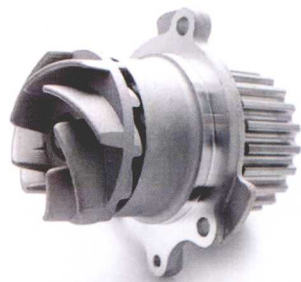


轻合金 及其工程应用

王渠东 王俊 吕维洁 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

轻合金及其工程应用

王渠东 王俊 吕维洁 编著



机械工业出版社

本书系统地介绍了轻合金的性能及其工程应用。其主要内容包括：轻合金概述、铝合金的性能、镁合金的性能、钛合金的性能、轻合金在航空航天中的应用、轻合金在机械工程中的应用、轻合金在电子电气工程中的应用、轻合金在化工中的应用、轻合金在建筑中的应用。本书针对工程应用主要以表格形式介绍了各种轻合金的牌号和性能，以工程实例介绍了各种轻合金的工程应用，实用性强。

本书可供航空航天、机械、电子电气、化工、建筑等领域的工程技术人员使用，也可以供相关院校师生和研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

轻合金及其工程应用/王秉东, 王峻, 吕维洁编著. —北京: 机械工业出版社, 2015.7
ISBN 978-7-111-50920-2

I. ①轻… II. ①王…②王…③吕… III. ①轻有色金属合金 IV. ①TG146.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 165592 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑: 陈保华 责任编辑: 陈保华 高依楠
版式设计: 霍永明 责任校对: 李锦莉 程俊巧
封面设计: 马精明 责任印制: 康朝琦
北京京丰印刷厂印刷
2015 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷
169mm × 239mm · 22.75 印张 · 505 千字
0 001—3 000 册
标准书号: ISBN 978-7-111-50920-2
定价: 59.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
电话服务 网络服务

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

策划编辑: 010-88379734

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

前 言

轻金属一般是指密度小于 $4.5\text{g}/\text{cm}^3$ 的金属。其中，铝、镁、钛（密度分别为 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ 、 $1.7\text{g}/\text{cm}^3$ 、 $4.5\text{g}/\text{cm}^3$ ）应用最广泛，通常所称的轻金属即指铝、镁、钛，其相应的铝合金、镁合金、钛合金则被称为轻合金。轻合金是国民经济建设和国防建设中的重要物质基础。

铝合金具有密度小、导热性好、易于成形、价格低廉等优点，已广泛应用于航空航天、交通运输、轻工建材等领域，是轻合金中应用最广、用量最大的合金。

镁合金具有密度小，比强度、比刚度高，阻尼性、切削加工性、导热性好，电磁屏蔽能力强，尺寸稳定，资源丰富，易回收，无污染等优点，在汽车、通信电子和航空航天等领域正得到日益广泛的应用。近年来镁合金在世界范围内的年增长率高达 $10\% \sim 20\%$ ，显示出了广阔的应用前景。

钛合金具有密度小、耐腐蚀性好、耐热性高、比刚度和比强度高等优点，是航空航天、石油化工、生物医学等领域的理想材料；同时，钛的无磁性、钛钎合金的超导性、钛铁合金的储氢能力等，使其在高技术方面发挥着重要作用。

近年来，国内外在轻合金研究、生产技术、工程应用方面都获得了迅速的发展，推动我国轻合金研究开发、生产技术和工程应用的进一步发展，迫切需要为广大科技人员、院校师生及应用人员提供轻合金及其应用的专业书籍，有鉴于此，我们组织编写了本书。

本书参阅了国内外众多的文献和专著，也包含作者的部分成果，在书中附有大量的图例，数据翔实，在每章后面都附有大量参考文献，为读者进一步查阅提供了便利条件。本书由上海交通大学材料科学与工程学院王渠东教授组织编写，参加编写的有王渠东（第1、3、5、6、7章）、王俊（第2、4、7章）、吕维洁（第8、9章）。全书由王渠东负责统稿和审校。此外，周浩、王立强、蔡西川参加了本书的资料收集、整理等工作。

在本书编著过程中，参阅和列出了国内外众多的参考文献和著作，在此作者向参阅文献的所有作者表示感谢！本书涉及的内容广泛，由于作者水平及时间有限，难免存在缺点和不足之处，敬请读者批评指正。

作者

目 录

前言

第1章 轻合金概述	1
1.1 轻合金的分类	1
1.1.1 铝合金的分类	1
1.1.2 镁合金的分类	6
1.1.3 钛合金的分类	8
1.2 轻合金的物理、化学性质	12
1.2.1 铝合金的物理、化学性质	12
1.2.2 镁合金的物理、化学性质	17
1.2.3 钛合金的物理、化学性质	21
1.3 轻合金的力学性能	23
1.3.1 铝合金的力学性能	23
1.3.2 镁合金的力学性能	29
1.3.3 钛合金的力学性能	34
参考文献	39
第2章 铝合金的性能	41
2.1 纯铝	41
2.1.1 概述	41
2.1.2 纯铝的性能	42
2.1.3 纯铝典型应用举例	44
2.2 铸造铝合金	46
2.2.1 铸造铝合金分类和状态表示方法	46
2.2.2 铸造铝合金的工艺特点	49
2.2.3 铸造方法	52
2.2.4 铸造铝合金的应用概况	54
2.2.5 典型铸造铝合金性能和应用举例	55
2.3 变形铝合金	60
2.3.1 变形铝合金的分类	60
2.3.2 变形铝合金的牌号及状态表示方法	60
2.3.3 变形铝合金的特点及应用概况	78
2.3.4 常用变形铝合金	80
参考文献	84
第3章 镁合金的性能	85
3.1 纯镁	85

3.1.1	元素特征	85
3.1.2	晶体结构	85
3.1.3	物理性质	86
3.1.4	热性能	86
3.1.5	力学性能	88
3.2	镁合金的牌号和一般力学性能	89
3.2.1	镁合金牌号	89
3.2.2	拉伸和压缩性能	91
3.2.3	应力-应变曲线	91
3.2.4	压杆强度	95
3.2.5	支承强度	97
3.2.6	剪切强度	98
3.2.7	硬度和耐磨性	99
3.2.8	韧性	100
3.2.9	减振性能	100
3.3	镁合金的高温力学性能	101
3.3.1	砂型铸件	101
3.3.2	压铸件	121
3.3.3	变形加工产品	123
3.4	镁合金的疲劳和断裂抗力	138
3.4.1	疲劳机理	138
3.4.2	疲劳裂纹的扩展	140
3.4.3	断裂韧度	141
3.4.4	腐蚀疲劳	144
	参考文献	145
第4章	钛合金的性能	146
4.1	纯钛	147
4.1.1	钛的力学性能	147
4.1.2	杂质元素对钛性能的影响	148
4.1.3	纯钛的组织与结构特征	149
4.1.4	纯钛的加工变形性能	149
4.1.5	工业纯钛的牌号、性能及用途	152
4.2	变形钛合金	153
4.2.1	变形钛合金的合金元素与基本性能特点	153
4.2.2	结构钛合金	155
4.2.3	热强钛合金	163
4.3	铸造钛合金	169
4.3.1	钛合金的熔炼浇注	170
4.3.2	铸造钛合金的组织、热处理和力学性能	172

284.4	钛合金的其他处理工艺	182
288	4.4.1 钛合金的焊接	182
308	4.4.2 表面化学处理	183
308	4.4.3 钛的表面加工强化	185
308	4.4.4 耐蚀性表面处理	185
308	4.4.5 钛的热氢处理	186
308	参考文献	187
第5章 轻合金在航空航天中的应用		189
189	5.1 铝合金在航空航天中的应用	189
200	5.1.1 铝合金在航空航天中的应用概况	189
209	5.1.2 超高强度铝合金在航空航天中的应用	193
209	5.1.3 超塑性铝合金在航空航天中的应用	195
209	5.1.4 铝锂合金在航空航天中的应用	197
209	5.1.5 铝钪合金在航空航天中的应用	199
209	5.1.6 铍铝合金在航空航天中的应用	201
209	5.2 镁合金在航空航天中的应用	203
209	5.2.1 概述	203
209	5.2.2 航空航天常用镁合金材料的性能与用途	204
209	5.2.3 主要航空航天器零部件的镁合金应用情况	207
209	5.3 钛合金在航空航天中的应用	211
209	5.3.1 前言	211
209	5.3.2 钛的生产及航空航天用钛概述	212
209	5.3.3 钛在航空航天中的实际应用	214
209	参考文献	228
第6章 轻合金在机械工程中的应用		231
231	6.1 铝合金在机械工程中的应用	231
231	6.1.1 铝合金在汽车中的应用	231
231	6.1.2 铝合金在高速列车中的应用	237
231	6.1.3 铝合金在造船工业中的应用	241
231	6.1.4 铝合金在其他机械领域中的应用	248
231	6.2 镁合金在机械工程中的应用	250
231	6.2.1 镁合金在汽车工业上的应用	250
231	6.2.2 镁合金在摩托车上的应用	261
231	6.2.3 镁合金在自行车上的应用	264
231	6.3 钛合金在机械工程中的应用	266
231	6.3.1 前言	266
231	6.3.2 汽车中使用钛的部件	267
231	6.3.3 汽车用钛的可能性	271
231	6.3.4 其他应用	278

参考文献	282
第7章 轻合金在电子电气工程中的应用	284
7.1 铝合金在电子电气工程中的应用	284
7.1.1 铝及铝合金在导线上的应用	284
7.1.2 铝及铝合金在变压器及电机等中的应用	287
7.1.3 铝及铝合金在电容中的应用	289
7.1.4 铝及铝合金在通信设施中的应用	291
7.1.5 铝及铝合金在电子部件中的应用	292
7.1.6 铝及铝合金在家用电器上的应用	297
7.2 镁合金在电子器材中的应用	300
7.2.1 镁合金制造电子器材壳体的优越性	300
7.2.2 镁合金在电子器材的应用实例	302
参考文献	309
第8章 轻合金在化工中的应用	312
8.1 铝合金在化工中的应用	312
8.1.1 铝合金在容器中的应用	312
8.1.2 铝合金在石油化工中的应用	316
8.1.3 铝合金在热交换器中的应用	319
8.1.4 铝合金在化工防腐中的应用	320
8.2 钛合金在化工中的应用	321
8.2.1 前言	321
8.2.2 钛制设备的发展	322
8.2.3 常用牌号及产品形式	323
8.2.4 钛制设备的应用	324
8.2.5 化工设备用钛腐蚀介质及腐蚀环境分析	331
8.2.6 钛在化工装置中的应用分析	334
参考文献	337
第9章 轻合金在建筑中的应用	339
9.1 铝合金在建筑中的应用	339
9.1.1 建筑用铝的发展	339
9.1.2 建筑用铝的特点及分类	339
9.1.3 围护型铝结构的应用实例	340
9.1.4 铝合金在承重结构中的应用	341
9.1.5 隔热保温铝合金	344
9.1.6 铝合金在建筑施工中的应用	345
9.2 钛合金在建筑中的应用	346
9.2.1 前言	346
9.2.2 钛作为建材的应用实例	348
参考文献	353

第1章 轻合金概述

轻金属通常是指密度小于 4.5g/cm^3 的金属。其中，铝、镁、钛的密度分别为 2.7g/cm^3 、 1.7g/cm^3 、 4.5g/cm^3 ，应用最广泛，通常所称轻金属即指铝、镁、钛，其相应的铝合金、镁合金、钛合金则被称为轻合金。轻合金具有密度小，比强度、比模量高，力学性能优良，是国民经济建设和国防建设中的重要物质基础，在航空航天、交通运输、机械、电子电气、化工、建筑等工程中已经得到了广泛应用，其应用领域和生产量还在迅速增加。

铝合金具有密度小、导热性好、易于成形、价格低廉等优点，已广泛应用于航空航天、交通运输、轻工建材等部门，是轻合金中应用最广、用量最大的合金。

镁合金具有密度小，比强度、比刚度高，阻尼性、切削加工性、导热性好，电磁屏蔽能力强，尺寸稳定，资源丰富，易回收，无污染等优点，在汽车工业、通信电子工业和航空航天工业等领域正得到日益广泛的应用。近年来镁合金在世界范围内的年增长率高达 $10\% \sim 20\%$ ，显示出了极好的应用前景。

钛合金密度小，耐腐蚀性好，耐热性高，比刚度和比强度高，是航空航天、石油化工、生物医学等领域的理想材料。同时，钛的无磁性、钛钕合金的超导性、钛铁合金的储氢能力等，使其在高技术方面发挥着重要作用。

1.1 轻合金的分类

根据金属的种类，可以将轻合金分为铝合金、镁合金、钛合金等；根据合金的组元数目，可以将轻合金分为纯金属、二元合金、三元合金、多元合金；根据制备和加工方法，可以将轻合金分为铸造合金、变形合金；根据用途，可以将轻合金分为焊接合金、中间合金、轴承合金、医用合金等。下面分别介绍铝合金、镁合金、钛合金的分类情况。

1.1.1 铝合金的分类

铝合金按加工方法可以分为铸造铝合金和变形铝合金。

铸造铝合金按其化学成分可以分为铝硅系合金、铝铜系合金、铝镁系合金和铝锌系合金等。

变形铝合金又分为不可热处理强化型铝合金和可热处理强化型铝合金。不可热处理强化型铝合金不能通过热处理来提高力学性能，只能通过冷加工变形来实现强化，主要包括高纯铝、工业纯铝以及防锈铝等。可热处理强化型铝合金可以通过淬火和时效等热处理手段来提高力学性能，主要包括硬铝、锻铝、超硬铝和特殊铝合金等。

1. 铸造铝合金

(1) **Al-Si 系铸造铝合金** 这类合金即著名的硅铝明，具有优良的铸造工艺性和气密性，中等强度，适合在常温下使用，可生产形状复杂的铸件，应用很普遍。Al-Si 系合金是航空工业应用最广泛的一类铸造铝合金，具有良好的工艺性和耐蚀性。简单二元 Al-Si 系合金，如 ZAlSi12，铸造性很好，但强度较低，大多用于金属型铸造和压力铸造，生产形状复杂、受力小的仪表壳体。除了上述简单二元 Al-Si 系外，其他合金均单独或同时加入 Cu、Mg 生成强化相 Mg_2Si 、 $CuAl_2$ 或 W 相 ($Al_xMg_5Si_4Cu_4$)，赋予合金以热处理强化的能力。Al-Si-Mg 系铸造铝合金，如 ZAlSi7Mg、ZAlSi9Mg 等。在 Al-Si 二元合金中添加 Mg，形成强化相 Mg_2Si ，能显著提高合金的时效强化能力，改善合金的力学性能。ZAlSi7Mg 合金铸造性能接近 ZAlSi12，主要用于铸造壁薄、形状复杂和承受中等负载的零件。ZAlSi9Mg 在铝硅合金中，强度高，铸造性能也好，但吸氢性强，容易生成气孔，因此需在压力下结晶，用于铸造承受大负载的复杂零件。Al-Si-Mg-Cu 系铸造铝合金和前述铝硅合金相比，降低了硅含量并增添了铜，改善了合金的耐热性，如 ZAlSi5Cu1Mg。ZAlSi5Cu1Mg 合金一般在人工时效状态下使用，强化相为 Mg_2Si 及 $CuAl_2$ ，室温性能与 ZAlSi9Mg 合金相当，但高温性能超过 ZAlSi9Mg，除可在常温下使用外，也适于制作 250℃ 以下工作的零件，ZAlSi5Cu1Mg 合金的缺点是耐蚀性差。

(2) **Al-Cu 系铸造铝合金** 该系合金的主要强化相是 $CuAl_2$ ，它本身具有较强的时效硬化能力和热稳定性，适合在高温工作，同时也有较高的室温强度，缺点是铸造工艺性及耐蚀性较差。航空领域常用的此类合金有 ZAlCu4、ZAlCu5Mn。ZAlCu4 合金属于简单的 Al-Cu 二元合金，该合金耐蚀性较差，人工时效状态尤为明显，适用铸造 200℃ 以下的承受中等负荷的形状简单零件。ZAlCu5Mn 属于添加了少量 Ti 的 Al-Cu-Mn 系合金，基本相组成为 $\alpha(Al) + CuAl_2 + T(Al_{12}CuMn_2)$ 。 $CuAl_2$ 是主要时效强化相，T 相有很高的热稳定性，固溶在 α 相中的 Mn，有降低基体原子扩散速度、延缓时效过程的作用，使合金的沉淀硬化效果保持到更高的温度，从而使合金具有优良的常温和高温性能，可在 250℃ 以下使用。该合金的缺点是铸造工艺性较差，气密性较低。为了进一步提高 Al-Cu 系铸造铝合金的耐热性，同时改善合金的综合性能，在 Al-Cu 系合金中，发展出了一系列的新型高强或耐热铝合金，如属于 Al-Cu-Mn-Cd 系的 ZAlCu5MnCd 及 ZAlCu5MnCdV 合金，属于 Al-Cu-RE 系的 ZAlCu8RE2Mn1 及 ZAlRE5Cu3Si2 合金，属于 Al-Cu-Ni 系的 ZAlCu5NiCoZr 合金等。

(3) **Al-Mg 系铸造铝合金** Al-Mg 系铸造铝合金又称耐蚀铸造铝合金，属于高强和高耐蚀性合金，具有良好的切削加工性能，在造船工业和食品、化工部门应用较多。缺点是耐热性和铸造工艺性差。属于此系的常用合金有 ZAlMg10 与 ZAlMg8Si1。ZAlMg10 是高镁铝合金，固溶处理和淬火后 (T4)，具有高的综合力学性能，并具有良好的耐蚀性能，但组织和性能的稳定性的稳定性差。ZAlMg8Zn1 针对上述缺陷，添加了 Zn，降低了 Mg 的含量，提高了铸造性能和时效稳定性，淬火后自然时效 10 年，塑性也不降低。适合于铸造强度高、耐蚀性好、承受较大载荷的铸件，如海水泵壳体、舷窗框和支架等。

(4) **Al-Zn 系铸造铝合金** Al-Zn 系铸造铝合金的特点是具有自淬火效应，铸造成

形后即可直接进行人工时效，因而省去了淬火工序，铸件的内应力大为减少。它适于制造尺寸稳定性要求高的铸件，其缺点是密度较大，耐热性很差，耐蚀性也比铝硅系合金差，故其应用受到限制。属于此系的常用合金有ZAlZn11Si7。这种合金的耐热性差，强度不高，耐蚀性中等，适于压铸工作温度低于200℃的压铸件。ZAlZn6Mg合金取消了Si，增加了Mn和Ti，改善了耐蚀性，提高了强度和塑性，适于砂型铸造空压机活塞、气缸座和仪表壳等。

2. 变形铝合金

(1) 不可热处理强化型铝合金

1) 高纯铝。美国通常把纯度（铝的质量分数）大于99.80%的铝就叫作高纯铝（high pure aluminium）并细分为次超高纯铝（铝的质量分数99.95%~99.949%）、超高纯度铝（铝的质量分数99.996%~99.999%）和极高纯度铝（铝的质量分数99.999%以上）。我国则将纯度超过99.996%的纯铝称为高纯铝。高纯铝呈银白色，表面光洁，具有清晰结晶纹，不含有夹杂物。高纯铝具有低的变形抗力、高的电导率及良好的塑性等性能，主要被应用于科学研究、电子工业、化学工业及制造高纯合金、激光材料及一些其他特殊用途。

2) 精铝。一般指纯度为99.95%~99.996%的铝。我国塑性变形加工工业纯铝的牌号有（括号前为新牌号、括号内为曾用牌号）1A99(LG5)、1A97(LG4)、1A95、1A93(LG3)、1A90(LG2)、1A85(LG1)，我国以1A99的纯度最高（99.99%），依次下降，1A85的纯度为99.85%。主要杂质为铁、硅和铜。

精铝除具有铝的一般特性外，由于纯度高，还具有以下特点：导电导热性好，退火状态20℃时的电导率为64.5% IACS；经电解抛光的表面对可见光的反射率高，可达85%~90%；耐蚀性和焊接性能极好；切削性能差；强度比工业纯铝的低，并随冷变形量的增大而提高，以1A99为例，冷变形量为10%~75%时，抗拉强度 $R_m = 59 \sim 120$ MPa，规定塑性延伸强度 $R_{p0.2} = 57 \sim 115$ MPa，断后伸长率 $A = 40\% \sim 50\%$ 。强度差别取决于晶粒的大小和杂质铁、硅、铜的含量。铝的纯度越高，再结晶温度越低，纯度 $\geq 99.99\%$ 的高纯铝，在16℃即可发生再结晶，因而容易引起晶粒粗大化。此外，纯度较高的铝在熔炼时也容易受杂质污染。

3) 工业纯铝。一般指纯度为99.00%~99.85%的铝。我国塑性变形加工工业纯铝牌号有1080、1080A、1070、1070A(L1)、1370、1060(L2)、1050、1050A(L3)、1A50(LB2)、1350、1145、1035(L4)、1A30(L4-1)、1100(L5-1)、1200(L-5)、1235等。铁和硅是其主要杂质，并按牌号数字增加而递增。

工业纯铝不能热处理强化，可通过冷变形提高强度，唯一的热处理形式是退火，再结晶开始温度与杂质含量和变形度有关，一般在200℃左右。退火板材的抗拉强度 $R_m = 80 \sim 100$ MPa，规定塑性延伸强度 $R_{p0.2} = 30 \sim 50$ MPa，断后伸长率 $A = 35\% \sim 40\%$ ，硬度为25~30HBW。经60%~80%冷变形，虽然 R_m 能提高到150~180MPa，但 A 值却下降到1%~1.5%。增加铁、硅杂质含量能提高强度，但会降低塑性、导电性和耐蚀性。

4) 防锈铝。这类合金的曾用牌号以LF为字头表示，包括不能热处理强化的铝-锰

系 3A21 合金和铝-镁系 5A02(LF2)、5A03(LF3)、5A06(LF6)、5B05(LF10) 合金, 在退火和冷加工硬化状态下应用, 具有高塑性、低强度、优良的耐蚀性及焊接性, 通常用于油箱、容器、导管等零件。这类合金还包括可热处理强化的 7A33 合金(属铝-锌-镁-铜系), 它在防锈铝合金中强度最高, 与 5A12 合金相当, 具有优良的耐海水腐蚀性能, 良好的断裂韧度, 低的缺口敏感性和良好的工艺成形性能, 适用于制造水上飞机的蒙皮和其他要求耐蚀性好和强度高的钣金零件, 可以部分代替 5A12 合金钣金件, 从而解决了应力腐蚀和晶间腐蚀问题。

(2) 可热处理强化型铝合金

1) 硬铝合金。硬铝合金属于可热处理强化合金, 曾用牌号均以 LY 为字头表示, 包括铝-铜-镁系 2A01(LY1)、2A02(LY2)、2A10(LY10)、2A11(LY11) 和 2A12(LY12) 合金, 以及铝-铜-锰系的 2A16 和 2B16 合金。这类合金的主要特点是, 主要组分铜、镁、锰都处在铝的饱和溶解或过饱和溶解状态, 因此合金的强度较高, 通常抗拉强度 R_m 为 400 ~ 460MPa, 而且有较好的高温性能和满意的塑性, 广泛用于飞机的承力构件。在硬铝型合金中, 最重要的是 2A12 合金, 其抗拉强度是这类合金中最高的, 成形性能好, 除了锻件和模锻件外, 该合金可以生产所有的半成品。但以板材和型材为最多。合金的耐热性比铝-镁系、铝-镁-硅系和铝-锌-铜系合金高, 可在高温下使用。该合金主要在固溶自然时效状态下应用, 但也可在固溶后过时效状态下使用, 具有较好的抗应力腐蚀性能, 特别是当合金中的铁、硅杂质含量降低时, 抗应力腐蚀性能及断裂韧度随之提高, 由于上述一系列的特点, 所以在航空工业中应用最广泛, 主要用于制造飞机的蒙皮、隔框、翼肋、翼梁和骨架等重要受力构件。硬铝型合金的缺点是耐蚀性差, 故对这类合金的制品需要进行防腐保护, 如包铝、阳极氧化和涂漆等。

2) 锻铝合金。这一类合金也是属于可热处理强化合金, 曾用牌号均以 LD 为字头表示, 包括三个系列: 铝-镁-硅系合金 6A02(LD2) 具有很好的耐蚀性和塑性, 高的抗疲劳性能和好的焊接性能, 用于直升机的旋翼梁和焊接构件; 铝-铜-镁-硅系合金 2A50(LD5)、2B50(LD6)、2A14(LD10), 具有良好的锻造性能和工艺塑性, 可以制造大型和复杂的锻件和模锻件, 如叶轮等, 该合金强度中等, 但耐蚀性差, 在国外逐渐被铝-铜-镁-锌系的合金所代替; 铝-铜-镁-铁-镍系合金 2A70(LD7) 含有铁和镍, 具有较好的耐热性能, 可在 200 ~ 250℃ 下使用, 合金中不含锰与铬, 无挤压效应, 零件在各方向上具有一致的性能, 常用于制造活塞、叶轮和轮盘等零件。

3) 超硬铝合金。以 Al-Zn-Mg-Cu 系为主, 是变形铝合金中强度最高的一类, 热处理后室温强度可超过 600MPa, 超过硬铝, 故有超硬铝之称。超硬铝的曾用牌号以 LC 为字头, 属于此系的常用合金有 7A03(LC3)、7A04(LC4)、7A09(LC9)。超硬铝的发展历史较硬铝短, 20 世纪 40 年代才有定型产品, 20 世纪 50 年代开始大批生产和应用。这类合金除强度高外, 在相同强度水平下, 断裂韧度也优于硬铝, 同时具有很好的热加工性能, 适合生产各种类型和规格的半成品。因此, 在航空工业中, 特别是飞机制造业中, 超硬铝是主要结构材料之一。其主要缺点是抗疲劳性较差, 对应力集中敏感, 有明显的应力腐蚀倾向, 耐热性也低于硬铝。近十几年来, 通过调整成分, 提高冶金质量和

采用一系列新的加工工艺和热处理制度，其综合性能有了明显改善。常用超硬铝的主要相组成为 $\alpha(\text{Al}) + \text{MgZn}_2 + \text{T}(\text{Mg}_3\text{Zn}_3\text{Al}_2) + \text{S}(\text{CuMgAl}_2)$ 。此外尚有少量含 Fe、Si、Cu、Mn 等元素的杂质相。7A04 合金与俄罗斯的合金牌号 B95 相当，是应用最早和最广泛的一种超硬铝，可生产板、型材和模锻件，用作飞机结构，如翼梁、蒙皮、起落架等，但 7A04 及其他超硬铝的一个共同缺点是耐热性差，例如在 125℃ 环境下工作超过 100h，强度降低 10%，在 175℃ 环境下工作则降低 70%。7A03 属铆钉用铝，强度与 7A04 相同，但塑性较高。7A05 是在 7A04 合金基础上发展起来的超硬铝，由于不含 Cr，又降低了 Mg、Cu 含量，故提高了塑性，适合于锻造螺旋桨叶。7A06 是含有大量锌、镁、铜的高合金化超硬铝，是强度最高的一种铝合金。7A06 的缺点是热强性差，对应力集中敏感。7A09 合金与美国的合金牌号 7075 合金相当，它在人工时效状态的强度最高，可生产各种尺寸的板材、棒材、型材、厚壁管材及锻件。近年来研究出的时效制度，可使 7A09 合金同时具有高的强度和高的耐应力腐蚀性能。7A09 合金的热强性低，一般长期使用温度不应超过 125℃。

4) 耐热铝合金。属 Al-Cu-Mg-Ni 系和 Al-Cu-Mn 系。属于 Al-Cu-Mg-Ni 系耐热铝合金的常用合金有 2A70(LD7)、2A80(LD8) 和 2A90(LD9)，一般用作锻件，因此也可归入锻铝一类。其中应用最广泛的是 2A70，可在 150 ~ 225℃ 使用。这类合金的化学成分复杂，除含铜、镁外，还含较多的铁和镍。在 2A80 和 2A90 合金中，还含硅，2A70 则含钛。和硬铝比较，这类合金的铜与镁含量有所降低，使合金成分处于 Al-Cu-Mg 系三元相图的 ($\alpha + \text{S}$) 相区内，以获得足够数量的 S 相，从而得到良好的耐热性能。铁、镍对提高合金的耐热性能是有益的，但是单独加入铁或镍，反而会使高温性能下降。若只加入铁，则在低铁时形成 Cu_2FeAl ，高铁时形成 CuFeAl_3 相；只加镍，则形成 AlCuNi 或 $(\text{CuNi})_2\text{Al}_3$ ，这些都是难溶相，它们的形成消耗了铜，使固溶体铜含量及 S 相数量减少，因而耐热性能降低。同时加入铁和镍，当铁、镍比等于 1 时，则形成 FeNiAl 相。此相不含铜，而且本身有很好的热稳定性，在热处理过程中不参与溶解析出过程，但在工作温度下能阻止晶界滑移，提高合金的耐热性。2A70 合金的主要相组成为 $\alpha(\text{Al})$ 、 $\text{S}(\text{CuMgAl}_2)$ 、 FeNiAl 及少量 AlCuNi 、 Mg_2Si 相。2A70 等合金皆在人工时效状态下使用，它们的室温强度与 2A12 接近，但高温性能则超过 2A12。在航空工业中用于制作叶片、叶轮、盘类等高温工作零件。

Al-Cu-Mn 系耐热铝合金是 20 世纪 50 年代发展起来的，属于此系的常用合金有 2A16 和 2A17，可加工成板材、棒材、型材和模锻件等半成品。挤压和模锻制品可在 200 ~ 300℃ 正常工作，板材用作常温和高温使用的焊接件。在铝合金中，除了铜以外，锰也是提高合金耐热性比较显著的元素。锰在铝中扩散系数小，能明显提高合金的再结晶温度及减少固溶体分解倾向，此外锰在合金中形成 $\text{T}(\text{CuMn}_2\text{Al}_2)$ 相，热稳定性较高。这些因素对改善合金耐热性都能发挥良好的作用。2A16 和 2A17 合金在人工时效状态下使用，主要时效强化相为 CuAl_2 。在淬火加热过程中，同时进行两个过程： CuAl_2 相溶入基体； $\text{T}(\text{CuMn}_2\text{Al}_2)$ 相从基体析出，并呈点状弥散分布。两者均有助于增加合金的高温强度。2A16 和 2A17 的缺点是由于铜含量高，耐蚀性比硬铝还差，使用前应采用阳

极氧化和涂漆等保护措施。这类合金可制作发动机零件，如叶片、盘，还可用作焊接容器等。

3.5) 铝锂合金。属于可热处理强化合金，在铝中加入锂可以提高合金的弹性模量，降低密度。若强度相当，铝锂合金的密度比常用铝合金的密度低约 10%，而弹性模量却高约 10%。铝锂合金具有高强度、高弹性模量、低密度，耐腐蚀性好等优点，是一种理想的航空航天结构材料。

1.1.2 镁合金的分类

镁合金的分类方法很多，各国不尽统一。但总的来说，不外乎根据镁合金中所含的主要元素（化学成分）、成形工艺（或产品形式）和是否含铝等三种原则来分类。

1. 按化学成分分类

根据镁合金中的第一主要合金元素，可以将镁合金划分为多种二元合金系：Mg-Al、Mg-Mn、Mg-Zn、Mg-RE、Mg-Th、Mg-Ag 和 Mg-Li 系。在此基础上，还可以进一步划分为多元合金系：Mg-Al-Mn、Mg-Al-Zn-Mn、Mg-Zr、Mg-Zn-Zr、Mg-RE-Zr、Mg-Ag-RE-Zr、Mg-Y-RE-Zr 等。按有无 Al，镁合金可以分为含 Al 镁合金和不含 Al 镁合金。按有无 Zr，镁合金可以分为含 Zr 镁合金和不含 Zr 镁合金。不含 Zr 镁合金有 Mg-Al、Mg-Mn、Mg-Zn 系。含 Zr 镁合金和不含 Zr 镁合金中既有铸造镁合金，也有变形镁合金。

2. 按成形工艺分类

工业镁合金可分为铸造镁合金和变形镁合金两大类，参见图 1-1。两者没有严格的区分，铸造镁合金中的 AZ91、AM20、AM50、AM60、AE42 等也可以作为变形镁合金。

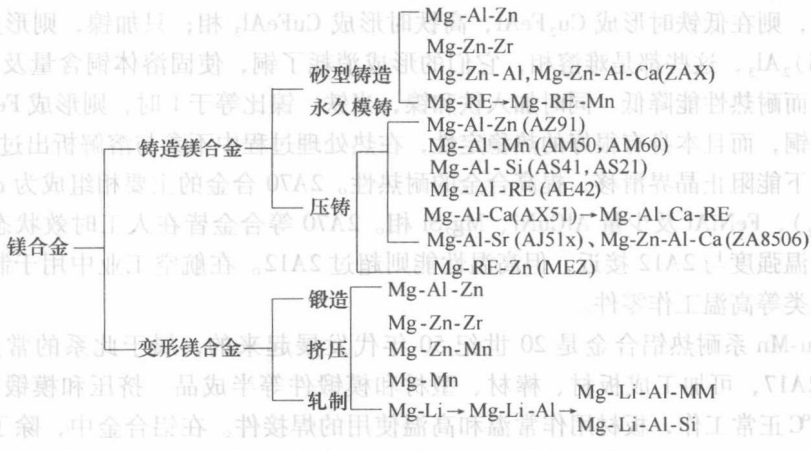


图 1-1 工业镁合金的分类

3. 按使用性能分类

按照镁合金使用性能特点，则可分为耐热镁合金、耐蚀镁合金、阻燃镁合金、高强高韧镁合金和变形镁合金五类。

(1) 耐热镁合金 耐热性差是阻碍镁合金广泛应用的主要原因之一，当温度升高

时,它的强度和抗蠕变性能大幅度下降,使它难以作为关键零件(如发动机零件)材料在汽车等工业中得到更广泛的应用。已开发的耐热镁合金中所采用的合金元素主要有稀土元素(RE)和硅(Si)。稀土是用来提高镁合金耐热性能的重要元素。含稀土的镁合金QE22和WE54具有与铝合金相当的高温强度,但是稀土合金的高成本是其被广泛应用的一大障碍。

Mg-Al-Si(AS)系合金是德国大众汽车公司开发的压铸镁合金。175℃时,AS41合金的蠕变强度明显高于AZ91和AM60合金。但是,AS系镁合金由于在凝固过程中会形成粗大的汉字状 Mg_2Si 相,损害了铸造性能和力学性能。研究发现,微量Ca的添加能够改善汉字状 Mg_2Si 相的形态,细化 Mg_2Si 颗粒,提高AS系列镁合金的性能。

从20世纪80年代以来,国外致力于利用Ca来提高镁合金的高温抗拉强度和抗蠕变性能。例如美国开发的ZAC8506(Mg-8Zn-5Al-0.6Ca)、AXJ530(Mg-5Al-3Ca-0.12Sr),以及加拿大研究的Mg-5Al-0.8Ca等镁合金,其抗拉强度和蠕变性能都较好。

2001年,日本东北大学井上明久等采用快速凝固法制成的具有100~200nm晶粒尺寸的高强镁合金Mg-2%Y-1%Zn(摩尔分数),其强度为超级铝合金的3倍,还具有超塑性、高耐热性和高耐腐蚀性。

(2) 耐蚀镁合金 镁合金的耐蚀性问题可通过两个途径来解决:

1) 严格限制镁合金中的Fe、Cu、Ni等杂质元素的含量。例如,高纯AZ91HP镁合金在盐雾试验中的耐蚀性大约是AZ91C的100倍,超过了压铸铝合金A380,比低碳钢好得多。

2) 对镁合金进行表面处理。根据不同的耐蚀性要求,可选择化学表面处理、阳极氧化处理、有机物涂覆、电镀、化学镀、热喷涂等方法处理。例如,经化学镀的镁合金,其耐蚀性超过了不锈钢。

(3) 阻燃镁合金 镁合金在熔炼浇注过程中容易发生剧烈的氧化燃烧。实践证明,熔剂保护法和 SF_6 、 SO_2 、 CO_2 、Ar等气体保护法是行之有效的阻燃方法,但它们在应用中会产生严重的环境污染,并使得合金性能降低,设备投资增大。纯镁中加钙能够大大提高镁液的抗氧化燃烧能力,但是由于添加大量钙会严重恶化镁合金的力学性能,使这一方法无法应用于生产实践。铍可以阻止镁合金进一步氧化,但是铍含量过高时,会引起晶粒粗化和增大热裂倾向。上海交通大学轻合金精密成形国家工程研究中心通过同时加入几种元素,开发了阻燃性能和力学性能均良好的轿车用阻燃镁合金,成功地进行了轿车变速器壳盖的工业试验,并生产出了手机壳体、MP3壳体等电子产品外壳。

(4) 高强高韧镁合金 现有镁合金的常温强度和塑韧性均有待进一步提高。在Mg-Zn和Mg-Y合金中加入Ca、Zr,可显著细化晶粒,提高其抗拉强度和屈服强度;加入Ag和Th,能够提高Mg-RE-Zr合金的力学性能,如含Ag的QE22A合金具有高室温拉伸性能和抗蠕变性能,已广泛用作飞机、导弹等的优质铸件;通过快速凝固粉末冶金、高挤压比及等通道角挤(ECAE)等方法,可使镁合金的晶粒处理得很细,从而获得高强度、高塑性甚至超塑性。

(5) 变形镁合金 虽然目前铸造镁合金产品用量大于变形镁合金,但变形镁合金

材料可获得更高的强度, 更好的延展性及更多样化的力学性能, 可以满足不同场合结构件的使用要求。因此, 开发变形镁合金, 是未来更长远的发展趋势。

新型变形镁合金及其成形工艺的开发, 已受到国内外材料工作者的高度重视。美国成功研制了各种系列的变形镁合金产品, 如通过挤压 + 热处理后的 ZK60 高强变形镁合金, 其强度及断裂韧性相当于时效状态的 Al7075 或 Al7475 合金, 而采用快速凝固 (RS) + 粉末冶金 (PM) + 热挤压工艺开发的 Mg-Al-Zn 系 EA55RS 变形镁合金, 其性能不但大大超过常规镁合金, 比强度甚至超过 7075 铝合金, 且具有超塑性 (300℃, 断后伸长率 436%), 腐蚀速率与 2024-T6 铝合金相当, 还可同时加入 SiCp 等增强相, 成为先进镁合金材料的典范。日本 1999 年开发出超高强度的 IM Mg-Y 系变形镁合金材料, 以及可以冷压加工的镁合金板材。英国开发出 Mg-Al-B 挤压镁合金, 用于 Magnox 核反应堆燃料罐。以色列也研制出了用于航天飞行器上的兼具优良力学性能和耐蚀性能的变形镁合金, 法国和俄罗斯开发了鱼雷动力源变形镁合金阳极薄板材料。

在我国, 镁合金的使用牌号与美国镁合金牌号不同, 其对比见表 1-1。

表 1-1 我国镁合金牌号与美国镁合金牌号对比

种类	系列	牌 号		化学成分(质量分数,%)			
		中国	美国	Al	Mn	Zn	其他
变形镁合金	Mg-Mn	M2M	M1	0.20	1.30~2.50	0.30	—
		ME20M	M2	0.20	1.30~2.20	0.30	0.15~0.35Ce
	Mg-Al-Zn	AZ40M	AZ31	3.00~4.00	0.15~0.50	0.2~0.8	—
		AZ41M	—	3.70~4.70	0.30~0.60	0.8~1.4	—
		AZ61M	AZ61	5.50~7.00	0.15~0.50	0.5~1.5	—
		AZ62M	AZ63	5.00~7.00	0.20~0.50	2.0~3.0	—
	AZ80M	AZ80	7.80~9.20	0.15~0.50	0.2~0.8	—	
Mg-Zn-Zr	ZK61M	ZK60	0.05	0.10	5.0~6.0	—	
铸造镁合金	Mg-Zn-Zr	ZM-1	ZK51A	—	—	3.5~5.5	0.5~1.0Zr
		ZM-2	ZE41A	—	0.7~1.7RE	3.5~5.0	0.5~1.0Zr
		ZM-4	EZ33	—	2.5~4.0RE	2.0~3.0	0.5~1.0Zr
		ZM-8	ZE63	—	2.0~3.0RE	5.5~6.5	0.5~1.0Zr
	Mg-RE-Zr	ZM-3	—	—	2.5~4.0RE	0.2~0.7	0.3~1.0Zr
		ZM-6	—	—	2.0~2.8RE	0.2~0.7	0.4~1.0Zr
Mg-Al-Zn	ZM-5	AZ81A	7.50~9.00	0.2~0.8	0.15~0.5	—	

1.1.3 钛合金的分类

按照合金在平衡和亚稳定状态的相组成, 钛合金可分为 α 、近 α 、 $\alpha + \beta$ 、近 β 、 β 五类; 但习惯上将钛合金分为 α 、 $\alpha + \beta$ 和 β 三大类。若按照使用性能特点, 则可分为结构钛合金、耐热 (热强) 钛合金和耐蚀钛合金等类。我国钛合金国标牌号中, TA 系

列代表 α 型钛合金；TB 系列代表 β 型钛合金；TC 系列代表 $\alpha + \beta$ 型钛合金。

1. 按相组成分类

钛具有两种同素异构体，在 882.5℃ 以下为 α 钛，具有密排六方晶格 (hcp) 结构；在 882.5℃ 以上直到熔点 1668℃ \pm 5℃ 之间为 β 钛，具有体心立方晶格 (bcc)。钛合金也可以分为铸造钛合金和变形钛合金，变形钛合金可以加工成板、带、箔、管、棒、锻件，铸造钛合金可以采用铸造工艺生产铸件。表 1-2 列出了世界各国典型钛合金的牌号、成分、特点及主要用途。

表 1-2 世界各国典型钛合金的分类、牌号、特点及用途

分类	牌号	名义成分	铝当量	热处理类型	工作温度 /℃	特点	主要用途	
α 钛合金	TA1	工业纯钛		退火	<300	焊接性好，拉伸塑性好，耐蚀	飞机蒙皮及受力不大的锻件，焊件	
	TA2	工业纯钛						
	TA3	工业纯钛						
	TA7	Ti-5Al-2.5Sn	5.8	<450				
近 α 钛合金	低铝当量	TA13	Ti-2.5Cu	退火	<400	工艺塑性略高于 α 钛合金	类似于 α 钛合金	
		TA21	Ti-1.0Al-1.0Mn					1.0
	高铝当量	TA14	Ti-2.3Al-11Sn-5Zr-1Mo-0.2Si	7.8	退火或强化热处理	450 ~ 600	有最高的蠕变抗力；焊接性及热塑性良好，耐热性好，拉伸塑性较低	压气机盘、叶片等
		IMI829	Ti-5.5Al-3.5Sn-3Zr-1Nb-0.3Mo-0.3Si	8.0				
		TC19	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	7.3				
		TA11	Ti-8Al-1Mo-1V	8.0				
		Ti-6211	Ti-6Al-2Nb-1Ta-1Mo	6.0				
		BT18	Ti-8Al-11Zr-0.6Mo-1Nb	9.5				
		TA15	Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V	6.3				
		IMI685	Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.3Si	8.0				
Ti-11	Ti-6Al-2Sn-1.5Zr-1Mo-0.35Bi	6.9						
$\alpha + \beta$ 钛合金	低铝当量	TC1	Ti-2Al-1.5Mn	退火或强化热处理	300 ~ 400	中强，中耐热性，韧性较高	紧固件，小型锻件，压气机盘、叶片等	
		TC2	Ti-4Al-1.5Mn					3.0
		BT14	Ti-5Al-3Mo-1.5V					4.5
		BT16	Ti-2.8Al-5Mo-5V					2.5
		BT23	Ti-5Al-5V-2Mo-0.7Cr-0.7Fe					5.0
		Ti-451	Ti-4.5Al-5Mo-1.5Cr					4.5
		IMI550	Ti-4Al-4Mo-2Sn-0.5Si					5.9