



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

汽车材料和典型零件 失效分析与延寿

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写
马鸣图 等编著



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

汽车材料和典型零件 失效分析与延寿

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写
马鸣图 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书全面介绍了汽车材料和零部件的失效分析技术和预防措施。重点介绍了汽车典型零件和系统的腐蚀失效特点和预防措施,包括汽车腐蚀磨损形式以及预防措施,汽车金属材料的腐蚀失效形式与预防,汽车镀层板腐蚀特点以及腐蚀措施,汽车排气系统的热端和冷端失效的评价方法和防腐性能提升的措施等。书中许多案例是作者实际经验的总结和提升,将会给读者解决汽车零部件失效问题提供全新的思路和有益的借鉴。

本书可供从事汽车材料应用的科研、技术开发和零件制造的技术人员、管理人员阅读,也可供工科大学相关师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

汽车材料和典型零件失效分析与延寿/马鸣图等著. —北京: 化学工业出版社, 2016. 11
(材料延寿与可持续发展)
ISBN 978-7-122-28135-7

I. ①汽… II. ①马… III. ①汽车-工程材料-失效分析②汽车-零部件-失效分析 IV. ①U465②U463

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 229816 号

责任编辑: 刘丽宏 段志兵 王清颖
责任校对: 宋玮

文字编辑: 颜克俭
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 25¼ 字数 460 千字 2017 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: 88.00 元

版权所有 违者必究

《材料延寿与可持续发展》 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(按姓名拼音排序)：

安桂华 白忠泉 才 让 陈光章 戴圣龙 干 勇
高万振 葛昌纯 俸培宗 侯保荣 柯 伟 李晓红
刘翔声 师昌绪 王淀佐 王亚军 吴荫顺 徐滨士
肖纪美 严东生 颜鸣皋

《材料延寿与可持续发展》 总编辑委员会

名誉总主编：干 勇

总 主 编：李金桂 张启富

副 总 主 编：许淳淳 高克玮 顾宝珊 张 炼 朱文德 李晓刚

编 委(按姓名拼音排序)：

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

总序言

在远古人类处于采猎时代，依赖自然，听天由命；公元前一万年多以来，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的重大问题。

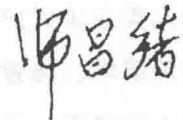
在“可持续发展”战略中，材料是关键，材料是人类赖以生存和发展的物质基础，是人类社会进步的标志和里程碑，是社会不断进步的先导，是可持续发展的支柱。如果不断发现新矿藏、不断研究出新材料、不断延长材料的使用寿命、不断实施材料的再制造、再循环、再利用，那么这根支柱是牢靠的、坚强的，是能够维护人类可持续发展的！

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问题项目。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、低成本应该受到广泛的关注。

中国科学院院士
中国工程院院士



丨 总前言 丨

我国改革开放三十多年来，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，支撑着“中国制造”的产品遍布世界、“中国建造”的重大工程建设项目遍布全国，促进了国家GDP连续高速发展，中国已经成为世界上第二经济大国。但是，我国还不是材料强国，我国的材料多处于中、低档水平，支撑起来的“中国制造”的产品水平不高、价格太低、无缘名牌；“中国建造”的重大工程中的主要结构件、专用件、关键件和重要件许多还依赖进口；我国在材料的选用、材料制成品的设计、加工、制造和材料保护等方面与先进国家相比还存在较大差距，导致材料制成品在制造环境、运行环境和自然环境的侵蚀下，容易出现腐蚀、摩擦磨损磨蚀、断裂（疲劳），引发“中国制造”的产品和“中国建造”的重大工程项目出现种种问题。

材料寿命是人类所用材料的核心。材料性能优良，质量稳定，使用安全、可靠、经济，是材料寿命的前提；没有使用安全、可靠、经济，就谈不上使用寿命。材料寿命的延长表达了上述性能的全面提升；材料延寿，就是提高材料制成品使用的可靠性、安全性、经济性和耐久性，就是延长材料制成品的使用寿命，就是节约了资源、能源、实施了低碳经济、减少了环境污染、支持了人类可持续发展。

我国建国以来材料研究取得了显著的成绩，在满足经济建设需求的同时，一大批材料研究、材料应用研究、材料加工研究和材料保护研究相继发展壮大起来，并为材料及其制成品的使用可靠性、安全性、经济性和耐久性做了大量的工作，积累了丰富的理论和实践经验，在材料全生命周期中凝炼出一些重要的原则、技术和措施。

“材料延寿与可持续发展”有两方面的工作：一是总结过去。总结系统控制材料提前损伤、提前破坏和提前失效的因素的理论、原则、技术和措施，

使各个行业的产品设计师，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；尽可能地延长材料的使用寿命，提高材料制成品的可靠性、安全性、经济性和耐久性。这项工作实质上是针对过去与现在，总结现有成果，及早服务于国家建设。

二是研究未来。面对未来，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、新材料的不断创新，由此促进我国从“材料生产、销售、消费大国”转变为“材料强国”。为此，我们组织了“材料延寿与可持续发展”的战略研究，在开展大量的调查研究基础上，从国家长远发展的眼光提出一整套的理论、原则、政策和建议，促使我国早日成为“材料强国”，支持国家“节约资源、节能减排”、“可持续发展”和“保卫地球”战略。

目前，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在努力地开展工作，提出研究报告，编写并出版发行《材料延寿与可持续发展》系列图书，供相关方面领导和工作人员参考。

希望通过我们的努力，既能为设计师、制造、使用和管理工程师提高其产品对环境抗力的理论、原则、技术和措施；又为国家成为“材料强国”，提出种种设想、原则、措施和政策建议。

由于我们水平有限，不当之处，敬请批评指正。

中国工程院 院士

中国工程院 副院长



| 前言 |

自 2000 年以来，中国汽车工业发展进入“快车道”，每年汽车产量几乎全以百分比两位数的速度增长，并于 2003 年达到 1364 万辆，超过美国，居世界首位。此后，多年来中国的汽车产销量一直居世界第一。2013 年产量达到 2211 万辆，汽车保有量超过 1.2 亿辆，汽车工业的主营收入超过 6.3 万亿元人民币，利税已接近 8.5 万亿元人民币。汽车工业已成为中国的支柱产业，汽车与人们日常生活密切相关，而汽车产业对相关产业的带动作用以及由此产生的汽车文化：汽车展览、汽车赛事、汽车旅游、汽车的现代科技等，也是没有任何一个产业可与之相比；对影响如此之大的一个产业，其用材和组成零部件的失效分析、预防和延寿自然是人们关注的重大课题。任何一个零件的失效原因的准确分析，特别是对一些关键零部件的分析，并提出延寿的措施，对于体量如此之大的汽车产业，不是一个单纯的技术问题，而是将会对整个产业的发展产生深刻的影响，进而产生巨大的经济效益，并给一个新车型的发展带来巨大的商机。这正是本书选择这一主题的重要原因所在。

早期系统的失效分析工作始于第二次世界大战后人们对自由轮的断裂分析，由此产生了材料低温韧性的评价参量，同时也使人们认识到失效分析不仅仅是寻找一个技术问题的解决方式，同时还涉及相关技术产业的发展和影响产业发展的新的科学问题的产生；随后美国金属学会组织编写了《金属手册——断口金相与断口图谱》，该手册的第 10 卷为失效分析预防，从而使失效分析成为一门新兴科学。20 世纪 60 年代以后，这门新兴学科迅速发展，对汽车零件的失效分析和材料的改进展示出了重要的意义。美国的这本手册已经出版到第 9 版，足见这一系统的巨著对技术发展所起的作用和意义。我国曾于 20 世纪 80 年代中期，由中国机械工程学会材料学会组织编写了《机械产品失效分析丛书》，该套丛书反映和总结了我国当时的失效分析技术水平、主要成果和经验，丛书的出版曾对我国失效分析预防工作发挥了重大作用，为产品质量的提升做出了贡献。

《汽车材料和典型零件失效分析与延寿》全面论述了汽车材料和零部件的失效分析技术和预防措施，全书共分七章。

第 1 章概述了汽车工业发展的趋势、汽车用材（包括高强度钢、先进高强度钢、铝合金、镁合金、复合材料等结构材料）的新近发展和应用以及孕育中的第三次产业革命对汽车发展趋势的影响（即电动化、智能化和轻量化），综述了汽车在服役过程中的材料和构件的失效模式和预防失效、延寿的重要意义。

腐蚀给国民经济尤其是汽车工业带来的巨大损失，第 2 章基于本书编著者承担的中国工程院、国家科技部资助的社会公益项目以及重庆市的国际合作项

目所进行的大量的观测，收集了大量相关数据和试验结果，展示了车辆材料在潮湿和酸雨的典型环境下的腐蚀研究成果，并提出了在这类环境中提升材料和构件腐蚀抗力的措施。

第3章论述了镀层板的种类、特点、性能、未来的发展趋势，以及对汽车防腐抗力提升的作用，并通过大量的应用研究结果，提出了应用镀层板提升汽车防腐抗力的设计方法。

第4章概述了排气系统的零件构成、用材演变和进展。基于排气系统的热端和冷端的失效模式，尤其是对冷端冷凝腐蚀的研究和分析，提出了排气系统的热端和冷端失效的评价方法和防腐性能提升的措施。本章由中信金属公司尚成嘉和张伟提出初稿，编著者根据全书的撰写思路进行了修改和补充。

第5章首先论述了金属材料疲劳的特点、疲劳失效和断口特征、疲劳的种类及表征参量，疲劳的试验方法和数据处理，试图给读者关于疲劳方面的准确概念，并概述了影响疲劳的因素和提高疲劳性能的措施。

第6章以大量的汽车零部件台架试验和使用中的失效案例的分析论述了汽车零部件的多种失效模式，多因素的分析 and 认识方法，希望能给读者进行汽车典型零部件进行失效分析时一个新的多维的思维；本章由刘珂军和编著者共同完成。不少案例是实际经验的总结和提升，可供读者在分析失效原因时进行借鉴。

汽车中的摩擦磨损是重要的失效模式之一，摩擦不仅消耗汽车发动机的有效功，磨损还会引起零件的早期失效，第7章首先介绍摩擦磨损的类型、汽车中的典型零件的摩擦磨损失效的案例，并提出了减少摩擦和降低磨损失效的途径。

现代的失效分析是一门新颖的多学科交叉的综合性技术。做好汽车材料和零件的失效分析工作，涉及机械设计、力学、物理、材料、工艺、管理、材料试验和微观分析等多学科以及多学科交叉的专业知识，同时还要了解零件的制造历史、服役历史，准确地找出失效原因并提出预防措施，是一项系统工程。本书正是本着这一思想对汽车构件的常见的失效方式（腐蚀、疲劳、磨损）进行论述；这三种失效模式又相互交叉和联系。因此书中各章也相互渗透，互有联系，但针对特定的失效模式，又自成体系，可独立阅读！应该说明，由于电动化、智能化和轻量化发展，汽车电器、电子、电控等技术迅速发展及其在现代汽车上的用量也迅速增加，失效概率也较前增多，有关这方面的失效与预防将另有专著论述，不在本书涉及范围。

本书涉及多学科的广泛领域，限于作者水平，书中不当之处难免，热情希望读者加以指正。本书初稿曾承总编委会李金桂研究员审阅，化学工业出版社责任编辑刘丽宏、段志兵、王清颢为本书的出版付出了许多辛勤劳动，他们所提出的宝贵意见已经采用于书中，中国工程院为编写此书专门立项并多次召开会议，给予指导和支持，编著者在此并致谢意。

编著者

目录

第1章 绪论

1.1 概述	001
1.2 汽车工业发展趋势	004
1.2.1 轻量化	004
1.2.2 提高安全性	006
1.2.3 提高可靠性	006
1.2.4 延长使用寿命	007
1.2.5 发展新能源汽车	007
1.3 汽车材料的开发和应用	008
1.3.1 汽车轻量化用钢概要	008
1.3.2 高强度钢和先进高强度钢在自主品牌汽车上的典型应用	013
1.3.3 汽车用铝合金	017
1.3.4 汽车用镁合金	024
1.3.5 复合材料	026
1.4 汽车在服役过程中的材料失效	028
1.4.1 腐蚀失效	028
1.4.2 疲劳失效	028
1.4.3 摩擦磨损	029
1.5 孕育中的新的工业革命对汽车工业发展 和产品延寿带来的影响	029
1.6 小结	031
参考文献	032

第2章 车辆材料和典型构件的自然环境腐蚀

2.1 概述	034
2.2 腐蚀的危害	035
2.2.1 腐蚀给国民经济带来重大损失	035
2.2.2 腐蚀给汽车工业带来巨大损失	038

2.3	腐蚀失效的特点	040
2.4	国内外汽车的环境腐蚀研究概况	042
2.5	重庆市公交和卡车环境腐蚀调研	045
2.5.1	重庆市公交车辆环境腐蚀调研	045
2.5.2	重庆市卡车车辆大气腐蚀调查	049
2.6	车辆材料在潮湿和酸雨的典型环境下的腐蚀	053
2.6.1	环境腐蚀试验试样与试验方法	054
2.6.2	环境腐蚀试验期间内的气象及环境数据	054
2.6.3	自然曝露试验的样品的腐蚀等级、光泽和色差的 试验结果	055
2.6.4	环境腐蚀试样的表面形貌变化	056
2.6.5	典型汽车零件环境腐蚀试验结果和表面形貌	058
2.7	自然曝露试验与加速腐蚀试验相关性的研究	069
2.7.1	试验样品和方法	069
2.7.2	环境腐蚀试验的结果	073
2.7.3	环境腐蚀产物形貌观察	081
2.7.4	环境腐蚀产物成分的定性和定量测定	083
2.7.5	人工加速试验——CASS 盐雾腐蚀结果	087
2.7.6	人工加速腐蚀和自然环境腐蚀的相关性及其评价	089
2.8	高强度螺栓的延迟断裂性能和环境腐蚀	092
2.8.1	高强度螺栓的延迟断裂性能	092
2.8.2	高强度螺栓环境腐蚀	096
2.9	提高重庆地区典型汽车构件环境防腐性能的措施和建议	100
2.10	车辆材料环境腐蚀数据库	103
2.11	总结	105
2.12	附录	105
	参考文献	138

第3章 涂镀层钢板在汽车中的应用

3.1	概述	141
3.2	镀层板的种类和特点	141
3.3	镀层板的基本性能	147
3.3.1	镀层与基体的结合力	147

3.3.2 涂层板的成形性	148
3.3.3 涂层板的耐蚀性	150
3.3.4 涂层板的点焊性能	153
3.3.5 涂层板的表面处理与油漆特性	164
3.4 涂层板在汽车工业中的应用	168
3.5 不同镀层板的性能和未来的发展趋势	171
3.6 提升汽车零件防腐抗力的设计方法	173
3.7 小结	174
参考文献	175

第4章 汽车排气系统腐蚀分析与选材

4.1 概述	177
4.2 排气系统的零件构成和用材演变	178
4.3 不锈钢在汽车排气系统中的应用	183
4.4 排气系统热端和冷端的常见失效模式	184
4.5 排气系统热端材料的性能特点和失效	188
4.6 排气系统的冷端材料性能和失效	191
4.7 腐蚀失效评价标准与方法	196
4.7.1 高温氧化试验	196
4.7.2 持久强度试验	197
4.7.3 凝结液腐蚀试验	198
4.7.4 晶间腐蚀评价	200
4.7.5 盐雾腐蚀试验	204
4.8 小结	205
4.9 附录	206
参考文献	209

第5章 汽车金属材料疲劳失效

5.1 概述	211
5.2 疲劳的循环应力	212
5.3 疲劳的加载模式和宏观断口	214
5.4 疲劳断口的微观特征	217
5.5 疲劳的分类及表征参量	225

5.5.1	疲劳的分类	225
5.5.2	高周疲劳的表征	227
5.5.3	影响高周疲劳的应力因素	233
5.6	影响疲劳性能的因素	236
5.6.1	材料的种类和抗拉强度	237
5.6.2	材料种类和屈服强度	239
5.6.3	材料的晶粒度和亚晶尺寸	241
5.6.4	材料的表面完整性	241
5.6.5	影响疲劳的其他因素	244
5.7	应变疲劳（低周疲劳）及表征	247
5.8	疲劳裂纹萌生	250
5.9	疲劳裂纹扩展	251
5.9.1	疲劳裂纹扩展和扩展速率的表征	251
5.9.2	Paris 方程和疲劳寿命的估算	255
5.10	疲劳的试验方法和数据处理	256
5.10.1	成组法及其数据处理	257
5.10.2	升降法及其数据处理	258
5.10.3	疲劳极限的统计分析——SAFL 方法	258
5.10.4	疲劳损伤累积理论的试验和数据处理方法——LOCATI 法	259
5.11	高周疲劳快速试验方法	261
5.12	疲劳试验设备	264
5.13	提高疲劳强度的措施	268
5.13.1	疲劳设计和零件选材	268
5.13.2	制造工艺	269
5.14	疲劳失效分析	278
5.15	小结	281
	参考文献	282

第 6 章 汽车零部件疲劳失效与延寿

6.1	概述	284
6.2	汽车典型零件的疲劳失效模式	284
6.2.1	轴类零件的失效断口特征	288
6.2.2	齿轮零件的失效的表面特征	295

6.2.3	在剪矩作用下的疲劳失效模式	296
6.3	疲劳失效模式的多样性和影响因素	298
6.4	汽车零件疲劳失效分析的思路及方法的思考	302
6.4.1	可靠性分析原理的应用	302
6.4.2	正确区分材料性能和零部件功能	315
6.4.3	充分利用和发挥计算机模拟的手段	316
6.4.4	疲劳断裂分析的认识过程	317
6.4.5	对疲劳断裂认识的阶段性	319
6.4.6	疲劳失效的过程和零件所在系统的相关性	320
6.4.7	汽车零件失效分析时的共性和个性问题	322
6.5	疲劳断裂分析与结构因素的再认识	323
6.5.1	零部件的基本结构特征与疲劳断裂模式	323
6.5.2	汽车部件结构对零件的力学要素和疲劳性能的影响	325
6.5.3	系统中的应力和应变集中对汽车结构件疲劳断裂的影响	327
6.5.4	弯曲结构与疲劳断裂	333
6.5.5	汽车零部件结构中的组合应力问题	343
6.5.6	系统结构对零件失效形式的影响	345
6.5.7	零件的结构失稳与失效	347
6.6	小结	350
	参考文献	351

第7章 典型汽车零件的摩擦与磨损

7.1	概述	352
7.2	摩擦的定义与分类	353
7.3	摩擦理论	354
7.3.1	早期摩擦理论	354
7.3.2	滑动摩擦理论	355
7.3.3	滚动摩擦理论	355
7.4	影响摩擦的因素	356
7.5	磨损的分类与评定	357
7.5.1	磨损的分类	358
7.5.2	影响黏着磨损和磨料磨损的因素	359
7.5.3	磨损的评定	360

7.6 提高材料耐磨性的方法和途径	361
7.6.1 开发耐磨材料	361
7.6.2 表面强化	363
7.7 不同磨损类型和零件选材	368
7.8 汽车中的磨损失效	370
7.8.1 刹车制动毂磨损、热疲劳和断裂	370
7.8.2 变速箱齿轮的接触疲劳、咬蚀和剥落	371
7.8.3 发动机排气阀的冲击磨损失效	377
7.8.4 矿用汽车翻斗的冲击磨损失效	380
7.8.5 汽车轮胎的磨损	380
7.8.6 汽车其他磨损件	385
7.8.7 热冲压硬化时的模具的磨损	385
7.9 小结	386
参考文献	387