用与设计

- 3.1 丁苯橡胶 /034
 - 3.1.1 结构与性能 /034
 - 3.1.2 应用领域 /043
 - 3.1.3 设计与加工要点 /045
- 参考文献 /050
- 3.2 聚丁二烯橡胶 /051
 - 3.2.1 结构与性能 /051

3.2.2 应用领域 /056

3.2.3 设计与加工要点 /058

参考文献 /064

3.3 聚异戊二烯橡胶 /064

3.3.1 结构与性能 /064

3.3.2 应用领域 /072

3.3.3 设计与加工要点 /073

参考文献 /080

3.4 氯丁橡胶 /080

3.4.1 结构与性能 /081

3.4.2 应用领域 /087

3.4.3 设计与加工要点 /088

参考文献 /095

3.5 丁腈橡胶 /096

3.5.1 结构与性能 /096

3.5.2 应用领域 /103

3.5.3 设计与加工要点 /105

参考文献 /111

3.6 丁基橡胶 /111

3.6.1 结构与性能 /111

3.6.2 应用领域 /116

3.6.3 设计与加工要点 /120

参考文献 /125

第4章 常见特种橡胶的选用与设计

4.1 乙丙橡胶 /126

4.1.1 结构与性能 /126

4.1.2 应用领域 /133

4.1.3 设计与加工要点 /134

参考文献 /139

4.2 硅橡胶 /140

4.2.1 结构与性能 /140

4.2.2 应用领域 /144

4.2.3 设计与加工要点 /145

参考文献 /151

4.3 氟橡胶 /151

4.3.1 结构与性能 /152

- 4.3.2 应用领域 /156
- 4.3.3 设计与加工要点 /160
- 参考文献 /165
- 4.4 聚丙烯酸酯橡胶 /166
 - 4.4.1 结构与性能 /166
 - 4.4.2 应用领域 /168
 - 4.4.3 设计与加工要点 /169
 - 参考文献 /175
- 4.5 聚硫橡胶 /176
 - 4.5.1 结构与性能 /176
 - 4.5.2 应用领域 /185
 - 4.5.3 设计与加工要点 /188
 - 参考文献 /191
- 4.6 聚氨酯橡胶 /191
 - 4.6.1 结构与性能 /191
 - 4.6.2 应用领域 /198
 - 4.6.3 设计与加工要点 /203
 - 参考文献 /204

第5章 新型特种橡胶材料及其进展

- 5.1 合成新型特种橡胶 /205
 - 5.1.1 氯化丁腈橡胶 /205
 - 5.1.2 新型氯化丁基橡胶 /206
 - 5.1.3 新型异丁烯类弹性体 /207
- 5.2 特异新型特种橡胶 /208
 - 5.2.1 新型氟橡胶 /208
 - 5.2.2 新型硅橡胶 /211
 - 5.2.3 新型三元乙丙橡胶 /211
 - 5.2.4 新型丙烯酸酯橡胶 /214
 - 5.2.5 新型聚硫橡胶 /215
 - 5.2.6 氯醚橡胶 /215
 - 5.2.7 乙烯-醋酸乙烯橡胶(EVM) /215
 - 5.2.8 聚硫氨酯橡胶 /216
- 5.3 其他新型特种橡胶 /217
 - 5.3.1 集成橡胶 /217
 - 5.3.2 黏弹性超级橡胶 /218
 - 参考文献 /218

第 6 章 废旧橡胶的回收和利用

- 6.1 废旧橡胶的种类 /219
 - 6.1.1 废旧橡胶的来源 /219
 - 6.1.2 废旧橡胶的分类 /220
- 6.2 废旧橡胶的回收与利用 /221
 - 6.2.1 国内外废旧橡胶综合利用现状 /221
 - 6.2.2 回收利用途径 /222
- 6.3 废旧橡胶回收利用技术 /223
 - 6.3.1 胶粉的生产 /223
 - 6.3.2 再生胶的生产 /227
 - 6.3.3 废旧橡胶的热裂解 /230
- 参考文献 /235

索引 /236

第1章

绪论

橡胶是一种具有高度伸缩性、高弹性的共聚物，合成橡胶与塑料、合成纤维一起并称为三大合成材料。橡胶可以用来制造轮胎、管带、胶鞋等各种橡胶制品，也可广泛用于电线电缆、纤维与纸加工、石棉以及塑料改性等方面，是橡胶工业的重要原料。

1.1 橡胶的种类^[1]

1.1.1 橡胶的基本特征

(1) 低弹性模量

橡胶的弹性模量非常小，仅为 $2\sim 4\text{MPa}$ ，这是橡胶最大的特征。其弹性模量约为钢铁的 $1/30000$ ，而伸长率则是钢铁的 300 倍；其伸长率同塑料相当，但弹性模量只为塑料的 $1/30$ 。橡胶的拉伸强度为 $5\sim 40\text{MPa}$ ，破坏时伸长率可达 $100\%\sim 800\%$ 。其永久变形在 15% 以内，并能在 $-50\sim 130^{\circ}\text{C}$ 范围内保持弹性。

(2) 耐透气性、耐溶剂性以及电绝缘性

橡胶具有相当好的耐透气性以及耐各种化学介质和电绝缘的性能。某些特种合成橡胶具备优良的耐油性及耐温性，可以抵抗脂肪油、润滑油、液压油以及溶剂油的溶胀；耐寒性可达 $-60\sim -80^{\circ}\text{C}$ ，耐热可达 $180\sim 350^{\circ}\text{C}$ 。

此外，橡胶还耐各种屈挠弯曲变形，且滞后损失小。

(3) 与其他材料并用、共混

橡胶能与多种材料并用、共混、复合，由此进行改性以便得到良好的综合性能。橡胶用炭黑等填料进行补强时，可使其耐磨性提高 $5\sim 10$ 倍，可提高非结晶性合成橡胶的机械强度 $10\sim 50$ 倍。

不同橡胶之间的并用，以及橡胶与塑料的共混，可进一步提高和改进橡胶的性能。橡胶还可与纤维、金属材料进行复合最大限度地发挥橡胶的特性，制成各种复合材料和制品。

橡胶的这些特性，使它成为工业上极好的减震、密封、屈挠、耐磨、防腐、绝缘以及粘接等材料。

1.1.2 橡胶的分类

世界上橡胶的种类已经有超过 100 种之多。如果按照牌号估计,已经超过了 1000 种。由不同的依据,橡胶可分为不同的类型,具体如下。

(1) 按制取和来源分类

按制取和来源分类,可分为天然橡胶和合成橡胶两大类。其中天然橡胶的消耗量占到 1/3,合成橡胶的消耗量占到 2/3。

(2) 按橡胶外观的表征分类

根据橡胶外观的表征,可分为固体橡胶(或称干胶)、乳状橡胶(简称胶乳)、液体橡胶和粉末橡胶。其中固体橡胶的产量占 70%~80%。

(3) 按化学结构分类

根据橡胶分子链上有无双键,可分为不饱和橡胶和饱和橡胶。不饱和型就有二烯类和非二烯类的硫化型橡胶,饱和橡胶有非硫化型和其他弹性体。饱和橡胶又可分为主链含有亚甲基的橡胶(乙丙橡胶、氯化聚乙烯橡胶、氯磺化聚乙烯橡胶、丙烯酸酯橡胶以及氟橡胶)、主链含硫的橡胶(聚硫橡胶)、主链含氧的橡胶(氯醚橡胶)、主链含硅的橡胶(硅橡胶)以及主链含碳、氧、氮的橡胶(聚氨酯橡胶)等。

不饱和橡胶主要包括天然橡胶、丁苯橡胶、丁二烯橡胶、异戊二烯橡胶、氯丁橡胶、丁腈橡胶、丁基橡胶等合成橡胶。除天然橡胶外,其余橡胶均可与亚甲基型橡胶进行化学改性,如羧基化、氯化、氯磺化等。

大多数不饱和橡胶经氢化处理可变为饱和型橡胶。

(4) 按应用范围及用途分类

除天然橡胶外,合成橡胶可分为通用橡胶和特种橡胶。通用橡胶指主要用于产生轮胎等大宗产品的原料橡胶,特种橡胶是指主要用于生产特种性能橡胶制品的原料橡胶。

天然橡胶为最典型的通用橡胶,也有经过改性后的特种橡胶;通用合成橡胶有部分天然橡胶的通用性,也有专门橡胶的性能。

(5) 按聚合用主要单体性质分类

合成橡胶可根据聚合用主要单体性质分为两类。

① 烃类橡胶。烃类橡胶包括二烯烃橡胶和烯烃橡胶。二烯烃橡胶包括丁二烯橡胶、异戊二烯橡胶、丁苯橡胶、丁腈橡胶、氯丁橡胶等;烯烃类橡胶包括乙丙橡胶、丁基橡胶、氯化聚乙烯橡胶等。

② 含有杂原子或官能团的橡胶。包括硅橡胶、氟橡胶、聚氨酯橡胶、聚硫橡胶、聚醚橡胶、丙烯酸酯橡胶、羧基橡胶等。

(6) 按照橡胶填充材料的种类分类

根据橡胶中填充材料的不同,通用橡胶可以分为充油橡胶、充碳橡胶以及充油充碳橡胶。充油量以 12.5 份为基数,可分为 25 份、37.5 份和 50 份。

(7) 按聚合条件分类

根据聚合条件的不同,聚合反应可分为本体聚合、悬浮聚合、乳液聚合以及溶液聚合四种。乳液聚合又分为冷聚和热聚,溶液聚合则分为阴离子聚合(大多数为定向聚合,可合成有规立构橡胶)和阳离子聚合。

微观上来看,有规立构橡胶分为顺式-1,4-橡胶和反式-1,4-橡胶。顺式-1,4-橡胶又可以分为高、中、低顺式橡胶。

乳液聚合一般得到的是无规则橡胶,主要代表为丁苯橡胶和氯丁橡胶,微观上表现为顺式-1,4 位、反式-1,4 位、反式-1,2 位、反式-3,4 位结合的混合型。

(8) 按橡胶功能分类

根据橡胶自补性的不同,可分为自补性强、自补性弱两类橡胶。自补性强的橡胶又称为结晶性橡胶(如天然橡胶、氯丁橡胶),自补性弱的橡胶则可分为微结晶性橡胶(如丁基橡胶)和非结晶性橡胶(如丁苯橡胶)。

根据橡胶分子中是否含有极性基团,则可分为极性橡胶(耐油橡胶)和非极性橡胶(不耐油橡胶)。

(9) 按橡胶的工艺加工特点分类

根据门尼黏度高低的不同,橡胶可分为标准门尼黏度(40~50)、低门尼黏度(30~40)、高门尼黏度(70~80)和特高门尼黏度(80~90)以及超高门尼黏度(100 以上)橡胶。

门尼黏度越高,混合加工的难度越大,物理性能则提高。低门尼黏度的橡胶一般用于海绵以及其他橡胶的并用改性,高门尼黏度橡胶主要用来制造胶黏剂,还可以进行高填充以便降低成本。

根据稳定剂的种类,合成橡胶还可以分为非污染型(NST)、污染型(ST)以及无污染型(无稳定剂)(NIL)。

(10) 按共混并用材料分类

橡胶的共混型主要有高苯乙烯(HS)、聚氯乙烯(PVC)、聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)以及乙烯醋酸乙烯(EVA)等。根据共混比例的不同,可分为热硫化性弹性体和热塑性弹性体。其中热塑性弹性体可以采用塑料成型机械加工而不需要硫化,能够取代传统橡胶制造温度要求不高的橡胶制品。

(11) 根据交联性质分类

由橡胶最终交联的性质不同,可以分为硫黄硫化、无硫(有机硫化物)硫化、过氧化物交联、金属氧化物交联以及树脂交联等。硫化和交联形式对橡胶的耐热、耐压缩变形、耐老化等性能有较大的影响。