

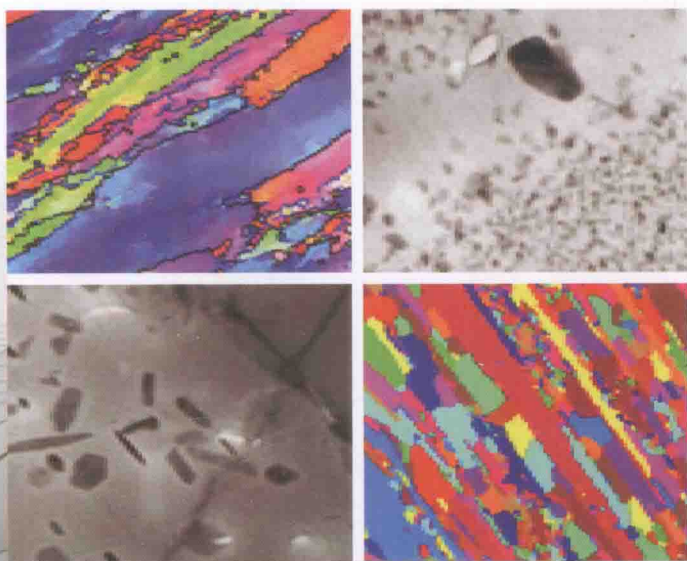


现代交通运输装备用铝手册系列

航空航天器 用铝材手册

HANDBOOK OF ALUMIUM APPLICATIONS
IN AVIATION SPACECRAFT

● 主编 王祝堂



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中航工业航材院

现代交通运输装备用铝手册系列

航空航天器用铝材手册

主 编 王祝堂

副主编 郑家驹 王中奎
王伟东 熊 慧



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

航空航天器用铝材手册/王祝堂主编.

—长沙:中南大学出版社,2015.10

ISBN 978-7-5487-1947-2

I. 航... II. 王... III. ①航空材料-铝合金-技术手册②航天材料-铝合金-技术手册

IV. V252-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 240985 号

航空航天器用铝材手册

王祝堂 主编

☐责任编辑 刘颖维

☐责任印制 易建国

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙印通印刷有限公司

☐开 本 720 × 1000 1/16 ☐印张 28.75 ☐字数 577 千字

☐版 次 2015 年 10 月第 1 版 ☐印次 2015 年 10 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-1947-2

☐定 价 120.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

前言

自 1888 年美国匹兹堡冶金公司工业化提取铝以来,铝及铝合金因具有一系列优良性能,诸如密度小、易加工与成形、导热导电性能好、抗蚀性强、资源丰富、对环境友好、可回收性强、极易摩擦搅拌焊接、价格适中、可表面处理性好、撞击时不产生火花、无磁性、对辐射有相当强的屏蔽作用等,在国民经济的各个产业部门获得了日益广泛的应用。

铝合金与航空航天器发展相辅相成,从第一架飞机面世到今天,人类航空史大体可分为四个阶段:1903—1938 年的初始阶段,飞机从木布结构发展到全金属及铝合金结构,用的铝合金以 $3 \times \times \times$ 系、 $5 \times \times \times$ 系及 $2 \times \times \times$ 系的 2014 合金为主;1939—1945 年的完善阶段,由于正处在第二次世界大战,航空业得到空前发展,全世界生产的 80% 以上的原铝都用于制造军用飞机,共制造了约 31 万架,其中仅美国就制造了 13 万多架,采用活塞式发动机,飞行速度一般不超过 700 km/h,飞机结构多采用高强度硬铝 2024 等 Al—Cu—Mg 系合金,其他系合金也得到广泛应用,美国开始采用 7075 超硬铝,追求的是合金的静态强度,飞机的铝化率达 80%;1946—1957 年的超声速阶段,是航空技术发生根本性变革的重要阶段,开始制造大批涡轮喷气发动机,20 世纪 50 年代初,在朝鲜战争中喷气式飞机已大规模用于空战,20 世纪 50 年代中期喷气战斗机的飞行速度已达到声速的两倍,高强度 2024 合金及超强度 7075 合金获得了大量应用,高强高温合金也开始应用,B707 飞机是此时期的代表客机,航天事业开始迅猛发展;1958 年至今的高超声速阶段,航空技术发展的高级阶段,航天产业繁荣,与航空航天工业高速发展相适应,先后开发成功的结构铝合金有高强高温合金、高韧合金、高损伤容限合金、高抗蚀合金、先进可切削合金、艾华合金(用于 A380E 喷气机)、先进的未来合金(用于 A350 C 系列飞机),与之相应的美国机型为 7075—T6、7075—T3、7475—T73、7075—T74、2524—T3511、2524—T73、2524—T3、7150—T77、7055—T6511、2026—T3511(2000 年以前的飞机)、7085—T76、C85T、7085—T74、C85T—T74、Al—Li—Tp—1、Al—Li—Tp—2(2000—2020 年的飞机)。

今后民用航空器将向三个方向发展:一是大型亚声速运输机,如 B797;二是先进超声速客机;三是偏转旋翼式垂直起降支线客机。在军用航空器方面,将进一步

朝信息化、综合化、一体化和智能化方向发展。与之相适应的铝合金是美国铝业公司正在研发制造的 7805-T76、C85T、7805-T74、C85-T74、第三代铝-锂合金,以及肯联公司(Constellium)正在研制的先进未来合金。

中国的航空铝合金及铝材生产始于 1956 年,为了航空工业的发展,20 世纪 60 年代后期有了较快发展,总体上中国在航空航天铝材研发与生产方面与世界先进水平相比存在五六十年的差距,这是我们必须面对的残酷现实与严峻挑战,中国正在设计制造的有全部自主知识产权的 ARJ21 支线客机与 C919 大飞机的适航证取证原型机所用的一切铝材全都是进口的。在 C919 主结构材料中,铝合金占 65%。

中国截至 2014 年已建成完整的世界领先水平航空级铝材生产体系,有世界一流的熔炼-铸造、热轧、冷轧、挤压、拉拔装备,有全球独一无二的专业铝厚板生产线,大挤压机(≥ 45 MN)数量占全世界总数的 62% 以上,450 MN 的锻压机已建成,全球最大的 800 MN 锻压机也于 2014 年投产。但是,中国距能为波音公司、空客公司、庞巴迪宇航公司、马丁-马里特公司批量提供航空航天器铝材可能还有七八年。在研发方面,中国可能还需要更长的时间才能赶上美国铝业公司的匹兹堡技术中心和肯联公司的法国沃雷普技术中心。只有那时中国才能成为名副其实的铝加工业产业强国。当前,中国航空航天铝材的价格还比美国及德国的贵将近一倍,缺乏竞争力。

本书共分为三篇:第 1 篇:航空航天器用变形铝合金;第 2 篇:航空航天器用铸造铝合金;第 3 篇:先进的航空航天器用铝合金。

参加本书编写等有关工作的还有段德炳、任柏峰、刘欢、袁嫫、姚希之、尤振平、霍云波、郭秋颖、沈兰、曾峥、夏颀轶。

在编写本书过程中得到了许多人士与朋友的帮助,在此谨致谢意。另需特别致谢的是《工程材料实用手册》(第 2 版)第 3 卷的作者与编委,本书引用了该书的一些数据。

由于编者水平有限,书中不可避免地会存在一些错误与不足之处,期盼读者多多提意见并斧正。

王祝堂

2015 年 5 月

目 录

第 1 篇 航空航天器用变形铝合金	(1)
1.1 航空器铝合金的发展	(3)
1.1.1 国外的发展概况	(3)
1.1.2 中国的航空航天铝合金发展概况	(5)
1.1.3 航空铝合金的发展趋势	(6)
1.1.4 铝合金在民用飞机上的应用	(8)
1.2 1×××系合金(含部分8×××合金)	(12)
1.2.1 化学成分及力学性能	(12)
1.2.2 热处理及其他工艺性能	(17)
1.2.3 物理化学性能	(19)
1.3 2×××系合金	(20)
1.3.1 化学成分与物理性能	(20)
1.3.2 2A01 合金	(26)
1.3.3 2A02 合金	(27)
1.3.4 2A10 合金	(30)
1.3.5 2A11 合金	(32)
1.3.6 2A12 合金	(37)
1.3.7 2A14 合金	(51)
1.3.8 2A16 合金	(55)
1.3.9 2B16 合金	(61)
1.3.10 2A50 合金	(65)
1.3.11 2B50 合金	(68)
1.3.12 2A70 合金	(70)
1.3.13 2014 型合金	(75)
1.3.14 2017A 合金	(79)
1.3.15 2024 型合金	(80)
1.3.16 2618 型合金	(97)
1.4 3A21 合金	(102)
1.4.1 化学成分及相组成	(102)
1.4.2 物理化学性能	(103)
1.4.3 力学性能	(104)

1.4.4	工艺特性	(108)
1.5	5 × × × 系合金	(109)
1.5.1	5 × × × 系合金中各元素的作用及化学成分	(109)
1.5.2	5 × × × 系合金的物理性能	(111)
1.5.3	5A02 合金	(112)
1.5.4	5A03 合金	(117)
1.5.5	5A05 合金	(120)
1.5.6	5B05 合金	(127)
1.5.7	5A06 合金	(128)
1.5.8	5083 型合金	(135)
1.6	6 × × × 系合金	(138)
1.6.1	合金元素和杂质元素的作用	(138)
1.6.2	6A02 合金	(139)
1.6.3	6082 合金	(148)
1.7	7 × × × 系合金	(149)
1.7.1	Al - Zn - Mg - Cu 系合金的发展	(149)
1.7.2	化学成分及典型应用	(152)
1.7.3	物理性能	(156)
1.7.4	合金元素和杂质元素在 7 × × × 系合金中的作用	(158)
1.7.5	组织及热处理特性	(160)
1.7.6	7A04/7B04 合金	(164)
1.7.7	7A09 合金	(177)
1.7.8	7050 型合金	(188)
1.7.9	7A33 合金	(197)
1.7.10	7075 型合金	(201)
1.7.11	7055 型合金	(236)
第 2 篇	航空航天器铸造铝合金	(244)
2.1	常用合金元素	(244)
2.2	合金熔体的变质处理	(245)
2.2.1	铝固溶体晶粒的细化	(246)
2.2.2	共晶体的细化	(246)
2.2.3	初生硬脆相的细化	(247)
2.2.4	熔体净化处理	(247)
2.3	热处理对组织的影响	(247)
2.4	ZL1 × × 系合金	(248)
2.4.1	ZL101 合金	(248)

2.4.2	ZL101A 合金	(256)
2.4.3	ZL102 合金	(261)
2.4.4	ZL104 合金	(265)
2.4.5	ZL105 合金	(269)
2.4.6	ZL105A 合金	(275)
2.4.7	ZL112Y 合金	(280)
2.4.8	ZL114A 合金	(282)
2.4.9	ZL116 合金	(285)
2.5	ZL2 × × 系合金	(288)
2.5.1	合金的成分与相组成	(288)
2.5.2	ZL201 合金	(293)
2.5.3	ZL201A 合金	(296)
2.5.4	ZL204A 合金	(300)
2.5.5	ZL205A 合金	(303)
2.5.6	ZL206 合金	(308)
2.5.7	ZL207 合金	(311)
2.5.8	ZL208 合金	(314)
2.6	ZL3 × × 系合金	(316)
2.6.1	ZL303 合金	(316)
2.6.2	热处理	(317)
2.7	ZL4 × × 系合金	(320)
2.7.1	ZL401 合金	(320)
第3篇	先进航空航天铝合金	(324)
3.1	Al-Li 合金	(324)
3.1.1	物理冶金	(325)
3.1.2	生产工艺	(333)
3.1.3	工业 Al-Li 合金	(337)
3.1.4	Al-Li 合金的应用	(360)
3.2	Al-Sc 合金	(365)
3.2.1	Sc 的性能	(365)
3.2.2	Al-Sc 中间合金制备	(367)
3.2.3	工业 Al-Sc 合金	(370)
3.2.4	应用	(381)
3.3	超塑铝合金	(381)
3.3.1	超塑性的种类及变形的力学特征	(382)
3.3.2	晶粒细化及抑制晶粒粗化的方法	(385)

3.3.3 超塑铝合金	(387)
3.4 铝基复合材料	(403)
3.4.1 基体与增强体	(403)
3.4.2 连续纤维增强铝基复合材料的制造	(404)
3.4.3 颗粒、晶须增强铝基复合材料制造	(410)
3.4.4 铝基功能复合材料	(416)
3.4.5 铝基复合材料的超塑性变形	(416)
3.4.6 中国航空复合材料的生产	(417)
3.4.7 新型先进铝合金与复合铝材的博弈	(418)
3.5 粉末冶金铝合金	(418)
3.5.1 粉末冶金铝合金的生产工艺	(419)
3.5.2 快速凝固粉末冶金铝合金的优点	(427)
3.5.3 机械合金化粉末冶金铝合金的优点	(429)
3.5.4 工业粉末冶金铝合金	(429)
3.5.5 粉末冶金耐磨铝合金和低热膨胀系数铝合金	(441)
参考文献	(445)

第1篇 航空航天器用变形铝合金

变形铝合金 $1 \times \times \times$ 系至 $8 \times \times \times$ 系在航空航天器制造中都得到了应用,但用得最多的是 $2 \times \times \times$ 系与 $7 \times \times \times$ 系合金,其次是 $6 \times \times \times$ 系与 $5 \times \times \times$ 系合金,用得较少的是 $8 \times \times \times$ 系合金(主要是 Al-Li 合金),用得最少的是 $1 \times \times \times$ 系合金,而 $4 \times \times \times$ 系合金加工材几乎没有在结构件制造中得到应用。

如果按材料的热处理状态来分,在航空航天器使用的铝材中,可热处理强化合金约占 92%,热处理不可强化合金仅占 8% 左右。

铝合金在飞机上主要是用作结构材料,如蒙皮、框架、螺旋桨、油箱、壁板和起落架支柱等。铝合金在航空航天器中的应用开发可分为几个阶段:20 世纪 50 年代,主要目标是减轻质量和提高合金比刚度、比强度;20 世纪六七十年代,主要目标是提高合金耐久性、疲劳性能和损伤容限,开发出 $7 \times \times \times$ 系合金 T73 和 T76 热处理制度,及 7050 合金和高纯铝合金;20 世纪 80 年代,由于燃油价格上涨而要求进一步减轻结构质量;20 世纪 90 年代至今,铝合金的发展目标是进一步减轻质量,并进一步提高铝合金的耐久性和损伤容限。例如开发出高强、高韧、高抗腐蚀性能的新型铝合金,大量采用厚板加工成复杂的整体结构部件代替以前用很多零件装配的部件,不但能减轻结构质量,而且可保证性能的稳定。要实现这一点必须开发出低内应力的厚板。进入 21 世纪后,各国围绕大型、高速飞机及航天器的需求,研发了一批新型的 Al-Li 合金材料,基本上满足了航空航天工业高速发展的需求。例如,客机的进舱门过去是由近 50 个零件组装的,而现在可用一块厚板数控铣削而成,不但降低了生产成本,而且门的强度提高了。飞机的上、下机翼也可以用厚板铣成。

近 20 年来,我国也投入了大量的人力、物力和财力,研发了大批用于飞机和航天器的铝合金材料,特别是自大飞机项目和“神舟”系列、“嫦娥”系列项目启动以来,我国在研发高强、高韧、高抗腐蚀、高抗疲劳等新型铝合金及 Al-Li 合金材料方面取得了重大进展,但与国际先进水平相比仍有二三十年的差距。中国 2013 年实际上可以批量生产的航空铝合金材料是美国铝业公司(Alcoa)与加拿大铝业公司(Alcan)在 20 世纪六七十年代批量供应的材料。中国当下制造的大飞机 C919 及支线客机 ARJ21-70“翔凤”取证机用的铝材全部是进口的。中国商用飞机有限责任公司称,2018 年制造这些飞机用的铝材的国产化率可望达到 30%,看来制造大飞机用的铝材全部国产化可能要到 2025 年或更后一些,更不用说艾华合金(Airware)与美国铝业公司的新一代航空航天铝合金了。

艾华合金并不是一个简单的合金而是若干个性能得到全面改进的合金与用先进的工艺生产的铝材的总称,用于制造 2005—2015 年下线的 A380E 喷气机(E-Jets)

及 A350C 系列(A350 C Series)飞机,是力拓-加铝公司(Rio Tinto-Alcan)与肯联全球航空-交通运输-工业公司[Constellium Global ATI(Aerospace, Transportation and Industry)]推出的,合金及生产工艺研究由设在法国沃雷普(Voreppe)与瑞士洛桑(Lausanne)的技术中心完成,板材由法国伊苏瓦尔轧制厂(Issoire)与美国的雷文斯伍德轧制厂生产,而挤压材则由努兹·圣·乔治型材厂(Nuits-Issoire Saint-Georges)与圣弗洛伦汀(Saint Florentin)铝材挤压厂生产,它们都位于法国。实际上,“艾华”是当前航空器先进铝制零件的全面解决方案的总称,包括合金成分与材料生产方案的最佳化,以及零部件的设计与加工。

与 2005 年以前广泛应用的高强、高温、高韧、高损伤容限(high damage tolerant alloys)、高抗腐蚀(high corrosion resistance alloys)合金相比,艾华合金可满足航空工业提出的以下主要要求:①飞机的自身质量降低 25%;②飞机投入运营后,至首次 D 级检修(D-Check)时间不短于 12 年;③大幅度减少 CO₂ 排放;④飞机到期退役后,铝制零部件的回收率达到 100%。铝材与民用飞机发展的关系如图 1-1-1 所示。

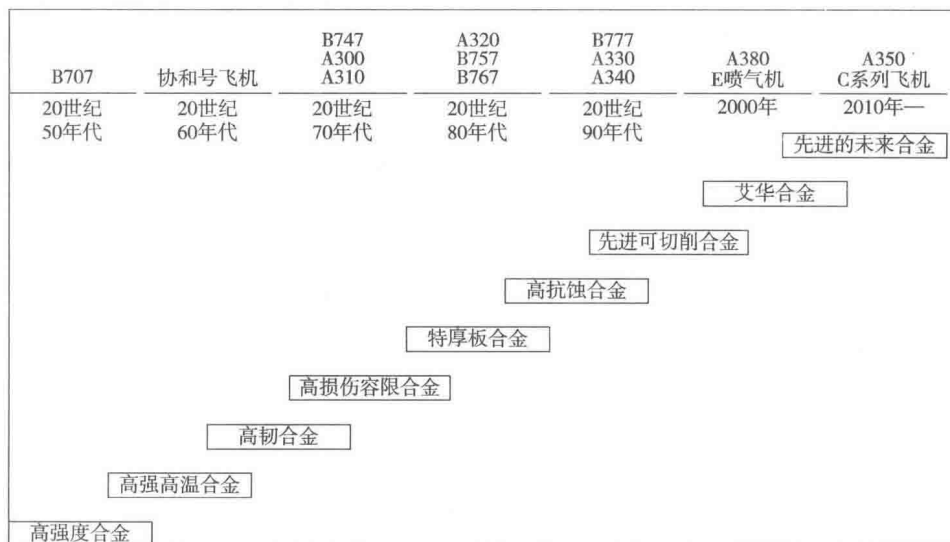


图 1-1-1 铝材与民用飞机发展的关系

铝合金具有密度低,为钢的 1/3 左右,抗腐蚀性能强、疲劳强度较高、强度性能高、比强度与比刚度大等一系列优点,是航空航天器结构的理想材料。目前铝合金在民用机上的用量占飞机自身质量的 60%~80%,在第四、第五代军机上的用量也不低于 20%。近些年来,尽管受到钛合金及复合材料在航空器上应用的挑战,但由于铝的资源丰富,铝合金性能优良、易加工成形、价格合理、可回收性强等诸多优点,加之传统铝合金新的热处理状态不断涌现,新的合金一批批地出现,材料加工工艺在不断更新,在可预见的时期内,至少在 2030 年以前,铝合金在飞行器结构

中的首选材料优势是不可取代的。

在中国自行设计研制的第二代战机机体结构用材中,铝合金占80%以上,在第三代战机机体结构用材中铝仍占60%~70%,能隐身的“坦克杀手”武直-10与中航工业研制的最新型第四代隐形战机歼-31中铝合金也是主要结构材料之一。

1.1 航空器铝合金的发展

航空铝合金发展的推动力来自两方面:一方面是航空器性能的不断改进,要求提供更多更好的铝材,这是市场需求的拉动;另一方面是受材料自身技术的发展。

1.1.1 国外的发展概况

国外航空器铝合金的发展大致可分为5个阶段,如下所述。

1.1.1.1 静态强度需求阶段(1906—1959年)

这是航空工业的初级阶段,要求合金具有尽可能高的静态强度,以降低结构质量,提高载重量和/或延长航程。在此期间研发成了Al-Cu-Mg系的2014、2017合金,稍后又研发成功2024-T3合金。20世纪30年代,2024合金在飞机制造中开始得到广泛应用,第二次世界大战期间研制成功具有更高强度的Al-Zn-Mg-Cu系超硬铝7075-T6合金,随后又研制出有更高强度的7178-T6合金。直到20世纪60年代这些合金都是航空器材料的骨干。

1.1.1.2 高抗腐蚀合金阶段(1959—1969)

在此阶段由于飞机开始应用厚大截面结构,机体出现应力腐蚀开裂(2024-T4、7075-T6合金短横向),因此要求铝材不但有高的静强度,还必须有很强的抗应力腐蚀能力。为此,研制成功了7075-T73合金,虽然抗应力腐蚀开裂能力满足了要求,但其抗拉强度 R_m 比T6材料的低15%。不久美国铝业公司技术中心研发成功了7075-T76合金,既能满足抗应力腐蚀要求,抗拉强度 R_m 的下降又较小。7075-T73、7075-T76合金在此阶段下线的飞机中获得了广泛应用。

1.1.1.3 要求综合性能阶段(1969—1979)

此时飞机设计进入失效-安全阶段,要求铝材有高的韧度。在此背景下美国铝业公司率先推出高纯的7475合金,1969年在美国铝业协会公司(The Aluminum Association, Inc.)注册,1971年该公司(Alcoa)又研制成功7050-T74合金,该合金能满足飞机厚大截面结构对强度和应力腐蚀开裂的要求。1976年后,飞机设计要求机体结构铝材不但应有高的强度还必须有足够的断裂韧度和良好的抗疲劳性能。美国铝业公司与波音飞机公司(Boeing)联合研发的7150-T6、T61(1978年注册)合金能满足这些要求;美国铝业公司还研制成功高强度的2324-T39厚板合金(1978年注册)及2224-T3511挤压材合金(1978年注册),它们有高的断裂韧度和不低于2024-T3合金的抗拉强度 R_m 。在此期间苏联也研制成功Д16ч、B93пч、AK4-1ч

和 B95ΠЧ 等高纯铝合金,在军机制造中获得了全面推广。

1.1.1.4 减轻质量与可靠性呼声高涨阶段(1980—1991)

由于 20 世纪 70 年代石油危机的冲击及为提高军机战斗力及民机的可靠性,人们对飞机设计提出了强烈减轻质量要求;另外,钛合金及树脂基复合材料的崛起对铝合金构成严峻挑战,大大激发了对传统铝合金的改型挖潜探究与研发新的铝合金,兴起了对 Al-Li 合金、快速凝固耐热铝合金及铝基复合材料的研究热潮,现在 Al-Li 合金已在航空航天器中获得较大规模应用,另两类合金距规模化应用还有较大的距离。在传统合金改型方面,美国铝业公司研制成功 7150-T77 状态,它不但有高的抗腐蚀性能,而且其抗拉强度 R_m 与 T6 材料的相当,稍后该公司又开发出有更高强度的 7055-T77 合金与更优抗疲劳性能的 2524-T3 合金,前者 1991 年注册,后者 1995 年注册。这些高性能铝合金的面世,极大地推动了航空铝合金的发展并巩固了铝合金在航空器制造中的地位,人们原来预测会使用钛材与复合材料的结构仍选用了这些新型铝合金,如 B777、C-17、F-35 等先进新一代飞机的选材就是这样。

1.1.1.5 较大地降低结构制造成本阶段(1992—2015)

飞机机体结构的制造成本约占其总成本的 95%,因而降低制造成本成为机体材料研制的重中之重。初期目标是在不改变飞机现行结构设计基础上使结构成本下降 25%。为此,美国铝业公司及力拓-加铝公司(2009 年剥离交通铝材板块组建肯联公司)都做了大量工作:以整体机加件代替锻件或由一些零件装配而成的结构部件,研发机翼的高温时效成形和高强度铝合金的快速超塑成形,开展可焊铝合金和铝合金摩擦搅拌焊技术的研究,以优质铸造铝合金铸造复杂形状的精密铸件,研发低成本高性能的 Al-Li 合金,以及开展铝基复合材料的研究等。至 2013 年,这些工作已成就斐然,如力拓-加铝的艾华合金及美国铝业公司的新一代合金就是其典型代表,它们可以满足 2020 年以前下线的航空器的需求,现在这两家公司正在研制能满足 22 世纪 20 年代航空器制造所需求的铝合金材料。

国外航空航天铝合金的发展历程与应用简况示于表 1-1-1。

表 1-1-1 国外航空航天铝合金的发展与应用简况

发展年代 (20 世纪)	2×××系合金	7×××系合金	应用情况	
			军机	民机
20 年代	2017-T4	—	Junkers F13	—
30 年代	2024-T3 第一个里程碑	—	DC3, B24	—
40 年代	2024-T3	7075-T6 第一个里程碑 7178-T6	B-29	—

续表 1-1-1

发展年代 (20 世纪)	2 × × × 系合金	7 × × × 系合金	应用情况	
			军机	民机
50 年代	2024 - T3	7075 - T6 7178 - T6 7079 - T6	B - 52, F100(第一代战斗机) F4(第二代战斗机, 1958 年首飞)	Boeing 707, 第一代民机, 1957 年首飞
60 年代	2024 - T3	7075 - T3 7075 - T6	F - 15, 第三代战斗机, 1972 年首飞	Boeing 737, 第二代民机, 1967 年首飞 Boeing 747 第三代民机, 1969 年首飞
70 年代	前期: 2024 - T3	前期: 7475 合金	F - 16, 1976 年 12 月首飞	—
	中期: 2024 - T3	中期: 7050 - T74 7010 - T74	A6, F/A(1978 年首飞) 幻影 2000(1978 年首飞)	空客 A300B, 第三代民机, 1973 年首飞
	后期: 2224 - T3511 2124 - T851 2324 - T39	后期: 7150 - T6 7150 - T61	—	Boeing 757, 第四代民机, 1982 年首飞
80 年代	2024 - T3 2124 - T851 2224 - T3511	7050 - T74 7050 - T76	F/A - 22, 第四代战斗机 1981 年启动, 1990 年首飞	—
80 年代末至 90 年代中期	2524 - T3 第二个里程碑	7150 - T77 第二个里程碑 7055 - T77 厚板	C17 军用运输机; F35, 低成本第四代战斗机, 1995 年启动, 2000 年首飞	Boeing 777, 第五代民机, 1994 年首飞 A340 - 500/600, 1997 年启动

1.1.2 中国的航空航天铝合金发展概况

中国航空工业起步晚, 航空铝合金的研制是在新中国成立后起步的。中国航空铝合金的应用与发展大致可分为四个阶段。

1.1.2.1 静强度需求阶段(1950—1979)

最初是为了配合从苏联引进飞机维修和仿制苏联米格 17 ϕ 战机的需求而发展的。从 1956 年开始仿制苏联主要的航空用铝合金, 以 2 × × × 系的 Д16 合金与 7 × × × 系的 B95 合金为主线, 仿制成功了 7A04(相当于 B95)及 2A12(相当于 Д16)合金, 但热处理状态仅有自然时效状态 T4 和简单的人工时效状态 T6。这两种合金在中国的 1980 年以前的航空工业中获得了应用, 它们在歼 5、歼 6、歼 7 等飞机上得到大量应用。

1.1.2.2 抗腐蚀性能高的合金需求阶段(1980—1986)

为向航空产业提供抗应力腐蚀开裂能力高的铝合金材料, 中国研制成功了 7A09 - T6 合金(与 7075 合金相当), 它的各项工艺性能与抗腐蚀性能均优于 7A04 合金, 可加工成各种半成品, 后又仿制成功 T73 及 T74 状态材料, 用作战机的主承力结

构,全面替代 7A04-T6 合金,在歼 7、歼 8 系列飞机中得到了广泛应用,目前在飞机上仍有较多的应用。在此阶段还仿制成功抗腐蚀性能高的 7A33 合金,其抗拉强度 R_m 与 2A12 合金的相当,不但无晶间腐蚀倾向,而且有高的抗应力腐蚀开裂与抗剥落腐蚀能力,在中国生产的水上飞机与两栖飞机中用于替代 2A12 合金作蒙皮结构件。

1.1.2.3 全面跟踪美国综合性能良好与多品种多热处理状态研发阶段(1987—1997)

为满足老飞机设计改型和研制新飞机对机体铝材综合性能及多品种、多规格、多热处理状态的需求,中国全面启动了对 7075-T73、7075-T76、2024-T3、T6、T8、7475-T73、7475-T76、7050-T74、2124-T851、2224-T3、2324-T39、7175-T74 材料的研究工作。20 世纪 80 年代中期兴起了跟踪欧美非传统铝合金材料研究,主要对象是 Al-Li 合金,快速凝固铝合金及铝基复合材料。不过,这些非传统铝合金材料目前仍处于研究完善提高、试生产与试用考核阶段,距批量生产与大规模应用还需要一些时日。

1.1.2.4 高纯铝合金研发阶段(1998—2015)

中国为了满足飞机制造的现实要求及未来飞机的发展需要,开展了对 7A04、2A70、2A12、2A06 等合金的高纯化研究,与此同时还开展了对超高强 7A55 合金及高抗蚀铝合金 6A60 的研究,以及对 T77 状态材料的研究等。

从以上的介绍可知,中国在航空航天铝合金的研发和应用方面与欧美发达国家有着明显的差距。我国还需要加强基础理论与工艺的研究;加快将实验室的研究成果转化为生产力;建立完整的航空航天材料体系;进一步完善材料的生产装备。

1.1.3 航空铝合金的发展趋势

航空器的更新换代速度虽然比电子设备的慢一些,但也是相当快的。飞机的发展趋势是高速、长服役期、安全可靠、低的结构质量系数、低成本和低维护工作量和综合隐身。铝工业必须为飞机的更新换代提供新的材料,而且要超越前一代。当前,航空铝合金的发展主要是围绕强度、刚度、耐热性、长使用期限、低成本制造成形技术等而展开的。

1.1.3.1 强度与刚度

提高材料的强度与刚度是一个永恒的话题,目前材料工作者采取的主要措施是:①提高合金化元素含量,不过增加合金元素含量会给合金的熔炼、铸造、加工、成形等带来一系列困难,对合金的抗腐蚀性能、断裂韧性、疲劳性能等都可能不利的影 响。②对合金进行微合金化,此举被认为是最可取的有效措施之一,例如向 Al-Mg 系及 Al-Zn-Mg-Cu 系合金添加小于 0.5% 的 Zr 和/或 Sc 等元素,向 Al-Li 合金添加 Zr、Sc、Zn、Ag 等元素。③热处理,主要是开展多级、分步固溶和固溶时效处理,在满足抗腐蚀性等要求的前提下,尽量提高合金的强度性能。④采用新的制造技术——喷射沉积技术和粉末冶金法制备合金锭坯。后一工艺可以获得强度很高的合金,但是成本高,不易制备大构件;而喷射沉积法被认为是能较好发

展下一代高强铝合金的技术,该技术能以相对低的制备成本生产大型锭坯,可使 $7 \times \times \times$ 系合金的 $(Zn + Mg)$ 含量超过 14% 限度,以达到提高强度目的。时下我国有些研究院已制成这种材料并取得多项专利,可以稳定生产抗拉强度 R_m 超过 700 N/mm^2 的 $7 \times \times \times$ 系航空铝合金。

1.1.3.2 耐热性

飞行速度的提高必然使飞机的气动加热问题和过载问题变得突出,例如 F/A-22 在 M2.0 飞行时的驻点温度可超过 121°C ,这是铝合金蒙皮可耐受的极限温度,达此温度安全隐患便显得突出,因此必须提高铝合金的耐热性能。当今在这方面的研究工作主要集中为:①向低合金化的 $2 \times \times \times$ 系合金中添加少量的 Fe 和 Ni,如新近研发的 2650 合金,就是一种耐热合金,可用于制造超音速飞机的蒙皮。②向传统的 $2 \times \times \times$ 合金中添加微量的特殊合金化元素 Ag。例如,美国的 C415 合金。③采用粉末冶金法、喷射沉积法制备耐热合金取得了较大进展,有可能成为未来制备高温铝合金的主要工艺。美国用这些工艺制备成功的 8019 合金,是一种含 7.3% ~ 9.3% Fe 的高温铝合金。美国还制成了一种牌号为 8009 的耐热铝合金。我国也已自行制备出可在 350°C 使用的喷射沉积铝合金。

1.1.3.3 可靠性与长期服役性

飞机必须有高的可靠性与尽可能长的使用期限,这一目的要求材料必须具有高的断裂韧度、抗疲劳强度与抗腐蚀性能,科学家在这方面做了许多工作,成就非凡,主要措施有:①提高合金的纯净度,即降低铝中固有的杂质 Fe 及 Si 的含量,现在几乎所有的航空航天铝合金都有对应的高纯型合金,首先制成的是 2024 及 7075 高纯合金。②从相图提供的数据出发,严格控制合金成分,减少难熔相、过剩相数量,如 2524 合金的成分范围比 2024 合金窄得多,它们的强度水平相同,但前者的断裂韧度、疲劳性能却比后者的高得多。③热处理对变形铝合金的性能有着极为明显的影响,因此,改变现行热处理制度参数与开发新的热处理工艺成为研究重点之一,例如为提高 $7 \times \times \times$ 合金的抗腐蚀性能与断裂韧度,开发了 T73、T74、T76 状态以及最近研发的三级时效 T77 状态。这些状态在强度、断裂韧度与抗腐蚀、疲劳性能四方面都能满足最新军、民机设计的要求。

为提高铝合金的抗腐蚀性采取的措施为:除对传统的 $2 \times \times \times$ 、 $7 \times \times \times$ 系合金薄板进行包铝以外,国外成功研制出抗蚀性高的 6013、6056 合金,中国成功研制出 7A33 合金;除对 $7 \times \times \times$ 系合金进行过时效处理外,现在也开始研究 6013、6056 等合金的过时效处理,如 T78 热处理技术,以及一些 $2 \times \times \times$ 系合金的时效制度和特殊性,如俄罗斯对 AK4-1 合金进行 T2 处理。目前,多级时效是提高铝合金抗腐蚀性能、强度、韧度、疲劳性能等综合性能的有效措施。提高铝合金的抗腐蚀性能除以上的方法外,还可以采用阳极氧化处理、涂漆、喷粉、贴膜等技术进行表面防护。

1.1.3.4 减轻质量

降低飞机的自身质量有着重要的节能减排效果与经济效益。铝合金减轻

质量有两方面的意义：一是降低铝合金本身的绝对质量；二是提高合金的比强度。常用的减轻质量措施有：①提高合金的比强度，开发高强度合金，如美国的 7055 合金，苏联的 B96 合金，以及用喷射沉积法生产的一些高成分合金。②开发 Al-Li 合金，在铝的合金化元素中锂的密度是最低的，向铝中每添加 1% Li，铝的密度下降约 3%，而其正弹性模量则上升 5% 左右。目前已研制成功一系列的 Al-Li 合金，有 $2 \times \times \times$ 系的、 $5 \times \times \times$ 系的、 $8 \times \times \times$ 系的，并在航空航天器制造中获得了广泛应用，中国天宫一号资源舱舱段的结构部分用 Al-Li 合金材料代替传统材料，为舱段成功减轻质量 10% 以上；C919 大客机机身等直段部段是用 Al-Li 合金制造的，已于 2010 年 12 月 2 日在中航工业洪都公司大飞机部装厂顺利下线。苏联研发的 1420 系列 Al-Li 合金被认为是成功的范例之一，它们的强度虽然不高，但是绝对密度低，在制造非承力件方面获得广泛应用。采用粉末冶金法可以制备绝对密度很低的 Al-Li 合金，如 Al905XL 等。今后 Al-Li 合金的发展趋势是提高其比强度，降低生产成本，加强废料回收与利用。中国制造大飞机用的 Al-Li 合金板材是美国铝业公司达文波特 (Davenport) 轧制厂生产的。③蜂窝铝结构及泡沫铝构件。蜂窝铝结构在航空器制造中已获得成功应用，是用铝箔制备的，生产成本较高，目前正在开发用泡沫铝取代蜂窝结构的研究工作。

1.1.3.5 适应新成形技术的新合金

人们总在追求以较低成本制造零部件与组装结构，在航空器铝合金低成本制造技术方面，目前开展的主要工作有：

①时效成形和超塑成形。前者又被称为蠕变成形或蠕变时效成形，是为大幅度降低飞机零件的制造成本而研发的新成形技术，美国正在研究新型铝合金以适应此法制造机翼的上下翼面。铝合金的超塑成形已得到广泛应用，但不足之处是成形速率低，因此研究成形速率高而各项性能又能全面满足设计要求的新型超塑铝合金是当务之急。

②大力开发可焊性好的铝合金。铝合金的连接在飞机制造中起着非常重要的作用，古老的铆接法仍是制造飞机零部件的主要工艺，大飞机 C919 的机身有 1 670 块铝合金钣金件用了约 600 000 个铆钉铆接而成。总体上铝合金的可焊性并不令人满意，因而在飞机零部件与结构连接中，焊接用得不多。焊接效率比铆接高得多，因而连接成本低。因此，应大力研发可焊性好的铝合金，已研制成的 6013、1420 (俄罗斯的)、Al-Mg-Sc 合金可焊性虽有所提高，但与需求还有一定差距；对常规合金进行微合金化，如向 7010 合金添加少量 Ag、Sc 等元素，以改善可焊性；采用新的焊接工艺，如摩擦搅拌焊 (FSW)。

1.1.4 铝合金在民用飞机上的应用

运输机要求使用寿命长、可靠性高、维修维护和使用成本低等。铝合金具有密度小、综合性能优良 (在飞机上的应用已十分成熟) 和成本低等优点。因此在运输机