



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

铝合金选用与设计

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写
赵 晴 王帅星 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

铝合金选用与设计

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写
赵 晴 王帅星 编 著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书全面介绍了铝合金从使用性能到结构设计、失效防护的各项基础知识和实用技术。书中重点介绍了铝合金在各种环境中的腐蚀性能、摩擦磨损性能、疲劳与腐蚀疲劳性能,探讨了影响铝合金使用寿命的主要因素,提出了相应的选材设计、结构设计、预防和控制措施及表面处理方法,同时结合铝合金的再制造,说明了铝合金废料的利用和回收方法。

本书可供铝合金材料构件的设计工程师,制造工程师,使用维护、维修和管理工程师参考。

图书在版编目(CIP)数据

铝合金选用与设计/赵晴,王帅星编著. —北京:化学工业出版社, 2017. 12

(材料延寿与可持续发展)

ISBN 978-7-122-30781-1

I. ①铝… II. ①赵… ②王… III. ①铝合金-设计
IV. ①TG146. 21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 253286 号

责任编辑:段志兵 刘丽宏 王清颖

文字编辑:孙凤英

责任校对:王 静

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 17 字数 322 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: 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

铝合金作为轻质金属结构材料，具有许多优良的物理、化学和力学性能，其密度小、比强度高，导电、导热性能好，色泽美观，耐腐蚀性能优异，切削加工性能优良，且能承受较大的冲击载荷，因此，目前已经广泛应用于机械制造、交通、建材、航空航天及军事国防的各个领域。我国铝合金储量只相当于世界人均储量的10%，而铝合金使用量又较大，如果不加以合理开采和使用，会面临铝资源耗竭的危机。

本书从促进铝合金可持续发展的角度出发，介绍了铝合金的基本性能，铝合金在航空航天、汽车、船舶、建筑等领域的使用情况以及在这些领域应用时铝合金的选材原则；较为详细地介绍了铝合金在各种环境中的腐蚀性能、摩擦磨损性能、疲劳与腐蚀疲劳性能，探讨了影响铝合金使用寿命的主要因素，提出了相应的选材设计、结构设计、预防和控制措施及表面处理方法，以达到延长铝合金材料的使用寿命，提高铝合金制成品的可靠性、安全性和耐久性的目的。从“再制造、再循环、再利用”的角度出发，介绍了铝合金的再制造方法和研究现状，铝合金废料的利用、回收方法。希望本书能为铝合金材料构件的设计工程师，制造工程师，使用维护、维修和管理工程师提供参考，提高所设计制造产品的可靠性、安全性和耐久性，达到延长铝合金材料使用寿命及有效节约资源的目的。

本书由南昌航空大学赵晴教授和王帅星编著。在本书的编著过程中，我国表面工程和腐蚀控制专家、航空材料科学家李金桂教授及南昌航空大学材料学院的专家学者给予了大量支持，并提出了许多建设性的意见，在此深表感谢！

由于编著者学术水平和资料收集阅读的局限，本书的疏漏与不妥之处在所难免，请读者赐教与指正。本书在撰写过程中参考了大量文献资料，在此对本书引用的所有参考资料的作者表示衷心感谢。

编著者

I 目录 I

第1章 概述

1.1 铝的基本性能	001
1.1.1 原子结构及晶体结构	001
1.1.2 物理性能	002
1.1.3 化学性能	002
1.1.4 力学性能	003
1.1.5 工艺性能	003
1.2 铝产业现状	004
1.2.1 铝土矿资源及分布	004
1.2.2 铝产量与产能	007
1.2.3 铝的使用量	009
参考文献	010

第2章 铝及铝合金的分类

2.1 分类基本原则	011
2.2 变形铝合金及分类	012
2.2.1 1×××系铝合金	012
2.2.2 2×××系铝合金	014
2.2.3 3×××系铝合金	020
2.2.4 4×××系铝合金	022
2.2.5 5×××系铝合金	024
2.2.6 6×××系铝合金	028
2.2.7 7×××系铝合金	031
2.2.8 新型变形铝合金	034
2.2.9 变形铝合金状态代号	041
2.3 铸造铝合金	045
2.3.1 铸造铝合金的分类和特点	046
2.3.2 铝合金铸件的热处理	049
2.4 航空航天用铝合金	056
2.5 交通用铝合金	059

2.5.1 轨道交通用铝合金	059
2.5.2 汽车用铝合金	061
2.5.3 船舶、舰艇用铝合金	063
2.6 建筑用铝合金	064
2.7 包装用铝合金	065
参考文献	066

第3章 铝合金的环境适应性及选用设计

3.1 铝合金的腐蚀形式	067
3.1.1 点蚀	068
3.1.2 晶间腐蚀	068
3.1.3 应力腐蚀开裂 (SCC)	069
3.1.4 剥层腐蚀	072
3.1.5 电偶腐蚀	074
3.2 铝合金构件在使用环境中的耐蚀性	074
3.2.1 大气环境	074
3.2.2 海洋环境	077
3.2.3 工业环境	092
3.2.4 太空环境	097
3.3 提高铝合金耐蚀性的表面处理技术	098
3.3.1 化学转化	098
3.3.2 阳极氧化	105
3.3.3 微弧氧化	118
3.3.4 金属镀层	128
3.3.5 有机涂层	134
3.4 铝合金构件的防腐蚀设计	145
3.4.1 铝合金防腐蚀设计的一般原则	145
3.4.2 预防电偶腐蚀的设计	145
3.4.3 预防应力腐蚀开裂的设计	148
参考文献	149

第4章 铝合金的耐磨性及选用设计

4.1 铝合金的干摩擦磨损行为	152
4.1.1 铝合金的干摩擦磨损特性	152
4.1.2 铝合金干摩擦磨损性能的影响因素	156
4.2 铝合金的腐蚀磨损行为	162

4.2.1 铝合金在雨水中的腐蚀磨损行为	162
4.2.2 铝合金在海水中的腐蚀磨损行为	163
4.2.3 铝合金在 NaCl 溶液中的腐蚀磨损行为	166
4.3 提高铝合金耐磨性的表面强化技术	167
4.3.1 硬质阳极氧化	167
4.3.2 微弧氧化	173
4.3.3 激光熔覆	178
4.3.4 离子注入	182
4.3.5 电镀和化学镀	185
4.3.6 热渗金属层	188
参考文献	189

第5章 铝合金的疲劳性能及选用设计

5.1 铝合金的断裂韧性	192
5.1.1 概述	192
5.1.2 影响因素	193
5.1.3 改善措施	195
5.2 铝合金的腐蚀疲劳	195
5.2.1 腐蚀疲劳的影响因素	195
5.2.2 腐蚀疲劳机理	197
5.2.3 腐蚀疲劳理论模型	199
5.2.4 腐蚀疲劳的控制方法	202
5.3 表面处理对铝合金疲劳性能的影响	202
5.3.1 化学氧化的影响	202
5.3.2 阳极氧化的影响	203
5.3.3 微弧氧化的影响	204
5.3.4 激光熔覆的影响	207
5.3.5 喷丸强化的影响	207
5.3.6 激光喷丸强化的影响	212
5.3.7 超声滚压强化的影响	214
5.4 铝合金构件抗疲劳技术与结构设计	216
5.4.1 减少应力集中	217
5.4.2 提高铝合金构件表面硬度	219
5.4.3 干涉配合连接, 提高铝合金连接件的疲劳寿命	220
参考文献	220

第6章 铝合金的再制造工程

6.1 表面工程技术	223
6.1.1 复合电刷镀	223
6.1.2 等离子喷涂	224
6.1.3 高速电弧喷涂	227
6.2 激光再制造技术	228
6.2.1 激光熔覆	228
6.2.2 激光表面合金化	231
6.2.3 激光快速成型	232
6.3 冷喷涂修复技术	234
6.3.1 冷喷涂修复技术原理、特点及设备	235
6.3.2 冷喷涂技术修复铝合金零件	238
参考文献	240

第7章 铝合金的循环利用

7.1 废铝的来源及分类	242
7.2 废铝料的利用现状	243
7.3 废铝的再生、应用与发展	244
7.3.1 再生铝的生产	244
7.3.2 再生铝的应用	247
7.3.3 再生铝的技术发展	247
7.4 特殊铝资源的回收与利用	251
7.4.1 铝灰中铝资源回收与资源化利用	251
7.4.2 铝材表面处理废水的资源化利用	254
7.4.3 铝合金化铣液中铝的回收	255
参考文献	256

第1章

概述

铝是地壳中分布最为广泛的元素之一，相对于通常使用的钢铁材料，铝具有密度小、比强度高，导电、导热性能好，耐蚀性优良，塑性加工性能好等特点，因此铝在许多领域得到广泛应用。

纯铝虽然具有优良的性能，但仍然不能满足使用需求，为此，人们通过合金化来改善其组织和性能；铝合金是以铝为基体加入铜、锌、镁、锰等合金元素组成的合金。铝合金作为轻质金属结构材料，是目前使用量最大、应用面最广的有色金属材料，且其使用范围还在不断扩大之中。

1.1 铝的基本性能

1.1.1 原子结构及晶体结构

铝是元素周期表中第三周期主族元素，原子序数 13，相对原子质量 26.9815。 ^{27}Al 的原子核内有 14 个中子和 13 个质子。13 个电子在各层轨道上的分布是 $1s^2$ ， $2s^2$ ， $2p^6$ ， $3s^2$ ， $3p^1$ 。如果同时失去 2 个 $3s$ 电子和 1 个 $3p$ 电子，则生成三价铝离子 (Al^{3+})；若失去一个 $3s$ 电子和 1 个 $3p$ 电子，则生成二价铝离子 (Al^{2+})；若失去 1 个 $3p$ 电子，则生成一价铝离子 (Al^+)；低价铝离子在低温下通常不稳定。

铝的晶格属于面心立方体 (fcc) 型。铝原子 (铝离子) 位于晶格的节点上和面的中心，这相当于每个晶格内有 4 个铝原子。铝的晶格结构示意图见图 1-1、图 1-2。可见，每一个铝原子周围都有 12 个最邻近的铝原子。铝晶格是由铝原子按照一定的排列方式紧密堆积而成的。

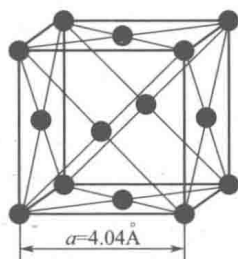


图 1-1 铝的单位格子的结构

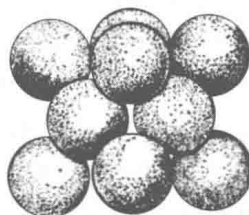


图 1-2 铝的单位格子中离子的配置

铝的晶格常数 $a = 4.04956 \times 10^{-10} \text{ m}$ ($4.04\text{\AA}$)，由此算出铝原子的直径为 $2.86 \times 10^{-10} \text{ m}$ ，体积为 $999.6 \text{ mm}^3/\text{mol}$ 原子；铝离子 (Al^{3+}) 的半径为 0.0535 nm 。

1.1.2 物理性能

表 1-1 列出了纯铝的有关物理性能。

表 1-1 纯铝的物理性能

性能	高纯铝(99.996%)	工业纯铝(99.5%)
原子序数	13	—
原子量	26.9815	—
晶格常数(20℃)/ $\times 10^{-10} \text{ m}$	4.0494	4.04
密度(20℃)/(kg/m^3)	2698	2710
熔点/℃	660.24	650
沸点/℃	2060	—
溶解热/(J/kg)	3.961×10^5	3.894×10^5
燃烧热/(J/kg)	3.094×10^{-7}	3.108×10^{-7}
凝固体积收缩率/%	—	6.6
比热容(100℃)/[$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]	934.92	964.74
热导率(25℃)/[$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]	235.2	222.6(O 状态)
线膨胀系数(20~100℃)/[$\mu\text{m}/(\text{m} \cdot \text{K})$] (100~300℃)/[$\mu\text{m}/(\text{m} \cdot \text{K})$]	24.58 25.45	23.5 25.6
电导率/(S/m)	64.94	59(O 状态) 57(H 状态)
体积磁化率/ $\times 10^{-7}$	6.27	6.26
磁导率/(H/m)	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}
反射率($2500 \times 10^{-10} \text{ m}$)/% ($5000 \times 10^{-10} \text{ m}$)/% ($20000 \times 10^{-10} \text{ m}$)/%	— — —	87 90 97
折射率(白光)	—	0.78~1.48
吸收率(白光)	—	2.85~3.92
辐射能(25℃)	—	0.035~0.06

1.1.3 化学性能

从热力学角度看，铝是仅次于镁和铍的十分活泼的金属结构材料，铝在金属电位序中的位置是一个热力学稳定性很低的元素，或者说铝应该是非常容易被腐

蚀的。但实际上，铝及铝合金具有比较好的耐腐蚀性能，在中性大气、天然水、某些化学品以及大部分食品中可以令人满意地使用许多年。这是由于在大气中铝表面总是自然形成一层保护性氧化膜，表面氧化膜的钝性决定着金属铝的耐腐蚀性能，即，铝的耐腐蚀性能实际上取决于表面形成的氧化物的本性和状态，而不是决定于金属铝的性能。

1.1.4 力学性能

铝的力学性能与加工状态或退火状态密切相关，表 1-2 分别列出了冷轧板材和退火板材的力学性能。冷轧铝板的强度明显高于退火铝板的，而冷轧铝板的延伸率却比退火铝板的低得多。

表 1-2 冷轧板材和退火板材铝的力学性能

力学性能	冷轧铝材	退火铝材
拉伸强度(σ_b)/MPa	150	80
屈服强度($\sigma_{0.2}$)/MPa	100	30
剪切强度(σ_c)/MPa	—	55
延伸率(δ)/%	6	35
断面收缩率(ψ)/%	60	80
纵向弹性模量/(N/mm ²)	71000	71000
横向弹性模量/(N/mm ²)	26000	26000
剪切模量/(N/mm ²)	27000	27000
泊松系数(μ)	0.31	0.31
布氏硬度	32	25
疲劳强度(σ_{-1})/MPa	42~65(与变形速度有关)	35

1.1.5 工艺性能

- ① 延展性好。易加工，能轧成薄板和箔，拉成管材和细丝，挤成各种型材，锻造或铸造成各种零件，可高速进行车、铣、镗、刨等机械加工。
- ② 可焊接。铝合金可用 TIG 或 MIG 法惰性气体焊接，焊接后力学性能高，耐蚀性好，外观美，满足结构材料的要求。高硅、高镁的铝合金焊接性能较差。
- ③ 易表面处理。纯铝强度不高，冷加工强化能使强度提高 1 倍以上，当然塑性则相应变低。可以通过添加各种元素合金化使其变成铝合金，将其强度提高，塑性下降不大。有的铝合金还可通过热处理进一步强化，其比强度可与优质合金钢媲美。铝阳极氧化工艺相当成熟，操作简便，已经广泛应用。铝阳极氧化