

Advanced Light Alloy
Repair and Strengthening Technology

先进轻合金 修复与强化技术

■ 朱 胜 王晓明 王启伟 曹 勇 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

先进轻合金 修复与强化技术

朱 胜 王晓明 王启伟 曹 勇 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

轻合金修复强化是保持设备技术状态的重要基础、是恢复设备技术状态的主要手段、是设备全寿命周期管理的关键环节,已成为国际材料领域的研究热点和重要发展方向。本书秉持指导轻合金维修工程实践的目的,介绍了轻合金材料的独特理化特性、典型应用、失效模式和修复强化关键技术体系,系统研究并总结梳理了低温超声速喷涂、电弧熔敷-数控铣削复合成形、激光-电弧复合成形和磁控电弧熔敷成形等先进轻合金修复强化技术的基本理论及工程实践知识。

本书可供从事轻合金修复强化或相关行业的工程技术人员及生产管理人员阅读,也可供高等院校及科研院所开展轻合金修复强化研究或教学的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

先进轻合金修复与强化技术/朱胜等著. —北京:
国防工业出版社,2017.6
ISBN 978-7-118-11322-8

I. ①先… II. ①朱… III. ①合金强化 IV.
①TG131

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 113653 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 17 字数 343 千字

2017 年 6 月第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 86.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

序

镁、铝、钛等金属的密度小,通常称为轻金属,相应的镁合金、铝合金及钛合金统称为轻合金。这其中,镁合金因具有高比强、高比模、高阻尼和易回收等特点,被誉为“21 世纪绿色工程材料”;钛合金因具有耐蚀性好、耐热性佳、比强度高等特点,在尖端科学技术中发挥着重要作用;铝合金因具有导热性好、易于成形和价格低廉等特点,在轻合金材料中的应用量最大。

轻合金材料因具有优异综合性能和巨大的发展潜力,使得世界各发达国家均高度重视其研究开发和推广应用。国际上,轻合金材料在近年来的发展势头十分强劲,在基础研究、加工制造和产业应用等方面均取得了显著成效,如美军 F-22 战斗机中应用的钛合金材料占机身全重的 40% 以上;我国轻合金材料近年来的发展也非常迅速,在矿产冶炼、加工成形、工程应用及回收利用等方面均取得了重要研究进展,并取得了大量产业化成果,如近期下线了世界首辆镁合金轻量化电动客车。

轻合金修复强化是轻合金材料研究的重要组成部分,是保持设备技术状态的重要基础、是恢复设备技术状态的主要手段,是设备全寿命周期管理的关键环节,已成为国际材料领域的研究热点和重要发展方向,地位重要、意义重大。作者所在单位在我国率先开展了轻合金修复强化科学研究工作,多年来,朱胜教授带领研究团队先后完成了国家自然科学基金、国家 863、国防 973、军口预研等多项国家及军队重大/重点科研课题,有力推动了轻合金修复强化技术的发展。

《先进轻合金修复与强化技术》一书由朱胜教授等著,是作者基于自身多年的科研实践和研究成果,创造性地撰写出的我国第一部阐述轻合金修复强化基础理论与关键技术的著作。该书从轻合金材料的独特理化特性、典型应用和修复强化技术“瓶颈”入手,阐述了轻合金在设备材料体系中的地位作用、修复强化关键技术体系及发展现状与趋势;基于应用实践和领域相关成果甄别,归纳梳理了轻合金材料的典型失效模式,并分别介绍了镁、铝、钛合金件的典型损伤实例;重点阐述了低温超声速喷涂等先进轻合金修复强化技术的内涵及特点,成形过程、微观组织及服役性能,并列举了典型损伤零部件的修复强化实例。

该书融入了作者在轻合金修复强化领域开展的学科建设、理论研究、技术开发和工程应用等方面的自主创新成果和实践经验。该书内容翔实、结构科学、取材广泛,基础理论部分阐述精炼、针对性强;先进技术部分重点突出,与工程实践联系紧密;反映了我国轻合金修复强化科学研究的最新进展,颇具创新性、理论性和实用性。该书的出版发行将对我国轻合金材料修复强化技术的研究开发和产业化发展起到积极的促进和推动作用。

中国工程院院士



2017年4月

前 言

镁、铝、钛等金属的密度小,通常称为轻金属,其相应的合金统称为轻合金;因具有比强度、比刚度高等优异特性,已成为装备轻量化的首选,在航空航天、舰艇船舶、消费电子及国防军工等领域的应用日益增多。如,美军 F-22 战斗机中应用的钛合金占机身全重的 40% 以上,美国特斯拉公司于近期下线了全铝合金车身电动汽车,我国也研制出了世界首辆镁合金轻量化电动客车等。

轻合金修复强化是指以损伤零部件为对象,在失效评估和前处理的基础上,基于专用合金材料,采用能束能场沉积成型的方法,来恢复其三维几何形貌和使役性能的过程。相较于钢等传统材料,轻合金具有化学活性高的共性特征,镁合金燃烧、铝合金偏析、钛合金氮化是其热加工的关键技术“瓶颈”,导致其修复强化的技术难度大、涉及的专业知识广、涵盖的学科领域宽,具有理论性、实用性、综合性等特点。目前,轻合金修复强化已成为国际材料领域的研究热点和前沿,对于保持设备技术状态、恢复设备技术性能、提升全寿命周期管理效益等均具有重要意义。

纵观轻合金领域的相关文献,尚未有系统阐述轻合金修复强化方面的相关书籍,目前大多数设备维修行业的企业及研究单位也深感理论资料缺乏,通常是参照制造行业的相关理论及自身经验开展工作,这在一定程度上制约了修复件性能质量的提升以及轻合金维修行业的发展。鉴于此,本书秉持指导轻合金维修工程实践的目的,研究并梳理了轻合金修复与强化涉及的基础理论、失效模式、先进技术、微观表征及性能评价等方面的专业知识。

本书兼具理论性和工程实用性,第 1 章阐述了轻合金材料的独特理化特性、典型应用、修复强化技术“瓶颈”及关键技术体系,读者可认知了解轻合金在设备材料体系中的地位作用及其修复强化技术的发展现状与趋势;第 2 章在应用实践和领域相关成果甄别的基础上,归纳梳理了轻合金材料的典型失效模式,并分别介绍了镁、铝、钛合金件的典型损伤实例,读者可认识到开展轻合金修复强化研究的必要性和紧迫性;第 3 章阐述了低温超声速喷涂技术的内涵与特点,以及镁合金表面修复强化层的成形过程、微观组织、性能评价和应用实例;第 4 章阐述了电弧熔敷

-数控铣削复合成形技术的原理与特点,以及钛合金修复强化的近净成形形态控制、净成形表面质量控制和应用实例;第5章阐述了激光-电弧复合成形技术的内涵与工艺流程,以及镁合金表面单层多道熔覆层、多层多道熔覆层的组织性能和应用实例;第6章阐述了磁控电弧熔敷成形技术的内涵与成形过程,以及铝合金磁控电弧熔敷的成形性、工艺影响因素、性能质量和应用实例。

本书由朱胜等撰写。各章撰写人员为:第1章,朱胜、王晓明、王启伟、杜文博,第2章,王晓明、赵阳、常青、袁鑫鹏,第3章,王晓明、韩国峰、周超极、张晓、江海波,第4章,朱胜、曹勇、李华莹、张垚,第5章,姚巨坤、殷凤良、王之千、邱六,第6章,王启伟、任智强、李显鹏、陈永星。全书由朱胜、王晓明和王启伟统稿。

本书的顺利出版得益于国家重点支持的轻合金修复强化技术的攻关成就,得益于科技部国际科技合作与交流专项“国家重点装备的绿色再制造技术与工程”(No. 2015DFG51920)。国家自然科学基金项目“基于微单元形态表征的钛合金MIG焊增材再制造生长调控”(No.51375493)、973项目“面向***的金属零件现场快速成形再制造基础研究”(No.613213)、预研项目“轻合金构(零)件损伤修复关键技术研究”(No.51327040301),以及军口科研等项目的资助,在此表示衷心感谢。

限于撰写人员水平,书中难免存在不当之处,恳请读者指正并提出宝贵意见。

作 者

2017年4月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 轻合金材料特性及应用	1
1.1.1 镁合金的特性及应用	1
1.1.2 铝合金的特性及应用	4
1.1.3 钛合金的特性及应用	6
1.2 轻合金装备修复强化的特点	8
1.3 轻合金修复强化的技术体系	8
参考文献	14
第2章 轻合金的典型失效模式	17
2.1 轻合金的失效模式	17
2.1.1 腐蚀失效	17
2.1.2 变形失效	18
2.1.3 断裂失效	18
2.1.4 磨损失效	19
2.2 镁合金零部件的典型损伤	19
2.3 铝合金零部件的典型损伤	21
2.4 钛合金零部件的典型损伤	24
参考文献	25
第3章 低温超声速喷涂技术	26
3.1 技术概述	26
3.1.1 技术内涵与特点	26
3.1.2 设备系统与工艺因素	28
3.2 低温超声速喷涂沉积成形过程的数值模拟	31
3.2.1 几何模型的建立	32
3.2.2 有限元模型的建立及边界条件	32
3.2.3 单颗粒碰撞过程的数值模拟结果及分析	33

3.2.4	基底层成形过程的数值模拟结果及分析	38
3.2.5	多层连续成形过程的数值模拟结果及分析	41
3.3	低温超声速喷涂射流过程的数值模拟	42
3.3.1	喷涂射流区模型	42
3.3.2	喷涂射流区模拟	46
3.3.3	喷涂两相流模拟	49
3.3.4	低温超声速喷涂工艺设计	52
3.4	镁合金表面 Al 基合金涂层的组织结构表征	53
3.4.1	涂层表面截面形貌观察	53
3.4.2	涂层微观组织结构分析	58
3.4.3	涂层中氧元素含量测定	60
3.4.4	涂层化学元素价态判定	61
3.5	粉体特性对涂层组织和性能的影响	63
3.5.1	Si 元素对 Al 基合金涂层组织的影响	64
3.5.2	Si 元素对 Al 基合金涂层性能的影响	75
3.5.3	粉体粒径对 Al-13Si 涂层组织的影响	87
3.5.4	粉体粒径对 Al-13Si 涂层性能的影响	94
3.6	工艺特性对涂层组织和性能的影响	105
3.7	应用实例	107
3.7.1	低温超声速喷涂工艺流程	107
3.7.2	典型镁合金损伤件修复强化	109
	参考文献	110
第 4 章	电弧熔敷-数控铣削复合成形技术	112
4.1	技术概述	112
4.1.1	技术内涵与特点	112
4.1.2	设备系统与工艺过程	113
4.2	电弧熔敷近净成形的形态控制	116
4.2.1	单层单道成形焊道的形态调控	116
4.2.2	基于神经网络的单层单道成形焊道截面形态函数建模	134
4.2.3	单层多道成形焊道的形态调控	138
4.3	数控铣削净成形的表面质量控制	149
4.3.1	基于回归分析的净成形加工表面质量预测模型	150
4.3.2	基于神经网络的净成形加工表面质量预测模型	154
4.3.3	基于 SVM 的净成形加工表面质量预测模型	155
4.4	应用实例	158

4.4.1	电弧熔敷-数控铣削工艺流程	158
4.4.2	典型金属损伤件修复强化	158
	参考文献	161
第5章	激光-电弧复合成形技术	164
5.1	技术概述	164
5.1.1	技术内涵与特点	164
5.1.2	设备系统与工艺流程	165
5.2	镁合金表面激光-TIG 单层多道熔覆层的组织与性能	166
5.2.1	组织形貌	166
5.2.2	综合性能	170
5.3	工艺特性对镁合金表面激光-TIG 单层多道熔覆层的影响	179
5.3.1	送丝速度的影响	179
5.3.2	焊接电流的影响	180
5.3.3	焊接速度的影响	182
5.3.4	激光功率的影响	183
5.3.5	工艺参数的离差分析	185
5.4	镁合金表面激光-TIG 多层多道熔覆层的组织与性能	185
5.4.1	组织形貌	185
5.4.2	力学性能	186
5.4.3	摩擦学性能	189
5.5	应用实例	192
5.5.1	激光-电弧复合成形工艺流程	192
5.5.2	典型镁合金损伤件修复强化	192
	参考文献	194
第6章	磁控电弧熔敷成形技术	195
6.1	技术概述	195
6.1.1	技术内涵与特点	195
6.1.2	设备系统与工艺流程	196
6.2	磁场空间分布与磁控电弧的数值模拟	197
6.2.1	励磁线圈的优化设计	198
6.2.2	磁控 MIG 电弧的数值模拟	208
6.3	铝合金磁控电弧熔敷的成形性研究	218
6.3.1	单层单道熔覆层的成形性	218
6.3.2	单层多道熔敷层的成形性	225

6.3.3 磁场特性对熔敷层表面质量的影响	229
6.4 铝合金磁控电弧熔敷层的组织性能优化	233
6.4.1 磁场特性对熔敷层显微结构的影响	233
6.4.2 工艺参数对母材组织与性能的影响	239
6.4.3 工艺参数对熔敷层组织与性能的影响	245
6.5 应用实例	255
6.5.1 磁控电弧熔敷成形工艺流程	255
6.5.2 典型铝合金损伤件修复强化	256
参考文献.....	260

第 1 章 绪 论

1.1 轻合金材料特性及应用

材料是装备的物质基础,是决定武器装备综合性能的重要因素。“一代材料、一代装备”已成为武器装备发展的重要特征^[1]。铝、镁、钛金属的合金统称为轻合金,相较于通用铁基材料,其共同的基本特性是密度小,具有较高的比强度和比刚度(表 1-1^[2]),综合使役性能优异。在装备材料领域,铝、镁、钛三种轻合金材料的应用既相对独立,又相互关联,整体应用日益广泛。

表 1-1 轻合金与铁基材料的物理化学特性比较

物理参数	温度范围	Mg	Al	Ti	Fe
密度/(g/cm ³)		1.75~1.85	2.55~2.95	4.3~4.5	7.8~9.0
硬度/HB	—	30~47	55~94	195	330
标准电极电位/V	—	-2.36	-1.71	-1.63	-0.44
熔点/℃	—	651	660	1725	1539
沸点/℃	—	1109	2056	3287	2750
燃点/℃	—	632	—	—	—
化学活性		活泼	活泼	活泼	稳定
热膨胀率/(10 ⁻⁶ /K)	25℃	25.8	23.9	8.36	12.2
热导率/(W/(m·K))	25℃	159	222	14.99	73.3
弹性模量/GPa		45	70	108	208
比弹性模量		25.86	25.9	24.55	24.3
拉伸强度/MPa		170~300	200~400	800~1200	600~1000
比拉伸强度		100~172	74~148	182~273	76~127

1.1.1 镁合金的特性及应用

镁合金具有比强度和比刚度高,导热性和电磁屏蔽性良好,可回收利用等优点,被誉为“21 世纪绿色工程材料”,广泛应用于航空航天、汽车制造等领域^[3]。我国镁资源丰富,约占世界总量的 70%以上。镁及镁合金材料具有以下特点^[4]:

(1) 镁是一种非常轻的金属材料,密度仅为 1.74g/cm³,约为铝密度的 67%,

45 钢密度的 25%左右。采用镁合金制造机械零部件,可显著减小质量,达到轻量化和节能减排的效果^[5]。

(2) 镁合金的比强度、比刚度高,分别为 138 和 25. 86,远胜于 45 钢和 ABS 塑料。采用镁合金材料,有利于制造刚性要求高的整体构件。

(3) 镁合金具有优良的导热、电磁屏蔽及抗阻尼等性能。镁合金的弹性模量小,抗振系数大,有很强的抗冲击能力和减振效果,在相同载荷下,其减振效果是铝的 100 倍、钛合金的 300~500 倍^[3]。AZ91D 镁合金与其他材料性能参数对比如表 1-2^[4]所列。

表 1-2 几种合金参数对比

性能参数	密度 /(g·cm ⁻³)	熔点 /℃	抗拉强度 /MPa	比强度	屈服强度 /MPa
AZ91D	1. 81	596	250	138	160
A380	2. 70	595	315	116	160
45 钢	7. 86	1520	517	80	400
ABS	1. 03	90	96	93	—

性能参数	延伸率 /%	弹性模量 /GPa	比刚度	导热系数 /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	减振系数
AZ91D	7	45	25. 86	54	50
A380	3	71	25. 9	100	5
45 钢	22	200	24. 3	42	15
ABS	60	—	—	—	—

(4) 镁合金具有良好的切削性和可回收利用性。如果假设镁合金的切削阻力系数为 1,则其他金属的切削阻力如表 1-3^[6]所列。可见,镁合金的切削阻力小,切削加工较为容易。压铸过程中产生的废弃镁合金件,可以直接回收再利用,花费仅相当于新料价格的 4%,具有良好的环保特性。

表 1-3 几种合金的切削阻力

合金	切削阻力	合金	切削阻力
镁合金	1. 0	黄铜	2. 3
铝合金	1. 8	铸铁	3. 5

注:假定镁合金的切削阻力为 1

(5) 镁合金还是一种良好的储氢材料。作为储氢材料的一个重要指标是储氢的质量密度,镁合金质量轻,有较大的储氢优势。MgNi 系合金是主要的储氢材料,如 Mg₂Ni 可以形成三元氢化物 Mg₃NiH₄,含氢 3. 6%(质量分数),氢的单位体积容量高达 150kg·m⁻³^[7]。

综上,镁合金因其独特的系列优良特性,受到广泛青睐。同时,随着科学技术

的发展进步,在汽车工业、航空航天、3C 产业及武器装备等领域中的应用日益广泛。

(1) 汽车工业。近年来,随着人们对节能、环保和安全需求的不断提高,镁合金在汽车、摩托车、自行车上的应用受到了更大的关注。采用高塑性的镁合金材料制造汽车零件,不仅可以减轻质量,而且由于镁合金的阻尼衰减能力强,还可提高汽车的抗振动及耐碰撞性能,降低汽车运行时的噪声。相关研究表明,汽车行驶所消耗的燃料中有 60% 用于抵消自重,而车辆自重每减轻 10% 便可以节省约 5.5% 的燃料;车辆自身质量降低 100kg,则百公里^①的耗油量减少约 0.7L,而每节约 1L 油料消耗便可以减少排放的 2.5g 的 CO₂,据此推算,CO₂的年排放量将减少 30% 以上^[8]。目前,镁合金材料主要用于制造汽车的仪表板、变速箱体、发动机前盖、汽缸盖、方向盘、轮毂、转向支架、车镜支架等零部件(图 1-1)。在过去的 10 年中,镁合金压铸件在汽车上的使用量上升了 18%,采用镁合金制造车辆零部件成为汽车轻量化的必然趋势。



图 1-1 宝马汽车的镁合金轮毂

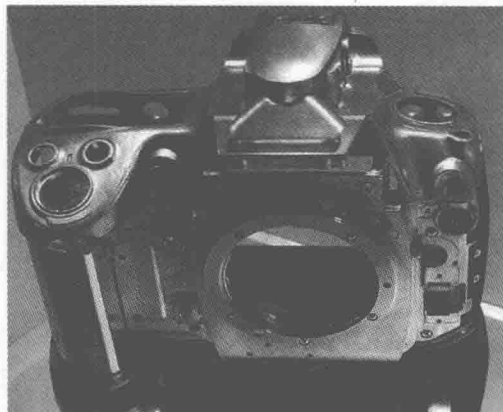


图 1-2 尼康 D700 相机的镁合金机身

(2) 3C 产业。3C 产业主要包括计算机类产品(Computer)、通信类产品(Communication)、消费类电子产品(Consumer Electronic Product)等。随着科学技术的进步,3C 产业向轻、薄、小、美观、可回收等方向发展。由于镁合金具有的质量轻、散热性好、电磁屏蔽能力强、震动吸收性能好且质感佳等优良特性,受到了 3C 产业的广泛关注^[9]。如,佳能 D 系列、宾得 K 系列及尼康 D700(图 1-2)等数码相机均采用了镁合金机身。另外,为了达到减小振动、降低噪声效果,计算机硬盘驱动器读出装置、风扇风叶等振动源附近的零部件已使用了镁合金制造。

(3) 航空航天业。镁合金可吸收较多振动与多余热能量,受到了国内外研究学者的广泛关注。由于镁不与油反应,在油介质中性能稳定,是制造发动机机匣、

^① 公里是法定计量单位千米(km)的俗称。

油泵等零部件的理想材料。美军 B-36 战略轰炸机使用了 6555kg 的镁合金材料;UH-60H 黑鹰直升机采用 ZE41A-T16 镁合金制造了传动箱箱体、镁磁发射器等部件;B-52 轰炸机的机身部分使用的镁合金板材达 635kg,极大地减小了飞机重量,提高了机动性及综合战技性能。目前,我国航空航天工业中,绝大多数的新型飞机、发动机、机载雷达、运载火箭、人造卫星、飞船等装备均应用了镁合金材料。如,某型飞机的轮毂、支架、汽缸盖等零件均由镁合金材料制造而成,单件镁合金零件的最大质量达 300kg^[10,11];某型直升机的机匣也由镁合金制造而成。另外,某导弹的仪表舱、尾舱、支座舱段、壁板等零部件均由镁合金制造,减轻了自重,大幅提高了飞行速度与飞行距离^[12]。

(4) 兵器工业。现代战争中,重量是影响兵器装备实现战场快速反应能力的主要因素之一。因此,镁合金独特的优点成为了兵器轻量化的理想材料。用镁合金制造坦克座椅骨架、变速箱箱体等,可极大减轻重载车辆的重量,提高了机动性和战场生存能力。如,美军水陆两栖突击步兵战车(AAAV)采用镁合金 WE43A 作为功能性壳体,W274A1 型军用吉普车采用了全镁合金车身及桥壳。法国采用镁合金材料制造 MK50 式反坦克枪榴弹零件,大幅增大了火炮射程,并提高了弹药的威力。镁合金材料应用在枪械中,可减轻单兵负荷量,对于提高单兵的战斗力和生存能力意义重大。我国采用镁铝合金注射成型制造的 38mm 转轮防暴发射器,显著提高了武警部队在危急情况下的防暴能力。此外,使用镁粉制造照明弹,其照明强度可达到其他传统照明弹的数倍^[13]。

1.1.2 铝合金的特性及应用

铝合金具有密度小、比强度高、抗疲劳性能好、耐腐蚀性能稳定等优良的服役特性,以及塑性大、焊接性好等优良的成形工艺特性,是轻合金中应用最广、用量最多的金属材料,已在航空航天、重载车辆、船舶建造等国防军工领域及民品制造领域广泛应用^[14,15]。

目前,全世界已经正式注册的铝合金材料超千种,最常用的有 442 种,形成了 9 个牌号系列。近年来,铝合金材料的研发和应用主要向两个方向发展:一是航空航天、船舶重工等军事工业和特殊工业部门所需求的高强度高韧等高性能铝合金材料;二是高档民用产品所需求的新型铝合金材料。铝合金的主要特点及典型应用如下^[14]:

(1) 铝合金具有熔点低、密度小、可强化等特性,使其在飞机、太空飞行器、轨道车辆、桥梁、船舶、汽车、建筑结构、压力容器、集装箱、小五金及日用品等领域得到了广泛的应用。

(2) 铝合金具有耐腐蚀、可表面再处理、美观耐用、无毒等特性,使其大量应用于建筑壁板、门窗、幕墙、汽车装饰件、飞机蒙皮、仪器仪表外壳、精密零件、船上用品、石油化工、医疗器具及各种容器的制造。

(3) 铝合金具有导热和导电性能好等特性,使其广泛应用于电线、电缆、热交换器、散热器、各类电子元件的制造。

(4) 铝合金具有对光、热、电波的反射性能好及耐低温等特性,使其广泛应用于照明器具、反射镜、屋顶瓦板、抛物面天线、冷藏车、冷冻库、冷暖器隔热板、氧或氢生产装置的制造。

(5) 铝合金具有无磁特性,可用作罗盘、天线、操舵室等器具材料。

(6) 铝合金具有吸音特性,可用作各种阻尼材料及减振零部件。

(7) 铝合金具有中子吸收截面大和放射性半衰期短等特性,可用作防核辐射材料。

铝合金材料的主要特性和工业应用如表 1-4 和表 1-5^[14] 所列。

表 1-4 铸造铝合金的特性和主要工业应用

铝合金合金系	性能特点	主要应用
Al-Cu 系	强韧性、耐热性好	自行车零件
Al-Cu-Si 系	铸造性好、强度高、能焊接	泵体、汽缸体、支架、汽车零件、阀体、曲轴箱、离合器壳
Al-Si 系	耐腐蚀性好、铸造性优良、热膨胀系数小、焊接性好	壳体类、盖类、复杂形状零件
Al-Si-Mg 系	铸造性好、强韧性好、能焊接	变速箱壳、曲轴箱、齿轮箱、舰船车辆发动机零件、飞机结合件、车轮、油压零件
Al-Si-Cu 系	铸造性好、强韧性好、能焊接	曲轴箱、汽缸体
Al-Si-Mg-Cu 系	强韧性好、能焊接	曲轴箱、汽缸体、燃料泵体、增压器壳
Al-Cu-Ni-Mg 系	强度和耐热性好	空冷汽缸体、发动机活塞
Al-Si-Cu-Mg 系	强度高、耐热性好、耐磨性好、热膨胀系数小	发动机活塞

表 1-5 变形铝合金的特性和主要工业应用

合金牌号	变形铝合金性能特点	典型应用
1×××	有良好的成形性和高的抗蚀性,但强度不高	化工设备、船舶设备、铁道油罐车、导电体材料、仪器仪表材料、焊条、管道、食品容器、建筑装饰材料、小五金件等
2×××	高强度与硬度、切削性能良好	航空航天器结构件与兵器结构零件,包括飞机结构(蒙皮、骨架、肋梁、隔框等),航空发动机汽缸、汽缸盖、活塞、导风轮、轮盘等零件,航天火箭焊接氧化剂槽与燃料槽,铆钉、导弹构件、卡车轮毂、螺旋桨元件,车轮、卡车构架与悬挂系统零件等
3×××	成形性良好、高的抗蚀性、可焊性好,比 1××× 系合金强度高	运输液体产品的槽和罐等储存装置、热交换器、化工设备、飞机油箱、油管、反光板、厨房设备、洗衣机缸体、铆钉、焊丝,建筑材料等
4×××	高温条件下耐腐蚀性和耐磨性好	活塞及耐热零件等,硬钎焊料,散热器钎焊板和箔的钎焊层

(续)

合金牌号	变形铝合金性能特点	典型应用
5×××	中等强度,具有良好的抗蚀性,成形加工性能和可焊性	飞机蒙皮骨架部件,飞机油箱与导管,焊条,铆钉,船舶结构件,船舶及海洋设施管道,钻探设备,重载车辆、导弹零部件与甲板,高强度焊接结构、储槽、压力容器等
6×××	塑性好,可焊性与抗蚀性高	飞机发动机零件,建筑型材,装饰材料,器材材料,车辆结构件
7×××	高强度,高断裂韧度	航天器零部件,飞机机身框架、机翼蒙皮、舱壁、桁条、加强筋、肋、起落架、座椅导轨、铆钉等,重载车辆、导弹零部件,体育器材等

1.1.3 钛合金的特性及应用

钛合金具有密度小、熔点高、抗拉强度高、比强度高、屈服比高、耐热性好、耐蚀性好、抗低温脆性好、可焊接性好、生物相容性好、弹性模量低、导热系数小、无毒无磁性、表面活性大、表面可装饰性强等特性,广泛应用于航空、航天、船舶、重载车辆等装备制造领域以及化工、电力、建筑等领域^[16-20]。钛合金是轻合金中强度最高、环境适应性最强的金属,在尖端装备方面发挥着重要作用,钛合金的特性及在工业中的具体应用见表1-6^[20]。

表 1-6 钛合金的应用

应用领域	材料特性	使用部位
航空工业	飞机 300℃以下具有高的比强度、高的韧性、足够的塑性。优异的疲劳性能、抗环境腐蚀性能、抗疲劳裂纹扩展性能、良好的焊接工艺性能	主要应用有机身部位的骨架、蒙皮、舱门、隔框、承力接头、防火壁、紧固件、液压油路导管等,机翼部位的承力梁、接头、发动机挂架、襟翼滑轨、纵梁、龙骨等;起落架部位的外筒、撑杆、扭力臂等,直升机桨毂、连接件等
	发动机 650℃以下具有高的屈服强度/比强度、热稳定性、抗氧化性能、抗蠕变性能、低周与高周疲劳性能和蠕变-疲劳交互作用性能等	主要应用部位是风扇叶片、盘、轴和机匣等部位。主要应用部件为压气机盘件、压气机罩、风扇静叶片、动叶片、机匣、燃烧室外壳、排气机构外壳、排气管、短轴等
火箭、导弹和宇宙飞船工业	常温及超低温下比强度高,有足够的塑性和韧性,耐高温、抗辐射性强	主要应用部位为固体或液体燃料火箭发动机壳体、燃料储箱、宇宙飞船的压力舱、燃料储箱球体构件、火箭发动机叶轮、蒙皮、飞船舱、结构骨架、起落架、登月船等部件