

铝合金增材制造的发展现状与展望

常天行¹ 刘彬² 方学伟^{1,3} 黄科¹ 卢秉恒^{1,3}

(1 西安交通大学, 西安 710049)

(2 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

(3 国家增材制造创新中心, 西安 710018)

文 摘 铝合金增材制造凭借着材料自身的轻量化优势以及增材制造工艺在材料利用率和复杂结构制造方面的特点,在航天领域结构件的制造方面受到了广泛关注。本文针对铝合金增材制造在航天领域的应用,通过电弧熔丝、激光选区熔化以及激光送粉三个代表性工艺分析铝合金增材制造技术的研究现状及现存问题,并简要阐述了目前铝合金增材制造技术在航天领域的应用现状和未来的发展方向。

关键词 铝合金,增材制造,航天

中图分类号: TG4

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2022.02.007

Development Status and Prospect of Aluminum Alloy Additive Manufacturing

CHANG Tianxing¹ LIU Bin² FANG Xuewei^{1,3} HUANG Ke¹ LU Bingheng^{1,3}

(1 Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

(2 Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076)

(3 National Innovation Institute of Additive manufacturing, Xi'an 710018)

Abstract Aluminum alloy additive manufacturing has attracted extensive attention in the manufacturing of aerospace structural components due to the advantages of lightweight materials and the characteristics of additive manufacturing technology in material utilization and complex structure manufacturing. Aiming at the application of aluminum alloy additive manufacturing in aerospace field, this paper analyzes the research status and existing problems of aluminum alloy additive manufacturing technology through three representative processes of wire arc additive manufacturing, selective laser melting and laser melted deposition. And the application status and future development of aluminum alloy additive manufacturing technology in aerospace field are briefly described.

Key words Aluminum alloy, Additive manufacturing, Aerospace

0 引言

铝合金作为当今世界上使用最为广泛的轻质合金,其具有密度轻、弹性好、比强度高、耐腐蚀性良好等优点。在航天领域,材料减重产生的影响往往是提高材料自身抗拉强度、弹性模量、损伤容限所产生影响的3~5倍^[1]。而铝合金构件的应用可以实现飞行器的大幅减重,从而提高飞行器的性能及经济效益,例如运载火箭每减重1 kg可节省发射费用约2万美元。

增材制造技术是自20世纪80年代末的快速成型技术发展而来的一种集材料-结构-功能于一体的先进数字化制造技术,其通过逐层累加的方式将数字化设计数据转变为三维实体零件^[2]。金属增材制造作为增材制造领域的一个分支,其主要通过激光、

电子束、离子束、搅拌摩擦等方式,将金属粉末、丝材、棒材进行重熔并逐层堆积,实现金属零件的三维成形^[2]。相比于传统的等材和减材加工,金属增材制造的材料利用率可以超过90%,并实现复杂金属结构件的快速一体化制造。因此在航天领域,金属增材制造技术有着极大的发展前景。

本文主要阐述近年来铝合金增材制造工艺的研究进展,从电弧熔丝增材制造、激光选区熔化以及激光送粉三种具有代表性的金属增材制造工艺分析铝合金增材制造的研究现状及现存问题,并简要概述目前铝合金增材制造构件在航天领域的应用现状。

1 电弧熔丝增材制造

1.1 制造工艺

收稿日期:2021-07-21

第一作者简介:常天行,1997年出生,博士研究生,主要从事铝合金电弧熔丝增材制造工艺工作

通信作者:方学伟,1989年,博士,副教授,主要从事大尺寸金属增材制造工艺及装备研究工作。E-mail: xueweifang@xjtu.edu.cn

电弧熔丝增材制造技术(WAAM)是采用电弧热将金属丝材逐层熔化堆积的一种金属增材制造工艺,其设备见图1。

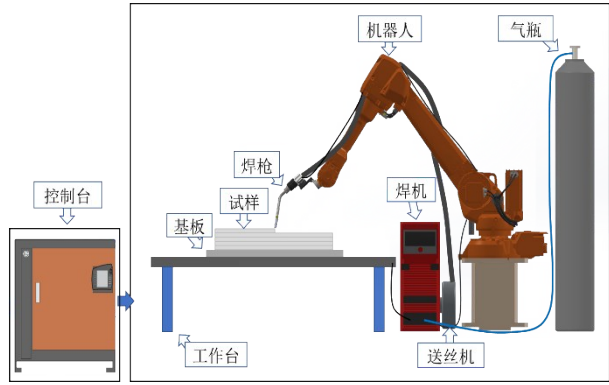


图1 WAAM设备原理图

Fig. 1 Schematic diagram of WAAM equipments

根据WAAM工艺热源特性的不同,可以将其分为熔化极气体保护焊、钨极气体保护焊和等离子体气体保护焊^[3]。另外,冷金属过渡(CMT)作为一种改进版的GMAW工艺,凭借着其较低的热输入和较好的工艺形貌受到了越来越多的关注和研究。相比于其他的金属增材制造工艺,WAAM的成形效率高、制造成本低、成形尺寸不受空间限制,非常适合于大型复杂结构件的一体化制造。但是其成形精度和表面形貌较差,必须经过二次机加工。由于铝合金具有高反射率的特点,因此相比于以激光作为热源的增材制造工艺,WAAM的能量利用率能保持在90%^[4]。目前应用于WAAM工艺的铝合金材料主要包括2系、4系、5系、7系以及其他一些成分的铝合金,表1展示了一些近几年具有代表性的铝合金WAAM研究。

表1 铝合金WAAM的研究现状

Tab. 1 Research status of aluminum alloy WAAM process

材料	工艺	力学性能			参考文献
		抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%	
2024	GTAW	470	374	8.2	[5]
2219	CMT	283	-	-	[6]
4220	CMT	324	277	5.7	[7]
7055	GTAW	230.7	148.3	3.3	[8]
ZL205A	CMT	500	450	10	[9]
2196	GTAW	439	372	6.9	[10]
Al-Mg-Mn	GMAW	319	169	38.4	[11]
Al5-Mg3-Zn-Cu	CMT	470	340	8	[12]

WAAM主要的工艺参数包括送丝速度、焊接速度、焊接电流、焊接频率等。这些工艺参数共同决定了WAAM成形过程中的热输入大小和表面形貌,如宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2022年 第2期

图2所示。保护气流量的大小决定了焊接过程的稳定性以及材料的宏观形貌^[13]。除此之外,为了解决WAAM工艺成形形貌差、组织不均匀、孔隙多等缺点,一些辅助工艺也被添加进WAAM的成形过程中,例如层间锤击强化^[14]、激光冲击强化^[15]、外加水冷却^[16]、预热丝材^[17]等。

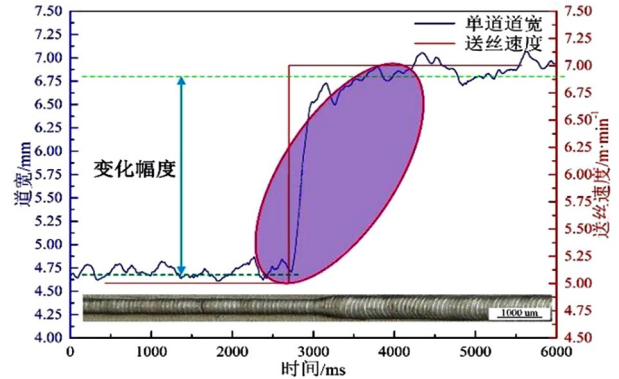


图2 送丝速度对WAAM成形的2319铝合金单道形貌的影响

Fig. 2 The effect of wire feed speed on the macrostructure of 2319 single pass fabricated by WAAM

在材料方面,基于WAAM工艺的铝合金丝材由于受到制丝工艺的限制,研发难度较大,但是仍有部分研究通过改善和开发铝合金丝材成分来提高试样性能。例如MORAIS等^[12]人开发了力学性能超越部分商用7系铝合金的Al5-Mg3-Zn-Cu铝合金。GU等^[18]人采用CMT成形了成分优化后的Al-Cu4.5-Mg1.5铝合金,经热处理后其抗拉强度和屈服强度分别达到485 MPa和399 MPa。另一部分针对材料成分的研究则绕开了丝材制备的难题,通过多丝协同或者是添加异种材料粉末的方式改变试样的成分组成。例如QI等^[5]人采用双丝TIG工艺,同时熔化2319/5087铝合金丝材实现与2024铝合金同成分的试样成形。WANG等^[19]人则通过在成形前的上一层表面添加钛粉来进行成分改进。

1.2 现存挑战

1.2.1 元素烧损及成分偏析

WAAM成形过程中,电弧中心的高热输入会促使一些低沸点元素的蒸发,造成元素损失,进而影响成形件的微观组织和力学性能^[20]。成形过程中较大的温度梯度和较大的熔池面积则会导致材料在凝固过程中的成分偏析更加显著。例如在2219合金中,随着铜元素偏析程度的增加,材料的力学性能会发生显著下降^[21]。

1.2.2 表面氧化

WAAM过程本身并不处于保护气氛的环境下,因此在WAAM成形过程中,等离子体产生的热化学反应会促使氧化铝的形成^[22]。最近的研究指出,WAAM成形过程中产生的高温会促使上一层材料表

面零散的氧化物转变成一层白色的氧化层^[13]。高熔点的氧化铝层在增材成形中不会被溶解,因此在后续堆叠时,上一层的氧化层会破碎并进入熔池形成杂质,进而影响材料的微观组织和力学性能。

1.2.3 微观孔隙及裂纹

微观孔隙和裂纹的存在会直接影响材料的密度和力学性能,如图3所示。孔隙的种类可以分为氢气孔和工艺过程导致的其他孔隙,前者一般直径小于100 μm,均匀分布在材料中,后者则尺寸较大并且随机分布在材料中^[23]。氢气孔的形成主要来自丝材表面的水分、油脂等杂质中的氢元素在丝材熔化过程中形成的氢气。这些氢气由于在凝固过程中未及时逸出从而形成了气孔^[23]。工艺过程导致的其他孔隙则主要来自材料自身产生的金属蒸汽、保护气氛等气体^[24]。裂纹的出现主要是因为WAAM凝固过程中Al₂CuMg等低熔点共晶体的存在,其在凝固时形成局部的凝固收缩,从而形成微观裂纹^[25]。另外,上文提到的氧化物颗粒等杂质也会促进裂纹的萌生。

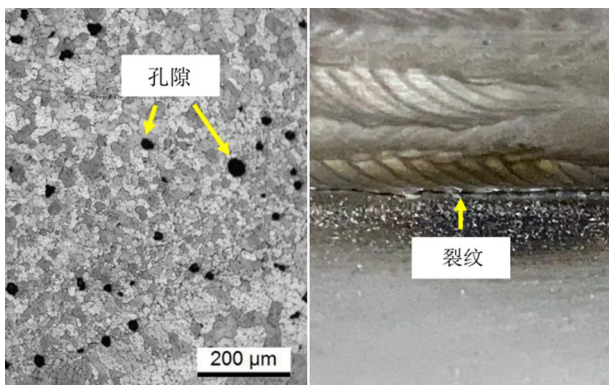


图3 WAAM2319铝合金孔隙及裂纹

Fig. 3 The pores and crack in the 2319 samples fabricated by WAAM

2 激光选区熔化

2.1 熔化工艺

激光选区熔化(Selective Laser Melting, SLM)是在一个密闭的保护气氛下,采用激光将铺放好的金属粉末按规定路径逐层烧结,从而成形金属试样的工艺(图4)。对比WAAM,SLM成形试样的晶粒更加细小、组织更加均匀,因而其力学性能一般也优于同种材料的WAAM试样。但是其成形效率较低,相比之下,WAAM的沉积速率是SLM的30倍左右。除此之外,SLM工艺的成形尺寸也受到成形腔尺寸的限制。因此SLM更适合中小尺寸高精度复杂结构件的成形。

SLM的主要工艺参数包括扫描速度、扫描间距、扫描层厚、激光能量、颗粒直径^[26]等。扫描速度、扫描间距、扫描层厚和激光能量决定了材料的能量密度^[27]。颗粒直径则主要影响材料成形过程的稳定

性^[28]。一些辅助工艺也被应用于SLM成形试样来进一步改善其微观组织和力学性能,例如采用激光冲击强化^[29]和热等静压^[30]的方式改善试样孔隙率,从而提高材料的力学性能。

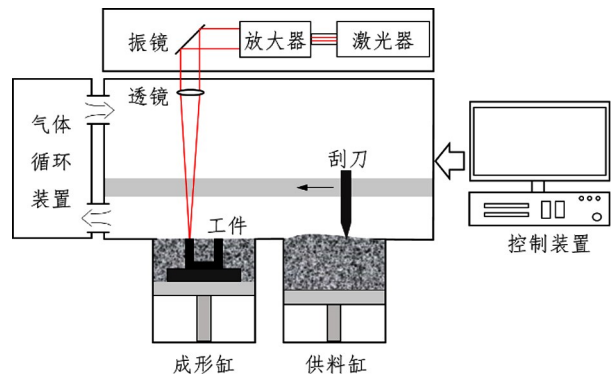


图4 SLM设备原理图

Fig. 4 Schematic diagram of SLM equipments

相比于WAAM,以金属粉末作为原材料的特点给SLM工艺中的材料成分设计提供了便利,微量元素对SLM铝合金试样微观组织和力学性能的影响也成为了一个研究热点。例如LEI等^[31]人研究了钨、锆的添加对7075铝合金性能的影响。DYNIN等^[32]人则研发了一种Al-10Si-0.9Cu-0.7Mg-0.3Zr-0.3Ce铝合金材料,其SLM试样经T6热处理后,抗拉强度超过390 MPa,屈服强度超过330 MPa,延伸率超过6%。

2.2 现存挑战

2.2.1 元素烧损

虽然SLM的热输入相比于WAAM要小得多,但是由于元素之间物理性质的差异,在SLM过程中也会发生元素烧损,导致材料力学性能的下降。在400 °C时,镁元素的蒸汽气压(3.6×10^{-1} Pa)比铝元素(2.9×10^{-14} Pa)高出13个数量级^[28]。因此在SLM成形过程中镁元素蒸汽的快速膨胀会对熔池形成较大的回弹压力,从而吹走熔池周围的未熔化颗粒并影响成形过程的稳定性^[33]。另外,成形过程产生的飞溅会导致材料表面形成孔隙,进而影响材料的表面形貌以及力学性能^[33]。

2.2.2 氧化

SLM成形过程虽然是在密闭的惰性气体的保护下进行的,但是仍会有0.1%的空气,而腔内的粉末原料间也会残留少量氧气。这些夹杂的氧气会和腔内的铝等元素反应形成氧化铝,如图5所示。在SLM成形过程中,粉末表面氧化物的存在会妨碍粉末的熔化过程,并影响成形层与上一层之间的冶金结合^[34]。和WAAM类似,这些氧化物会在成形过程中破碎进入熔池,促进SLM试样内的裂纹萌生并降低力学性能^[35]。

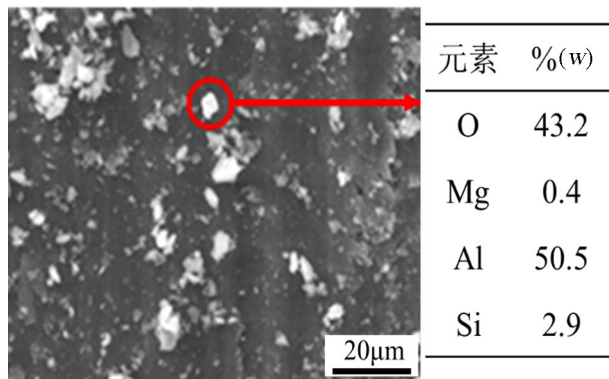


图5 SLM成形 AlSi10Mg中的氧化

Fig. 5 The oxidation in the AlSi10Mg fabricated by SLM

2.3 微观孔隙及裂纹

根据孔隙的形状和成形机制,可以将SLM中的孔隙分为球形的气孔和不规则形状的匙孔^[36]。前者的形成是由于金属粉末表面残余的水分等杂质,在成形过程中产生的氢气未能及时逸出导致的^[37]。后者则是因为熔化不充分而产生,其内部一般存在着未熔融颗粒^[38],如图6所示。

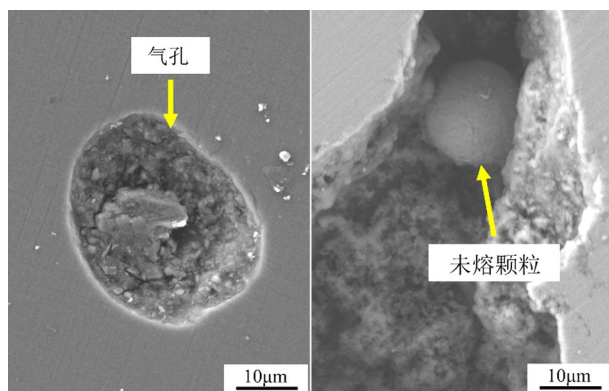


图6 SLM铝合金试样中的孔隙和未熔颗粒

Fig. 6 The pore and unmelted particle in the aluminum alloys fabricated by SLM

铝合金粉末具有高激光反射率以及高热导率,这就导致了铝粉在凝固时具有快速热耗散的特点。而铝粉自身的流动性差,因此容易因为激光能量密度不足使得材料熔化不充分,从而导致匙孔的形成^[39]。试样内部的氧化物也有可能导致这种孔隙的出现^[40]。一般会提高激光能量来克服热耗散过快导致的匙孔,但是这也会导致铝合金的凝固区间增大,容易产生因凝固收缩而导致的凝固裂纹。

2.4 球化现象

球化现象指液体金属表面在重力、气体、固体基体的影响下收缩成球状,从而获得金属液体和其接触的介质之间的最小的表面能^[41]。球化现象的出现主要是由于材料自身的润湿性较差或者是成形过程中出现的熔滴飞溅现象。在SLM成形过程中,当由于激光能量密度较小导致下半部已成形层的重熔部分体积较小,或者是发生飞溅导致熔液转移时,上半部的熔融粉末

部分的熔液体积就会增大。当体积超过材料自身润湿性所允许的极限时,球化现象就会出现^[42]。球化现象会导致材料成形不均匀,从而影响材料的表面粗糙度并且产生孔隙。另外,球化现象导致材料表面的凸起也会损坏刮刀表面,影响刮刀的使用寿命^[43]。

3 激光熔化沉积

3.1 制造工艺

激光熔化沉积(Laser Melted Deposition, LMD^[44]/Direct Laser Deposition, DLD^[45])是以激光束为热源,将金属粉末/丝材直接沉积在基板上,并通过移动基板实现零件的三维成形^[45],如图7所示。随着LMD技术的发展,基于丝材的激光熔化沉积技术逐渐从LMD中分离,常被称作激光熔丝增材制造^[46]或者是基于丝材的激光金属增材制造技术^[47]。因此此处所讲的LMD工艺一般专指以金属粉末为原料。

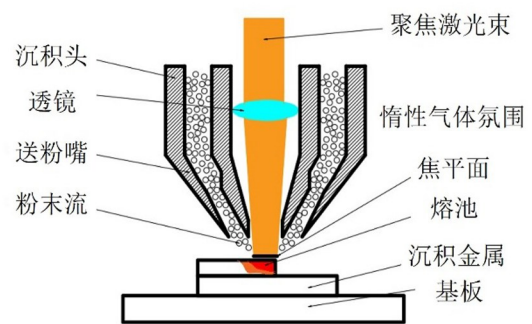


图7 激光送粉工艺的原理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of LMD process

相比于SLM,LMD成形精度较低,一般需要二次加工。且由于缺少粉末床的支撑,LMD在成形悬臂结构时不如SLM便利^[45]。相比于WAAM,其优点是成品表面质量和成形精度较高、适用于复杂结构件、材料致密度高、成分均匀。另外,由于LMD的工艺特点,其可以通过激光熔覆的方式进行表面修复以及零件修复和镀层^[48],并且通过同轴送粉工艺,LMD可以在成形过程中直接实现材料的混合^[49]。目前针对铝合金LMD的部分研究内容如表2所示。

表2 铝合金LMD的研究现状

Tab. 2 Research status of aluminum alloy LMD process

材料	成形工艺			参考文献
	激光功率 /W	扫描速度 /mm·s ⁻¹	送粉速度 /g·min ⁻¹	
AlSi10Mg	1400	16.7	4.4	[50]
2A97	2200	9	12.5	[51]
	4000~6000	10~15	8~12	[52]
4045	6000	8.3	-	[53]
5083	600~800	-	-	[54]
7075	1000~2000	6.7~20	2~6	[44]
	1050	8.3	3.3	[55]

激光熔化沉积技术的工艺参数主要包括激光功率、扫描速度、送料速度、光斑直径、扫描间距、保护气流量等。这些工艺参数共同决定了成形过程中的热输入大小和过程稳定性。而改变扫描间距^[56]和扫描路径^[57]可以调节成品表面质量,减少后期加工时间。为了减少工艺过程复杂热历史的影响并提高试样的力学性能,一些辅助工艺也被加入LMD的成形过程中。例如LV等^[58]人则采用525℃固溶2h的后热处理工艺,使AlSi10Mg的拉伸性能从292 MPa提升至342 MPa。除此之外,在其他材料上使用过的基板预热、激光重熔等辅助工艺在铝合金LMD工艺上也具有潜在的应用价值。在材料方面,LMD工艺和SLM工艺类似,可以通过在粉末中加入不同的强化颗粒来提高材料力学性能,例如XI等^[50]人通过加入2%SiC强化颗粒,使AlSi10Mg成品拉伸强度提高29.9%。

3.2 现存挑战

3.2.1 微观孔隙及裂纹

LMD中的孔隙可以根据分布位置不同可以分为层内孔隙和层间孔隙^[44]。

层内孔隙一般是由于材料中低熔点元素的蒸发^[59]以及粉末送入过程中吸附或者随紊流卷入的保护气体^[60]。层间孔隙一般是由于热输入不够或者是送粉速率过高导致的未熔融孔隙^[58,60]。除此之外,与前两种工艺相同的氢气孔则是主要出现在LMD试样的层间区域^[44]。裂纹的出现主要是因为材料成形过程中,由于复杂热历史等原因导致的残余应力在超过材料强度极限时,促使了裂纹在气孔、未熔合、夹杂区域产生^[61],如图8所示。

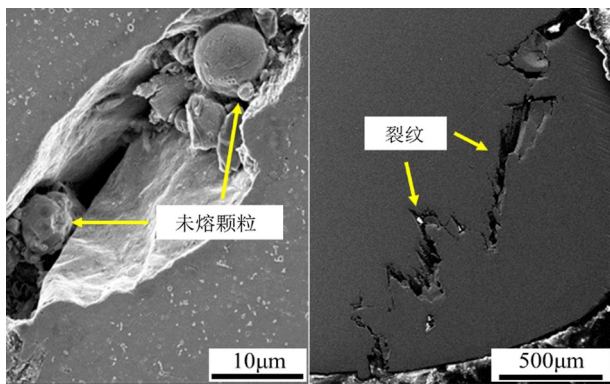


图8 LMD中的未熔缺陷和裂纹

Fig. 8 The unmelted defect and cracks in LMD

3.2.2 微观组织不均匀

由于激光熔化沉积成形过程中产生的高温梯度等特点,在凝固过程中会出现不均匀的微观组织分布,进而导致力学性能的区域分布差异和各向异性。例如在AlSi10Mg打印过程中,从底部区域到顶部区域出现的微观组织从包晶变化到柱状树枝晶至发散树枝晶,从而导致材料硬度产生梯度变化,从

121 HV降至101 HV,影响试样的宏观力学性能^[56]。CHEN等^[51]人则关注到了温度梯度和重熔共同导致的试样内部的强织构现象,并且由于沉积方向上微观组织的差异,导致了底部试样的抗拉强度比中部和顶部试样低了约30 MPa。

4 铝合金金属增材制造在航天领域的应用

近年来,随着航天技术的快速发展,航天飞行器的结构趋向于复杂化、整体化、轻量化、个性化。采用传统加工工艺往往面临着制造工序繁杂,材料耗损严重等问题。增材制造技术的应用可以实现小批量、定制化零件的高效、低成本、短流程制造,缩短零件的交付周期和制造成本,加快零件的实装速度。配合拓扑优化以及点阵结构,可以实现零件的进一步减重。另外,结合三维重构等技术,增材制造工艺可直接用于零件修复以及现有零件的再制造,减少了备用零件的仓储、运输等管理成本,解决了航天零部件维护保养的高昂成本问题。

4.1 国外发展情况

国外的增材制造发展较早,在2013年,美国的NASA便已经开始涉足增材制造领域。其在太空金属增材制造领域与Ultra Tech Machinery公司、Fabrisonic公司、Made in Space公司以及Techshot公司合作,致力于研发面向航天领域的,包括超声增材制造,电弧增材制造等在内的金属增材制造工艺。2017年,美国的Blue origin研发的BE-4火箭引擎增压泵选用了SLM成形的铝合金壳体。2019年,美国的休斯研究实验室向NASA销售了其开发的新型7A77高强3D打印铝合金粉末。欧洲方面,Thales Alenia Space宇航公司于2015年开始利用3D打印进行卫星部件制造,2016年该公司和法国Poly-Shape SAS 3D打印服务公司共同为韩国通信卫星Koreasat-5A和Koreasat-7提供增材制造铝合金天线基座支架,用于与地面基地通信,天线支架采用SLM技术制造^[62]。2019年Thales Alenia Space对Spacebus Neo平台电信卫星中的组件使用SLM技术生产,包括4个铝制反作用轮支架以及4个铝合金天线展开和指向机构(ADPM)支架,新的结构件性能得到提升并且减重30%。德国的HILPER等^[63]人,采用SLM工艺制造了运用于星载光学系统上的AlSi40镜面,可用于光谱仪等光学系统。瑞典的RUAG Space公司采用SLM工艺,成形了星体跟踪器支架、Leros发动机支架等AlSi10Mg铝合金构件。欧洲Astrium公司则采用LAM技术整体成形EurostarE3000卫星平台的遥测/遥控天线铝合金安装支架,减重35%^[62]。此外,欧洲航天局(ESA)的PROBA-3卫星的天线系统中包含一种3D打印铝合金螺旋式天线,该天线由SENER Aeroespacial制造并已经通过飞行认可。

4.2 国内发展现状

针对航天铝合金增材制造结构件,国内多所高校及科研机构开展研究及应用。

首都航天机械有限公司、北京航星机器制造公司及华中科技大学等单位,针对航天领域的铝合金管路支架,壳体、框梁以及网格结构等进行了应用试制^[64]。上海航天设备制造总厂有限公司则成功实现了2A14和2219等铝合金材料的搅拌摩擦焊增材制造技术^[65]。2016年清华大学对面向低轨定位载荷的铝合金喇叭天线的增材制造方法开展了研究,通过SLM增材制造工艺与设计方式使天线质量降低了2/3^[66]。2018年5月21日,嫦娥四号中继星“鹊桥”成功发射,北京卫星制造厂有限公司采用SLM工艺技术验证并进行结构拓扑优化的包括卫星斜动量轮支架在内的多个复杂形状铝合金结构件应用其中。2019年8月,捷龙一号遥一火箭将“千乘一号01星”卫星送入预定轨道,中国空间技术研究院总体部机械系统事业部与西安铂力特对千乘一号整星结构采用面向增材制造的轻量化三维点阵结构设计方法进行设计,并通过铝合金增材制造技术一体化制备。2020年发射的天问一号变推力发动机中部分铝合金零件也采用了3D打印技术。华中科技大学的高炼玲等^[67]人采用电弧熔丝增材制造工艺成功成形了5356铝合金运载火箭过渡端框样件。2021年1月,中国国家增材制造创新中心、西安交通大学卢秉恒院士团队利用电弧熔丝增材制造一体化制造技术,克服了多路打印的运动控制、大尺寸结构件打印的变形与应力调控等难题,制造出世界上首件10 m级高强铝合金重型运载火箭连接环样件(图9)。

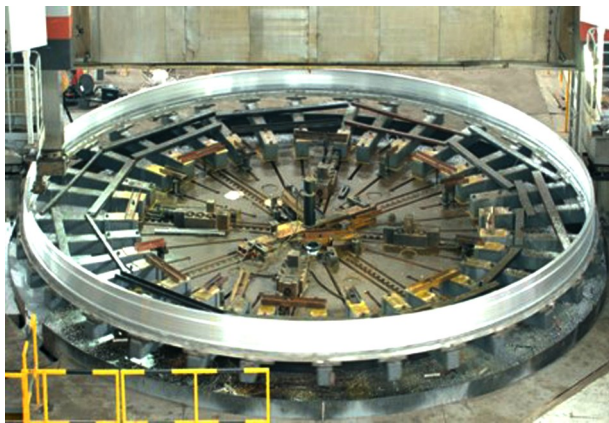


图9 10 m级高强铝合金重型运载火箭连接环样件

Fig. 9 10 m class high strength aluminum alloy heavy carrier rocket connection ring sample

5 现存挑战及未来发展趋势

金属增材制造凭借其高材料利用率、高自由度等特点,在航天领域有着传统加工无法替代的优势。尤其是针对小批量的复杂高精度零件、大尺寸宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2022年 第2期

的复杂薄壁结构件等航天装备。铝合金增材制造工艺在航天领域的应用可以提高材料利用率、降低生产和维护成本、提高零件的设计自由度、缩短零件的研发周期,促进航天装备的升级换代。但是目前铝合金增材制造工艺仍没有达到传统加工的技术成熟度、缺乏标准化的质量管理体系、缺乏完善的配套软硬件设施,未来仍具有较大的发展空间。

5.1 研发及优化增材制造工艺

相比于传统工艺,金属增材制造工艺诞生较晚,研发及应用时间短,因此无法避免地存在工艺成熟性低的问题。除了上文提及的各工艺现有的工艺缺陷外,还存在着工艺重复性差、零件性能一致性差等问题。并且目前仍缺少针对增材制造成形过程以及成形构件质量评定的相关标准,这极大的限制了现阶段增材制造技术的工程应用。

优化工艺一方面是需要进一步改善现有的铝合金增材制造工艺,降低孔隙率、元素烧损、氧化等铝合金增材制造现有缺陷对材料性能的影响。结合航天零件的特殊性能需求,例如高疲劳寿命、单向拉伸性能等,设计研发专属增材制造工艺。另一方面需要结合热等静压、层间锤击、后热处理等辅助工艺,形成完整的增材制造工艺链。加强最终成形构件的质量稳定性,提高成品率。除此之外,研究现有等材、减材工艺与增材制造工艺的复合效果。通过优势互补,充分发挥增材制造自身特点。利用成熟的传统机加工工艺,解决增材制造表面质量低、组织不均匀、质量不稳定等问题。通过增减材复合制造实现复杂高性能零件的一体化成形。

5.2 研发新型增材制造铝合金原材料

针对增材制造铝合金原材料的研发可以分为两个方面。一是开发增材制造工艺专属丝材、粉材。以金属丝材为例,目前绝大部分丝材增材制造工艺使用的材料为传统的焊接丝材,工艺适配性差,无法针对性的解决增材制造过程中的元素损失、热裂、气孔、力学性能各向异性等问题。另外,现有的金属材料,大部分是基于适应铸锻焊等传统工艺为目的进行的成分设计,但这并不意味着其可以完美适应增材制造工艺快速且复杂变化的热历史特点。从材料源头解决部分增材制造工艺缺陷可以有效的提高增材制造工艺的成形质量。另一方面是研究新型铝合金材料,针对航天领域构件轻质高强、耐高温、耐低温等特殊需求,开发适用于增材制造的铝锂合金等新型铝合金材料。针对零件修复,开发适配性强的多用途铝合金修复材料,实现一种铝合金材料修复多种牌号铝合金。加强增材制造工艺的应急修复能力,降低零件的修复成本。

5.3 研发适用于航天装备零部件成形的增材制造

和在线监测装备

随着增材制造工艺的发展,增材制造装备也在不断的更迭换代。但是目前大部分金属增材制造装备集中在激光选区熔化工艺,而像电弧熔丝增材制造设备,部分科研及企业单位仍在使用自主搭建的工艺平台。尤其是面对航天领域的大型结构件,目前仍没有合适的增材制造成形设备。研发成熟的工艺成形设备以及配套的工艺软件是面向企业应用必须解决的一环。另一方面,针对成形过程的在线监测是确保增材制造构件质量的必要手段。采用激光、红外、超声、X射线等监测手段,多方位监测成形过程中的温度场、应力场等物理场。检测成形构件内部孔隙、裂纹、元素烧损等缺陷。通过监测数据的反馈,优化和改进成形工艺,并在零件出现严重质量缺陷时及时停产止损。

5.4 研发太空增材制造技术

太空增材制造是具有颠覆性引领性质的重大研究方向之一^[68]。通过将制造搬入太空,可以有效节省空间运输成本。太空中微重力、高真空、超低温等特殊条件,可以简化增材制造环境的搭建成本以及零件的制造成本。太空在轨增材制造以及地外行星表面增材制造的实现,可以有效解决在轨飞行器以及太空基地的制造、维护问题。但是,太空的特殊环境也让太空增材制造技术的发展面临诸多挑战。例如微重力环境下无法实现粉末床熔融增材制造技术,而直接能量沉积技术也面临着表面张力影响、热环境差异、公差叠加等问题^[69]。做完即用的模式给太空增材制造的后处理、过程监测及质量检测环节提出了更加严格的要求。受限于太空实验的成本,太空增材制造过程的建模和仿真技术的发展也是研发太空增材制造技术必不可少的一环。

参考文献

[1] CAMPBELL F C. Manufacturing technology for aerospace structural materials [M]. Elsevier Science, 2006:2.

[2] DEBROY T, WEI H L, ZUBACK J S, et al. Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties [J]. Progress in Materials Science, 2018, 92: 112–224.

[3] Z P, D D, B W. Arc welding processes for additive manufacturing: A review [M]. Transactions on Intelligent Welding Manufacturing, 2018:3–24.

[4] DUPONT J N, MARDER A R. Thermal efficiency of arc welding processes [J]. Welding Journal (Miami, Fla), 1995, 74 (12): 406.

[5] QI Z, QI B, CONG B, et al. Microstructure and mechanical properties of wire + arc additively manufactured 2024 aluminum alloy components: As-deposited and post heat-treated [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 40: 27–36.

[6] 姚云飞, 王繆乾, 方学伟, 等. 冷金属过渡_CMT_增材制造 2219 铝合金性能 [J]. 焊接, 2018(6): 53–68.

YAO Yunfei, WANG Miaoqian, FANG Xuewei, et al. Properties of CMT additively manufactured 2219 aluminum alloy [J]. Welding, 2018(6): 53–68.

[7] FANG X, LI H, LI X, et al. Effect of post heat treatment on the microstructure and mechanical properties of wire-arc additively manufactured A357 alloy components [J]. Materials Letters, 2020, 269: 127674.

[8] DONG B, CAI X, LIN S, et al. Wire arc additive manufacturing of Al-Zn-Mg-Cu alloy: Microstructures and mechanical properties [J]. Additive Manufacturing, 2020, 36: 101447.

[9] 王帅, 顾惠敏, 王伟, 等. ZL205A 电弧熔丝增材制造堆积体的组织与性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(9): 2910–2916.

WANG Shuai, GU Huimin, WANG Wei, et al. Microstructure and mechanical properties of ZL205A aluminum alloy wall produced by wire arc additive manufacturing [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(9): 2910–2916.

[10] XUE C, ZHANG Y, MAO P, et al. Improving mechanical properties of wire arc additively manufactured AA2196 Al-Li alloy by controlling solidification defects [J]. Additive Manufacturing, 2021, 43: 102019.

[11] PANCHENKO O, KURUSHKIN D, MUSHNIKOV I, et al. A high-performance WAAM process for Al-Mg-Mn using controlled short-circuiting metal transfer at increased wire feed rate and increased travel speed [J]. Materials & Design, 2020, 195: 109040.

[12] MORAIS P J, GOMES B, SANTOS P, et al. Characterisation of a high-performance Al-Zn-Mg-Cu alloy designed for wire arc additive manufacturing [J]. Materials (Basel), 2020, 13(7): 1610.

[13] HAUSER T, REISCH R T, BREESE P P, et al. Oxidation in wire arc additive manufacturing of aluminium alloys [J]. Additive Manufacturing, 2021, 41: 101958.

[14] FANG X, ZHANG L, CHEN G, et al. Microstructure evolution of wire-arc additively manufactured 2319 aluminum alloy with interlayer hammering [J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 800: 140168.

[15] SUN R, LI L, ZHU Y, et al. Microstructure, residual stress and tensile properties control of wire-arc additive manufactured 2319 aluminum alloy with laser shock peening [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 747: 255–265.

[16] SCOTTI F M, TEIXEIRA F R, SILVA L J D, et al. Thermal management in WAAM through the CMT advanced process and an active cooling technique [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 57: 23–35.

[17] FU R, TANG S, LU J, et al. Hot-wire arc additive manufacturing of aluminum alloy with reduced porosity and high deposition rate [J]. Materials & Design, 2021, 199: 109370.

[18] GU J, GAO M, YANG S, et al. Microstructure, defects, and mechanical properties of wire + arc additively manufactured Al Cu₄.3-Mg1.5 alloy [J]. Materials & Design, 2020, 186: 108357.

[19] WANG L, SUO Y, LIANG Z, et al. Effect of titanium powder on microstructure and mechanical properties of

- wire + arc additively manufactured Al-Mg alloy [J]. *Materials Letters*, 2019, 241: 231–234.
- [20] YUAN T, YU Z, CHEN S, et al. Loss of elemental Mg during wire + arc additive manufacturing of Al-Mg alloy and its effect on mechanical properties [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 49: 456–462.
- [21] LI Q, WU A P, LI Y J, et al. Segregation in fusion weld of 2219 aluminum alloy and its influence on mechanical properties of weld [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(2): 258–271.
- [22] REISCH R, HAUSER T, KAMPS T, et al. Robot based wire arc additive manufacturing system with context-sensitive multivariate monitoring framework [J]. *Procedia Manufacturing*, 2020, 51: 732–739.
- [23] GU J, DING J, WILLIAMS S W, et al. The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 230: 26–34.
- [24] ALUMINIUM-ZENTRALE. *Aluminium-taschenbuch* [M]. Aluminium-Verlag, 1988.
- [25] CHAO C, QINGQING L, SANBAO L, et al. Mechanism of crack initiation of dissimilar joints between 2219 aluminum alloy and 5A06 aluminum alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2019, 48(3): 776–781.
- [26] TONELLI L, LIVERANI E, VALLI G, et al. Effects of powders and process parameters on density and hardness of A357 aluminum alloy fabricated by selective laser melting [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 106(1/2): 371–383.
- [27] SIMCHI A. Direct laser sintering of metal powders: Mechanism, kinetics and microstructural features [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 428(1/2): 148–158.
- [28] ZHANG W-N, WANG L-Z, FENG Z-X, et al. Research progress on selective laser melting (SLM) of magnesium alloys: A review [J]. *Optik*, 2020, 207: 163842.
- [29] DAMON J, DIETRICH S, VOLLERT F, et al. Process dependent porosity and the influence of shot peening on porosity morphology regarding selective laser melted AlSi10Mg parts [J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 20: 77–89.
- [30] HIRATA T, KIMURA T, NAKAMOTO T. Effects of hot isostatic pressing and internal porosity on the performance of selective laser melted AlSi10Mg alloys [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 772: 138713.
- [31] LEI Z, BI J, CHEN Y, et al. Effect of energy density on formability, microstructure and micro-hardness of selective laser melted Sc- and Zr- modified 7075 aluminum alloy [J]. *Powder Technology*, 2019, 356: 594–606.
- [32] DYNIN N V, ANTIPOV V V, KHASIKOV D V, et al. Structure and mechanical properties of an advanced aluminium alloy AlSi10MgCu (Ce, Zr) produced by selective laser melting [J]. *Materials Letters*, 2021, 284: 128898.
- [33] PAWLAK A, ROSIENKIEWICZ M, CHIEBUS E. Design of experiments approach in AZ31 powder selective laser melting process optimization [J]. *Archives of Civil and Mechanical* Engineering, 2017, 17(1): 9–18.
- [34] SIMONELLI M, TUCK C, ABOULKHAIR N T, et al. A study on the laser spatter and the oxidation reactions during selective laser melting of 316L stainless steel, Al-Si10-Mg, and Ti-6Al-4V [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2015, 46(9): 3842–3851.
- [35] LIU Y, YANG Y, WANG D. A study on the residual stress during selective laser melting (SLM) of metallic powder [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(1–4): 647–656.
- [36] ABOULKHAIR N T, EVERITT N M, ASHCROFT I, et al. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting [J]. *Additive Manufacturing*, 2014, 1–4: 77–86.
- [37] WEINGARTEN C, BUCHBINDER D, PIRCH N, et al. Formation and reduction of hydrogen porosity during selective laser melting of AlSi10Mg [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 221: 112–120.
- [38] MASKERY I, ABOULKHAIR N T, CORFIELD M R, et al. Quantification and characterisation of porosity in selectively laser melted Al-Si10-Mg using X-ray computed tomography [J]. *Materials Characterization*, 2016, 111: 193–204.
- [39] ABOULKHAIR N T, SIMONELLI M, PARRY L, et al. 3D printing of aluminium alloys: Additive manufacturing of aluminium alloys using selective laser melting [J]. *Progress in Materials Science*, 2019, 106: 100578.
- [40] TANG M, PISTORIUS P C. Oxides, porosity and fatigue performance of AlSi10Mg parts produced by selective laser melting [J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 94: 192–201.
- [41] YAP C Y, CHUA C K, DONG Z L, et al. Review of selective laser melting: Materials and applications [J]. *Applied Physics Reviews*, 2015(2): 041101.
- [42] 吴伟辉, 杨永强, 王迪. 选区激光熔化成型过程的球化现象 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(5): 110–115.
- WU Weihui, YANG Yongqiang, WANG Di. Balling phenomenon in selective laser melting process [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 38(5): 110–115.
- [43] 李瑞迪. 金属粉末选择性激光熔化成型的关键基础问题研究 [D]. 华中科技大学, 2010.
- LI Ruidi. Research on the key fundamental problems of metal powder selective laser melting [D]. *Huazhong University of Science and Technology*, 2010.
- [44] BENOIT M J, SUN S D, BRANDT M, et al. Processing window for laser metal deposition of Al 7075 powder with minimized defects [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 64: 1484–1492.
- [45] THOMPSON S M, BIAN L, SHAMSAEI N, et al. An overview of direct laser deposition for additive manufacturing; part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics [J]. *Additive Manufacturing*, 2015(8): 36–62.
- [46] MORTELLO M, CASALINO G. Transfer mode effects on Ti6Al4V wall building in wire laser additive manufacturing [J]. *Manufacturing Letters*, 2021, 28: 17–20.

- [47] HUANG W, CHEN S, XIAO J, et al. Laser wire-feed metal additive manufacturing of the Al alloy [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 134:106627.
- [48] FALLAH V, CORBIN S F, KHAJEPOUR A. Process optimization of Ti-Nb alloy coatings on a Ti-6Al-4V plate using a fiber laser and blended elemental powders [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(14): 2081-2087.
- [49] WANG F, MEI J, WU X. Compositionally graded Ti6Al4V + TiC made by direct laser fabrication using powder and wire [J]. *Materials & Design*, 2007, 28(7): 2040-2046.
- [50] XI X, CHEN B, TAN C, et al. Microstructure and mechanical properties of SiC reinforced AlSi10Mg composites fabricated by laser metal deposition [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 58: 763-774.
- [51] CHEN R, WANG H, HE B, et al. Effect of thermal cycling on microstructure and mechanical properties of 2A97 Al-Li alloy fabricated by direct laser deposition [J]. *Vacuum*, 2021, 190: 110299.
- [52] JIAO S, CHENG X, SHEN S, et al. Microstructure evolution and mechanical behavior of Al-Li alloy fabricated by laser melting deposition technique [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 821:153125.
- [53] YONGCHENG C, SHUQUAN Z, XIANGJUN T, et al. Microstructure and microhardness of 4045 aluminum alloy fabricated by laser melting deposition [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3):0303008.
- [54] SVETLIZKY D, ZHENG B, BUTA T, et al. Directed energy deposition of Al 5XXX alloy using laser engineered net shaping (LENS®) [J]. *Materials & Design*, 2020, 192:108763.
- [55] SINGH A, RAMAKRISHNAN A, BAKER D, et al. Laser metal deposition of nickel coated Al 7050 alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 719: 151-158.
- [56] 吕非, 田宗军, 梁绘昕, 等. AlSi10Mg 铝合金激光熔化沉积显微组织及力学性能 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(10): 117-125.
- LYU Fei, TIAN Zongjun, LIANG Huixin, et al. Mechanical properties and microstructure of Laser melting deposited AlSi10Mg aluminum alloy [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 46(10):117-125.
- [57] 陶汪, 王宪, 陈奥, 等. 铝合金激光熔化沉积应力场及力学性能 [J]. *焊接学报*, 2020, 41(4): 62-66.
- TAO Wang, WANG Xian, CHEN Ao, et al. Analysis of stress field and mechanical properties of aluminum alloy by laser melting deposition [J]. 2020, 41(4): 62-66.
- [58] LV F, SHEN L, LIANG H, et al. Mechanical properties of AlSi10Mg alloy fabricated by laser melting deposition and improvements via heat treatment [J]. *Optik*, 2019, 179: 8-18.
- [59] SINGH A, RAMAKRISHNAN A, DINDA G P. Laser metal deposition of Al-7050/Al50Mg50 gradient material [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2019, 50(8): 3949-3958.
- [60] DASS D, CHOSPHEL T, KUMAR H. Psychometric validation of hindi version of 2018 lake louise acute mountain sickness scoring system [J]. *International Journal of Current Research and Review*, 2019, 11(18):110054.
- [61] 邵玉呈, 陈长军, 张敏, 等. 关于 Deloro_40 镍基合金粉末激光增材制造成型件裂纹问题研究 [J]. *应用激光*, 2016, 36(4): 397-402.
- SHAO Yuchen, CHEN Changjun, ZHANG Min, et al. Research on Crack issue of deloro 40Ni alloys prototype fabricated by laser additive manufacturing [J]. *Applied Laser*, 2016, 36(4):397-402.
- [62] XIANG Q, HUANG S, LIU W, et al. Development of laser additive manufacturing technology for metals [J]. *Chinese Journal of Engineering Science*, 2020, 22(3):56-62.
- [63] HILPERT E, HARTUNG J, LUKOWICZ H V, et al. Design, additive manufacturing, processing, and characterization of metal mirror made of aluminum silicon alloy for space applications [J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(9):092613.
- [64] 李权, 王福德, 王国庆, 等. 航空航天轻质金属材料电弧熔丝增材制造技术 [J]. *航空制造技术*, 2018, 61(3): 74-89.
- LI Quan, WANG Fude, WANG Guoqing, et al. Wire and arc additive manufacturing of lightweight metal components in aeronautics and astronautics [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(3): 74-89.
- [65] 张春杰, 齐超琪, 赵凯, 等. 大型航空航天铝合金承力构件增材制造技术 [J]. *电焊机*, 2021, 51(8): 39-54.
- ZHANG Chunjie, QI Chaoqi, Zhao Kai, et al. Additive manufacturing technology for large load-carrying component of aluminum alloy in aeronautics and astronautics. *Electric Welding Machine*, 2021, 51(8): 39-54.
- [66] 黄振, 赵砚, 陈曦, 等. 一种面向低轨定位载荷的铝合金喇叭天线及其制造方法 [P]. CN106159453A, 2016.
- [67] 高炼玲, 余圣甫, 禹润缙, 等. 5356 铝合金过渡端框电弧增材制造及组织与性能 [J]. *机械工程学报*, 2020, 56(8): 28-36.
- GAO Lianling, YU Shenfu, YU Runzhen, et al. Study on arc additive manufacturing process and properties of 5356 aluminum alloy rocket booster module transition end frame [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(8): 28-36.
- [68] 卢秉恒. 增材制造技术——现状与未来 [J]. *中国机械工程*, 2020, 31(1):19-23.
- LU Bingheng. Additive manufacturing—current situation and future [J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(1):19-23.
- [69] 张颖一, 张伟, 王功. 太空增材制造的技术需求和应用模式探索 [J]. *中国材料进展*, 2017, 36(7): 503-511.
- ZHANG Yingyi, ZHANG Wei, WANG Gong. Discussion on the technical demands and application modes of additive manufacturing in space [J]. *Materials China*, 2017, 36(7): 503-511.