



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

金属锈蚀原理 与暂时防锈

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写
王一建 王余高 黄本元 张康夫 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

金属锈蚀原理 与暂时防锈

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写
王一建 王余高 黄本元 张康夫 编 著

本书全面介绍了金属锈蚀理论与防护技术的相关知识,在简要阐述金属大气腐蚀原理基础上,重点结合典型零件说明如何正确选择防锈材料、如何进行防锈工艺论证、如何对防锈装备进行设计,以及如何进行防锈质量管理,构成了“防锈材料是基础,工艺是关键,装备是保证,质量管理是核心”的系统防锈工程技术。本书可帮助读者切实解决工程中的防锈问题。

本书适合从事金属加工、表面技术的科研、技术开发和零件制造的技术人员、管理人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属锈蚀原理与暂时防锈/王—建等编著. —北京:化学工业出版社, 2017. 12

(材料延寿与可持续发展)

ISBN 978-7-122-30865-8

I. ①金… II. ①王… III. ①金属-防锈 IV. ①TG17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 263517 号

责任编辑:刘丽宏 段志兵 王清颖
责任校对:宋 夏

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 刷:三河市延风印装有限公司

装 订:三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 16½ 字数 314 千字 2018 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:78.00 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，人类的成长史实际上也是材料的发展史。在人类经过了漫长的石器时代之后，于五千年前进入铜器时代，三千年前进入铁器时代，然而，在自然环境作用下，铜器生长出绿色“铜锈”，铁器生长出棕黄色“铁锈”，困扰着人们的使用，为了防止生锈，寻找“防锈”措施，三千年前我国出现了“大漆”，两千年前秦始皇墓出土的 19 把青铜剑采用了铬酸盐处理，使其历经 2000 多年出土后，还“光亮如新、锋利如初”，就是明证。17 世纪第一次工业革命以来，大量地使用金属材料，生锈问题普遍存在，为了防锈，人们采用了多种措施，第一种，在金属材料中加入防锈元素形成防锈合金，例如不锈钢、耐候钢、耐热钢，在相当一段时间内不生锈了。第二种，在金属的表面上采用电镀、热喷涂、有机涂覆和气相沉积技术，施加电镀层、热喷涂层、油漆层、塑料喷涂层以及金属或陶瓷膜层，起着防止锈蚀、减少磨损、减少断裂的作用，或是进行表面装饰装潢美化，甚至达到声光磁电的转换作用，这是一类从设计开始安排，到产品退役都期待保留的永久性功能表面层。第三种，在金属制品的表面上施加防锈油、防锈剂、防锈脂（膏）或在限定空间内施加气相防锈剂，其目的是解决在金属加工过程（车、铣、磨、刨等）、零件的周转过程、金属制品的储存、运输过程甚至使用过程中的锈蚀问题，通常还包括包装（防潮包装、防锈包装、防霉包装），人们普遍认可的实例就是高级月饼包装盒内放了干燥剂，就是防潮包装。存放衣物的箱子里放有樟脑丸，就是气相防蛀、防霉包装。第三种，防锈包装。这些防锈包装的一个显著特点就是在完成了“过程中的防锈任务”后，需要去除包装及涂覆的防锈油脂，所以，西方世界早有“暂时性防锈”的提法。但在实际处理过程中，要根据防锈油脂是有碍于还是有助于使用来确定是否清除，确保电子电器接点导电通畅的固体润滑导电防锈膜、导弹发射导轨润滑防锈膜、民用客机机翼内各种翼盒防锈剂、航炮内腔润滑防锈膜等，这些有利于使用的防锈剂不用清除。

我国“暂时防锈事业”起源于新中国成立初期，当时工厂生产的工件或成品锈蚀严重，因此每个工厂都设有“防锈室”，有若干技术人员处理工厂产品的锈蚀与防锈问题。1957 年华保定、沈行素先生翻译的《中性介质缓蚀剂》对工厂防锈起到了指导作用；1960 年华保定先生撰写的《机件在加工和储藏过程中的防锈》，为国内最早公开出版的专业图书，起到了更为深入的指导作用；1965 年周静妤、李少正先生在国内又陆续出版了一些专著。我们团队的张康夫、王秀蓉先生等于 1982 年编写出版了《防锈封存包装手册》，在航空领域内部发行，受到热烈欢迎；1990 年公开出版发行了《机电产品防

锈、包装手册》，影响全国；2004 年我们参与了中国表面工程协会防锈润滑分会组织编写的《防锈材料应用手册》；2007 年我们团队编写出版了《金属大气腐蚀与暂时性保护》，2009 年编写出版了《滚动轴承防锈包装》；2011 年编写出版了《暂时防锈手册》。在我国，我们首次使用了“暂时性防锈”的概念，并为广大的工程技术人员所肯定，说明这种表述是符合实际的。

中国工程院和中国科协联合指导下编写出版《材料延寿与可持续发展》丛书，确定“金属防锈”单立一册，我们取名为《金属锈蚀原理与暂时防锈》，希望能为我国各类产品的设计师、制造、储存、运输和使用工程师在进行防锈时起到引导和推荐作用。

本书承蒙李金桂教授的支持、帮助和审定，在此表示衷心的感谢！在编写过程中得到中国表面工程协会防锈专业委员会理事长罗永秀、秘书长吴正前的关切与支持，也在此表示衷心感谢。编写过程中众多专家与朋友给予了关怀和帮助，杭州五源科技实业有限公司的钟金环、张凯，南京凯耐思化工科技有限公司的贺恒松、钱强为本书的编写、出版也做了贡献，在此也一并表示感谢。

尽管编著者竭尽全力，力图完善，但由于水平所限，难免有不足与疏漏，敬请批评指正。

编著者

I 目录 I

第1章 绪论

1.1 金属腐蚀与锈蚀的定义	2
1.2 大气腐蚀原理	5
1.2.1 大气腐蚀分类	5
1.2.2 影响大气腐蚀的因素	7
1.3 大气腐蚀的防护技术与研究方法	13
1.3.1 大气腐蚀的防护技术	13
1.3.2 大气腐蚀研究方法	15
1.4 金属暂时性防护	17
1.5 暂时防锈技术现状与发展趋势	19
1.5.1 暂时防锈系列标准	19
1.5.2 管理与技术服务	20
1.5.3 暂时防锈技术体系	21
1.5.4 引进国外先进技术并逐步替代国产化	22
1.5.5 环境友好防锈材料与清洁生产	22
1.6 金属锈蚀危害与材料延寿持续发展的意义	23
1.6.1 自然环境作用引发金属制品失效,甚至引发重大事故	23
1.6.2 金属防锈技术与材料延寿的重大意义	24
参考文献	25

第2章 产品设计与防锈

2.1 环境条件	27
2.2 结构设计	33
2.3 材料选择	34
参考文献	43

第3章 清洗是防锈质量的保证

3.1 清洗用材料	44
3.1.1 有机溶剂	45
3.1.2 水基清洗溶液	58

3.2 清洗工艺	63
3.2.1 清洗工艺设计	64
3.2.2 清洗工艺的选择	64
3.2.3 清洗设备的选择	65
3.2.4 精密清洗设备选择	66
3.2.5 清洁度标准与检测	72
3.3 干燥方法	76
参考文献	76

第4章 正确选择暂时防锈材料

4.1 防锈油	80
4.1.1 除指纹型防锈油 (RC)	81
4.1.2 溶剂稀释型防锈油	82
4.1.3 脂型防锈油 (防锈脂)	83
4.1.4 润滑油型防锈油	84
4.1.5 气相防锈油	86
4.2 防锈剂	87
4.2.1 NV 类气相防锈剂	88
4.2.2 水溶性防锈剂	90
4.3 防锈纸与防锈薄膜	92
4.4 其他防锈处理材料	99
4.5 内包装用材料	101
参考文献	104

第5章 金属加工液应用与管理

5.1 油基加工液	108
5.2 水基加工液	112
5.3 正确选用金属加工液	120
5.4 切削加工油 (液)	120
5.4.1 切削液的选择	121
5.4.2 常用金属材料切削液的选择	126
5.4.3 按切削加工方式选择切削液	127
5.4.4 选择切削液时必须考虑的环境卫生因素	132
5.4.5 切削液的配制与管理	133

5.4.6 切削液使用中的故障排除	140
5.4.7 水基切削液的净化	146
5.4.8 切削液的安全与环保	147
5.4.9 切削液的废液处理	151
5.5 塑性成型加工液	154
5.5.1 塑性加工对金属加工液的要求	154
5.5.2 金属塑性 (非切削) 加工用润滑剂	156
5.6 绿色环保金属加工液	168
参考文献	169

第6章 暂时防锈包装工艺应用

6.1 生产过程中 (工序间) 的防锈	170
6.1.1 工序间产生锈蚀的基本原因	170
6.1.2 预防工序间锈蚀的主要方法	170
6.1.3 工序间防锈一般要求	170
6.2 成品防锈包装	174
6.2.1 防锈处理的工艺要点	174
6.2.2 封存包装方法的选择	177
6.3 几种典型机械制品防锈包装工艺举例	181
6.3.1 轴承防锈、包装工艺	181
6.3.2 汽车防锈、包装工艺	186
6.3.3 光学仪器防锈工艺	201
6.3.4 大型机械防锈工艺	203
6.3.5 通用设备防锈工艺	204
6.3.6 有关行业防锈技术条件及工艺规范	205
6.4 仓库防锈	207
6.4.1 露天库防锈工艺	207
6.4.2 库房防锈	209
6.4.3 洞库的防潮及防锈	211
6.5 产品防锈封存期	211
参考文献	213

第7章 清洁生产与环境保护

7.1 清洁生产	214
----------------	-----

7.2 环境保护 215

7.2.1 环境友好材料 215

7.2.2 环境友好切削液 226

7.2.3 包装材料与环境保护 229

参考文献..... 230

附录 试验方法汇总

后记

第1章

绪论

金属生锈是金属在自然环境作用下发生的最普遍的一种自然现象，它是自然环境诸多因素在金属表面的化学、电化学作用的结果，例如钢铁在空气中的生锈、电子材料的失效等。据统计，全世界每年因腐蚀而报废的金属量，相当于金属年产量的10%左右。损失达7000亿美元，约为地震、台风、火灾等自然灾害损失的6倍。发达国家每年解决腐蚀问题所需的费用，占国民经济的2%~4%，而且有逐年增加的趋势。1963年英国发表了著名的《贺尔报告》，估计英国每年因腐蚀造成的损失达13.65亿英镑，占当年国民生产总值（GNP）的3.5%。1995年美国腐蚀工程协会（NACE）统计表明，美国每年的腐蚀经济损失已高达3000亿美元，相当于GNP的4%~5%。我国因腐蚀直接造成的经济损失也十分巨大，据2000年统计，我国总腐蚀损失已高达5000多亿元，约占国民生产总值的5%。腐蚀不仅耗竭宝贵的资源和能源，还带来灾难性事故，污染环境，危害地球，威胁人类的生命安全。腐蚀好比是金属的癌症和无焰的火灾，所以人们要像关注环境保护、减灾、医学一样关注腐蚀及其控制问题。

金属在各种环境下的腐蚀，以大气腐蚀最为普遍，其腐蚀造成的损失最严重，约占金属腐蚀损失总量的一半以上。全世界在大气中使用的金属材料超过其生产总量的60%。机械工业产品在生产、储存、运输过程中的锈蚀，是大气环境中常见的现象。

世界各国长期以来采取各种防护措施与大气腐蚀作斗争，但金属的锈蚀仍然存在。这是因为产品的锈蚀除大气侵蚀外，还有人为的因素，如使用的防锈材料不当或质量不好；防锈包装方法及工序不健全或配套性差；储运过程中保管不善；加工过程中的锈蚀隐患等等。据武汉材料保护研究所计算机数理统计分析，1986年我国机械工业锈蚀损失为116.245亿元。其中，机械工业产品用金属材料锈蚀总损失为8.600亿元/年；机械工业产品（制造商品）锈蚀总损失为95.145亿元/年；出口机械工业产品锈蚀总损失为1938.44万美元/年，折合人民币（当时美元对人民币比值1:4.78）为9265.74万元/年；机械工业生产用机床设备锈蚀总损失（以使用10年后锈蚀报废台数折算）为11.573亿元/年。

锈蚀造成的损失是可观的，然而令人忧虑的是某些部门和企业对锈蚀问题缺

乏意识，未引起足够的重视。在机械制造业中很多企业暂时防锈不重视，缺乏暂时防锈知识，有的机械工程师不熟悉暂时防锈封存技术及防锈管理。因此，让机械工程师提高腐蚀科学素养与腐蚀防护意识，具有更多、更全面的暂时防锈知识，并能正确、及时地解决生产中的锈蚀与防护问题，是编写本书的目的。

1.1 金属腐蚀与锈蚀的定义

人们认识金属腐蚀是从腐蚀产物感性地发现的，首先看到的就是“锈”，从棕黄色“铁锈” $[\text{FeO}(\text{OH}) \text{ 或 } \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}]$ 及绿色“铜锈” $[\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2]$ 分别地认识了铁和铜的锈蚀。

1960年艾文思在他的专著《The corrosion and oxidation of metals》中对腐蚀下的定义为：“金属腐蚀是金属从元素态转变为化合态的化学变化及电化学变化。”

20世纪80年代，国家科委成立“腐蚀科学学科组”，随后成立“中国腐蚀与防护学会”，将“腐蚀”涉及的范围从金属扩大到所有材料，将“腐蚀”定义为：“腐蚀是材料在环境作用下引起的破坏和变质。”

确切地说，“腐蚀”的定义为：“材料的腐蚀是材料受环境介质的化学、电化学和物理作用而破坏的现象。”而“大气腐蚀”是指材料在大气环境中因环境因素的作用而引起材料变质或破坏。

但是，按照防锈行业的认识及所从事的工作，主要还是针对金属及其制品在大气环境中遭遇环境因素（温度、湿度、盐雾等）作用而引起的变质或破坏，不涉及其他材料。防锈这个行业本身有一整套的金属生锈、除锈与防锈的理论、原则、技术、标准、测试方法、产品及其科学管理办法，应该说在“腐蚀科学”出现之前，已经有了这个行业。“腐蚀科学”出现之后，又被包括在其中，但它是一个独立的分支。这个分支将金属制件在大气、土壤、自然水等自然环境和在各种工业介质中所发生的化学、电化学的变化演变为锈蚀的过程称为生锈；其表面的腐蚀生成物称为锈；清除这些锈蚀产物的过程称为除锈；而防止金属生锈则称为防锈。在一种载体中加入缓蚀剂，即能明显地降低生锈速度的物质，称为防锈剂。例如在矿物油中加入缓蚀剂，称为防锈油；在切削液中加入缓蚀剂，称为防锈切削液；在润滑油中加入缓蚀剂称为防锈润滑油；在润滑脂中加入缓蚀剂称为防锈润滑脂等等。千百种缓蚀剂被称为“工业味精”而广泛用于金属防锈行业，防止了“过程中”的生锈，提高了金属制品装备使用的可靠性、安全性和耐久性，减少了失效、损失和污染，创造了巨大的社会效益、经济效益和国防效益。

金属制件在加工、储存、运输过程中的防锈，一般称为“暂时防锈”，其中“暂时”并不是指其防锈期限的长短，而是指在使用前，可方便去除的一类防腐保护方法。

由于金属制件在加工、储存、运输和使用过程中都在大气条件下进行，引起此试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com