

轻质材料 焊接技术

QINGZHI CAILIAO HANJIE JISHU

李亚江 等编著



化学工业出版社

轻质材料 焊接技术

QINGZHI CAILIAO HANJIE JISHU

李亚江 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书从实用的角度出发,详细介绍了各种轻质材料的焊接技术,包括钛和钛合金的焊接、铝和铝合金的焊接、镁和镁合金的焊接、叠层材料的焊接、异种轻金属的焊接、轻质复合材料的焊接等内容。从各种轻质材料的特性、焊接性、焊接工艺要点等方面做了系统阐述,并给出了一些轻质材料焊接研发和生产的成功案例,为读者掌握轻质材料的焊接和工程应用提供理论指导和实践经验。

本书适用面较广,主要供从事轻质材料研发、焊接生产和制造相关工作的工程技术人员、管理人员、质量检验人员使用,也可供高等院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

轻质材料焊接技术/李亚江等编著. —北京:化学工业出版社, 2019.6

ISBN 978-7-122-34154-9

I. ①轻… II. ①李… III. ①轻质材料-焊接 IV. ①TG457

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 053957 号

责任编辑:张兴辉 金林茹

文字编辑:陈 喆

责任校对:宋 玮

装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:三河市延风印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张21 字数482千字 2019年7月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888

售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 89.00 元

版权所有 违者必究

轻质材料所具有的特殊优异性能和发展潜力使其在减轻结构质量、节能减排、提高装备性价比等方面独具特色，成为世界各国重点发展与应用的先进结构材料。我国近年来加快了轻质材料的研发和产业化进程，完成了一批关键技术的突破，扩大了轻质材料的应用范围，使其在尖端科学和高新技术领域发挥了重要的作用。

虽然轻质材料（如轻金属及合金、轻质复合材料等）在工程应用中所占的比例较小，处于补充地位，但轻质材料的重要作用却是其他材料无法代替的，特别是在航空航天、舰船和国防装备领域，轻质材料更是占据着举足轻重的地位，受到世界各国的高度重视。随着近年来市场经济的发展，轻质材料的应用越来越广泛，已从原来的航空航天、军工部门逐渐扩展到电子、通信、车辆、船舶等民用领域，轻质材料的焊接也日益受到人们的关注。

轻质材料焊接有自己独特的特点，比常规钢铁材料的焊接复杂得多，这给焊接工作带来很大的困难。本书的特点是从实用的角度阐述轻金属（如钛、铝、镁及其合金等）以及轻质复合材料的焊接特点、焊接方法和焊接工艺要点，给出一些轻质材料焊接研发和生产应用的成功案例。为读者掌握轻质材料的焊接和工程应用提供理论指导和实践经验。

本书适用面广，主要供从事轻质材料研发、焊接生产和制造相关工作的工程技术人员、管理人员、质量检验人员使用，也可供高等院校师生参考。

参加本书撰写的其他人员还有王娟、夏春智、魏守征、刘坤、陈茂爱、刘如伟、蒋庆磊、刘鹏、沈孝芹、吴娜、李嘉宁、马群双、许有肖。

在此向所引用文献的作者表示感谢。书中不足之处，恳请广大读者批评指正。

作者

目 录

第1章 概述 / 1

- 1.1 轻质材料焊接的发展 / 2
 - 1.1.1 轻质材料发展的战略意义 / 2
 - 1.1.2 轻质材料焊接现状 / 3
- 1.2 轻金属的分类及性能 / 3
 - 1.2.1 轻金属的分类 / 3
 - 1.2.2 轻金属的主要特性 / 4
- 1.3 轻质材料的焊接应用 / 7
 - 1.3.1 轻金属焊接的难易程度 / 7
 - 1.3.2 钛及其合金的焊接应用 / 8
 - 1.3.3 铝及其合金的焊接应用 / 12
 - 1.3.4 镁及其合金的焊接应用 / 16
 - 1.3.5 轻质复合材料的焊接应用 / 19
- 参考文献 / 20

第2章 钛及钛合金的焊接 / 21

- 2.1 钛及钛合金的分类和性能 / 22
 - 2.1.1 钛及钛合金的分类 / 22
 - 2.1.2 钛及钛合金的化学成分及性能 / 23
- 2.2 钛及钛合金的焊接性分析 / 25
 - 2.2.1 接头区脆化 / 26
 - 2.2.2 焊接裂纹倾向 / 29
 - 2.2.3 焊缝中的气孔 / 30
- 2.3 钛及钛合金的焊接工艺 / 32
 - 2.3.1 钛及钛合金焊接工艺特点 / 33
 - 2.3.2 钛及钛合金的氩弧焊 (TIG焊/MIG焊) / 41

2.3.3 钛及钛合金的等离子弧焊 (PAW) / 53

2.3.4 钛及钛合金的电子束焊 / 54

2.3.5 钛及钛合金的扩散焊 / 61

2.3.6 钛及钛合金的电阻焊 / 66

2.3.7 钛及钛合金的其他焊接方法 / 68

参考文献 / 70

第3章 铝及铝合金的焊接 / 71

3.1 铝及铝合金的特性和焊接特点 / 72

3.1.1 铝及铝合金的分类和性能 / 72

3.1.2 铝及铝合金的焊接特点 / 76

3.1.3 铝及铝合金的常用焊接方法 / 77

3.1.4 铝及铝合金焊接材料 / 80

3.2 铝及铝合金的焊接性分析 / 85

3.2.1 焊缝中的气孔 / 85

3.2.2 焊接热裂纹 / 88

3.2.3 焊接接头的力学性能 / 91

3.2.4 铝合金焊接修复和焊接性评定 / 96

3.3 铝及铝合金焊接工艺 / 98

3.3.1 焊前准备 / 98

3.3.2 铝及铝合金的钨极氩弧焊 (TIG 焊) / 99

3.3.3 铝及铝合金的熔化极氩弧焊 (MIG 焊) / 103

3.3.4 铝及铝合金的搅拌摩擦焊 (FSW) / 109

3.3.5 铝及铝合金的钎焊 / 117

3.3.6 铝及铝合金的激光焊 / 123

参考文献 / 126

第4章 镁及镁合金的焊接 / 127

4.1 镁及镁合金的分类、性能及焊接性特点 / 128

4.1.1 镁及镁合金的分类 / 128

4.1.2 镁及镁合金的成分及性能 / 130

4.1.3 镁及镁合金的焊接性特点 / 133

- 4.1.4 镁合金的应用 / 135
- 4.2 镁及镁合金焊接工艺 / 136
 - 4.2.1 焊接材料及焊前准备 / 136
 - 4.2.2 镁及镁合金的氩弧焊 / 138
 - 4.2.3 镁及镁合金的电阻点焊 / 142
 - 4.2.4 镁及镁合金的气焊 / 143
 - 4.2.5 镁及镁合金的搅拌摩擦焊 (FSW) / 144
 - 4.2.6 镁及镁合金的其他焊接方法 / 147
- 4.3 镁及镁合金焊接实例 / 152
 - 4.3.1 AZ31B 镁合金的钨极氩弧焊 / 152
 - 4.3.2 电子控制柜镁合金组合件 TIG 焊 / 154
 - 4.3.3 镁合金汽轮机喷嘴裂纹的电子束焊修复 / 155
 - 4.3.4 飞机发动机镁合金铸件裂纹的 TIG 焊修复 / 156
 - 4.3.5 AZ31B/AZ61A 异种镁合金的搅拌摩擦焊 / 157
 - 4.3.6 镁合金超声波振动钎焊 / 160
 - 4.3.7 镁合金自行车架的脉冲交流 TIG 焊 / 161
 - 4.3.8 ZM 镁合金铸件缺陷的补焊 / 164
- 参考文献 / 166

第 5 章 叠层材料的焊接 / 169

- 5.1 叠层材料的性能特点及焊接性 / 170
 - 5.1.1 叠层材料的性能特点 / 170
 - 5.1.2 叠层材料的焊接性分析 / 173
 - 5.1.3 叠层材料的焊接研究现状 / 176
 - 5.1.4 微叠层复合材料加工及增韧机制 / 178
- 5.2 叠层材料的填丝钨极氩弧焊 / 183
 - 5.2.1 叠层材料填丝 TIG 焊的工艺特点 / 183
 - 5.2.2 叠层材料焊接区的熔合状态 / 184
 - 5.2.3 叠层材料与 18-8 钢焊接区的组织性能 / 190
 - 5.2.4 叠层复合材料焊接区的应力分析 / 193
- 5.3 叠层材料的扩散钎焊 / 203
 - 5.3.1 叠层材料扩散钎焊的工艺特点 / 203

- 5.3.2 叠层材料与 18-8 钢扩散钎焊的界面状态 / 206
- 5.3.3 叠层材料/18-8 钢扩散钎焊接头的显微硬度 / 213
- 5.3.4 叠层材料/18-8 钢扩散钎焊接头的剪切强度 / 217
- 5.4 叠层材料与钛合金的过渡液相扩散焊 / 219
 - 5.4.1 叠层材料与钛合金 TLP 扩散焊的工艺特点 / 219
 - 5.4.2 叠层材料与钛合金 TLP 扩散焊的界面行为 / 221
 - 5.4.3 叠层材料与钛合金 TLP 扩散焊接头的性能特点 / 226
- 参考文献 / 228

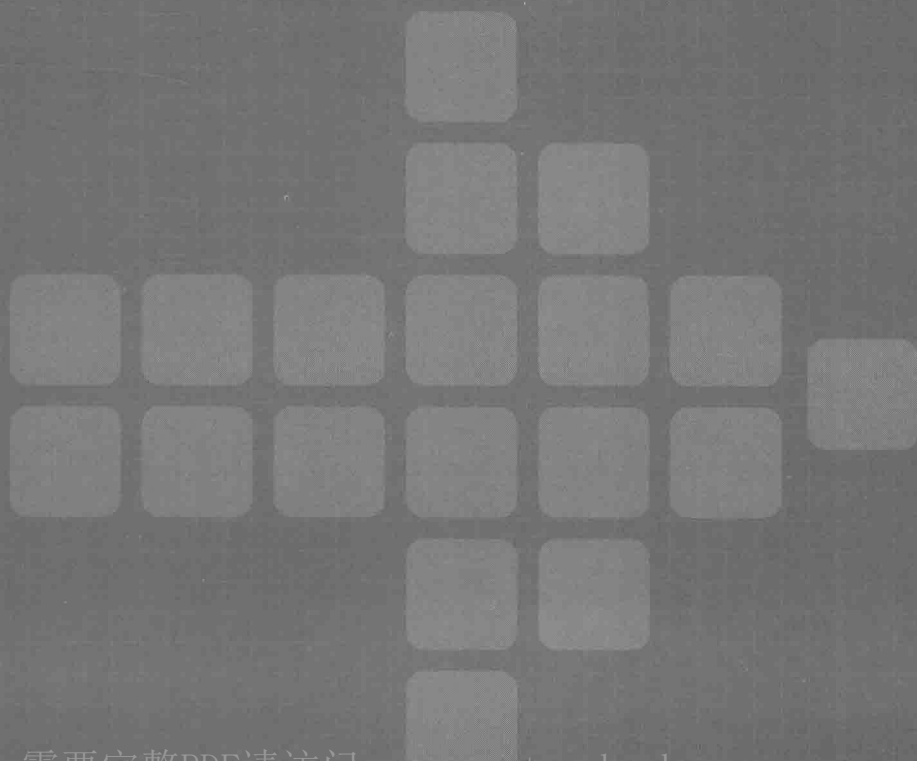
第 6 章 异种轻金属的焊接 / 231

- 6.1 铜与铝及铝合金的焊接 / 232
 - 6.1.1 铜与铝及铝合金的焊接特点 / 232
 - 6.1.2 铜与铝及铝合金的熔焊 / 234
 - 6.1.3 铜与铝及铝合金的压焊 / 237
 - 6.1.4 铜与铝及铝合金的钎焊 / 245
 - 6.1.5 铜与铝的搅拌摩擦焊 / 251
- 6.2 铜与钛及钛合金的焊接 / 254
 - 6.2.1 铜与钛及钛合金的焊接特点 / 254
 - 6.2.2 铜与钛及钛合金的氩弧焊 / 254
 - 6.2.3 铜与钛及钛合金的扩散焊 / 255
- 6.3 钛与铝的焊接 / 257
 - 6.3.1 钛与铝的焊接性特点 / 257
 - 6.3.2 钛与铝的钨极氩弧焊 / 258
 - 6.3.3 钛与铝的扩散焊 / 265
 - 6.3.4 钛与铝的冷压焊 / 267
 - 6.3.5 钛与铝的激光焊 / 267
- 6.4 铝与镁的焊接 / 271
 - 6.4.1 铝与镁的焊接性特点 / 271
 - 6.4.2 铝与镁的钨极氩弧焊 / 273
 - 6.4.3 铝与镁的搅拌摩擦焊 / 274
 - 6.4.4 铝与镁的扩散焊 / 278

参考文献 / 280

- 7.1 轻质复合材料的分类、特点及性能 / 284
 - 7.1.1 轻质复合材料的分类及特点 / 284
 - 7.1.2 轻质复合材料的增强体 / 286
 - 7.1.3 轻金属基复合材料的性能特点 / 287
- 7.2 轻质复合材料的焊接性分析 / 291
 - 7.2.1 轻金属基复合材料的焊接性 / 291
 - 7.2.2 树脂基复合材料的连接性 / 295
 - 7.2.3 非连续增强金属基复合材料的焊接特点 / 297
- 7.3 铝基复合材料的焊接 / 299
 - 7.3.1 铝基复合材料的焊接特点 / 299
 - 7.3.2 铝基复合材料的电弧焊 / 301
 - 7.3.3 铝基复合材料的钎焊 / 304
 - 7.3.4 铝基复合材料的摩擦焊 / 309
 - 7.3.5 铝基复合材料的扩散焊 / 312
 - 7.3.6 铝基复合材料的高能密度焊接 / 316
- 7.4 钛基复合材料的焊接 / 317
 - 7.4.1 纤维增强钛基复合材料的焊接方法 / 317
 - 7.4.2 纤维增强钛基复合材料的激光焊 / 317
 - 7.4.3 纤维增强钛基复合材料的扩散焊 / 319
 - 7.4.4 钛基复合材料的钎焊 / 321
- 7.5 C/C复合材料的连接 / 322
 - 7.5.1 C/C复合材料连接的主要问题 / 322
 - 7.5.2 C/C复合材料的扩散连接 / 322
 - 7.5.3 C/C复合材料的钎焊连接 / 325

第1章 概述



轻质材料的种类和品种很多,范围很大,本书中特指与焊接相关的轻质材料,大多指以金属材料为基的。当前全世界金属材料的产量超过10亿吨,其中轻金属材料约占5%,处于补充地位。但轻质材料在国防建设和社会发展中的重要地位却是钢铁或其他材料无法代替的。特别是在航空航天、舰船、现代交通和国防装备等领域,轻质材料更是占据着举足轻重的地位,其发展受到各国的高度重视。

1.1 轻质材料焊接的发展

本书所针对的轻质材料是指与其焊接应用联系密切的、以轻金属为基的钛及钛合金、镁及镁合金、轻质复合材料等。近年来随着市场经济的发展,钛合金、镁合金、铝基复合材料等的应用越来越广泛,已从原来的航空航天部门逐渐扩展到电子、通信、现代交通、医疗器械和民用领域。轻质材料的焊接也引起人们越来越多的关注。

1.1.1 轻质材料发展的战略意义

为满足结构轻量化和节能降耗的要求,现代工业对结构件的设计要求更加严格。近年来,轻质材料在各个领域得到极大的推广和应用,例如,制造了全铝车身、镁合金变速箱体、钛合金飞机机舱散热片等产品。随着科学技术的发展,轻质材料在工业中的应用范围和比重将持续增大。

近年来,世界范围内的能源消耗不断增长,而且在可以预见的未来还将持续增长。以液体燃料为动力的航空、舰船、轨道交通、汽车等领域的能耗是能源消耗整体的主要方面。减重增效已被发达国家公认为是提高能源利用率战略方向。由于具有高比强度(R_m/ρ)和高比刚度(E/ρ),轻质材料及其焊接结构被广泛使用,且成为减轻整体结构质量、提高能源利用率的有效途径之一。

例如,轻质材料焊接结构在空客A380和波音787等大型飞机制造中得到成功应用,按质量百分比,空客A380中铝合金占61%,钛合金占10%;波音787中铝合金占20%,钛合金占15%。美国新一代战机F-22中也大量使用轻质材料焊接结构,钛合金占结构质量的41%,铝合金占11%;美军大型运输机C17中钛合金占结构质量的19%,铝合金占77%。发达国家高速列车制造中,以铝合金或铝基复合材料取代耐候钢比用不锈钢替代车体质量还可再降低25%。

轻质材料所具有的特殊优异性能和发展潜力促使世界各国越来越重视对其进行研发、焊接与推广应用。近年来世界各国投入大量人力物力加快轻质材料的研发和产业化进程,完成了一批关键技术的突破,扩大了轻质材料的应用范围,在尖端科学和高技术领域发挥了重要的作用。

我国的《国家中长期科学和技术发展规划纲要》中也明确将轻量化作为中国科技发展的战略方向之一。我国近期实施的重大科技发展项目,如大飞机项目、高速列车项目和载人航天项目等,都对结构的轻量化有明确的要求。但是,由于轻质材料自身的特点和焊接工艺的特殊性,决定了这些材料的焊接接头区域组织和性能发生了显著的变化,这些变化对轻质材料整体焊接结构的性能和寿命有重要的影响。

1.1.2 轻质材料焊接现状

随着我国航空航天、舰船、轨道交通等国家重大项目的实施,轻质材料在减轻结构质量、降低能耗、提高装备性价比等方面独具特色,成为国家重点发展与应用的先进结构材料发展的方向。先进焊接技术是轻质材料结构制造的关键技术之一,随着日益严格的服役环境和高可靠性的要求,对轻质材料研发与先进焊接技术同步发展也提出了更高的要求。

近年来,我国的轻质材料焊接技术取得了长足发展。针对铝合金、钛合金、铝基复合材料等的焊接研发和产业化已取得突破性进展,拥有一大批具有独立知识产权的先进焊接技术。镁合金的焊接研发及应用也取得了可喜的进展。例如近些年来出现的轻金属焊接新工艺,如A-TIG焊、真空电子束焊、激光焊、激光-电弧复合焊以及搅拌摩擦焊等,特别是搅拌摩擦焊技术近年来得到快速发展。这些针对轻质材料的先进的焊接技术在航空航天、轨道交通、舰船、电子信息、化工等领域得到了一定程度的应用。

轻质材料焊接对中国在大飞机、高速列车、新型汽车、新一代战机、医疗器械和国防领域整体结构制造技术的发展具有重要的意义。由于轻量化结构材料自身的特点,发达国家已将轻质材料焊接技术应用于大型飞行器、巡航导弹、高速列车的制造中。我国对轻质结构材料的焊接性及应用的研发已有几十年的历史,但这些研发工作较分散,特别是在应用方面具有很大的局限性,目前仍难以形成轻质结构材料焊接的完整理论与技术。总体来说,国内还未完全和系统地掌握关键轻质结构材料(如高强轻质复合材料、叠层复合材料等)焊接结构制造的理论基础和关键技术,如智能化焊接工艺、焊接中热质传递规律、焊接区微观组织性能控制、接头的力学行为评价、焊接整体结构的可靠性和抗疲劳性等。

轻质材料焊接技术依然是中国大型轻质结构制造的瓶颈所在,仍制约着轻质材料焊接结构的制造水平和应用。轻质结构材料的应用与高新技术的发展密切相关,先进焊接(如激光焊、电子束焊、扩散焊、搅拌摩擦焊等)对推进轻质结构材料的应用有重要的意义。要突破发达国家在轻质材料焊接结构制造方面的技术壁垒,掌握轻质材料焊接的完整理论和关键技术,对轻质材料焊接方面存在的一系列关键共性基础问题的系统研究是重要前提。

1.2 轻金属的分类及性能

1.2.1 轻金属的分类

轻金属的特点是密度小于 $4.5\text{g}/\text{cm}^3$,包括铝(Al)、镁(Mg)、钠(Na)、钾(K)、钙(Ca)、锶(Sr)、钡(Ba)等。例如,铝的密度是 $2.75\text{g}/\text{cm}^3$,镁的密度是 $1.7\text{g}/\text{cm}^3$,而钾的密度只有 $0.875\text{g}/\text{cm}^3$,钠的密度只有 $0.975\text{g}/\text{cm}^3$ 。这些金属的另一个特点是化学活性大,与氧、硫、碳和卤素的化合物非常稳定。

按冶金工业中有色金属的分类法,密度小于 $4.5\text{g}/\text{cm}^3$ 的金属并不都归入轻金属,如锂(Li)、铷(Rb)、铯(Cs)、铍(Be)归入稀有金属(分属稀有轻金属),钛(Ti)归入稀有金属中的难熔金属。

轻金属的划分如下:

① 有色轻金属 有色轻金属指密度小于 $4.5\text{g}/\text{cm}^3$ 的有色金属材料,包括铝、镁、钠、

钾、钙等纯金属及其合金。这类有色金属的特点是：密度小（ $0.53\sim 4.5\text{g}/\text{cm}^3$ ）、化学活性大，与氧、硫、碳和卤族元素的化合物都相当稳定。在工业上应用最为广泛的是铝及铝合金，它的产量已超过有色金属总产量的 $1/3$ 。

② 稀有轻金属 稀有金属指那些在自然界中含量很少、分布稀疏或难以从原料中提取的金属，分为稀有轻金属和稀有高熔点金属两类。稀有轻金属包括钛、铍、锂、铷、铯五种金属及其合金，主要特点是密度小、化学活性强；这类金属的氧化物和氯化物具有很高的化学稳定性，很难还原。

本书中涉及的轻金属是与焊接有密切联系的钛及钛合金、铝及铝合金、镁及镁合金等。

1.2.2 轻金属的主要特性

由一种轻金属作为基体，加入另一种或几种金属或非金属组分所组成的既具有基体轻金属通性又具有某种特定性能的物质，称为轻金属合金。

(1) 三种常用的轻金属合金

轻金属合金的分类方法很多，按基体金属可分为铝合金、镁合金、钛合金等；按其冶炼和生产方法，又可分为铸造合金与变形合金；根据组成合金的元素数目，可分为二元合金、三元合金和多元合金。一般，合金组分的总含量小于 2.5% 的为低合金，总含量为 $2.5\%\sim 10\%$ 的为中合金，总含量大于 10% 的为高合金。

轻金属按纯度分为工业纯度轻金属和高纯度轻金属两类。以冶炼和压力加工方法生产出来的各种板材、管材、棒材、线材、型材等轻金属及其合金半成品材料，按金属及合金系统可分为铝及铝合金、镁及镁合金、钛及钛合金。制造业常用的轻金属见表 1.1。

表 1.1 制造业常用的轻金属

分类名称	说 明	
纯金属	铝(Al)、镁(Mg)、钛(Ti)	
铝合金	压力加工用 (变形用)	非热处理强化铝合金:防锈铝(Al-Mn合金、Al-Mg合金) 热处理强化铝合金:硬铝(Al-Cu-Mg或Al-Cu-Mn合金)、锻铝(Al-Cu-Mg-Si合金)、超硬铝(Al-Cu-Mg-Zn合金)等
	铸造用	Al-Si合金、Al-Cu合金、Al-Mg合金、Al-Zn合金、Al-RE合金等
钛合金	压力加工用	Ti-Al-Mo合金、Ti-Al-V合金等
	铸造用	Ti-Al合金、Ti-Al-Mo合金、Ti-Al-V合金等
镁合金	压力加工用	Mg-Al合金、Mg-Mn合金、Mg-Zn合金等
	铸造用	Mg-Zn合金、Mg-Al合金、Mg-Al-Zn、Mg-RE合金等

采用铸造方法制造的铸件和铸锭，可以直接浇铸成各种形状的机械零件，按不同的合金系统可分为铸造铝合金、铸造镁合金等。化学元素对轻金属合金有重要的影响，例如，化学元素对铝及其合金性能的影响见表 1.2。

表 1.2 化学元素对铝及其合金性能的影响

类型	化学元素的影响
纯铝	①杂质元素:所有杂质元素均降低铝的导电性 ②铁(Fe)、硅(Si):铁与硅如并存于铝中,会使铝的塑性、耐蚀性降低 ③铜(Cu):使铝的耐蚀性降低 ④锌(Zn):降低铝的耐蚀性

续表

类型	化学元素的影响
变形铝合金	①铜(Cu)、镁(Mg):铜能明显提高铝合金的强度和硬度;镁除了能提高强度和硬度外,主要提高铝合金的耐腐蚀性;铜和镁共同作用,通过淬火时效作用能强化铝合金 ②锌(Zn):能提高铝合金的时效强化效率,改善切削加工性能和热塑性,但使其疲劳强度和抗晶间腐蚀能力都降低 ③锰(Mn):主要能提高铝合金的强度 ④钛(Ti)、硼(B):可细化铝合金的晶粒和提高其强度 ⑤硅(Si):能提高铝合金的热塑性,并增强其热处理强化效果 ⑥铁(Fe)、镍(Ni):在锻铝中能提高淬火时效后的强度
铸造铝合金	①硅(Si):能提高铸造铝合金的流动性、强度和耐蚀性,降低收缩率和减少裂纹 ②铜(Cu)、镁(Mg):能通过淬火时效来提高铝合金的强度、硬度;铜还能提高其流动性,镁却反之,不过镁能提高其耐蚀性 ③锌(Zn):能提高铸造铝合金的铸造性和强度,但降低其耐蚀性 ④镍(Ni):能提高铸造铝合金的热强性

(2) 轻金属及合金的牌号

1) 纯金属加工产品

纯金属指的是提纯度高于一般工业生产用金属纯度的金属,纯度高于纯金属的金属称为高纯金属。高纯金属主要用于研究和其他特殊用途,不同金属的高纯度成分标准是不同的。铝、镁、钛的纯金属加工产品分别用英文第一个字母 A、M、T 加顺序号表示。

2) 合金加工产品

合金加工产品的代号,用汉语拼音字母、元素符号或汉语拼音字母及元素符号结合表示成分的数字组或顺序号表示。

① 铝合金 以铝为基础,加入一种或几种其他元素(如 Cu、Mg、Si、Mn 等)构成的合金,称为铝合金。由于纯铝强度低,应用受到限制,工业上多采用铝合金。铝合金密度小,有足够高的强度、塑性,耐蚀性好,大部分铝合金可以经过热处理得到强化。铝合金在航空航天、汽车、电子制造业中得到广泛应用。

根据 GB/T 3190—2008 和 GB/T 16474—2011 的规定,纯铝和变形铝及铝合金牌号表示方法采用四位字符体系。牌号的第一位数字表示铝及铝合金的组别,1~7 分别表示纯铝以及以 Cu、Mn、Si、Mg、Mg 和 Si (Mg₂Si 相为强化相)、Zn 为主要合金元素的铝合金,8 表示以其他元素为主要合金元素的铝合金,9 表示备用合金组。牌号的第二位字母表示纯铝或铝合金的改型情况;最后两位数字用以标识同一组中不同的铝合金或表示铝的纯度。

在最初的铝及铝合金牌号中,铝合金用“L”加合金组别的汉语拼音字母及顺序号表示。例如,防锈铝的代号为 LF、锻铝为 LD、硬铝为 LY、超硬铝为 LC、特殊铝为 LT、硬钎焊铝为 LQ。

② 钛合金 钛合金是以钛为基加入其他元素组成的合金。钛及钛合金是 20 世纪 50 年代发展起来的一种重要的轻结构金属,钛合金因具有比强度高、耐蚀性好、耐热性好等特点而被广泛用于多个领域。世界上许多国家都认识到钛合金材料的重要性,相继对其进行研究开发,并得到了实际应用。20 世纪 50~60 年代,主要是发展航空发动机用的高温钛合金和飞机机体用的结构钛合金;70 年代开发出一批耐蚀钛合金;80 年代以后,耐蚀钛合金和高强钛合金得到进一步发展。钛合金主要用于制作飞机发动机压气机部件,其次为火箭、导弹和高速飞机的结构件。钛合金在造船、化工、医疗器械等方面也获得了应用。

③ 镁合金 以镁为基体的合金,常称之为超轻质合金。镁合金近年来在工业(如航空

航天、电子、通信、仪表、汽车等行业)上的应用越来越多。镁合金具有密度很小(比铝轻1/3)、比强度高、能承受较大的冲击载荷、有良好的切削加工等优点,获得应用并具有广泛的应用前景。根据加工方法的不同,镁合金分为变形镁合金(压力加工)和铸造镁合金两大类。

轻金属及其合金产品牌号的表示方法见表1.3。轻金属产品状态名称、特性及其汉语拼音字母的代号见表1.4。

表 1.3 轻金属及其合金产品牌号的表示方法

分类	牌号举例		牌号表示方法说明
	名称	代号	
铝及铝合金	纯铝	1060	1 A 99 ① ② ③ ①组别代号,1×××为纯铝,2×××~7×××系列分别为以铜、锰、硅、镁、镁+硅、锌为主要合金元素的铝合金,8×××和9×××系列为其他合金元素为主要合金元素的铝合金和备用合金组 ②A表示原始纯铝,B~Y表示铝合金的改型情况 ③1×××系列(纯铝)表示最低铝百分含量;2×××~8×××系列用来区分同一组中不同的铝合金
	防锈铝合金	3A21 5A02	
	硬铝	2B12 2A16	
镁合金	变形镁合金	MB1	MB 8 M ① ② ③ ①分类代号:M为纯镁;MB为变形镁合金 ②金属或合金的顺序号 ③状态代号,见表1.4
		MB8-M	
		MB15	
钛及钛合金	—	TA1-M,TA4	TA 1 M ① ② ③ ①分类代号,表示合金或合金组织类型;TA为 α 型Ti合金;TB为 β 型Ti合金;TC为 $(\alpha+\beta)$ 型Ti合金 ②金属或合金的顺序号 ③状态代号,见表1.4
		TB2	
		TC1,TC4	
		TC9	

表 1.4 轻金属产品状态名称、特性及其汉语拼音字母的代号

名称	代号	名称	代号	名称	代号	
(1)产品状态代号		(2)产品特性代号		(3)产品状态、特性代号组合举例		
热加工(如热轧、热挤)	R	优质表面	O	不包铝(热轧)	BR	
退火	M	涂漆蒙皮板	Q	不包铝(退火)	BM	
淬火	C	加厚包铝的	J	不包铝(淬火、冷作硬化)	BCY	
淬火后冷轧(冷作硬化)	CY	不包铝的	B	不包铝(淬火、优质表面)	BCO	
淬火(自然时效)	CZ	硬质合金	表面涂层	U	不包铝(淬火、冷作硬化、优质表面)	BCYO
淬火(人工时效)	CS		添加碳化钨	A	优质表面(退火)	MO
硬	Y		添加碳化钨	N	优质表面淬火、自然时效	CZO
3/4硬、1/2硬	Y1、Y2		细颗粒	X	优质表面淬火、人工时效	CSO
1/3硬	Y3		粗颗粒	C	淬火后冷轧、人工时效	CYS
1/4硬	Y4		超细颗粒	H	热加工、人工时效	RS
特硬	T		—	—	淬火、自然时效、冷作硬化、优质表面	CZYO

3) 铸造产品

GB/T 8063—2017《铸造有色金属及其合金牌号表示方法》规定了采用化学元素符号和百分含量的表示方法。铸造有色金属牌号由“Z”和相应纯金属的化学元素符号及表明产品纯度百分含量的数字或用一短横加顺序号组成。例如，GB/T 1173—2013《铸造铝合金》中规定的牌号表示方法为：铸铝的汉语拼音字母“ZL”及其后面三位数字，第一位数字表示合金系列，其中1、2、3、4分别表示铝硅、铝铜、铝镁、铝锌系列合金；“ZL”后面第二、三位数字表示合金的顺序号。

在原标准中，当合金化元素多于两个时，合金牌号中应列出足以表明合金主要特性的元素符号及其名义百分含量的数字。合金化元素符号按其名义百分含量递减的次序排列，当百分含量相等时，按元素符号字母顺序排列。

除基体元素的名义百分含量不标注外，其他合金元素的百分含量标注于该元素符号之后。当合金元素含量规定为大于或等于1%的某个范围时，采用其平均含量，必要时也可用带一位小数的数字标注。合金含量小于1%时一般不标注。

对具有相同主成分、需要控制低间隙元素的合金，在牌号后的圆括弧内标注EL1。对杂质限量要求严、性能高的优质合金，在牌号后面标注大写字母“A”表示优质。

轻金属的主要特性见表 1.5。

表 1.5 轻金属的主要特性

序号	名称	主要特性
1	铝及其合金	密度小($2.7\text{g}/\text{cm}^3$)，比强度高，耐腐蚀性好，导电性、导热性、反光性良好，塑性好，易加工成形和铸造各种零件
2	镁及其合金	密度小($1.7\text{g}/\text{cm}^3$)，比强度和比刚度高，能承受大的冲击载荷，有良好的机械加工性能和抛光性能，对有机酸、碱类和液体燃料有较高的耐蚀性
3	钛及其合金	密度小($4.5\text{g}/\text{cm}^3$)，比强度高，高温强度高，硬度高，耐蚀性良好

1.3 轻质材料的焊接应用

轻质材料所具有的特殊优异性能和发展潜力促使世界各国越来越重视对轻金属和轻质复合材料的研发和推广应用，近年来轻质材料的发展取得显著成效。

1.3.1 轻金属焊接的难易程度

轻金属具有自己特殊的性能，例如，轻金属（钛、铝、镁及其合金）都具有很强的氧化性，材料表面极易与氧形成致密的氧化膜，如 TiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 等。对于熔焊，这些氧化膜阻碍焊接电弧燃烧和焊接时的熔合，而且容易在焊缝中形成夹杂物。对于压焊，这些氧化膜阻碍被连接件之间的结合。因此，轻金属焊接比常规钢铁材料的焊接更复杂，这给焊接工作带来很大的困难。

轻金属焊接的难易程度见表 1.6。

异种轻金属焊接时（如铝与铜、钛与铝、铝与镁等）焊缝中形成的各种脆性的金属间化合物，易导致产生裂纹或影响焊缝的性能，这是在异种轻金属焊接中应尽量避免的。常见异种轻金属的焊接方法和焊缝中的形成物见表 1.7。

表 1.6 轻金属焊接的难易程度一览表

有色金属及其合金	焊条电弧焊	埋弧焊	CO ₂ 气体保护焊	惰性气体保护焊	电渣焊	电子束焊	气焊	气压焊	点焊缝焊	闪光对焊	铝热剂焊	钎焊
纯铝	B	D	D	A	D	A	B	C	A	A	D	B
非热处理铝合金	B	D	D	A	D	A	B	C	A	A	D	B
热处理铝合金	B	D	D	B	D	A	B	C	A	A	D	C
纯镁	D	D	D	A	D	B	D	C	A	A	D	B
镁合金	D	D	D	A	D	B	C	C	A	A	D	C
纯钛	D	D	D	A	D	A	D	D	A	D	D	C
钛合金(α相)	D	D	D	A	D	A	D	D	A	D	D	D
钛合金(其他相)	D	D	D	B	D	A	D	D	B	D	D	D

注：A—通常采用，B—有时采用，C—很少采用，D—不采用。

表 1.7 常见异种有色金属的焊接方法和焊缝中的形成物

被焊金属	焊接方法		焊缝中的形成物	
	熔焊	压焊	固溶体	金属间化合物
Al+Cu	氩弧焊、埋弧焊	冷压焊、电阻焊、爆炸焊、扩散焊	Al 在 Cu 中的溶解度在 9.8% 以下	CuAl ₂
Al+Ti	氩弧焊、埋弧焊	扩散焊、摩擦焊	Al 在 α-Ti 中溶解度在 6% 以下	TiAl、TiAl ₃
Al+Mg	氩弧焊	扩散焊	α-Mg 固溶体 α-Al 固溶体	MgAl、Mg ₃ Al ₂ 、 Mg ₁₇ Al ₁₂
Ti+Ta	电子束焊、氩弧焊	—	连续系列	—
Ti+Cu	电子束焊、氩弧焊	—	Cu 在 α-Ti 中的溶解度为 2.1%，在 β-Ti 中溶解度在 17% 以下	Ti ₂ Cu、TiCu、 Ti ₂ Cu ₃ 、 TiCu ₂ 、TiCu ₃

1.3.2 钛及其合金的焊接应用

钛合金兼有钢、不锈钢和铝材的许多优点，有广阔的应用前景，人们对其发展寄予厚望，称为正在崛起的“第三金属”。钛作为年轻的材料，它要发展，性价比是竞争的焦点。从钢铁等材料的发展史可以看出，影响材料发展的五个要素是：需求、性能、成本、资源、经济技术环境。一种材料要获得迅速的发展，必须在诸多因素中取得某几项优势。

从 20 世纪 50 年代开始，由于航空航天技术的迫切需要，钛及钛合金得到了迅速的发展。第一种实用的钛合金是 1954 年美国研制成功的 Ti-6Al-4V 合金，由于它的耐热性、强度、塑性、韧性、成形性、可焊性、耐蚀性和生物相容性均较好，而成为钛合金工业中的王牌合金，该合金使用量已占全部钛合金的 75%~85%。其他许多钛合金都可以看作是 Ti-6Al-4V 合金的改型。钛及钛合金不仅是航空航天工业中不可缺少的结构材料，在造船、化