

# 铝及铝合金 的焊接

周万盛 姚君山 编著



# 铝及铝合金的焊接

周万盛 姚君山 编著



机械工业出版社

本书全面介绍了铝及铝合金的焊接技术,包括铝及铝合金焊接接头的冶金行为、力学行为、各种焊接方法和焊接质量检验,着重阐述了热处理强化的高强铝合金的焊缝气孔、焊接裂纹的成因和防治以及氩弧焊、变极性等离子弧焊、电子束焊、搅拌摩擦焊和激光焊等焊接方法。

本书作为铝及铝合金焊接技术方面的最新专著,内容丰富、图文并茂,新颖实用、使用方便,突出了铝合金焊接技术领域的最新进展。本书既对铝及铝合金焊接理论基础和新涌现的焊接技术进行了较为全面的阐述,又列举了许多具有代表意义的工程应用实例。

本书可供从事铝及铝合金焊接技术研究和生产工作的人员使用,亦可供大专院校相关专业教学参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

铝及铝合金的焊接/周万盛,姚君山编著. —北京:机械工业出版社, 2006. 1

ISBN 7-111-18276-6

I. 铝… II. ①周…②姚… III. ①铝-焊接②铝合金-焊接  
IV. TG457.14

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第159166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:武江 吕德齐 责任编辑:吕德齐

责任印制:洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2006年3月第1版第1次印刷

1000mm×1400mm B5·15 印张·551千字

0 001—4 000册

定价:42.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68326294

编辑热线(010)68351729

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

铝及铝合金具有优异的物理特性、化学特性、力学特性及工艺特性，是宇航、化工、交通运输等工业重要的结构材料之一。随着焊接技术的进步，人们已研制成多种能够满足各种特殊使用要求的铝合金焊接结构，如宇宙飞船、航天飞机、轻型汽车以及能导电、散热、耐腐蚀、耐超低温的各种铝合金焊接产品。近年来，由于能源危机的威胁，人们对交通运输工具提出了更高的性能要求，既要提高承载和高速运营能力，又要绿色安全、节省燃料，为此就需要大力减轻它们的质量，以铝代钢，发展新型交通工具，如铝质轨道交通车辆、铝质观光游轮等。

铝及铝合金的焊接特性不同于钢铁材料，后者的专业书籍已经很多，但铝及铝合金焊接技术方面的专著很少，已有的少量有关报道也只反映了 20 世纪 80 年代以前的焊接技术水平。到 20 世纪末，铝及铝合金焊接技术取得了迅猛的发展，涌现了多项先进的焊接技术，相关的理论也得到了丰富和完善。

据此，我想有必要编写一本关于铝及铝合金焊接技术的专业书籍，以便反映国内外铝及铝合金焊接技术的最新进展，改变我国这方面专业书籍匮乏的局面，帮助读者了解铝及铝合金焊接的基础知识和先进技术。

我们选择中国机械工程学会焊接学会主编的第 2 版《焊接手册》中与铝及铝合金焊接及其他文献资料中有关的内容作为本书摘编的基础内容，因为它是作者们根据各自的知识经验和参考国内外大量文献资料中的信息编著而成的精品。同时，我与我的合作者也以各自多年来从事铝合金焊接科研和生产中的知识和经验并结合国内外大量资料而编著成此书，贡献给读者。

本书定位为铝及铝合金的焊接专著，内容比较全面，力度有所侧重。全书共 17 章，全面介绍了铝及铝合金焊接接头的冶金行为、力学行为、各种焊接方法及焊接质量检验，着重阐述了热处理强化铝合金的焊缝气孔和焊接裂纹的成因及预防，以及氩弧焊、变极性等离子弧焊、电子束焊、搅拌摩擦焊和激光焊等焊接方法。

本书第 6、9、10、11、12、17 章由姚君山博士编写，其余各章由我编写。

我特别感谢我国《焊接手册》第 2 版有关章节及其他文献资料的各位作者，感谢中国航天科技集团公司第一研究院 211 厂总工程师王国庆先生、第八研究院 149 厂总工程师郭立杰先生、703 所焊接研究室主任刘志华先生，感谢我的合作者姚君山博士及他的夫人王春蕾女士和我的夫人张洁女士，感谢他们以各种不同的方式对本书的编著作出了贡献。

我热切希望本书能够为读者提供有益的帮助，但限于编著者的学识和经验，书中的缺点错误在所难免，殷切希望读者们批评指正。

周万盛

2005 年 10 月 9 日于北京

## 作者简介

### 周万盛



中国航天科技集团总公司北京航天材料及工艺研究所研究员。1932年出生于湖北武昌，1956年毕业于哈尔滨工业大学焊接专业，主要从事航天焊接技术的发展、不锈钢夹层结构真空钎焊工艺及钎料合金、高强度铝合金的焊接性、焊接裂纹、焊丝合金及焊接工艺和焊接标准等研究发展工作。有关成果已应用于航天型号产品的焊接生产，并获得航天工业部科技进步一等奖、国防科工委科技进步二等奖各一项。

**联系地址：**北京市丰台区东高地万源东里94栋6单元5号

**邮 编：**100076

**电 话：**010-68383331

**E-mail:** wsz@sohu.com

### 姚君山



工学博士后，1972年出生于江苏邳县。1995年7月本科毕业于中国石油大学机械系焊接专业，2001年11月于北京航空航天大学获得机械制造及其自动化专业博士学位；2002年1月~2004年8月，于中国航天科技集团总公司第一研究院211厂（首都航天机械公司）从事航天贮箱先进焊接技术方面的博士后研究工作；2004年9月至今，于中国航天科技集团第八研究院149厂（上海航天设备制造总厂）从事我国新一代运载火箭贮箱的研制工作，已发表论文十余篇。

**联系地址：**上海市闵行区华宁路100号，上海航天设备制造总厂技术中心

**邮 编：**200245

**电 话：**021-64301161-2741

**E-mail:** junshan\_yao@sohu.com

# 目 录

## 前言

第1章 概述.....	1	5.1.6 焊接热模拟试验方法.....	68
第2章 基体金属.....	5	5.1.7 使用焊接性直接试验方法.....	68
2.1 分类.....	5	5.2 材料焊接性评价.....	69
2.2 牌号.....	6	5.3 小结.....	85
2.3 状态.....	6	第6章 焊接接头的力学行为.....	86
2.4 成分.....	7	6.1 概述.....	86
2.5 性能.....	12	6.2 焊接接头力学性能的不均匀性.....	87
第3章 填充金属.....	18	6.2.1 铝合金熔焊接头的显微组织.....	88
3.1 成分.....	18	6.2.2 铝合金焊接接头的硬度分布.....	89
3.2 质量.....	18	6.3 典型接头的工作应力分布.....	89
3.3 填充金属的选用.....	23	6.3.1 应力集中.....	89
第4章 焊接接头的冶金行为.....	26	6.3.2 对接接头的应力分布.....	90
4.1 焊接接头的冶金特性.....	26	6.3.3 搭接接头.....	91
4.1.1 焊缝区.....	26	6.3.4 T形(十字)接头.....	95
4.1.2 熔合区.....	32	6.4 焊接应力和变形.....	96
4.1.3 母材热影响区.....	35	6.4.1 产生机理.....	96
4.2 焊接接头的冶金缺陷.....	39	6.4.2 材料物理特性和力学特性的影响.....	98
4.2.1 焊缝气孔.....	40	6.4.3 构件的几何尺寸和热源类型的影响.....	98
4.2.2 焊接裂纹.....	48	6.4.4 焊接残余应力.....	99
4.3 小结.....	59	6.4.5 焊接残余变形.....	110
第5章 材料的焊接性.....	60	6.5 焊接接头的断裂行为.....	122
5.1 焊接性试验方法.....	60	6.5.1 铝合金焊接接头的延性断裂.....	123
5.1.1 焊接裂纹倾向性试验方法.....	61	6.5.2 焊接接头的疲劳断裂.....	139
5.1.2 焊接接头力学性能试验方法.....	66	6.5.3 焊接接头的腐蚀破坏和应力腐蚀断裂.....	145
5.1.3 焊接接头高低温力学性能试验方法.....	66	6.6 小结.....	148
5.1.4 焊接接头疲劳强度试验方法.....	66		
5.1.5 焊接接头断裂韧度试验方法.....	67		

<b>第7章 钨极惰性气体保护电弧焊</b> .....150	8.3.5 熔化极双丝氩弧焊.....215
7.1 焊接过程原理.....151	8.4 熔化极惰性气体保护电弧 焊的应用.....216
7.2 焊接设备.....155	8.5 MIG 焊过程故障及焊接 缺陷.....221
7.3 焊接工艺.....157	8.6 小结.....225
7.3.1 钨极交流手工氩弧焊.....166	<b>第9章 变极性等离子弧焊</b> .....226
7.3.2 钨极交流自动氩弧焊.....169	9.1 概述.....226
7.3.3 钨极交流脉冲氩弧焊.....169	9.2 焊接过程原理与工艺特性.....226
7.3.4 直流正接钨极氩弧焊.....170	9.3 焊接设备.....228
7.3.5 钨极直流正接高频脉 冲氩弧焊.....172	9.3.1 引弧单元.....229
7.4 钨极惰性气体保护电弧焊 的应用.....174	9.3.2 焊接电源.....229
7.4.1 燃料箱筒体搭接环缝 交流钨极自动氩弧焊.....174	9.3.3 焊枪.....232
7.4.2 贮罐双人及双枪交流 钨极氩弧焊.....175	9.4 焊接材料.....235
7.4.3 铝合金开口薄壁筒体 TIG 焊工艺装备.....176	9.5 焊接工艺及接头性能.....236
7.4.4 铝合金薄壁油箱悬空 脉冲 TIG 自动氩弧焊.....178	9.5.1 接头形式与装配.....236
7.4.5 铝合金贮箱封头 TIG 自 动氩弧焊系统.....179	9.5.2 VPPAW 焊接工艺.....236
7.5 焊接过程故障及焊接缺陷.....184	9.6 变极性等离子弧焊的 工业应用.....246
7.5.1 过程故障及其成因.....184	9.7 小结.....247
7.5.2 焊接缺陷及其成因.....186	<b>第10章 电子束焊</b> .....248
7.6 小结.....188	10.1 概述.....248
<b>第8章 熔化极惰性气体保护 电弧焊</b> .....189	10.2 原理、特点和分类.....248
8.1 焊接过程原理.....189	10.2.1 电子束焊的原理.....248
8.1.1 焊丝的加热及熔化.....189	10.2.2 电子束焊的特点.....249
8.1.2 熔滴过渡.....190	10.2.3 电子束焊的分类.....251
8.2 焊接设备.....194	10.3 焊接设备.....252
8.3 焊接工艺.....200	10.3.1 电子枪.....253
8.3.1 熔化极半自动氩弧焊.....209	10.3.2 高压电源及控制系统.....255
8.3.2 熔化极自动氩弧焊.....211	10.3.3 真空系统.....256
8.3.3 熔化极脉冲氩弧焊.....212	10.3.4 焊接工作台和工 装夹具.....256
8.3.4 熔化极大电流氩弧焊.....213	10.3.5 工业应用的电子 束焊机.....257
	10.4 一般焊接工艺.....257
	10.4.1 接头设计.....257
	10.4.2 焊前准备.....259

10.4.3	焊接参数 .....	260	12.2	搅拌摩擦焊原理与工艺特性 .....	311
10.4.4	工艺控制 .....	261	12.3	搅拌头的发展 .....	313
10.5	铝合金电子束焊 .....	263	12.3.1	柱形搅拌探头 .....	314
10.5.1	铝合金电子束焊特点 .....	263	12.3.2	锥形螺纹搅拌探头和三角锥形螺纹搅拌探头 .....	315
10.5.2	铝合金电子束焊的接头性能 .....	265	12.3.3	偏心圆搅拌探头和偏心圆螺纹搅拌探头 .....	316
10.6	电子束焊技术的应用 .....	268	12.3.4	非对称螺纹搅拌探头 .....	317
10.7	小结 .....	271	12.3.5	外开螺纹搅拌头 .....	318
<b>第 11 章</b>	<b>激光焊 .....</b>	<b>272</b>	12.3.6	用于搭接的两级搅拌探头 .....	318
11.1	概述 .....	272	12.3.7	可伸缩式搅拌头 .....	319
11.2	激光器 .....	273	12.4	铝合金的搅拌摩擦焊 .....	320
11.2.1	YAG 激光器 .....	273	12.4.1	铝及铝合金 FSW 接头的性能及其影响因素 .....	321
11.2.2	CO <sub>2</sub> 激光器 .....	274	12.4.2	铝合金搅拌摩擦焊机 .....	324
11.2.3	铝合金激光焊用激光器的选择 .....	277	12.5	搅拌摩擦焊接头的缺陷、检测和修补 .....	326
11.3	激光焊原理 .....	277	12.5.1	搅拌摩擦焊接头缺陷分类 .....	326
11.3.1	激光焊分类 .....	277	12.5.2	搅拌摩擦焊缺陷的特征及分布 .....	327
11.3.2	激光焊过程中的几种效应 .....	278	12.5.3	搅拌摩擦焊缺陷的检测与补焊 .....	328
11.4	激光深熔焊 .....	281	12.6	搅拌摩擦焊的工业应用 .....	329
11.4.1	激光深熔焊接设备的选择 .....	281	12.6.1	FSW 在航天工业的应用 .....	329
11.4.2	深熔焊接的接头设计 .....	281	12.6.2	FSW 在航空工业的应用 .....	331
11.4.3	工艺参数及其对熔深的影响 .....	282	12.6.3	FSW 在造船工业的应用 .....	333
11.5	激光复合焊 .....	285	12.6.4	FSW 在客车制造中的应用 .....	335
11.6	铝合金的激光焊 .....	286	12.6.5	FSW 在汽车制造中的应用 .....	336
11.6.1	铝合金 CO <sub>2</sub> 激光深熔焊的阈值及影响因素 .....	287			
11.6.2	CO <sub>2</sub> 激光填丝焊 .....	290			
11.6.3	预置填料激光焊 .....	293			
11.6.4	激光粉末焊 .....	294			
11.6.5	激光压焊 .....	303			
11.7	小结 .....	309			
<b>第 12 章</b>	<b>搅拌摩擦焊 .....</b>	<b>310</b>			
12.1	概述 .....	310			



12.7 小结 .....	337	15.3 扩散焊工艺 .....	398
<b>第 13 章 电阻焊</b> .....	<b>338</b>	15.4 扩散焊缺陷 .....	401
13.1 焊接过程原理 .....	339	15.5 扩散焊技术的应用 .....	402
13.1.1 热的产生 .....	339	15.6 小结 .....	403
13.1.2 热的平衡 .....	342	<b>第 16 章 其他焊接方法</b> .....	<b>404</b>
13.1.3 焊接循环 .....	343	16.1 火焰气焊 .....	404
13.2 电阻焊设备 .....	344	16.1.1 火焰的特性 .....	404
13.2.1 电阻焊机 .....	344	16.1.2 溶剂 .....	406
13.2.2 电阻焊机的控制装置 .....	347	16.1.3 火焰气焊工艺 .....	407
13.3 点焊 .....	349	16.2 变形焊 .....	409
13.4 缝焊 .....	354	16.2.1 冷压焊 .....	411
13.5 闪光电阻对焊 .....	356	16.2.2 热压焊 .....	416
13.6 小结 .....	360	16.2.3 超高真空变形焊 .....	416
<b>第 14 章 钎焊</b> .....	<b>361</b>	16.3 爆炸焊 .....	416
14.1 钎焊过程原理 .....	362	16.3.1 爆炸焊过程及焊接 原理 .....	417
14.2 钎焊材料 .....	365	16.3.2 爆炸焊工艺 .....	419
14.2.1 钎料 .....	366	16.3.3 爆炸焊缺陷和检验 .....	423
14.2.2 钎剂 .....	370	16.3.4 爆炸焊技术的应用 .....	426
14.2.3 钎料润湿铺展及填 缝试验 .....	377	16.3.5 爆炸焊生产安全 .....	427
14.3 钎焊工艺 .....	379	16.4 超声波焊 .....	428
14.4 钎焊技术的应用 .....	386	16.4.1 超声波焊接系统及其 工作原理 .....	429
14.4.1 计算机铝合金机箱真 空炉中钎焊 .....	386	16.4.2 超声波焊接设备 .....	432
14.4.2 计算机铝合金机箱气 体保护炉中钎焊 .....	387	16.4.3 超声波焊接工艺 .....	433
14.4.3 铝波导真空炉中钎焊 .....	388	16.4.4 接头性能及焊接机理 .....	436
14.4.4 客车铝窗框型材火 焰钎焊 <sup>[56]</sup> .....	389	16.4.5 超声波焊技术的应用 .....	438
14.5 钎焊接头缺陷及其成因 .....	391	16.5 小结 .....	438
14.6 小结 .....	392	<b>第 17 章 焊接接头质量检验</b> .....	<b>439</b>
<b>第 15 章 扩散焊</b> .....	<b>393</b>	17.1 概述 .....	439
15.1 焊接过程原理 .....	393	17.2 焊接接头质量检验方法 .....	440
15.1.1 固相扩散焊 .....	393	17.2.1 焊接检验方法的分类 .....	440
15.1.2 液相扩散焊 .....	395	17.2.2 破坏性检验方法 .....	441
15.2 扩散焊设备 .....	396	17.2.3 非破坏性检验方法 .....	445
		17.2.4 无损检测 .....	447
		17.3 小结 .....	466
		<b>参考文献</b> .....	<b>467</b>

# 第 1 章 概 述

与其他金属相比较，铝及铝合金具有独特的和优异的物理特性、化学特性、力学特性及工艺特性，能适应现代科技及高新工程发展的需要，广泛应用于制造各类工业产品。

几种金属的物理特性及力学特性的比较分别如表 1-1、1-2 所示。

由表 1-1、表 1-2 可见，铝及铝合金的密度仅为钢的密度的 1/3，小于除金属镁以外的其他金属的密度。诚然，其抗拉强度和弹性模量比钢低，但铝合金经热处理强化后，其比强度（抗拉强度与密度之比）已超过高强度钢而接近超高强度钢（例如马氏体时效钢），其比模量（弹性模量与密度之比）则接近于高强度钢。因此，铝合金特别适用于轻质承载结构。

铝及铝合金为面心立方晶体结构。当温度降低时，它们不发生脆性转变，其强度、延性、韧度不仅不降低，反而可同步提升。现在，铝合金的工作温度可达零下 253℃，因此，特别适用于低温和超低温容器。

表 1-1 几种金属的物理特性

特性参数 金属名称	密度 /(kg/m <sup>3</sup> )	电导率 %I.A.C.S	25℃时热导率 (25℃) /[W/(m·℃)]	线膨胀系数 /℃	比热容 (0-100℃) /(J/kg·℃)	熔点 /℃
铝	2700	62	222	23.6×10 <sup>-6</sup>	940	660
铜	8925	100	394	16.5×10 <sup>-6</sup>	376	1083
65/35 黄铜	8430	27	117	20.3×10 <sup>-6</sup>	368	930
低碳钢	7800	10	46	12.6×10 <sup>-6</sup>	496	1350
304 不锈钢	7880	2	21	16.2×10 <sup>-6</sup>	490	1426
镁	1740	38	159	25.8×10 <sup>-6</sup>	1022	651

表 1-2 几种金属的力学特性

金 属	密度 $\rho$ /(g/cm <sup>3</sup> )	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	弹性模量 E/MPa	比强度 /×10 <sup>3</sup> cm	比模量 /×10 <sup>3</sup> cm
7A04 超硬铝	2.85	588	69.630	2.10	2.49
MB15 镁合金	1.80	314	42.170	1.78	2.39
TC4 钛合金	4.43	1030	110.819	2.37	2.55
30CrMnSi 高强度钢	7.85	1079	196.140	1.40	2.54
00Ni18Co9Mo5TiAl 马氏体不锈钢	8.0	1765	181.430	2.25	2.31

铝及铝合金的化学性质活泼、极易氧化，在大气条件下，其表面可随时生成一层附着力强的和难熔的（熔点  $2050^{\circ}\text{C}$ ）氧化膜（ $\text{Al}_2\text{O}_3$ ），它对铝及铝合金表面起防止进一步氧化和介质腐蚀的作用，因而其耐腐蚀性好，可在不同气候条件下与液态的氢、氧、氮、天然气和重水、石油、浓硝酸、冰醋酸等长期接触和相容。因此，特别适用于化工容器。

铝的电导率高，是低碳钢的约六倍，其热导率也高，是低碳钢的约五倍，前者适用于电力输配，后者适用于热交换。

铝及铝合金的工艺性好，易于轧压、挤压、锻压、冲压、旋压，可制成各种截面形状的铝材（如棒、板、管、丝、带）和各种形状型材，如图 1-1 所示。挤压型材有利于减少焊缝数量、减小焊接变形，便于装配焊接，适于制造轻质复杂结构。

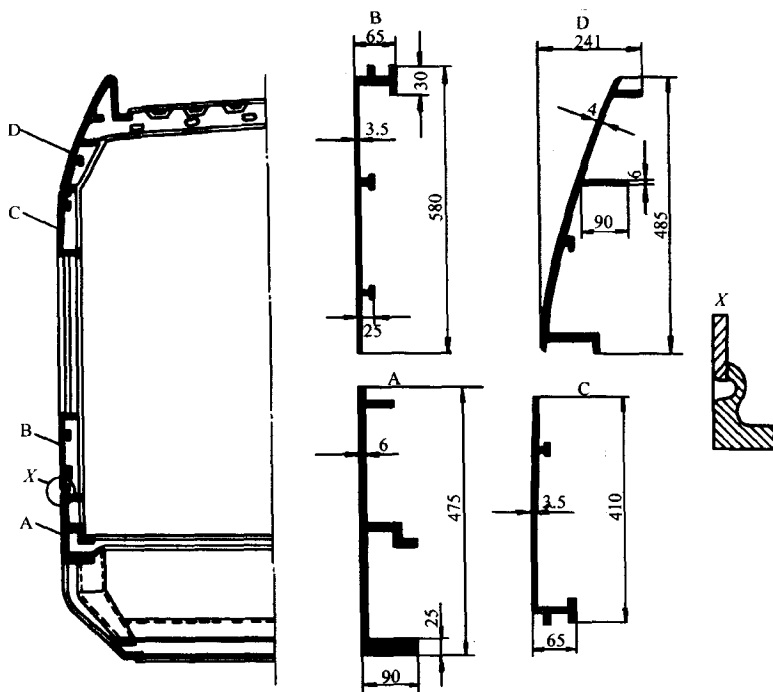


图1-1 车箱侧壁铝合金挤压型材的截面

铝及铝合金的理化特性也使其焊接工艺与钢有许多不同之处。铝及铝合金的表面氧化膜可妨碍焊接及钎焊过程的进行或引发一些与其相关的缺陷。因此，焊接前需将其去除，焊接过程中需防止焊接区发生氧化。由于其比热、电导率及热导率很高，焊接时，特别是电阻焊时，焊接热输入应远大于焊接钢件，需采用功率很大的焊接设备。由于其线膨胀系数较大，焊件变形及裂

纹倾向也较大，焊接时需采取相应的有效措施。由于焊铝时的温度变化不会引起焊件颜色的变化，故焊接时操作有一定难度，需提高焊工的技术熟练程度。铝及多数防锈铝合金焊接性好，但不少高强度铝合金焊接性不良，特别是容易在焊接过程中产生焊接裂纹或钎焊时发生母材过烧现象。

目前，铝及铝合金的焊接技术已经有了长足的进步。除早年的气焊、电弧焊外，现已广泛采用氩弧焊、氦弧焊、等离子弧焊、真空电子束焊、真空钎焊、气体保护钎焊、电阻焊、扩散焊、摩擦焊及其他许多特种焊接方法。有些历来被视为不可焊的铝合金，如 Al-Cu-Mg、Al-Cu-Mg-Si、Al-Zn-Mg、Al-Li 等硬铝及超硬铝合金，通过新型的氩弧焊、氦弧焊、搅拌摩擦焊等新方法及特殊焊接材料的配合，已成为可焊的铝合金并制成高新产品。

铝及铝合金焊接结构已成为我国民用及军工产品上的重要组成部分。例如各种化工容器，包括能贮存浓硝酸、醋酸、酒精、尿素、聚乙烯醇、碳酸氢氨等介质的耐腐蚀容器及能贮存液氧、液氮、液氢、液氦及液态天然气等介质的耐超低温容器，它们都是全部用铝或铝合金制成的焊接结构。例如各种交通运输工具，包括地面的各种车辆，如轿车、货车、槽车、缆车、铁道列车、磁悬浮列车等；水上的舰船，如巡逻艇、鱼雷及鱼雷快艇、气垫船、双体船、水翼船、水陆两用坦克等，突出的实例是国产的“南星”号和“北星”号燃气轮机喷水推进的深浸式自控水翼客船和“远舟 I 型”水翼高速客船，其船体即为高强度铝合金的焊接结构，如图 1-2 及 1-3 所示，它们已分别航行于香港与澳门之间和重庆与万州之间；还有空中的飞行器，如飞机、火箭、飞船、太空站、宇宙探测器等，突出的实例是“神舟五号”、“神舟六号”载人宇宙飞船及“长征二号”捆绑式运载火箭，如图 1-4 所示。其宇航员座舱的舱体及推进剂贮箱的箱体均为高强度铝合金焊接结构，它们已完成了运载中国太空人上天的壮举。



图1-2 燃气轮机喷水推进深浸式自控水翼客船

随着我国现代化建设的高速发展，铝及铝合金焊接结构及其焊接材料和焊接工艺必将获得更广泛的应用和更快速的发展。

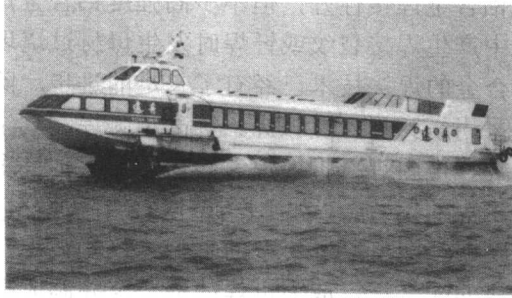


图1-3 水翼高速客船

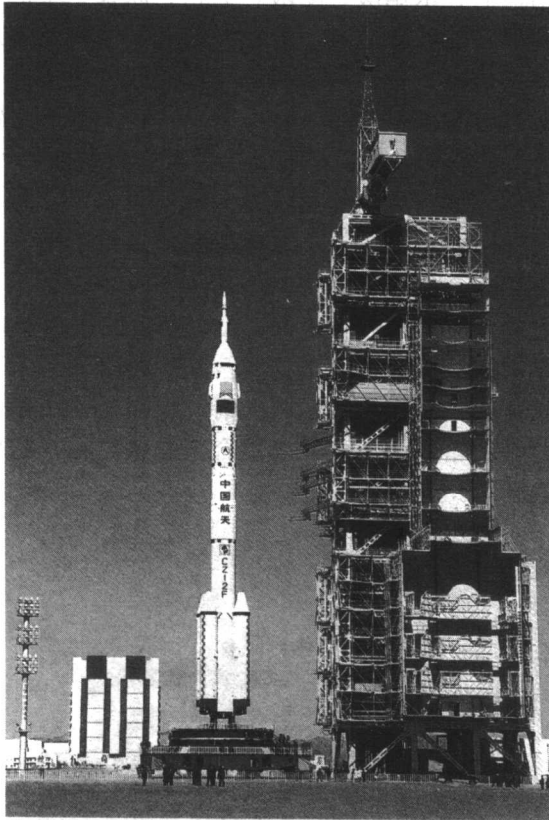


图1-4 “神舟5号”载人宇宙飞船及“长征二号”捆绑式运载火箭

## 第2章 基体金属

被焊接的金属或合金统称为基体金属，或称为母材。

作为基体金属，铝及铝合金的分类、牌号及状态代号与钢及其他金属显著不同。特别是铝及铝合金的状态代号非常复杂，又非常重要。它们表示了铝及铝合金焊前变形强化的不同程度或不同热处理强化的不同程度。不了解这些状态代号的具体规定就无法了解母材焊前的工艺经历、力学性能、组织特征及焊接特性。

### 2.1 分类

铝及铝合金分为两大类。

一大类为变形铝及铝合金，它一般表现为冶金工业半成品，即板、棒、管、丝、带等，或具有一定形状及尺寸的锻件和挤压型材。

另一大类为铸造铝合金，它一般表现为铸造的零件或其毛坯。

变形铝及铝合金又可分为两类，一类为热处理不可强化的铝及铝合金（或称为非热处理强化铝及铝合金）。它们只可变形强化，由于热处理强化效应很弱，故不能热处理强化。此类铝及铝合金有工业纯铝，Al-Mn系防锈铝合金、Al-Mg系防锈铝合金。另一类为热处理强化铝合金。它们既可变形强化，也可热处理强化。此类铝合金有Al-Cu、Al-Mg-Si、Al-Zn、Al-Li等系列铝合金。

表 2-1 变形铝及铝合金牌号表示法

组 别	牌 号
纯铝 (w (Al) 不小于 99.00%)	1×××
以铜为主要合金元素的铝合金	2×××
以锰为主要合金元素的铝合金	3×××
以硅为主要合金元素的铝合金	4×××
以镁为主要合金元素的铝合金	5×××
以镁和硅为主要合金元素且以 MgSi 相为强化相的铝合金	6×××

(续)

组 别	牌 号
以锌为主要合金元素的铝合金	7×××
以其他合金元素为主要合金元素的铝合金	8×××
备用合金组	9×××

## 2.2 牌号

按我国标准 GB/T 16474—1996《变形铝及铝合金牌号表示法》，变形铝及铝合金采用四位字符体系牌号，牌号的第一位数字表示铝及铝合金的组别，如表 2-1 所示；第三及第四位数字表示同一组中不同的铝合金或表示纯铝的纯度。

## 2.3 状态

按我国标准 GB/T 16475—1966《变形铝及铝合金状态代号》，铝及铝合金有下列五种状态：

F——自由加工状态。合金力学性能无规定。

O——退火状态。合金充分软化，延性高，强度水平最低。

H——加工硬化状态。有不同硬化程度，用 H 代号后的数字表示。

W——固溶热处理状态。合金经固溶处理，然后自然时效。

T——热处理状态（不同于 F、O、H 状态）。合金固溶时效后有不同强化程度，用 T 代号后的数字表示。

加工硬化状态代号 H 后面的第一位数字的含义：

H1——单纯加工硬化状态，未经附加热处理。

H2——加工硬化及不完全退火状态。

H3——加工硬化及稳定化处理状态。

加工硬化状态代号 H 后面的第二位数字（从 1 到 9）表示产品的加工硬化程度，如：

H18——单纯加工硬化到硬状态。

H19——单纯加工硬化到超硬状态。

加工硬化状态代号 H 后面的第三位数字的含义：

H111——最终退火后又进行了适量加工硬化，但其加工硬化程度又不及 H11 状态。

H112——适用于热加工成形的合金制品，对其力学性能有规定要求。

热处理状态代号 T 后面的第一位数字的含义:

- T0——固溶热处理后经自然时效再通过冷加工的状态。
- T1——由高温成形过程冷却, 然后自然时效至基本稳定状态。
- T2——由高温成形过程冷却, 经冷加工后自然时效至基本稳定状态。
- T3——固溶处理后进行冷加工, 再经自然时效至基本稳定状态。
- T4——固溶处理后不经冷加工, 只经自然时效至基本稳定状态。
- T5——由高温成形过程冷却, 然后人工时效的状态。
- T6——固溶处理后再人工时效的稳定状态。
- T7——固溶处理后进行过时效的状态。
- T8——固溶处理后经冷加工, 然后人工时效的状态。
- T9——固溶处理后经人工时效, 然后冷加工的状态。
- T10——高温成型后进行冷加工, 然后人工时效的状态。

T 状态代号后面的第二位数字表示经明显改变合金特性(如力学性能、耐腐蚀性能)的特定工艺处理后的状态, 例如:

- T42——自 O 或 F 状态固溶处理后自然时效至充分稳定的状态。
- T62——自 O 或 F 状态固溶处理后再进行人工时效的状态。
- T73——固溶处理后再过时效以达到规定力学性能和耐应力腐蚀性能指标的状态。
- T74——与 T73 状态定义相同, 其抗拉强度大于 T73 状态, 但小于 T76 状态。
- T76——与 T73 状态定义相同, 其抗拉强度分别高于 T73、T74 状态, 耐应力腐蚀断裂性能分别低于 T73、T74 状态, 但其抗剥落性能较好。
- T81——固溶处理后经, 经 1% 左右的冷加工变形以提高强度, 然后进行人工时效的状态。
- T87——适用于固溶处理后, 经 7% 左右的冷加工变形以提高强度, 然后进行人工时效的状态。

T 状态代号后面再加第四位或第五位或第六位数字则表示经过不同的消除应力处理的状态。

## 2.4 成分

按国家标准 GB/T 3190—1996《变形铝及铝合金化学成分》及 GB/T 1173—1995《铸造铝合金》的规定, 铝及铝合金化学成分如表 2-2、表 2-3、表 2-4 所示。



表 2-2 铝及铝合金的牌号及化学成分

序号	牌号	化 学 成 分 (质量分数, %)													新旧 牌号 对照			
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn		Ti	Zr	其 他					
																单个	合计	Al
1	1070A	0.20	0.25	0.03	0.03	0.03	—	—	0.07	—	0.03	—	0.03	—	0.03	—	99.70	L1
2	1370	0.10	0.25	0.02	0.01	0.02	0.01	—	0.04	Ca: 0.03; V+Ti: 0.02 B: 0.02	—	—	—	—	0.02	0.10	99.70	
3	1060	0.25	0.35	0.05	0.03	0.03	—	—	0.05	V: 0.05	0.03	—	0.03	—	0.03	—	99.60	L2
4	1050	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	—	—	0.05	V: 0.05	0.03	—	0.03	—	0.03	—	99.50	—
5	1050A	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	—	—	0.07	—	0.05	—	0.05	—	0.03	—	99.50	L3
6	1A50	0.30	0.30	0.01	0.05	0.05	—	—	0.03	Fe+Si: 0.45	—	—	—	—	0.03	—	99.50	LB2
7	1035	0.35	0.6	0.10	0.05	0.05	—	—	0.10	V: 0.05	0.03	—	0.03	—	0.03	—	99.35	L4
8	1A30	0.10~0.20	0.15~0.30	0.05	0.01	0.01	—	0.01	0.02	—	0.02	—	0.02	—	0.03	—	99.30	L4-1
9	1100	Si+Fe: 0.95	0.05~0.20	0.05	0.05	—	—	—	0.10	①	—	—	—	—	0.05	0.15	99.00	L5-1
10	1200	Si+Fe: 1.00	0.05	0.05	0.05	—	—	—	0.10	—	—	—	0.05	—	0.05	0.15	99.00	L5
11	2A12	0.50	0.50	3.8~4.9	0.30~0.9	1.2~1.8	—	0.10	0.30	Fe+Ni: 0.50	0.15	—	0.15	—	0.05	0.10	余量	LY12
12	2A14	0.6~1.2	0.7	3.9~4.8	0.40~1.0	0.40~0.8	—	0.10	0.30	—	0.15	—	0.15	—	0.05	0.10	余量	LD10
13	2A16	0.30	0.30	6.0~7.0	0.40~0.8	0.05	—	—	0.10	—	0.10~0.20	0.20	0.10~0.20	0.05	0.10	0.10	余量	LY16
14	2B16	0.25	0.30	5.8~6.8	0.20~0.40	0.05	—	—	—	V: 0.05~0.15	0.08~0.20	0.10~0.25	0.10~0.25	0.05	0.10	0.15	余量	—
15	2A20	0.20	0.30	5.8~6.8	—	0.02	—	—	0.10	V: 0.05~0.15 B: 0.001~0.01	0.07~0.16	0.10~0.25	0.10~0.25	0.05	0.15	0.15	余量	LY20
16	2014	0.50~1.2	0.7	3.9~5.0	0.40~1.2	0.20~0.8	0.10	—	0.25	③	0.15	—	0.15	—	0.05	0.15	余量	—
17	2014A	0.50~0.9	0.50	3.9~5.0	0.40~1.2	0.20~0.8	0.10	0.10	0.25	Ti+Zr: 0.20	0.15	—	0.15	—	0.05	0.15	余量	—
18	2219	0.20	0.30	5.8~6.8	0.20~0.40	0.02	—	—	0.10	V: 0.05~0.15	0.02~0.10	0.10~0.25	0.10~0.25	0.05	0.15	0.15	余量	LY19
19	2024	0.50	0.50	3.8~4.9	0.30~0.9	1.2~1.8	0.10	—	0.25	③	0.15	—	0.15	—	0.05	0.15	余量	—