

轻质高性能镁合金开发及其在航天航空领域的应用

丁文江¹, 吴国华¹, 李中权², 肖旅², 陈玉狮¹

(1. 上海交通大学轻合金精密成型国家工程研究中心, 上海 200240; 2. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600)

摘要: 镁合金是实际应用中最轻的金属结构材料, 在航天航空、轨道交通、汽车、3C (computer, communication, consumer electronics) 产品等领域具有广阔的应用前景。但镁合金材料强度偏低, 尤其是高温强度, 其抗蠕变性较差; 镁合金铸件容易形成缩松和热裂纹, 成品率低, 镁合金变形件塑性加工条件控制困难, 导致组织与力学性能不稳定。介绍了高性能镁合金材料(非稀土镁合金、含稀土镁合金、镁锂合金)及其成形技术(重力铸造、低压铸造、压铸、挤压铸造、半固态成形、塑性成形)的开发现状, 综述了其在航天航空领域的应用状况, 并展望了今后的发展趋势。

关键词: 镁合金; 航天航空; 成形技术; 轻量化

中图分类号: TG 146.2⁺2 **文献标志码:** A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.02.001

Development of High-Performance Light-Mass Magnesium Alloys and Applications in Aerospace and Aviation Fields

DING Wenjiang¹, WU Guohua¹, LI Zhongquan², XIAO Lü², CHEN Yushi¹

(1. National Engineering Research Center of Light Alloy Net Forming, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China)

Abstract: The magnesium alloy is the lightest metal structural material in practical application, and has broad application prospects in aerospace, rail transit, automobiles, 3C (computer, communication, consumer electronics) products and other fields. However, the strength of the magnesium alloy is relatively low, especially the high temperature strength, and its creep resistance is relatively poor. Magnesium alloy castings are prone to shrinkage and hot cracks, and the yield is low. It is difficult to control the plastic processing conditions of magnesium alloy deformed parts, resulting in unstable structural and mechanical properties. In this paper, research and development status of high performance magnesium alloys (magnesium alloy without rare earth, magnesium alloy containing rare earth and magnesium lithium alloy) and their forming technologies (gravity casting, low pressure casting, die casting, squeeze casting, semi-solid forming and plastic forming) are introduced, their applications in aerospace and aviation fields are summarized, and the development trends in the future are prospected.

Keywords: magnesium alloy; aerospace and aviation; forming technology; light-mass design

0 引言

随着航天航空和国防工业的快速发展, 我国对高性能轻质结构材料的需求越来越大, 并已制定了相应的轻量化目标, 如: 航空发动机推重比不小于 10, 战略导弹弹头单位侧面积质量小于 30 kg/m², 战术导弹结构质量减小 30% 以上, 卫星结构质量减

小 5% 左右, 歼击机的结构质量系数从 32%~34% 降至 27%~28% 等。镁合金作为目前实际应用中最轻的金属结构材料, 能带来巨大的减重效益^[1-3]。1 枚洲际导弹质量若减小 1 kg, 则运载火箭的起飞质量可减小 50 kg, 地面设备的结构质量可减小 100 kg; 战斗机质量若减小 15%, 则其滑跑距离可

收稿日期: 2018-11-13; 修回日期: 2019-02-06

基金项目: 国家自然科学基金(51775334); 国防科技创新特区项目(002-002-01)

作者简介: 丁文江(1953—), 男, 教授, 院士, 主要研究方向为轻合金材料开发及其精密成形。

通信作者: 吴国华(1964—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为轻合金材料开发及其液态成形。

缩短 15%，航程增加 20%，有效载荷质量增加 30%；喷气发动机结构质量若减小 1 kg，则飞机结构质量可减小 4 kg，升限高度提高 $10 \text{ m}^{[3-4]}$ 。

纯镁的密度为 1.74 g/cm^3 ，约为铝合金的 2/3，锌合金的 1/3，钢铁的 1/4，钛合金的 2/5，与多数工程塑料相当。镁合金具有较高的比强度和比刚度，良好的尺寸稳定性、导热导电性，以及优异的铸造、切削加工性能，并具有高阻尼、电磁屏蔽、资源丰富、易回收利用等优点，被誉为“21 世纪绿色工程材料”^[1]。限制镁合金在航天航空领域应用的主要因素如下：高温强度等材料强度偏低，抗蠕变性差；镁合金铸件容易形成缩松和热裂纹，成品率低；镁合金变形件塑性加工条件控制困难，导致组织与力学性能不稳定^[2,5]。

本文介绍了高性能镁合金的开发研究现状及镁合金成形技术，重点介绍新型镁合金材料在我国航天航空领域的应用。

1 高性能镁合金材料开发

1.1 非稀土镁合金

非稀土镁合金主要包括 Mg-Al 系和 Mg-Zn 系镁合金。Al 是镁合金中最主要的合金化元素，与 Al 合金化的 Mg 约占镁合金应用总量的 43%^[6]。现有的 Mg-Al 系非稀土镁合金主要是在 AZ91 合金中添加 Ca, Mn 等元素。如 ZHU 等^[7]研究发现：在 Mg-9Al-2Sn 合金中添加微量 Mn 能形成 $\text{Al}_3(\text{Mn}, \text{Fe})_5$ 相，起到晶粒细化和促进时效强化的效果，对其进行 T6 热处理后，Mg-9Al-2Sn-0.1Mn 合金的抗拉强度、屈服强度分别为 292 MPa, 154 MPa，伸长率为 5%。

在 Mg-Zn 系合金中，Zn 主要起固溶强化作用，热处理后可提高合金的屈服极限。在该系合金中添加 Al, Zr, Mn 等元素，可进一步提高合金力学性能。如：冯凯等^[8]通过调整 Zn, Al 的质量分数，系统研究了 Mg-(5%~20%)Zn-(0~6%)Al 合金的组织 and 性能，发现 ZA74 合金经半固态触变压铸后，抗拉强度达 352 MPa；WANG 等^[9]在 Mg-Zn-Al-Mn 合金中添加少量 Cu 元素，目的是使合金能在较高温度下固溶，促进更多的 Zn 溶进镁基体，并增强随后的时效强化效果。研究发现：Mg-8.0Zn-1.0Al-0.5Cu-0.5Mn 合金的屈服强度、抗拉强度分别为 228 MPa, 372 MPa，伸长率为 16%。

1.2 含稀土镁合金

稀土元素对镁合金具有固溶和沉淀强化作用^[10]。在 Mg-Al 系和 Mg-Zn 系合金中添加稀土元素能提高合金的室温和高温强度，提高高温蠕变抗力，改善铸造性能，有利于提高耐蚀性能。如 ZHANG 等^[11]研究发现在 AZ91 压铸合金中添加质量分数为 0.8% 的富 Y 混合稀土后，初生 α -Mg 和共晶 β - $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相均得到细化，组织中形成了少量的 Al_2Y 相，合金室温拉伸的抗拉强度、屈服强度分别为 270 MPa, 160 MPa，伸长率为 11%，且在 150 °C 拉伸时仍可保持较高的力学性能。此外，合金的耐蚀性能也得到大幅度提高。但此类合金的室温和高温性能仍无法满足航天航空材料的强度要求。

为进一步提高镁合金的强度，上海交通大学研究了 Mg-Nd, Mg-Gd, Mg-Y, Mg-Dy, Mg-Sm 等多个 Mg-RE 系合金^[10]，重点探讨了合金的强韧化机制，发现 JDM1~JDM4 镁合金具有优良的综合力学性能^[12]，见表 1。

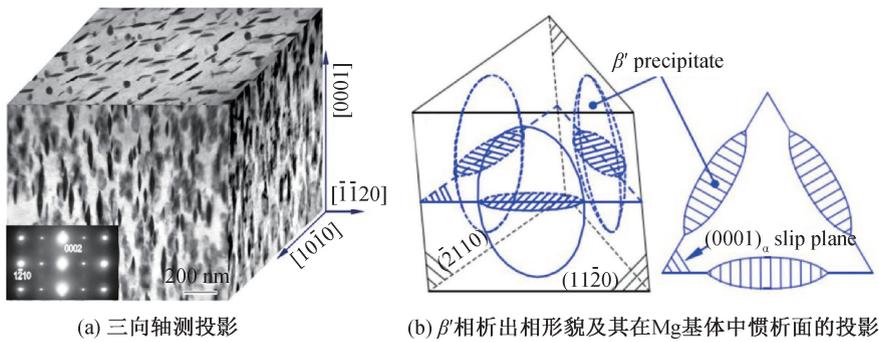
表 1 JDM1~JDM4 的典型力学性能

Tab. 1 Typical mechanical properties of JDM1-JDM4

合金	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	温度/°C
JDM1	280~300	140	6~10	室温
JDM1	200	130	15	200
JDM2	320~340	230	3	室温
JDM2	250	200	6	250
JDM3	250~280	230	2	室温
JDM3	250~300	210	5	300
JDM4	380~420	300	2	室温
JDM4	250	230	6	300

JDM1 镁合金为 Mg-Nd-Zn-Zr 系合金^[13]。强化机理主要是弥散 Zr 化合物和垂直基面的 β' (Mg_3Nd) 亚稳态析出相的协同强化，初化机制主要是微量 Zn, Zr 元素促进室温非基面位错的滑移。合金典型的室温拉伸屈服强度、抗拉强度分别为 140 MPa, 300 MPa，伸长率为 10%。

JDM2 镁合金为 Mg-Gd-Y-Zr 系合金^[14]。强化方式主要为镁-重稀土系合金共格时效析出强化。JDM2 合金时效析出相如图 1 所示，其中，图 1(a) 为 JDM2 镁合金在 250 °C，时效 5 h 后的透射电子显微镜 (TEM) 明场相组成的三向轴测投影，顶视图、前视图、右视图分别垂直于 $[0001]_a$ ， $[1010]_a$ ，



(a) 三向轴测投影

(b) β' 相析出相形貌及其在Mg基体中惯析面的投影

图 1 JDM2 合金时效析出相

Fig. 1 Precipitated phase of JDM2 alloy during aging treatment

$[11\bar{2}0]_{\alpha}$ 。合金中的 β' 相沿 $[0001]_{\alpha}$ 方向的形貌为伸长的凸透镜状,其惯析面为 $\{2110\}_{\alpha}$ 。棱柱面呈三角分布。这些片状的棱柱面析出相垂直于 $(0001)_{\alpha}$ 基面。相对于粒状或杆状等析出物,该位向的片状析出相在理论上已被证明是基面滑移最有效的障碍物。合金典型的室温拉伸屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为 230 MPa, 340 MPa, 3%。JDM2 变形镁合金在引入织构强化机制以后,获得了室温抗拉强度超过 500 MPa、屈服强度超过 450 MPa、伸长率大于 10% 的优异力学性能。

JDM3 镁合金是 Mg-Y-Gd-Zn-Zr 系合金^[15]。其在 JDM2 合金基础上,引入适量 Zn 元素,使部分稀土元素与 Zn 原子形成高温稳定的长周期堆垛有序结构(LPSO),LPSO 具有良好的高温稳定性和抗扭转能力,与析出相的惯析面垂直,形成“LPSO+析出相”共存强化单元。JDM3 镁合金在 300 °C 下实验室试棒的抗拉强度大于 250 MPa。

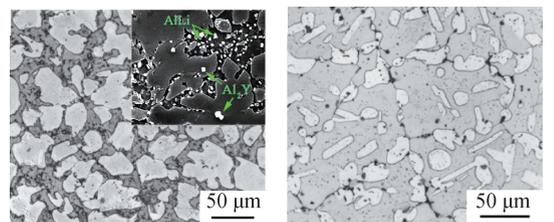
JDM4 镁合金是 Mg-Gd-Y-Ag-Zr 系合金^[16]。其在 JDM2 合金基础上,通过 Ag 元素微合金化调控镁稀土合金中沉淀析出相形态,形成“棱柱面析出相+基面析出相”的复合强化。JDM4 镁合金的室温屈服强度超过 300 MPa,抗拉强度可达 420 MPa。

1.3 镁锂合金

镁锂合金密度一般为 1.3~1.6 g/cm³,比普通镁合金减小 1/4~1/3,且减振和电磁屏蔽性能更为优异,是航天航空和国防工业领域极具发展潜力的结构材料^[4,15,17]。目前,关于镁锂合金的研究主要集中在 Mg-Li-Al, Mg-Li-Zn 或 Mg-Li-Al-Zn 系合金。在镁锂合金中添加 Al, Zn 分别形成时效强化相 MgLi₂Al 和 MgLi₂Zn。但这 2 种相都是亚稳相,

在时效过程中容易分解成时效软化相 AlLi 和 MgLiZn,进而发生过时效软化,导致镁锂合金的长期力学性能不稳定。

研究表明:Ca, Sn, Cd, RE 等同样是镁锂合金的有效合金化元素。其中,稀土元素可与合金中的 Al 形成 Al-RE 第二相,如 AlY, Al₂Y, Al₂La, Al₂Ce, Al₂Nd 等,可有效抑制软化相的形成,提升镁锂合金力学性能的稳定性^[18]。此外, Y, Gd 等重稀土元素在镁锂合金中的固溶度较大,可起到较大的固溶强化效果。赵炯等^[19]在 Mg-8Li-3Al-2Zn(LAZ832)合金中添加少量 Y 元素,发现随着 Y 元素含量的增加,合金的晶粒形貌由长条状转变为圆球状,晶粒尺寸逐渐减小, Al₂Y 相和 β -Li 相的含量逐渐增加, AlLi 相的含量逐渐减少,如图 2 所示^[19]。LAZ832-0.5Y 铸态合金组织(见图 2(a))主要由 α -Mg, β -Li, Al₂Y, AlLi 相组成,固溶后的大部分 AlLi 相溶入基体中(见图 2(b)),合金的屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为 182 MPa, 263 MPa, 11.8%。目前该合金已用于导弹舱体试制。



(a) 铸态组织

(b) 固溶态组织(350 °C, 2 h)

图 2 Mg-8Li-3Al-2Zn 合金的组织形貌

Fig. 2 Structural morphology of Mg-8Li-3Al-2Zn alloy

2 镁合金成形技术

镁合金成形工艺可分为液态成形和固态成形。

其中:液态成形包括重力铸造、低压铸造、压铸、挤压铸造、半固态成形等;固态成形又称塑性加工成形,包括挤压、轧制、锻造、冲压、拉深等。

2.1 重力铸造

镁合金可采用不同的重力铸造方法生产,包括砂型铸造、金属模铸造、半金属模铸造、熔模铸造、壳型铸造等。其中,砂型铸造的成本低,适用于大铸件的小批量生产。如丁文江等^[2]发明了镁合金专用的非占位式转移涂料技术:先将涂料涂在模样表面上,然后在涂料上面充填造型材料,固化后涂层自发地转移至型芯表面。涂层完整地复制了模型表面的形状和粗糙度,显著降低了铸件表面的粗糙度,提高了铸件尺寸的精度。涂层转移法的关键是阴模制备,通过与快速成形和无收缩橡胶复膜等技术相结合来实现,可解决复杂镁合金零件表面(非加工面)对粗糙度要求高的铸造难题。该技术已经用于镁合金导弹壳体等产品的生产。

2.2 低压铸造

利用低压铸造平稳充型和顺序凝固的特点可生产出优质的镁合金铸件。上海交通大学将涂层转移制芯技术、坩埚液体金属密封技术与低压铸造技术相结合,开发了镁合金大型铸件的精密低压铸造成型工艺,并采用双炉熔炉、压力转炉方式保证镁液的高纯度。该工艺具有精密成型尺寸精度高、压力凝固组织致密、涂层转移表面光洁等优势,目前已具备研发并小批量生产质量为 100 kg 镁合金铸件的能力^[2]。

2.3 压铸

压铸是指在高压作用下,将液态或半固态合金熔体以高速度压入模具型腔,熔体在压力下凝固成形,从而获得尺寸精确、轮廓清晰的铸件的方法。由于镁合金熔点较低(纯镁约为 650 °C),凝固潜热小,凝固速度快,且合金液黏度低、流动性好,因此特别适于压铸生产。但常规压铸的零件由于卷气等原因容易产生气孔而无法进行热处理,且无法通过时效强化进一步提高性能。近几十年来发展起来的真空压铸、充氧压铸和半固态压铸方法可解决该问题^[3, 20]。

2.4 挤压铸造

挤压铸造,又称液态模锻,是对浇入模具型腔的

液态金属施加较高的压力,金属液在压力作用下成形,从而获得铸件的方法^[21]。该工艺结合了压力铸造和锻造的优点,可有效细化晶粒,减少疏松缩孔等缺陷。所得铸件也能通过后续热处理提高力学性能,该技术在高性能、厚壁镁合金铸件中具有广泛的应用前景。近年来,越来越多的研究人员利用挤压铸造技术制备镁合金材料^[18, 22-24]。如 WANG 等^[18]利用挤压铸造技术制备了 Mg-Gd-Y-Zr 合金,研究了浇注温度和压力对合金组织与力学性能的影响。结果表明:Mg-10Gd-3Y-0.5Zr 合金在压力下凝固,能获得细小、致密的组织,挤压铸造 T6 态合金的屈服强度、抗拉强度和伸长率分别比金属模铸造合金提高了 9%, 19%, 114%。

2.5 半固态成形

半固态成形是 20 世纪 70 年代由美国麻省理工学院提出的一种先进金属成形工艺^[25]。该工艺与传统的液态成形相比,具有成形温度低、模具寿命长、可改善生产条件和环境、细化晶粒、减少气孔和疏松缩孔、提高组织致密性、提高铸件质量等优点。此外,该工艺综合了凝固加工和塑性成形的长处,即成形温度低于液态、变形抗力小于固态,可一次以大变形量近净成形大尺寸、复杂薄壁且精度和质量要求较高的零件。目前,用于镁合金零件实际生产的只有半固态触变射铸成形技术^[3]。该技术具有工艺简单、自动化程度高等优点,已应用于生产镁合金汽车零件、计算机存储器零件、笔记本电脑外壳和框架、手机外壳、航天航空工业仪器仪表等。

2.6 塑性成形

塑性成形包括挤压、锻造、轧制、冲压、拉深等^[1]。其中,镁合金挤压有以下优点:可细化晶粒,可通过保留挤压纤维织构提高强度,可获得优良的表面质量及良好的尺寸精度。目前,镁合金管材、棒材、型材、带材等产品主要采用挤压成形。但镁合金挤压也存在挤压速度慢、变形抗力大、挤压加工后由于形成织构而造成材料力学性能的各向异性等缺点^[25]。

镁合金锻造一般有 2 种方式:自由锻和模锻。常用来锻造的镁合金有 ZK 系列和 AZ 系列。镁合金锻件的力学性能通常取决于锻造过程中所产生的应变硬化程度。锻造温度越低,其应变硬化效果越显著。但如果温度过低,则锻件容易开裂;如果温度

过高,则锻件氧化严重^[3]。为解决航天航空领域应用中大尺寸镁合金锻件制备的技术难题,上海交通大学基于大尺寸半连续铸造坯料,将镁合金塑性变形计算机模拟与实际锻造工艺相结合,开发了镁合金大型锻件成型技术^[2]。通过半连续铸造方式制备大尺寸坯料,可制备的最大铸锭坯料可达 $\varphi 400$ mm;通过计算机模拟确定锻造工艺,确保锻件各个方向的总变形量和变形温升均匀,减小锻件各向异性;通过锻件实际锻造工艺与计算机模拟的对比研究,提高后续计算机模拟的准确度;通过锻造后续热处理,调整锻件的力学性能。

镁合金一般采用轧制成形的方法生产带材及板材。轧制过程可细化晶粒,改善镁合金组织,显著提高镁合金的力学性能。轧制温度是镁合金轧制过程中的关键参数。轧制温度过低时,高应力集中,导致孪晶形核和切变断裂;轧制温度过高时,晶粒容易长大,使板材热脆倾向增大^[1]。

3 镁合金在航天航空领域的应用

当前,世界各国开展了一系列项目对镁合金展开深入研究,取得了诸多成果^[26-27]。如欧盟在框架计划(framework programme for research, FP)中开展的“变形镁合金在航空航天器的应用(aeronautical application of wrought magnesium, AEROMAG)”项目,共有空中客车公司、欧洲空客直升机公司(Eurocopter)、意大利阿莱尼亚(Alenia)公司、圣彼得堡轻金属研究院、莫斯科航空材料研究院,以及 7 所大学、8 个镁材生产企业等 20 家单位参与,全方位研究镁合金(主要为 Mg-Al-Zn, Mg-Zn-Zr-RE, Mg-Y-RE 系合金)的冶炼、成形工艺、燃烧性能、表面处理、连接技术和结构性能等。结果表明:镁合金可取代中等强度的 5xxx 铝合金,对于某一项性能镁合金可达到甚至超过高强度的 2xxx 合金,但综合考虑强度、疲劳、加工、耐蚀、耐温等性能,没有一种镁合金可与 2xxx 铝合金等同。这说明在较长一段时间之内,镁合金无法在结构制造层面上部分代替铝合金,但可在航空工业中广泛应用。此外,共有 12 个单位参与了航空工业镁合金的成形新技术的研究。该项目采用锻造、超塑性成形、弯辊、橡皮囊液压成形、拉深和蠕变成形等不同成形技术制备不同航天航空零件,开发了许多可行的传统镁合金和新型镁合金商业化成形方法。

在航天航空领域,镁合金被广泛应用于制造飞

机、导弹、飞船、卫星上的重要构件,以减小零件质量,提高飞行器的机动性能,降低航天器的发射成本^[2]。图 3 为美国海军研发的 AGM-154C 无动力滑翔制导炸弹^[28]。2007 年,美国雷声公司采用改进后的 AZ91E 合金和 AZ91D 合金制备 AGM-154C 连接舱舱体、尾舱舱体、翼片骨架、设备箱箱体等,力学性能和耐蚀能力均能满足侵彻型制导炸弹的整体要求。德国金牛座系统公司和瑞典博福斯公司合作开发的动能侵彻和毁伤导弹 KEPD-350(见图 4)于 2010 年交付使用,该导弹结构中的加强框、壁板、舵面、隔板等 30 余种零件分别应用了约 100 kg 的 GW83, ZK61 等高性能镁合金^[28]。2015 年,德国座椅制造商 ZIM Flugsitz GmbH 公司利用美国 Magnesium Elektron 公司提供的 Elektron © 43 镁合金成功生产了航空座椅,该座椅在保持强度和韧性的前提下,可取代现有铝合金座椅,质量减小 25%^[3]。

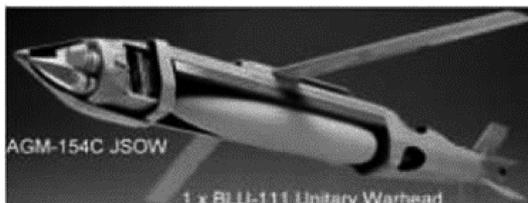


图 3 AGM-154C 联合防区外武器

Fig. 3 AGM-154C joint defense zone weapon



图 4 KEPD-350 防区外对地攻击导弹

Fig. 4 KEPD-350 off-site ground attack missile

我国用于航空航天工业中的镁合金主要有铸造稀土镁合金(ZM2, ZM3, ZM4, ZM5, ZM6, ZM9)和变形稀土镁合金(MB25, MB26)。目前,我国歼击机、轰炸机、直升机、运输机、机载雷达、地空导弹、运载火箭、人造卫星和飞船上均选用了稀土镁合金构件^[1]。有关高校、研究所和航空航天企业对镁合金在航天航空领域的应用也做了相关研究工作^[3]。如:哈尔滨工业大学、华中科技大学采用等温精密锻造工艺、反重力真空低压消失模铸造方法等研发生产了镁合金机匣、飞机导轮和排气管;北京卫星制造

厂突破了大型镁合金表面的防腐处理、机械加工、焊接技术,实现了大型镁合金结构件在多个航天器上的应用;中国科学院金属研究所研发的 G04 镁合金已成功用于“神舟六号”载人飞船的电控箱,为其减重约 13 kg,并使用 G04 镁合金成功制造出“天宫一号”等型号中的航天器零部件;上海交通大学轻合金精密成型国家工程研究中心采用涂层转移精密铸造技术、大型铸件低压铸造技术、镁合金大型锻件成型技术、温热挤压工艺等结合 JDM1~JDM4 镁合金,制备了多种航天航空部件,满足了某卫星和火星探测器的使用要求,实现了 20%~30% 的减重效果。图 5 为卫星支架。图 6 为某空天飞行器系列部件。图 7 为 CZ-6 运载火箭所需的近 1.5 t 高性能大规格锻件,其尺寸为 400 mm×250 mm×210 mm。研究人员已研制出 100 件防爆盒类零件,比铝合金产品质量减小 30%,并具有更好的阻尼减振性能。采用高强度 JDM 合金研制成功的大尺寸锻件,达到 2024 铝合金大锻件的水平。图 8 为某型战斗机导弹发射架,质量比之前产品减小 25%。图 9 为美国波音民用飞机公司研发的大飞机座骨椅架,该公司已完成了燃烧实验、静态及部分动态实验。图 10 为我国自主设计的新一代发动机机匣盖。图 11 为某型武装直升机的传动系统镁合金机匣部件,突破了 Mg-Y-RE 镁稀土合金伸长率低的瓶颈,在大型复杂薄壁镁合金铸造工艺技术方面取得了一系列重大突破。图 12 为某轻型导弹舱体,满足了舱体内表面(非加工面)对粗糙度的要求。上海航天精密机械研究所实现了 Mg-Gd-Y 系列铸造镁合金的批量工程化应用,飞行器结构件质量较以往产品减小 25%,如图 13 所示。



图 5 卫星支架(尺寸为 300 mm×300 mm×300 mm)
Fig. 5 Satellite bracket(size:300 mm×300 mm×300 mm)

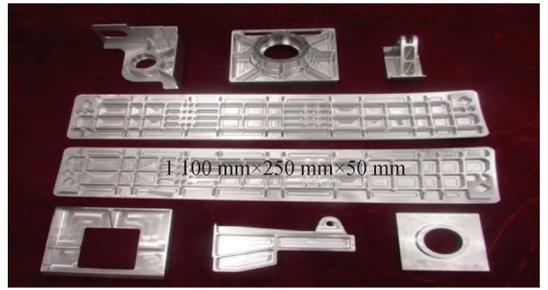


图 6 某空天飞行器系列部件
Fig. 6 Parts of aerospace vehicle series



(a) CZ-6运载火箭



(b) 锻件

图 7 镁合金在运载火箭中的应用

Fig. 7 Application of magnesium alloy in launch vehicle



图 8 某歼击机导弹射架(尺寸为 2 300 mm×300 mm×160 mm)

Fig. 8 Fighter missile projectile(size:2 300 mm×300 mm×160 mm)



图 9 大飞机座骨椅架
Fig. 9 Large aircraft seat frame

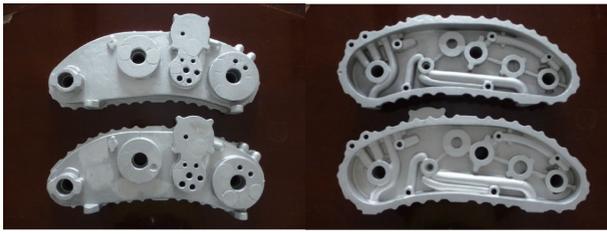


图 10 某新型发动机机匣盖(尺寸为 500 mm×220 mm×50 mm)

Fig. 10 New-type engine cover(size:500 mm×220 mm×50 mm)



(a) 主减机匣

(b) 尾减机匣

图 11 某新型武装直升机传动系统镁合金机匣部件

Fig. 11 Magnesium alloy machine parts for transmission system of new-type gunship



图 12 某轻型导弹舱体

Fig. 12 Light missile nacelle



图 13 Mg-Gd-Y 铸造镁合金舱体

Fig. 13 Mg-Gd-Y cast magnesium alloy cabin

4 结束语

随着我国航天航空事业的飞速发展,轻质高性能镁合金材料在航天航空领域的应用越来越广泛,为航天航空制造业轻量化作出了重要贡献。我国是镁合金资源大国,应进一步加快发展镁合金科技,提升我国镁产业的技术水平,使我国镁产业从资源优势向经济优势转变。新型镁合金材料在航天航空领域的应用需要相关高校、科研院所和航天航空企业相互合作,在技术上不断创新,不断扩大镁合金在航天航空领域的应用范围。

参考文献

- [1] 丁文江. 镁合金科学与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 365-371.
- [2] 丁文江, 付彭怀, 彭立明, 等. 先进镁合金材料及其在航空航天领域中的应用[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(2): 103-109.
- [3] 吴国华, 陈玉狮, 丁文江. 镁合金在航空航天领域研究应用现状与展望[J]. 载人航天, 2016, 22(3): 281-292.
- [4] 王军武, 刘旭贺, 王飞超, 等. 航空航天用高性能超轻镁锂合金[J]. 军民两用技术与产品, 2013(6): 21-24.
- [5] 赵恽, 董刚, 赵博. 镁合金在航空领域应用的研究进展[J]. 有色金属工程, 2015, 5(2): 23-27, 43.
- [6] KUMAR D S, SASANKA C T, RAVINDRA K, et al. Magnesium and its alloys in automotive applications; a review[J]. American Journal of Materials Science and Technology, 2015, 4(1): 12-30.
- [7] ZHU T Y, FU P H, PENG L M, et al. Effects of Mn addition on the microstructure and mechanical properties of cast Mg-9Al-2Sn (wt.%) alloy [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2014, 2(1): 27-35.
- [8] 冯凯. Mg-Zn-Al 新型镁合金开发及半固态触变成形[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
- [9] WANG J, LIU R D, LUO T J, et al. A high strength and ductility Mg-Zn-Al-Cu-Mn magnesium alloy[J]. Materials Design, 2013, 47: 746-749.
- [10] 吴玉娟, 丁文江, 彭立明, 等. 高性能稀土镁合金的研究进展[J]. 中国材料进展, 2011, 30(2): 1-9.
- [11] ZHANG J H, NIU X D, QIU X, et al. Effect of yttrium-rich misch metal on the microstructures, mechanical properties and corrosion behavior of die cast AZ91 alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 471(1/2): 322-330.

- [12] 付彭怀, 彭立明, 丁文江. 汽车轻量化技术: 铝/镁合金及其成型技术发展动态[J]. 中国工程科学, 2018, 20(1): 84-90.
- [13] 付彭怀. Mg-Nd-Zn-Zr 合金微观组织、力学性能和强化机制的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [14] 何上明. Mg-Gd-Y-Zr(-Ca) 合金的微观组织演变、性能和断裂行为研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [15] ZHANG Y, WU Y J, PENG L M, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of an ultra-high strength casting Mg-15.6Gd-1.8Ag-0.4Zr alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 615: 703-711.
- [16] WU R, YAN Y, WANG G, et al. Recent progress in magnesium-lithium alloys[J]. International Materials Reviews, 2015, 60(2): 65-100.
- [17] 张密林. 超轻镁锂合金设计、制备与表面技术[J]. 黑龙江冶金, 2014, 34(1): 1-6, 9.
- [18] WANG C L, LAVERNIA E J, WU G H, et al. Influence of pressure and temperature on microstructure and mechanical behavior of squeeze cast Mg-10Gd-3Y-0.5Zr alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2016, 47(8): 4104-4115.
- [19] 赵炯. 含 Y 双相镁锂合金 Mg-8Li-3Al-2Zn 微观组织与力学性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [20] 吴国华, 张亮, 丁文江. 镁合金液态精密成型研究进展[J]. 上海电力学院学报, 2015, 31(4): 299-316.
- [21] 张卫文, 齐丕骧, 朱德智, 等. 铸造技术路线图: 挤压铸造[J]. 铸造, 2017, 66(6): 535-540.
- [22] HAO L Y, YANG X, LYU S L, et al. Influence of squeeze casting pressure and heat treatment on microstructure and mechanical properties of Mg₉₄Ni₂Y₄ alloy with LPSO structure[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 707: 280-286.
- [23] HAN Z Q, PAN H W, LI Y D, et al. Study on pressurized solidification behavior and microstructure characteristics of squeeze casting magnesium Alloy AZ91D[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2015, 46(1): 328-336.
- [24] MO W F, ZHANG L, WU G H, et al. Effects of processing parameters on microstructure and mechanical properties of squeeze-cast Mg-12Zn-4Al-0.5Ca alloy[J]. Materials & Design, 2014, 63: 729-737.
- [25] 吴树森, 方晓刚, 吕书林, 等. 稀土镁合金的流变挤压铸造工艺及其组织与性能[C]//2015 中国铸造活动周论文集. 长沙: 中国机械工程学会, 2015: 7.
- [26] DIERINGA H, BOHLEN J, HORT N, et al. Advances in manufacturing processes for magnesium alloys[M]//Essential readings in magnesium technology. Cham: Springer International Publishing, 2016: 19-24.
- [27] OSTROVSKY I, HENN Y. Present state and future of magnesium application in aerospace industry[C]//ASTEC'07 International Conference: New Challenges in Aeronautics. Moscow: [s. n.], 2007: 1-5.
- [28] 康凤, 闫峰, 杨鄂川, 等. 轻合金在国外航空炸弹上的应用研究[J]. 材料导报: 纳米与新材料专辑, 2014, 28(2): 136-138.

(本文编辑: 姚麒伟)

作者简介:

丁文江, 男, 中国工程院院士, 上海交通大学材料科学与工程学院教授, 博士生导师。现任轻合金精密成型国家工程研究中心主任, 中国铸造学会理事长, 中国镁业协会副会长, 中国材料研究学会副理事长。长期从事先进镁合金、铝合金材料及成型技术研究, 获国家和省部级奖励 10 余项。至今发表 SCI 论文 320 篇、授权发明专利 147 项。2000 年创建了轻合金精密成型国家工程研究中心, 将基础研究、应用技术开发、工程化研究和转移有机融合, 加快了科研成果的转化。培养博士后、博/硕士研究生 100 余人。曾获“上海市科技功臣奖”“何梁何利奖”“中国优秀青年科技创业奖”“全国先进工作者”“上海市劳动模范”“全国优秀科技工作者”等殊荣。

