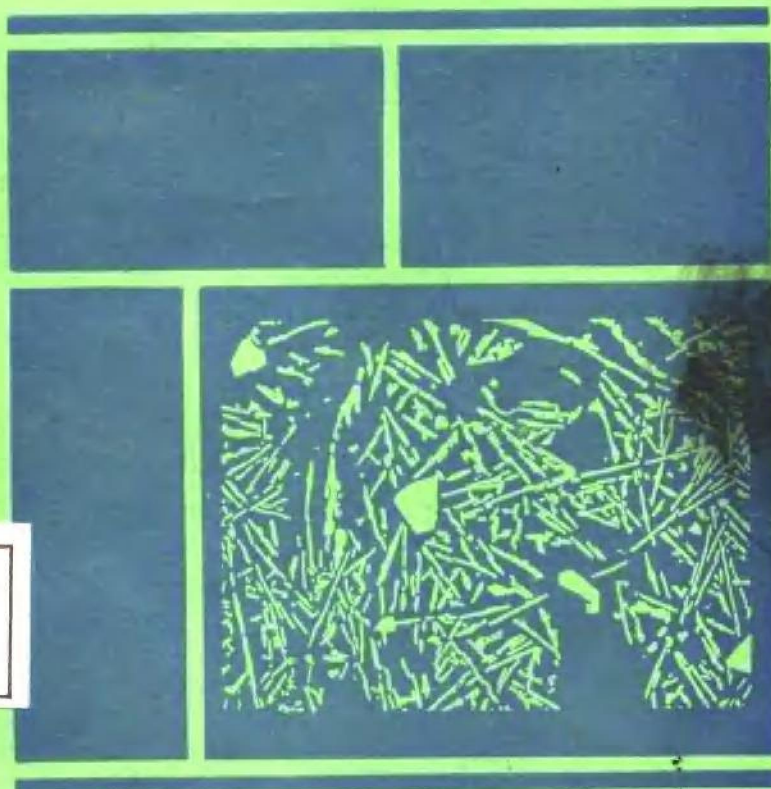


机械工程材料丛书

铝合金和钛合金

邢淑仪 王世洪 编



16.2

机械工业出版社

机械 工程 材料 丛书

铝 合 金 和 钛 合 金

邢淑仪 王世洪 编



机械工业出版社

本书是《机械工程材料》丛书之一,介绍各种机械上最常用的轻有色金属铝及其合金、新兴的轻有色金属钛及其合金。根据读者对象,书中除对这些合金的成分、组织和强化机理进行必要的阐述以外,对这些合金的选材和使用方面也作了介绍。

本书主要供机械工程行业的工程技术人员和高等工业院校中的有关师生参考使用。

铝合金和钛合金

邢淑仪 王世洪 编

责任编辑:张蕩玲

封面设计:刘代

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄两里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/32·印张 6 3/4·字数 145 千字

1987年10月北京第一版·1987年10月北京第一次印刷

印数 0,001—2,600·定价:1.65 元

统一书号:15033·6754

《机械工程材料丛书》出版说明

国民经济及科学技术的飞速进步，使机械工业产品朝着大型化、高速化、高性能、高精度方向发展。因而对材料科学提出愈来愈高的要求，新的材料不断出现。为了帮助在机械工程行业工作的中、高级工程技术人员开拓工程材料的知识领域，进行知识更新，正确选择和使用材料，充分发挥材料的性能潜力，使机械工业产品的水平得到进一步提高；同时也考虑到高等工业学校非材料专业本科生及研究生的机械工程材料课程涉及内容广泛而学时数有限，为使学生在学习机械工程材料课程时，有一套教学参考用书加以配合，我们组织编写了这套《机械工程材料丛书》，拟陆续出版十分册。这十分册是：《工程陶瓷材料》、《模具材料》、《工程塑料》、《低温材料》、《耐热钢及耐热合金》、《复合材料》、《胶接与密封材料》、《高强度及超高强度钢》、《耐磨及减摩材料》、《铝合金及钛合金》。

这套丛书的读者对象是：机械工程行业的中、高级技术人员，高等工业学校非材料专业的本科生及研究生。

丛书的内容以机械工程结构材料为主，适当介绍一些功能材料。内容的重点在于应用和选材，一般性谈及机理。阐述工程材料性能时，以使用性能为主，适当介绍其它性能，同时力求文字简洁，通俗易懂，便于自学。

由于条件和水平限制，特别是编审小组缺乏组织丛书编

写的经验，因此丛书内容难免有不妥之处。希望读者尤其是各高等工业学校从事机械工程材料教学的教师提出宝贵意见，帮助我们改进提高。

高等工业学校机电类
《机械工程材料及物理化学》教材编审小组
1985.2

前 言

铝及其合金在现代工程技术所用的各种材料中占有重要地位。其世界年产量已仅次于钢铁而跃居于第二位。如果说铝合金最初是在航空工业中崭露头角的话，那么，近几十年来，铝合金已经大大地冲出了航空部门，在国民经济的各部门中大显身手了。铝的产量与用途的快速增长，首先是因为铝及其合金具有优良的综合性能，尤其是密度低，容易加工成形，并且一部分铝合金的强度较之普通结构钢并不逊色。铝有很好的导热性和导电性。在许多情况下铝的抗腐蚀性也优良。此外，铝还可以进行多种表面精饰，使产品光泽漂亮、绚丽多彩。铝是地壳中储量最多的金属，也是铝得以广泛应用的原因之一。

钛是一种新兴的金属材料，作为结构材料本世纪五十年代首先应用于航空工业。由于钛及其合金具有一系列优异性能，所以很快就受到各工业部门的重视。近年来其应用范围逐渐扩大。钛的熔点比铁还高，而密度比铁小许多，这就使钛有可能在许多场合取代钢铁和铝合金，从而改善结构和装置的性能。钛还有很好的抗腐蚀性和低温性能。

我国的铝和钛资源丰富。经过多年努力，已经建立了自己的铝合金和钛合金体系。但是，在国民经济各部门中，除航空与航天部门以外，其他工业部门还较少使用铝及钛，使用经验也不足。这是和四个现代化建设的要求很不适应的。我们相信，这种状况一定会在较短时间内发生变化。铝合金和钛合金必将为我国各工业部门所普遍采用，为四个现代化

提供坚强的物质基础。

鉴于本书的读者对象主要是机械工业中的非材料专业人员，他们是材料的使用者，因此本书对于各种合金的成分、组织和有关机理方面仅作了一般的介绍，力求多阐述一些关于合金的性能和选用方面的知识。

本书的铝合金部分由邢淑仪执笔；钛合金部分由王世洪执笔。限于时间、篇幅和我们的水平，书中难免有不妥之处，欢迎读者指正。

目 录

前言

绪论	1
第一章 铝合金概论	5
§ 1-1 工业纯铝	5
§ 1-2 铝的合金化	10
§ 1-3 铝合金的分类及牌号	16
§ 1-4 铝合金的淬火与时效	18
§ 1-5 退火	28
第二章 变形铝合金	32
§ 2-1 防锈铝	32
§ 2-2 硬铝	37
§ 2-3 超硬铝	45
§ 2-4 锻铝	50
第三章 铸造铝合金	55
§ 3-1 铝硅系铸造铝合金	57
§ 3-2 铝铜系铸造铝合金	64
§ 3-3 铝镁系铸造铝合金	68
§ 3-4 其他铸造铝合金	70
第四章 铝合金的应用	72
§ 4-1 铝合金的机械性能特征	73
§ 4-2 铝合金的工艺性能	83
§ 4-3 选材实例	90
第五章 钛合金概论	97
§ 5-1 钛合金的生产和发展简况	97
§ 5-2 钛及钛合金的基本性质	99

§ 5-3 钛合金的成分与分类	104
§ 5-4 钛合金的组织特点	115
第六章 工业钛合金	120
§ 6-1 α 型钛合金	120
§ 6-2 $\alpha+\beta$ 型钛合金	125
§ 6-3 β 型钛合金	147
§ 6-4 钛合金的热处理	151
第七章 钛合金的工艺性能及使用性能	176
§ 7-1 钛合金的工艺性能	176
§ 7-2 钛合金的使用性能	182
第八章 钛合金的应用	194
§ 8-1 钛合金在军事工业部门中的应用	194
§ 8-2 钛合金在民用工业部门中的应用	197
附录	205
一、各国变形铝合金牌号对照表	205
二、各国铸造铝合金牌号对照表	206
参考文献	207

绪 论

我们在习惯上把铝和镁称为轻金属,因为它们自重轻,常被用来减轻零件和结构的重量。在此种意义上,钛和用途尚少的铍也应归入轻金属的范围。这四种金属的相对密度处于1.7(Mg)到4.5(Ti)的区间,而老的传统的结构用金属的相对密度则高达7.9(Fe)和8.9(Cu)。在元素周期表中,还有好几种金属比钛轻,例如锂、钠等,但因种种原因,它们一般不能作为结构材料使用。

轻金属的密度小这一个特点,使其与交通运输工业首先是航空和航天工业结下了不解之缘。因为在这些部门中减轻结构本身重量具有决定性的意义。运输工具本身越重,使自己本身运动就越要消耗能量,其运输能力也就越小。可以断定,如果没有铝合金,本世纪初产生的航空工业就不会有今天的光辉成就。据计算,在人造卫星的发射中,最上一层重量每增加一公斤,整个火箭系统的重量就要增加千百公斤!节约能源,增加有效载荷,这些都是现代各类机械、设备的共同追求目标,轻金属正是在这种需求下得到了日益广泛的应用。在许多机械中,不但强度和重量之比重要,而像抗弯刚度等参数与重量之比更为重要。例如,简单的矩形梁的刚度正比于材料弹性模量与厚度的立方之积,在同样刚度的条件下,钢铁梁重10kg时;钛梁为7kg;而铝梁仅4.9kg重。镁和铍则更轻(见图1)。在同样重量的条件下,刚度之比为钢:钛:铝:镁=1:2.9:8.2:18.9。

除去重量方面的优点外,轻金属还有许多科学技术方面

值得重视的性能。像铝的高导热性和导电性使它可以在许多地方代替铜；钛的杰出的抗腐蚀性使它在多种工业中发挥作用。表1概括地归纳了轻金属的若干物理性质,作为对比,也列出了铁和铜在这方面的性质。

决定一种金属能不能得到大规模应用的因素,除去其本身的性能以外,非常重要是该金属的资源状况。轻金属在地壳中的储量都不算少,其中尤以铝的储量最多。从表2看出,铝是所有金属元素中储量最多的,而传统的金属除铁外,铜、铅、锌等的量皆因少于0.1%而未在表中列出。

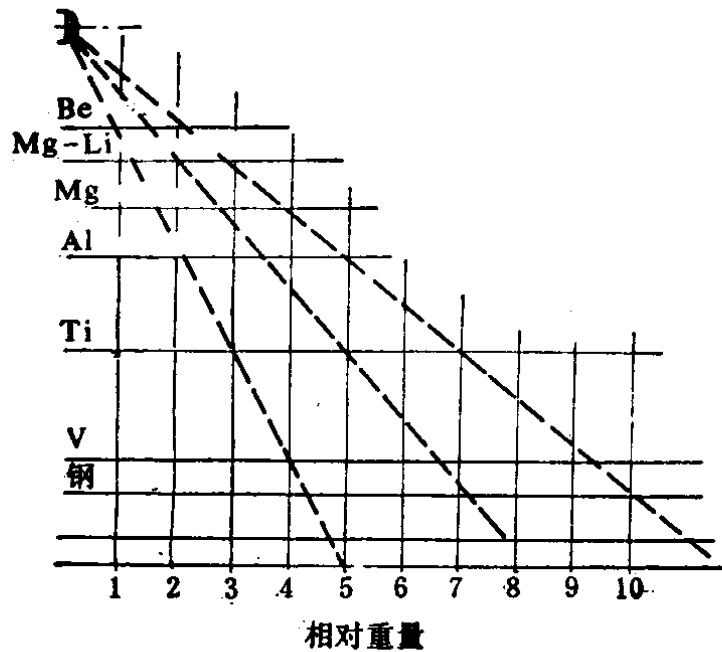


图1 等刚度下不同材料的相对重量图
(虚线代表不同的刚度水平, 虚线与对应金属标志线的交点即为该金属的相对重量)

表1 某些纯金属的若干物理性能

性 能	单 位	Al	Mg	Ti	Be	Fe	Cu
熔 点	℃	660	650	1678	1287	1535	1083
相对密度 (d)	/	2.70	1.74	4.51	1.85	7.87	8.96
弹性模量 (E)	GPa	70	45	120	295	211	130
比模量 (E/d)	GPa	26	26	26	160	27	14
平均比热 ($0\sim 100^{\circ}\text{C}$)	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	917	1083	528	2052	456	386

(续)

性 能	单 位	Al	Mg	Ti	Be	Fe	Cu
导热系数 (20~100℃)	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	238	156	26	194	78	397
热膨胀系数 (0~100℃)	$10^{-6} K^{-1}$	23.5	26.0	8.9	12.0	12.1	17.0
电 阻 率 (20℃)	$\mu\Omega \cdot cm$	2.67	4.2	54	3.3	10.1	1.69

表 2 主要元素地壳储量(相对)

元 素 名	氧	硅	铝	铁	钙	镁	钠	钾	钛	氢	锰
重 量	45.2	27.2	8.0	5.8	5.06	2.77	2.32	1.68	0.86	0.14	0.10

图 2 所示的二十世纪以来一些材料的世界产量增长情况也表明, 当今世界上, 产量增长最快的两种材料是铝和塑料。从 1900 年到 1950 年期间, 铝的年产量从六千吨增长到一百五十万吨。随后铝的年产量更超过铜而仅次于钢铁。1979 年, 铝的产量已达一千五百万吨。近年来, 钛的产量也以年 8~10% 的速度增长着。

限制轻金属使用的主要障碍有两个。一个是价格问题, 尤其是钛, 直到目前还比较昂贵, 因此民用工业应用时就存在经济上是否适宜的问题。另外一个因素是轻金属的有些性能仍然不及钢铁。例如硬度、耐磨性, 耐热性。在不允许加大零件尺寸的部位, 或者要求单位面积上承载能力极高时, 轻合金也远不如超高强度钢。因此, 即使在航空、航天器的关键受力或受热部分, 如飞机起落架上的主要受力件、飞机的大梁、发动机的主要轴类零件和受热零件, 其结构材料仍然是钢铁和高温合金的领地。图 3 表示不同温度下各种合金的比屈服强度, 仅在 500℃ 以前, 钛合金在这方面才居于领先地位。

从结构材料角度来看, 轻金属中铝用得最广泛, 钛具有很大的潜力。

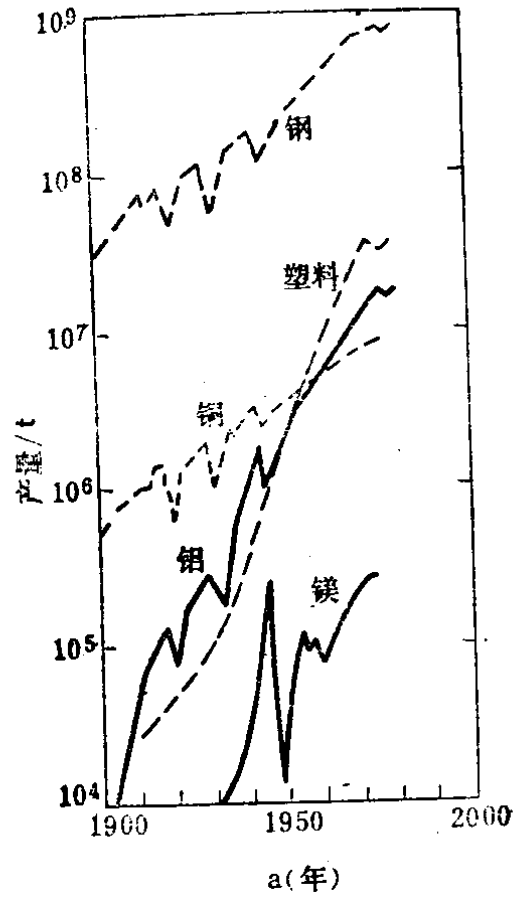


图2 金属与塑料的世界产量

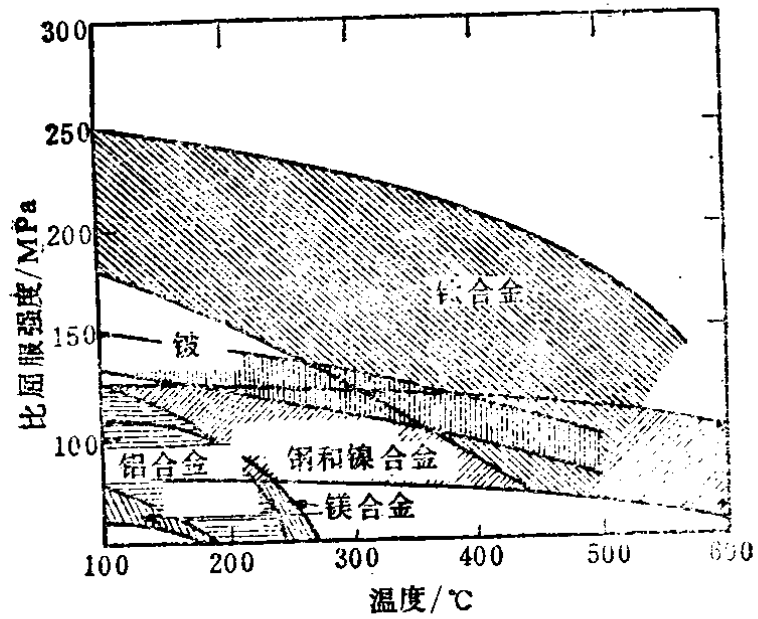


图3 各种金属材料比屈服强度（屈服应力与相对密度之比）与温度的关系

第一章 铝合金概论

§ 1-1 工业纯铝

铝的熔点为660℃，具有面心立方结构，点阵常数在25℃时为0.404nm。铝没有同素异构转变。由于铝具有面心立方结构，所以其塑性优异，适合各种形式的冷热加工。并且因为纯铝的强度不高，虽不适合做承力大的结构材料使用，但却有利于铝的加工，即可以在省力的条件下将铝制成各种形状的零件。例如，1955年匈牙利就发行了一种用0.009mm厚的铝箔制成的邮票。

表1-1列举了工业纯铝板的室温性能和低温性能，这些数据说明铝确实宜于制造各种受力不大却有复杂形状的工业和民用产品。

表 1-1 工业纯铝板材的室温和低温性能

状 态	E	G	泊松系数	$\sigma_{0.2}$	σ_b	δ	ψ	HB	σ_{-1}	σ_b (-70℃)	δ (-70℃)
退 火	71000	27000	0.31	50	80	35	80	25	35	105	43

注：E、 $\sigma_{0.2}$ 、 σ_b 等强度指标的单位为MPa； δ 、 ψ 为%。

纯铝的导电、导热性能均很好，约为铜的60%，所以可作为铜的代用材料。一般来说，杂质和合金元素以及冷变形都降低铝的导电和导热能力。不过，有些铝合金在降低这些性能不多的条件下，会使强度增加，从而有利于制造承受较大应力的导电、导热零件。表1-2举出常用的导电、导热铝及铝合金的有关性能。

铝的化学活泼性很高，铝的标准电极电位很低（ -1.67V ）。在大气中极易和氧作用生成一层氧化膜，膜的厚度约 10nm 。有意思的是这层 Al_2O_3 膜致密而且牢固，能够防止铝继续氧化。因此铝在大气中是抗腐蚀的。为使铝的抗蚀性进一步提高，广泛采用所谓阳极氧化的工艺，即用电化学的方法在铝或其合金的表面上人工地覆盖一层氧化膜。因为这种氧化层比自然形成的氧化膜厚得多（可达 $10\mu\text{m}$ ），所以它不但改善了耐腐蚀性，而且也提高了抵抗机械损伤的能力。阳极氧化工艺还能够使铝的氧化膜呈现各种美观的颜色，极有利于铝的装饰性用途。

表 1-2

材 料 名 称	纯铝（退火）	纯铝（冷变形）	LF21M	LD2CS
相 对 导 电 率 (以Cu为100%)	62	61	50	45
导热系数/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	221	221	192	180

在侵蚀性介质中，铝的抗腐蚀性取决于氧化膜的稳定性。 Al_2O_3 具有酸、碱两性氧化物的性质。因此在酸性和碱性介质中都容易被溶解，使铝进一步受到腐蚀。铝在中性盐类溶液中的腐蚀行为，主要与溶液中的阴、阳离子的特性有关。当溶液中含有活性离子（尤其是氯离子）时，由于它们破坏氧化膜而产生点状腐蚀，所以铝在海水中的抗腐蚀性很差。铝在氧化性酸中的抗腐蚀性和酸的浓度有关。当硝酸浓度超过30%时，随浓度增加，稳定性提高，当浓度达80%时，铝的抗腐蚀能力甚至高于铬镍不锈钢。

概括起来，铝是一种极好的金属材料，它的特点可以归纳为：

1. 铝很轻，其合金的密度仅为钢铁的三分之一左右。
2. 在大气中，在与食物接触中，以及我们日常使用的许多气体和液体中，铝都是不发生反应的，也就是稳定的。
3. 铝有高反射性。再加上其银白色表面，使铝具有在建筑物内外适用的装饰特性。铝的表面光泽可以用塑料、油漆或者适当的阳极化来保护。许多时候仅靠自然形成的氧化层也足够起保护作用。
4. 铝合金的强度可以等于甚至超过普通碳素结构钢。
5. 铝有高弹性，对于某些经受冲击载荷的结构有意义。铝的韧性在低温下减少不明显，但大多数钢却明显减少。
6. 铝很易加工成形，例如可以轧制成极薄的箔片(厚度小于百分之一毫米)。
7. 铝在导热和导电性方面与铜不差多少。

由于上述性质，再加上其他物理和化学性质，铝在各部门得到广泛应用。表1-3可做为这方面的概括。

表 1-3 铝的特性及其在各应用部门中的重要性

应用方面	特 性				半 成 品 类 型					
	低 密 度	高 导 热 (电) 性	腐 蚀 抗 力	装 饰 方 面	铸 件 、 锻 件	板 材	冲 压 材	挤 压 材	纜 、 线 材	箔 材
交通运输	●		○	○	○	○		○		
建 筑	○		○	○		○		○		
包 装	+	+	●	○		○	○		○	
电力工业	+	●	○				○	○	○	○
家 用	○	●	●	○		○				○
机器、设备	●	○	○	○	○	○		○		
化学与食品工业	○	○	●	○	+	○		○		○

注：+希望的；○重要的；●很重要的

在大多数国家中，铝的主要使用领域是：建筑与结构、容器与包装、运输、电力系统。预计，铝的进一步应用也仍是交通运输工业。表 1-4 给出了美国 1976 年和 1977 年度的市场用量情况。

表 1-4 美国的铝的市场用量

市场类型	1977		1976		增 减 %
	10 ⁶ kg	%	10 ⁶ kg	%	
建筑与结构	1385	23.1	1322	23	+4.7
运 输	1303	21.7	1106	19.3	+17.8
消 费 用 品	477	7.9	640	8.1	+2.4
电 力	601.2	10	590	10.3	+1.8
机械与装置	414	6.9	407	7.1	+1.8
容器与包装	1259	20.8	1156	20.2	+8.1
其 他	252	4.2	310	5.4	-18.8
出 口	326	5.4	376	6.6	-13.2
总 计	6010		5736		+4.8

铝的重要性还可以从工业发达国家的人均消费量上看出(图 1-1)。发达国家的人均消费量进入八十年代后都突破了 10kg/a(年)，而我国则还不到 0.5kg/a(年)。

使用铝及其合金，到目前为止仍然存在价格比钢铁贵的问题。这是因为铝的冶炼消耗电能较多。但从图 1-2 可见，随着科技进步，生产铝的能耗也在不断降低。特别是，采用铝结构又有节能的效果，在许多场合完全可以抵消原料贵的缺点。例如，八十年代，美国汽车工业平均每造一台车用 36kg 铝代替钢材，若按一台车使用 10 年计算，可以节油 2t 多，其价格比炼铝多耗的电费贵许多倍。图 1-3 为一列地铁铝制列车，这种列车由于经常频繁加速，故采用铝代钢减轻重量所节约的能量费用，一般地在 1~2 年内就能补偿多花的费用。