

XIANJIN CAILIAO HANJIE JISHU

# 先进材料 焊接技术

李亚江 等编著



化学工业出版社

# 先进材料 焊接技术

（第二版）

机械工业出版社

TG4  
L312-3



郑州大学 \*04010778701Z\*

# 先进材料 焊接技术

李亚江 等编著

MIN QIANJIAO HANJIE JISHU

01596	焊工操作技能
02015	气焊工作手册
02362	焊接缺陷变形控制与防止
02744	电焊工作手册
03344	焊接缺陷解答问答
04100	焊工工艺入门
05094	焊工上岗速成
05228	实用焊工容差焊工读本
05495	焊工上岗技能读本——气焊
05494	焊工上岗技能读本——电焊
05597	焊工上岗技能读本——钎焊
06108	焊工入门
06305	焊工职业技能等级认定教材



TG4  化学工业出版社  
L312-3  
· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

先进材料焊接技术/李亚江等编著. —北京: 化学工业出版社, 2011. 7

ISBN 978-7-122-11434-1

I. 先… II. 李… III. 焊接-技术 IV. TG4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 103176 号

---

责任编辑: 周 红  
责任校对: 宋 夏

文字编辑: 项 激  
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 刷: 北京市振南印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 31½ 字数 786 千字 2012 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 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: 98.00 元

版权所有 违者必究

续表

书号	书名	定价/元
04705	埋弧自动焊工艺分析及操作案例	19
03953	焊接原理及应用(焊接工程师继续教育丛书)	45
04953	焊接结构设计及应用	30
04392	金属焊接与切割作业安全技术 200 问	18
03681	现代无损检测与评价	45
03639	实用长输管道焊接技术	45
03697	焊接技术能手绝技绝活	49
01745	氩弧焊技术入门与提高	20
01895	焊工操作技巧集锦 100 例	25
02015	气焊工工作手册	20
02362	焊接结构变形控制与校正	28
00744	电焊工工作手册	25
00334	焊接难题解析问答	18
9100	焊工工艺入门	16
9894	焊工上岗速成	14
9228	实用压力容器焊工读本	19
00495	焊工上岗技能读本——气体保护焊	19
00494	焊工上岗技能读本——手工电弧焊	29
00555	焊工上岗技能读本——切割	19
01088	焊工入门	15
02663	特种焊接技术及应用(第二版)	45
02409	焊接修复技术(第二版)	45

化学工业出版社出版机械、电气、化学、化工、环境、安全、生物、医药、材料工程、腐蚀和表面技术等专业技术图书。如要出版新著，请与编辑联系。如要以上图书的内容简介和详细目录，或要更多的科技图书信息，请登录 [www.cip.com.cn](http://www.cip.com.cn)。

地址：(100011) 北京市东城区青年湖南街 13 号 化学工业出版社

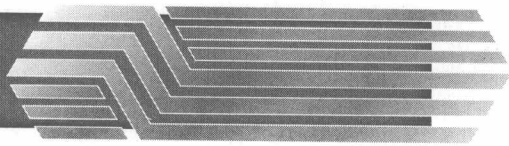
邮购电话：010-64518800

编辑：010-64519273



# 前言

## FOREWORD



先进材料是指除常规钢铁和有色金属之外的具有特殊性能的工程材料,如高技术陶瓷、金属间化合物、高温合金、轻金属、先进钢铁材料、复合材料、超导材料等。历史上每一种新材料的出现,都伴随着新的连接工艺的出现并推动了科学技术的发展。先进材料的研究开发是多学科相互渗透的结果,连接技术对其推广应用起着至关重要的作用,并在电子、能源、汽车、航空航天、核工业等部门中得到了越来越广泛的应用。

先进材料的连接在工程结构中是经常遇到的,而且在实践中出现的问题也较多。许多具有特殊性能先进材料的连接,采用常规的焊接方法难以完成,先进焊接技术的优越性日益凸现,高能束焊、扩散焊和搅拌摩擦焊等成为关注的热点。先进材料焊接技术的应用产生了重大的经济效益,是值得大力推广的先进焊接技术。

本书从理论与实践相结合的角度,对先进材料焊接问题、焊接性特点及应用等做了系统的阐述,力求突出科学性、先进性和新颖性等特色。本书内容反映出近年来先进材料连接技术的发展,特别是一些高新技术的发展。为了便于读者阅读,全书内容分为3篇,分别为:轻金属的焊接、先进钢铁材料的焊接和特殊材料的焊接。钢铁材料应用广泛,冶金技术进步推动了先进钢铁材料的发展,为了突出实用性,本书中也包括了受到人们关注的几种典型先进钢铁材料的焊接。

本书供从事与材料开发和焊接技术相关的工程技术人员使用,也可供高等院校师生、科研院(所)和企事业单位的科研人员参考,还可作为高等学校材料成形及控制工程、材料加工工程专业(焊接方向)师生的教学参考书。

本书由李亚江等编著。参加本书撰写和提供信息的其他人员还有:王娟、马海军、刘鹏、蒋庆磊、夏春智、陈茂爱、孙俊生、刘如伟、高进强、秦国良、吴娜、沈孝芹、黄万群、张蕾、李嘉宁、胡效东、郑德双、许有肖、张永喜、刘毅、杜红燕、赵康培等。

在本书写作过程中得到天津大学杜则裕教授、山东大学邹增大教授、哈尔滨工业大学冯吉才教授等的悉心指导,在此特致谢意!此外,向关心本书出版的焊接界同行及所引用文献的作者表示诚挚的谢意!

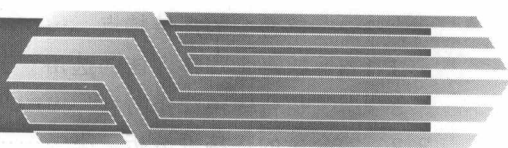
由于作者水平所限,书中不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者



# 目 录

## CONTENTS



<b>第 1 篇 轻金属的焊接</b> .....	1
<b>第 1 章 概述</b> .....	2
1.1 轻金属焊接的意义及主要特性 .....	2
1.1.1 轻金属焊接的战略意义 .....	2
1.1.2 轻金属的划分及主要性能 .....	3
1.2 轻金属的焊接应用 .....	6
1.2.1 轻金属焊接的难易程度 .....	6
1.2.2 镁及其合金的焊接应用 .....	6
1.2.3 铝合金的焊接应用 .....	9
1.2.4 钛及其合金的焊接应用 .....	12
<b>第 2 章 镁及镁合金的焊接</b> .....	17
2.1 镁及镁合金的分类与性能 .....	17
2.1.1 镁及镁合金的分类及应用 .....	17
2.1.2 镁及镁合金的成分及性能 .....	20
2.1.3 合金元素对镁合金组织性能的影响 .....	23
2.2 镁及镁合金的焊接性分析 .....	25
2.2.1 焊接热裂纹倾向 .....	25
2.2.2 氧化、蒸发、气孔及烧穿 .....	26
2.2.3 控制焊接热输入 .....	27
2.3 镁及镁合金焊接工艺特点 .....	28
2.3.1 焊接材料及焊前准备 .....	28
2.3.2 镁及镁合金的氩弧焊 (GTAW、GMAW) .....	31
2.3.3 镁及镁合金的电阻点焊 .....	34
2.3.4 镁及镁合金的钎焊 .....	35
2.3.5 镁及镁合金的其他焊接方法 .....	40
2.3.6 镁及镁合金焊接示例 .....	43
<b>第 3 章 铝合金的焊接</b> .....	49
3.1 铝合金的特性和焊接特点 .....	49
3.1.1 铝合金的分类、成分和性能 .....	49

3.1.2	铝合金的焊接特点	53
3.1.3	铝合金焊接方法的选用	54
3.1.4	铝合金用焊接材料	57
3.2	铝合金的焊接性分析	63
3.2.1	焊缝中的气孔及防止	63
3.2.2	焊接热裂纹	65
3.2.3	焊接接头的力学性能	68
3.2.4	铝合金焊接修复和焊接性评定	71
3.3	铝合金焊接工艺特点	73
3.3.1	焊前准备	73
3.3.2	铝合金的钨极氩弧焊 (GTAW)	74
3.3.3	铝合金的熔化极氩弧焊 (GMAW)	78
3.3.4	铝合金的搅拌摩擦焊 (FSW)	83
3.4	铝合金焊接示例	91
3.4.1	铝合金压力罐的自动 GMAW 焊接	91
3.4.2	铝锂合金的焊接	92
3.4.3	5A06 铝合金搅拌摩擦点焊	94
<b>第 4 章 钛及钛合金的焊接</b>		97
4.1	钛及钛合金的分类和性能	97
4.1.1	钛及钛合金的分类	97
4.1.2	钛及钛合金的化学成分及性能	98
4.2	钛及钛合金的焊接性分析	103
4.2.1	焊接接头区脆化	103
4.2.2	焊缝熔化、凝固和裂纹倾向	107
4.2.3	焊缝中的气孔	108
4.2.4	焊接接头的组织性能	109
4.3	钛及钛合金的焊接工艺特点	110
4.3.1	钛及钛合金的气体保护焊	111
4.3.2	钛及钛合金的等离子弧焊 (PAW)	119
4.3.3	钛及钛合金的电子束焊 (EBW)	120
4.3.4	钛及钛合金的其他焊接方法	122
4.3.5	钛及钛合金焊接示例	126
<b>第 5 章 异种轻金属的焊接</b>		131
5.1	钛与铝的焊接	131
5.1.1	钛与铝的焊接特点	131
5.1.2	钛与铝的焊接工艺要点	132
5.2	镁与铝的焊接	135
5.2.1	镁与铝的焊接特点	135
5.2.2	镁与铝的钨极氩弧焊	136



5.2.3	镁与铝的扩散焊	142
5.3	铝与钢的焊接	148
5.3.1	铝与钢的焊接性特点	148
5.3.2	铝与钢的钎焊和压焊	150
5.3.3	铝与钢的熔焊和熔-钎焊	155
5.3.4	铝与钢的焊接示例	160
5.4	钛与钢的焊接	162
5.4.1	钛与钢的焊接特点	162
5.4.2	钛与钢的焊接工艺要点	163

参考文献	166
------	-----

## 第 2 篇 先进钢铁材料的焊接 167

### 第 6 章 微合金控轧钢的焊接 168

6.1	微合金控轧钢的特点	168
6.1.1	微合金钢	168
6.1.2	微合金管线钢	169
6.1.3	TMCP 控轧钢	170
6.1.4	超细晶粒钢 (超级钢)	171
6.2	钢材焊接性评定中存在的问题	173
6.2.1	提高低合金高强钢性能的途径	173
6.2.2	冶金技术进步对焊接冶金的影响	174
6.2.3	对焊接性评定的影响	176
6.3	微合金控轧钢的焊接性分析	177
6.3.1	焊接裂纹问题	177
6.3.2	热影响区的脆化	177
6.3.3	焊缝合金化和组织调控	178
6.4	微合金控轧钢的焊接工艺特点	180
6.4.1	控制焊接热输入	180
6.4.2	高效 GMAW 和脉冲 GMAW	180
6.4.3	控轧管线钢的焊接	182
6.4.4	超细晶粒钢的激光焊	186

### 第 7 章 低合金调质钢的焊接 190

7.1	低合金调质钢的分类及性能	190
7.1.1	低碳调质钢的分类	190
7.1.2	低合金调质钢的性能特点	191
7.2	低合金调质钢的焊接性分析	197
7.2.1	焊接冷裂纹	197
7.2.2	热裂纹和再热裂纹	202

7.2.3	热影响区性能变化	203
7.3	低合金调质钢焊缝的强韧性匹配	206
7.3.1	强度匹配	206
7.3.2	韧性匹配	207
7.4	低合金调质钢焊接工艺特点	209
7.4.1	焊接方法和焊接材料	209
7.4.2	焊接参数的选择	211
7.4.3	800MPa 低碳调质钢的焊接	213
7.4.4	HQ100 低碳调质钢的焊接	217
7.4.5	高强高韧性钢的焊接	219
<hr/>		
<b>第 8 章 特殊用途结构钢的焊接</b>		229
8.1	低合金耐热钢的焊接	229
8.1.1	低合金耐热钢的基本特性	229
8.1.2	低合金耐热钢的焊接性分析	236
8.1.3	低合金耐热钢的焊接工艺特点	244
8.2	低温钢的焊接	246
8.2.1	低温钢的特点及应用	246
8.2.2	低温钢的焊接性特点	252
8.2.3	低温钢的焊接工艺要点	253
8.3	二次硬化超高强度的焊接	257
8.3.1	二次硬化超高强度钢的分类及特点	257
8.3.2	马氏体时效超高强度钢的焊接	261
8.3.3	Ni-Co 系超高强度钢的焊接	266
<hr/>		
<b>第 9 章 A-F 双相不锈钢的焊接</b>		269
9.1	A-F 双相不锈钢的类型及耐蚀性	269
9.1.1	双相不锈钢的类型	269
9.1.2	双相不锈钢的耐蚀性	270
9.2	A-F 双相不锈钢的焊接性分析	271
9.2.1	焊接裂纹和气孔倾向	272
9.2.2	双相不锈钢焊接区的组织特性	273
9.2.3	双相不锈钢焊接接头的析出现象	277
9.2.4	双相不锈钢焊接接头的力学性能	281
9.3	双相不锈钢的焊接工艺特点	283
9.3.1	焊接方法和焊接材料	283
9.3.2	焊接工艺措施	284
9.3.3	含氮双相不锈钢的焊接要点	286
9.3.4	超级双相不锈钢的焊接要点	286
<hr/>		
<b>参考文献</b>		290

<b>第 3 篇 特殊材料的焊接</b> .....	291
<b>第 10 章 先进陶瓷材料的焊接</b> .....	292
10.1 陶瓷材料的性能特点及连接问题 .....	292
10.1.1 结构陶瓷的性能特点 .....	292
10.1.2 几种常用的结构陶瓷 .....	293
10.1.3 陶瓷与金属连接的基本要求 .....	298
10.1.4 陶瓷与金属连接存在的问题 .....	299
10.1.5 陶瓷与金属的连接方法 .....	300
10.2 陶瓷材料的焊接性分析 .....	303
10.2.1 焊接应力和裂纹 .....	303
10.2.2 界面反应及界面形成过程 .....	305
10.2.3 扩散界面的结合强度 .....	311
10.3 陶瓷与金属的钎焊连接 .....	314
10.3.1 陶瓷与金属的钎焊连接特点 .....	314
10.3.2 陶瓷与金属的表面金属化法钎焊 .....	315
10.3.3 陶瓷与金属的活性金属化法钎焊 .....	319
10.3.4 陶瓷与金属钎焊的示例 .....	321
10.3.5 钎焊接头设计注意事项 .....	322
10.4 陶瓷与金属的扩散连接 .....	323
10.4.1 陶瓷与金属扩散连接的特点 .....	323
10.4.2 扩散连接的工艺参数 .....	324
10.4.3 $Al_2O_3$ 复合陶瓷/金属扩散界面特征 .....	331
10.4.4 SiC/Ti/SiC 陶瓷的扩散连接 .....	338
10.5 陶瓷与金属的电子束焊接 .....	340
10.5.1 陶瓷与金属电子束焊的特点 .....	340
10.5.2 陶瓷与金属电子束焊的工艺过程与焊接参数 .....	340
10.5.3 陶瓷与金属电子束焊示例 .....	341
<b>第 11 章 金属间化合物的焊接</b> .....	342
11.1 金属间化合物的发展及特性 .....	342
11.1.1 结构用金属间化合物的发展 .....	342
11.1.2 金属间化合物的基本特点 .....	343
11.1.3 三种有发展前景的金属间化合物 .....	344
11.2 Ni-Al 金属间化合物的焊接 .....	351
11.2.1 NiAl 合金的扩散连接 .....	351
11.2.2 $Ni_3Al$ 金属间化合物的熔焊 .....	353
11.2.3 $Ni_3Al$ 与碳钢或不锈钢的焊接 .....	355
11.3 Ti-Al 金属间化合物的焊接 .....	358
11.3.1 TiAl 合金的电子束焊 .....	358

11.3.2	TiAl 和 $Ti_3Al$ 合金的扩散焊	360
11.3.3	TiAl 异种材料的扩散焊	362
11.4	Fe-Al 金属间化合物的焊接	365
11.4.1	$Fe_3Al$ 金属间化合物的电子束焊	365
11.4.2	$Fe_3Al$ 的填丝钨极氩弧焊	366
11.4.3	$Fe_3Al$ 堆焊及焊条电弧焊	371
11.4.4	$Fe_3Al$ 金属间化合物的扩散焊	373
11.4.5	$Fe_3Al$ 的其他连接方法	379
<hr/>		
<b>第 12 章</b>	<b>复合材料的焊接</b>	<b>382</b>
12.1	复合材料的分类、特点及性能	382
12.1.1	复合材料的分类及特点	382
12.1.2	复合材料的增强体	385
12.1.3	金属基复合材料的性能特点	388
12.2	复合材料的连接性分析	391
12.2.1	金属基复合材料的连接性分析	391
12.2.2	树脂基复合材料的连接性分析	396
12.2.3	C/C 复合材料的连接性分析	398
12.2.4	陶瓷基复合材料的连接性分析	402
12.3	连续纤维增强金属基复合材料的焊接	404
12.3.1	连续纤维增强 MMC 焊接中的问题	404
12.3.2	连续纤维增强 MMC 接头设计	404
12.3.3	纤维增强 MMC 的焊接工艺特点	404
12.4	非连续增强金属基复合材料的焊接	412
12.4.1	非连续增强 MMC 焊接中的问题	412
12.4.2	非连续增强 MMC 的焊接工艺特点	413
<hr/>		
<b>第 13 章</b>	<b>高温合金的焊接</b>	<b>420</b>
13.1	高温合金的分类及性能	420
13.1.1	高温合金的分类和强化方式	420
13.1.2	高温合金的性能特点及应用	425
13.2	高温合金的焊接性分析	428
13.2.1	高温合金的裂纹敏感性	428
13.2.2	高温合金焊接的气孔倾向	431
13.2.3	接头组织的不均匀性和力学性能	432
13.3	高温合金的焊接工艺特点	435
13.3.1	焊接前后的处理	435
13.3.2	惰性气体保护焊 (GTAW、GMAW)	436
13.3.3	等离子弧焊 (PAW)	441
13.3.4	电子束焊和激光焊	441

13.3.5	钎焊和扩散焊 (DB)	444
13.4	先进高温合金的焊接特点	452
13.4.1	定向凝固高温合金的焊接特点	452
13.4.2	单晶高温合金的焊接特点	453
13.4.3	氧化物弥散强化高温合金的焊接特点	455
<hr/>		
<b>第 14 章</b>	<b>功能材料与金属的连接</b>	459
14.1	功能材料	459
14.1.1	功能材料的重要性	459
14.1.2	功能材料发展现状	460
14.2	超导材料与金属的连接	460
14.2.1	超导材料的性能特点	461
14.2.2	超导材料的连接方法	462
14.2.3	超导材料的焊接特点	464
14.2.4	氧化物陶瓷超导材料的焊接	465
14.3	形状记忆合金与金属的连接	472
14.3.1	形状记忆合金的特点	472
14.3.2	形状记忆合金的应用	474
14.3.3	形状记忆合金的焊接方法	477
14.3.4	TiNi 形状记忆合金的电阻钎焊	482
14.3.5	TiNi 合金与不锈钢的过渡液相扩散焊	485
<hr/>		
<b>参考文献</b>		488



轻金属的种类和品种很多,当前全世界金属材料的总产量约8亿吨,其中轻金属材料约占4%,处于补充地位,但是轻金属在国防和社会发展中的重要作用却是钢铁或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,轻金属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 轻金属焊接的意义及主要特性

本书所针对的轻金属,是指与焊接应用联系密切的先进的铝合金、镁及镁合金、钛及钛合金等。近年来随着市场经济的发展,镁、铝、钛及其合金的应用越来越广泛,已从原来的航空航天部门逐渐扩展到电子、通信、汽车、交通、轻工等领域。轻金属结构的焊接也引起人们越来越多的关注。

### 1.1.1 轻金属焊接的战略意义

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、铁路、汽车等交通运输领域的能耗是能源消耗整体结构的主要方面。减重增效已被发达国家公认为是提高能源利用效率的重要手段。由于具有高比强度( $R_m/\rho$ )和高比刚度( $E/\rho$ ),轻金属(主要是铝合金、钛合金、镁合金等)及其焊接结构的使用是减轻整体结构重量、提高能源利用效率的有效途径之一。

例如,轻金属焊接结构在空客380和波音787等大型飞机制造中得到成功应用,按质量分数,空客380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F22也大量使用轻金属焊接结构,钛合金占结构质量的41%,铝合金占11%;美军大型运输机C17钛合金占19%,铝合金占77%。发达国家高速列车制造中,以铝合金取代耐候钢比用不锈钢替代车体质量还可再降低25%,但成本变化不大。

轻金属及合金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合金材料的研发与推广应用。近年来世界各国投入大量人力物力加快轻合金材料的研发和产业化进程,突破了一批关键技术,扩大了轻合金的应用范围,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基本国策。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,都对结构的轻量化有明确的要求。但是,由于轻金属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组织和性能发生了显著的变化,这些变化对轻金属整体结构的性能和寿命有重要的影响。

随着我国航空航天等国家重大项目的实施,轻金属在减轻结构重量、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。焊接是轻金属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，对焊接技术同步发展也提出了新的要求。

近年来，我国的轻金属焊接取得了长足发展。针对铝合金、钛合金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。镁合金的焊接研发也取得可喜的进展。近些年来出现的轻金属焊接新工艺，如 A-GTAW、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。这些先进方法针对轻金属及合金的焊接在航天航空、汽车、电子、通信、石化等领域得到了重要的应用。

轻金属焊接对我国在大飞机、高速列车、新型汽车、新一代战机等国防领域和民用整体结构制造技术的发展具有重要的意义；对通过应用轻金属焊接结构实现减重增效、缓解能源短缺状况具有重要的实际意义。

由于轻金属自身的特点，如在提高材料利用率、减轻结构重量、降低成本方面独具优势，发达国家已将轻金属焊接技术应用于大型飞行器和高速列车的制造中。我国对轻金属焊接的研究已有几十年的历史并取得长足进展，但总的来说，轻金属焊接技术依然是我国大型轻金属结构制造的瓶颈所在，仍制约着我国轻金属焊接结构制造水平的发展和應用。

要突破轻金属焊接结构制造方面的技术壁垒，掌握轻金属焊接的完整理论和技术，解决轻金属焊接存在的一系列关键问题是重要前提。仍有待掌握轻金属（如超高强轻合金）焊接结构制造的关键技术，如智能化焊接工艺、焊接中热质传递规律、焊缝成形及组织性能的控制、接头的力行为评价、焊接整体结构的可靠性等。

## 1.1.2 轻金属的划分及主要性能

### (1) 轻金属的划分

① 有色轻金属 指密度小于  $4.5\text{g/cm}^3$  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（ $0.53\sim 4.5\text{g/cm}^3$ ）、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、分布分散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。

本篇涉及的轻金属是与焊接有密切联系的先进镁合金、铝合金、钛合金等。

### (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。

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，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  $2.5\%$  时，为低合金；总含量为  $2.5\%\sim 10\%$  时，为中合金；总含量大于  $10\%$  时，为高合金。

轻金属按纯度分为工业纯度和高纯度两类。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、钛及钛合金等。制造业中常用的轻金属及主要特性见表 1.1。



表 1.1 制造业中常用的轻金属及主要特性

分类名称	说 明		主 要 特 性
铝合金	压力加工 (变形用)	非热处理强化铝合金:防锈铝(Al-Mn合金、Al-Mg合金)	密度小(2.7g/cm <sup>3</sup> )、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
		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	
镁合金	压力加工	Mg-Al合金、Mg-Mn合金、Mg-Zn合金等	密度小(1.7g/cm <sup>3</sup> )、比强度和比刚度,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
	铸造用	Mg-Zn合金、Mg-Al合金、Mg-Al-Zn、Mg-RE合金等	
钛合金	压力加工	Ti-Al-Mo合金、Ti-Al-V合金等	密度小(4.5g/cm <sup>3</sup> )、比强度高、高温强度高、硬度高、耐蚀性良好
	铸造用	Ti-Al合金、Ti-Al-Mo合金、Ti-Al-V合金等	

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。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。

② 钛合金 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、耐热性高等特点而被广泛用于各个领域。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;90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(是铝合金的2/3)、比强度高、能承受较大的冲击载荷、有良好的切削加工性等优点,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。

(3) 轻金属的牌号、代号及热处理

轻金属及其合金产品牌号的表示方法见表1.2。轻金属产品状态名称、特性及其汉语拼音字母的代号见表1.3。

表 1.2 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
	防锈铝合金	3A21	①——组别代号,1×××系列是纯铝,2×××~7×××系列分别是以铜、锰、硅、镁、镁+硅、锌为主要合金元素的铝合金,8×××和9×××系列是以其他合金元素为主要合金元素的铝合金和备用合金组 ②——A表示原始纯铝,B~Y表示铝合金的改型情况 ③——1×××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
		5A02	
	硬铝	2B12	
2A16			