

腐蚀与防护全书

有色金属的耐腐蚀性及其应用

中国腐蚀与防护学会 王编

朱 祖 芳 等编著

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

· 有色金属的耐腐蚀性及其应用/中国腐蚀与防护学会主编 朱祖芳等编著. —北京:化学工业出版社,1994
(腐蚀与防护全书)
ISBN 7-5025-1446-5

I. 有… II. ①中…②朱… III. 有色金属-耐腐蚀性-研究 IV. TG178

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 12887 号

出版发行: 化学工业出版社(北京市朝阳区惠新里 3 号)

社长: 俸培宗 总编辑: 蔡剑秋

经 销: 新华书店北京发行所

印 刷: 三河科教印刷厂

装 订: 三河雪丽装订厂

版 次: 1995 年 6 月第 1 版

印 次: 1995 年 6 月第 1 次印刷

开 本: 850××1168 1/32

印 张: 10 1/2

字 数: 287 千字

印 数: 1—5000

定 价: 16.50 元

序

腐蚀与防护科学是本世纪 30 年代发展起来的一门综合性技术科学,目前已成为一门独立的学科,并在不断发展。

腐蚀是材料在各种环境作用下发生的破坏和变质,遍及国民经济各部门,给国民经济带来巨大损失。根据工业发达国家的调查,每年因腐蚀造成的经济损失约占国民生产总值的 2—4%,我国每年因腐蚀造成的经济损失至少达二百亿元。搞好腐蚀与防护工作,已不是单纯的技术问题,而是关系到保护资源、节约能源、节省材料、保护环境、保证正常生产和人身安全、发展新技术等一系列重大的社会和经济问题。全面普及科学知识,推广近代的防护技术,以减少腐蚀造成的经济损失,延长材料和设备的使用寿命,促进城乡经济的发展和企业经济效益的提高,是当前急待解决的问题。

为此,中国腐蚀与防护学会和化学工业出版社决定共同组织编写《腐蚀与防护全书》。《全书》分总论、腐蚀理论、环境腐蚀与防护、耐蚀材料、防蚀技术、腐蚀试验与监控等六篇数十个分册,并将陆续出版。

《全书》属于专业百科性质的大型综合性工具书,全面系统地阐述腐蚀学科的理论和应用,总结国内外的腐蚀与防护经验,反映近代的防护技术;内容广泛,兼顾知识性、教育性和实用性。主要供腐蚀与防护专业以及与该专业有关的工程技术人员阅读使用,也可供企业管理干部与大专院校有关专业师生参考。

《全书》的编写工作曾得到腐蚀领域许多专家、工程技术人员及其所在单位领导的热情协助和支持,对此,表示衷心感谢。

由于我们水平有限,缺点和错误在所难免,望读者批评指正。

《腐蚀与防护全书》编委会

1995.5

目 录

第1章 铝及铝合金	(1)
1. 概述	(1)
2. 一般性能	(3)
2.1 物理性质	(3)
2.2 力学性能	(4)
2.3 工艺性能	(5)
3. 铝、铝合金及其应用	(5)
3.1 纯铝	(5)
3.2 铝合金	(6)
3.2.1 防锈铝	(6)
3.2.2 硬铝和超硬铝	(7)
4. 铝合金的腐蚀类型	(7)
4.1 点蚀	(7)
4.2 晶间腐蚀	(11)
4.2.1 晶间腐蚀的形貌和机理	(11)
4.2.2 热处理工艺对晶间腐蚀的影响	(13)
4.2.3 晶间腐蚀的分布特征	(14)
4.3 应力腐蚀开裂	(15)
4.3.1 应力腐蚀开裂形成的条件和机理	(15)
4.3.2 合金元素的影响	(16)
4.3.3 工艺因素的影响	(17)
4.4 剥蚀	(18)
4.4.1 剥蚀的形貌和机理	(18)
4.4.2 减轻和消除剥蚀的途径	(19)
5. 铝和铝合金在各种介质中的耐蚀性	(20)
5.1 工业纯铝	(20)
5.1.1 电化学行为	(20)

5.1.2	表面氧化膜	(22)
5.1.3	铝在不同介质中的腐蚀行为	(23)
5.2	高纯铝	(27)
5.2.1	微量杂质元素对耐蚀性的影响	(27)
5.2.2	组织结构对耐蚀性的影响	(30)
5.2.3	交直流电解腐蚀	(30)
5.3	反应堆用纯铝	(31)
5.3.1	反应堆用铝的特点	(31)
5.3.2	耐蚀性	(32)
5.3.3	包壳材料成分对耐蚀性的影响	(32)
5.4	Al-Mn 系合金	(34)
5.4.1	组织结构和腐蚀特性	(34)
5.4.2	合金元素对耐蚀性影响	(35)
5.5	Al-Mg 系合金	(38)
5.5.1	组织结构和腐蚀特性	(38)
5.5.2	Mg 含量和退火工艺对耐蚀性的影响	(39)
5.5.3	固溶处理温度对应力腐蚀敏感性的影响	(41)
5.5.4	合金元素对耐蚀性的影响	(43)
5.6	Al-Mg-Si-(Cu)合金	(44)
5.6.1	组织结构和腐蚀特性	(44)
5.6.2	合金元素对耐蚀性的影响	(45)
5.7	Al-Cu 系合金	(46)
5.7.1	合金特点和组织结构	(46)
5.7.2	Al-Cu 合金的腐蚀通性	(48)
5.7.3	合金元素对耐蚀性的影响	(49)
5.7.4	热处理工艺对耐蚀性的影响	(50)
5.8	Al-Zn-Mg-(Cu)合金	(51)
5.8.1	组织结构和腐蚀特性	(52)
5.8.2	合金元素对耐蚀性的影响	(52)
5.8.3	热处理工艺对耐蚀性的影响	(54)
(附表1)	中国、前苏联、美国变形铝合金牌号对照表	(57)
(参考文献)	(60)

第2章 镁及镁合金	(61)
1. 概述	(61)
2. 一般性能	(62)
2.1 物理性质	(62)
2.2 力学性能	(63)
3. 镁及镁合金的牌号、成分和用途	(64)
3.1 纯镁	(64)
3.2 镁合金	(64)
4. 镁及镁合金的耐蚀性	(65)
4.1 纯镁	(65)
4.2 Mg-Mn 系合金	(69)
4.3 Mg-Al-Zn 系合金	(70)
4.4 Mg-Zn-Zr 系合金	(72)
参考文献	(74)
第3章 钛	(75)
1. 概述	(75)
2. 一般性能	(76)
3. 钛的电化学特性	(78)
3.1 钛及其化合物的电极电位	(78)
3.2 钛-水体系的电位-pH图	(80)
3.3 钛的阳极行为	(81)
3.4 钛的阴极行为	(83)
4. 钛在各种介质中的耐蚀性	(85)
4.1 氯气、氯化物和含氯化物	(85)
4.2 溴、碘和氟	(87)
4.3 海水	(87)
4.4 无机酸	(88)
4.5 碱	(91)
4.6 有机化合物	(91)
4.7 有机酸	(92)
4.8 氧	(94)
4.9 氢	(95)
4.10 二氧化硫和硫化氢	(96)

4.11	氮和氨	(97)
4.12	冶金因素对于工业纯钛耐蚀性的影响	(97)
5.	钛的特殊腐蚀形式和钛设备腐蚀实例	(99)
5.1	钛的着火和爆炸	(99)
5.2	钛的缝隙腐蚀	(101)
5.3	钛的焊区择优腐蚀	(104)
5.4	钛的吸氢和氢脆	(105)
5.5	钛的点蚀	(107)
5.6	钛的电偶腐蚀	(109)
6.	工业纯钛提高耐蚀性的方法	(110)
6.1	研制耐蚀钛合金	(110)
6.2	钛的缓蚀剂	(114)
6.3	钛的涂层和表面处理	(116)
6.4	钛的阳极保护	(118)
7.	钛在耐蚀工程中应用	(120)
7.1	钛在能源工程中应用	(121)
7.2	钛在石油化工中应用	(122)
7.3	钛在化学工程中应用	(124)
7.4	钛在冶金工业中应用	(126)
7.5	钛在造纸、纺织和制盐工业的应用	(127)
7.6	钛在医药和食品加工上应用	(128)
7.7	钛在矫形外科植入手术中应用	(129)
	参考文献	(130)
第4章	铜及铜合金	(132)
1.	概述	(132)
2.	紫铜	(133)
2.1	紫铜的牌号、基本物理、力学性能及用途	(133)
2.2	紫铜的耐蚀性	(135)
2.2.1	紫铜的一般化学通性	(135)
2.2.2	杂质元素对紫铜耐蚀性的影响	(135)
2.2.3	紫铜的常规防腐蚀措施	(136)
3.	黄铜	(138)
3.1	黄铜的主要性能及用途	(138)

3.2 黄铜的耐腐蚀性	(139)
3.2.1 黄铜在各种常用介质中的腐蚀	(141)
3.2.2 黄铜的脱锌腐蚀	(147)
3.2.3 黄铜的应力腐蚀开裂	(149)
4. 白铜	(151)
4.1 典型白铜的牌号、主成分、力学性能及其用途	(151)
4.2 白铜的耐蚀性	(151)
5. 青铜	(156)
5.1 青铜的牌号、主成分、力学性能及用途	(157)
5.2 青铜的耐蚀性	(160)
6. 装饰铜合金	(165)
6.1 常见装饰铜合金标定成分及其基本特性	(165)
6.2 装饰铜合金抗变色性能的检测	(166)
6.3 装饰铜合金的防护处理	(167)
6.4 装饰铜合金的作旧处理	(168)
附表 1 纯铜的国际铜协牌号(C)与相近的中国牌号(T)对照表	(170)
附表 2 常用简单黄铜国际铜协牌号(C)与相近中国牌号(H)对照表	(172)
附表 3 常用复杂黄铜国际铜协牌号(C)与相近中国牌号(HMe)对照表	(173)
附表 4 常用各类青铜国际铜协牌号(C)与相近中国牌号(Q)对照表	(175)
附表 5 常用各类白铜国际铜协(C)牌号与中国相近牌号(B)对照表	(177)
附表 6 锌白铜国际铜协(C)牌号与中国相近牌号对照表	(178)
参考文献	(179)
第 5 章 锌	(180)
1. 概述	(180)
2. 一般性能	(180)
2.1 物理性质	(180)
2.2 力学性能	(181)
3. 电化学特性	(181)

4. 锌镀层	(182)
5. 在各种介质中的耐蚀性	(182)
5.1 大气	(182)
5.2 淡水和海水	(184)
5.3 酸和碱溶液	(185)
5.4 有机和无机化合物	(187)
5.5 土壤	(187)
5.6 杂质和合金元素对耐蚀性影响	(187)
6. 在腐蚀工程中应用	(188)
6.1 镀锌层	(188)
6.2 锌阳极	(191)
6.3 锌电极	(193)
参考文献	(193)
第6章 锡和铅	(194)
1. 概述	(194)
2. 一般性能	(195)
3. 电化学特性	(196)
4. 在各种介质中耐蚀性	(198)
4.1 大气	(198)
4.2 淡水和海水	(199)
4.3 酸溶液	(201)
4.4 碱溶液	(204)
4.5 土壤	(204)
4.6 有机化合物	(205)
5. 在腐蚀工程中应用	(206)
5.1 镀层	(206)
5.1.1 锡镀层	(206)
5.1.2 热镀锡钢板(马口铁)	(207)
5.1.3 锡合金镀层	(208)
5.2 其它	(209)
参考文献	(210)
第7章 锆	(211)
1. 概述	(211)

2. 一般性能	(212)
3. 锆的电化学特性	(212)
3.1 锆及其化合物的电极电位	(212)
3.2 锆-水体系的电位-pH图	(214)
3.3 锆的阳极行为	(215)
3.4 锆的阴极行为	(216)
4. 锆在各种介质中的耐蚀性	(217)
4.1 水和水蒸汽	(217)
4.2 硫酸	(218)
4.3 盐酸及其它卤素酸	(220)
4.4 硝酸	(221)
4.5 磷酸	(222)
4.6 碱	(223)
4.7 无机盐	(223)
4.8 有机化合物	(225)
4.9 气体、熔盐和液态金属	(225)
4.10 冶金因素对锆的腐蚀影响	(226)
5. 提高锆的耐蚀性方法	(227)
5.1 强化表面氧化膜	(229)
5.2 电化学的阳极保护	(229)
5.3 缓蚀剂保护	(230)
6. 锆在防蚀工程中应用	(231)
参考文献	(233)
第8章 钨和钼	(235)
1. 概述	(235)
1.1 钼和钼合金分类	(235)
1.2 钨和钨合金分类	(236)
2. 一般性能	(239)
2.1 钨和钼的物理性质	(239)
2.2 钨和钼的化学性质	(240)
2.3 钨和钼的力学性能	(242)
2.3.1 钨的力学性能	(242)
2.3.2 钼的力学性能	(243)

3.	钨和钼在各种介质中的耐蚀性	(245)
3.1	电化学浸蚀	(245)
3.2	酸	(246)
3.3	盐和碱	(248)
3.4	液态金属	(249)
3.5	熔融盐	(251)
3.6	熔融玻璃	(251)
3.7	固体物质	(253)
3.8	卤素、碳氢化合物和硫化氢	(254)
4.	钨和钼的高温氧化与防护	(254)
4.1	钼的高温氧化	(255)
4.2	钼及其合金的抗氧化防护方法	(256)
4.2.1	中温长周期使用的涂层	(256)
4.2.2	高温短时使用的涂层	(258)
4.3	钨的高温氧化	(259)
4.4	钨及其合金的抗氧化防护方法	(260)
4.5	防护层系统的改进	(260)
5.	钨和钼的应用	(261)
5.1	钨及其合金的应用	(261)
5.2	钼及其合金的应用	(262)
	参考文献	(265)
第9章	钽和铌及其合金	(266)
1	概述	(266)
1.1	钽和铌的物理和力学性能	(266)
1.2	钽和铌及其合金的分类	(267)
1.2.1	合金化原则	(267)
1.2.2	工业用钽和铌合金的分类	(270)
2.	钽和铌及其合金的制造	(273)
2.1	钽和铌粉的制取	(273)
2.2	坯锭制取	(273)
2.3	塑性加工	(274)
2.4	热处理	(275)
2.5	切削加工	(275)

2.6 焊接	(276)
3. 钽和铌的耐蚀性	(276)
3.1 在酸和碱水溶液中的耐蚀性	(276)
3.1.1 在酸溶液中的耐蚀性	(279)
3.1.2 氢脆	(281)
3.2 在液态金属中的耐蚀性	(283)
4. 钽和铌与气体反应	(285)
4.1 与氢气反应	(285)
4.2 与氧气反应	(288)
4.3 与氮气反应	(291)
4.4 与空气反应	(293)
4.5 钽和铌及其合金抗氧化防护方法	(295)
5. 钽和铌的应用	(296)
5.1 化学工业中应用	(296)
5.2 电子工业中应用	(297)
5.3 合金添加剂	(298)
5.4 航空和航天工业中应用	(299)
5.5 超导材料	(299)
5.6 其它方向的应用	(300)
参考文献	(300)
第10章 贵金属	(302)
1. 概述	(302)
2. 一般性能	(302)
3. 贵金属在各种介质中的耐蚀性	(304)
3.1 金和金合金的耐蚀性	(304)
3.2 银和银合金的耐蚀性	(306)
3.3 铂和铂合金的耐蚀性	(309)
3.4 铱的耐蚀性	(311)
4. 贵金属在工业和日常生活中的应用	(312)
参考文献	(314)

第 1 章 铝及铝合金

1. 概 述

铝的密度小,比强度大,耐蚀性好,所以首先用于航空工业。铝还有其它许多优点,诸如导热和导电性能高,可焊,塑性好,易于加工成型以及优良的表面装饰性能等。在铝中加入其它元素制成合金,可大大提高其力学性能。因此在机械、化工、电子、电气、交通、运输、民用建筑、食品轻工以及人民日常生活的各个领域里都获得了广泛的应用。

目前世界铝的消费量每年大约以 5% 的速率增长。世界上铝的年产量仅次于钢铁,居有色金属之首。

铝合金的分类。铝合金有多种分类方法。按生产方法的不同,铝合金可分为铸造铝合金和变形铝合金两大类。我国按性能和用途可分为纯铝、防锈铝、硬铝、超硬铝、锻铝和特殊铝几类。分类及其代号的详细情况列于表 1-1。

表 1-1 铝合金类别及其代号对照

合金类别	纯铝	防锈铝	硬铝	超硬铝	锻铝	特殊铝
合金代号	L	LF	LY	LC	LD	LT
合金举例	L2	LF3	LY12	LC4	LD5	LT1

按热处理特点不同,变形铝合金可分为不可热处理强化的和可热处理强化的两大类。

热处理不强化的合金有纯铝、Al-Mn 和 Al-Mg 合金。

热处理强化的合金有 Al-Cu、Al-Cu-Mg、Al-Cu-Mn、Al-Cu-Li、

Al-Mg-Si、Al-Mg-Si-Cu、Al-Zn-Mg、Al-Zn-Mg-Cu 和 Al-Cu-Mg-Fe-Ni 等系合金。

在工业生产上，一般习惯于把铝合金按主要合金元素分为下列合金系：

纯铝系

Al-Mn 系

Al-Mg 系

Al-Mg-Si-(Cu)系

Al-Cu-Mn 系

Al-Cu-Mg 系

Al-Zn-Mg 系

Al-Zn-Mg-Cu 系

Al-Cu-Mg-Fe-Ni 系

世界大多数国家，也都是采用类似的分类方法。下面是美国铝业协会(AA)的铝合金分类方法：

1×××系	纯铝(99.0%以上)
2×××系	Al-Cu 系
3×××系	Al-Mn 系
4×××系	Al-Si 系
5×××系	Al-Mg 系
6×××系	Al-Mg-Si 系
7×××系	Al-Zn 系
8×××系	Al-其它元素

四位数字的含意为：第一位数字表示主要添加元素，代表合金系列。1×××系为纯铝(>99.0%)。第二位数字表示受控杂质的个数，后两位数表示纯度百分数中小数点后的数字。在2×××—8×××系合金牌号中，第二位数字为0表示原始合金，如果是其它数字则表示对原始合金改进的次数，后两位数字用于区别该系的不同合金。

美国和前苏联是两个铝合金生产大国，其中美国的变形铝合金约

有 170 种,前苏联约有 130 种。这两个国家对我国铝合金生产和发展影响都很大。附表 1 列出了中国和前苏联、美国变形铝合金的牌号对照情况,供读者参考。

2. 一般性能

2.1 物理性质

铝在元素周期表里属于 III A 族主族元素,原子序数 13,原子量 26.98。

铝的密度小(纯度 99.75% 的铝为 $2.703\text{g}/\text{cm}^3$),约为钢或铜的 $1/3$ 。通常铝合金的密度约在 $2.65\text{—}2.75\text{g}/\text{cm}^3$ 之间。如 Al-Mg 合金的密度小于 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$,而 Al-Cu 合金的密度大于 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ 。

铝的导电性仅次于银和铜。纯度越高,导电性能越好。99.97% 的纯铝约为铜导电率的 65.4%。由于铝的密度小,因此只要使用铜重量一半的铝便可通过和铜相同的电量。所以工业上大量推广以铝代铜。如电线、电缆和导电排等材料。铝合金的导电性除了和添加元素有关之外,还和 α 固溶体对元素的过饱和量有关。过饱和度越大,导电性越差。

铝的导热性能好。在 $0\text{—}100^\circ\text{C}$ 之间,铝的导热系数为 $2.26\text{J}/(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C})$ [$0.54\text{cal}/(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C})$],因此大量用铝作热交换器等部件。

铝对光和热都有良好的反射能力。高纯铝(99.996%)的热反射率为 85—95%。因此工业上应用高纯铝作太阳能的反射镜面,照明器具以及暖气设备的反射板等。

铝对电磁几乎没有影响,可以用铝材作为无磁性要求的各种电气装置。

铝有良好的核性能,热中子吸收截面较小,为 0.22 靶^①;铝在强烈的辐照之后力学性能变化很小,即辐照效应小。所以在原子能工业中用作燃料元件的包套材料,冷却管道等。

其它物理性质列于表 1-2。

① 1 靶 = $1\text{b} = 10^{-28}\text{m}^2$ 。

表 1-2 铝的物理性质

名 称		单 位	高纯铝(99.996%)	工业纯铝(99.5%)
熔点		°C	660.5	650
沸点		°C	2494	—
熔化潜热		J/g	1.08×10^{-4}	—
比热容(373K)		J/(g·K)	0.9349	0.9647
蒸发潜热		J/g	31033.8	31080
电导率		IACS	64.94	59
20°C电阻温度系数		1/°C	0.00429	0.004
电阻系数	0°C	$10^{-6} \cdot \Omega \cdot \text{cm}$	2.6548	—
	20°C		2.67	2.922
热反射率		%	85—95	
辐射率		%	100	
凝固体积收缩率		%	6.7	6.6
由熔点凝固体积收缩率		%	5.6	

2.2 力学性能

铝的强度中等,并随合金化而增大,随冷加工而硬化。因此铝合金的强度取决于合金化和加工工艺。一般说来,纯铝在退火状态的强度约80MPa,超硬铝的强度可达600MPa,所以铝可制作承受力较大的结构件。

铝的塑性好,可进行各种形式的压力加工。退火状态下的铝延伸率可达35%。随着合金化以及冷加工,延伸率下降。

铝的力学性能列于表1-3。

表 1-3 工业纯铝的室温力学性能

材料及状态	冷轧板材	退火板材
弹性模量 E , MPa	71000	71000
剪切模量 G , MPa	27000	27000
泊松系数 μ	0.31	0.31

续表

材料及状态	冷轧板材	退火板材
屈服强度 $\sigma_{0.2}$, MPa	100	30
抗拉强度 σ_b , MPa	150	80
延伸率 δ , %	6	35
断面收缩率 ψ , %	60	80
抗剪强度 σ_c , MPa	—	55
布氏硬度 HB	32	25
疲劳强度 σ_{-1} , MPa ^①	42—63 ^②	35

注：① 疲劳强度是由旋转试样受悬臂弯曲时测定的， $N=5 \times 10^8$ 。

② σ_{-1} 的大小在给定情况下与冷变形程度有关。

2.3 工艺性能

延展性：延展性能好，可以进行各种形式的压力加工，如压延、挤压、锻压、冲压等工艺。可以制成各种规格和形状的产品，如管材、棒材、型材、线材、板材、带材和箔材等。

切削性能：纯度越高，切削性能越差。强度高的铝合金，切削性能较好。

焊接性能：可以进行气焊、接触焊和氩弧焊等。合金元素少，焊接性能好。高硅、高钛的铝合金，焊接性能较差。

铝的其它工艺性能列于表 1-4。

表 1-4 熔铸、轧制、挤压和退火的温度范围

项 目	熔 炼	铸 造	轧 制	挤 压	退 火
温度范围, °C	720—760	700—760	290—500	250—450	低温退火 210—260 完工退火 310—410

3. 铝、铝合金及其应用

3.1 纯 铝

根据纯度不同，即铝中杂质含量的多少，把铝分为高纯铝和工业纯