

航天运载器结构先进材料及工艺技术应用与发展展望

刘观日 吴迪 姚重阳 占续军 渠弘毅 吴会强 王非凡

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

文 摘 先进结构是支撑航天运载器研制及航天任务实施的基础,而先进材料与工艺技术则是先进航天运载器结构研制的重要基石。本文在简要论述航天运载器结构特点及我国发展趋势的基础上,综述了我国航天运载器结构金属材料、复合材料和智能材料的应用与发展需求,最后从超大型结构制造、整体高精高性能制造、复合材料结构制造、增材制造和绿色制造五个方面综述了航天结构先进工艺技术的未来发展趋势,并对重点研究方向进行了展望。

关键词 航天运载器,材料,工艺技术,研究进展

中图分类号:V1

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2021.04.001

Application and Development of Advanced Materials and Processing Technology in Aerospace Vehicle Structure

LIU Guanri WU Di YAO Chongyang ZHAN Xujun QU Hongyi
WU Huiqiang WANG Feifan

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076)

Abstract Advanced materials and processing technology are the key foundation of the aerospace vehicle structure. With a brief discussion of the classification and development trends of the aerospace vehicle structure of China, this paper summarizes the application and development requirements of the main body structure of space vehicles, including metal materials, composite materials and intelligent materials. Meanwhile the future development trend of advanced processing technology of aerospace structure is summarized from five aspects, including ultra-large-sized structure manufacturing, integral high performance manufacturing, composite structure manufacturing, additive manufacturing and green manufacturing, and the interested process technologies are proposed.

Key words Aerospace vehicle structure, Materials, Processing technology, Research progress

0 引言

航天材料及工艺技术是发展航天运载器的基础技术、先导技术和关键技术,是决定航天运载器性能、质量、可靠性和成本的基础因素,贯穿于每一件航天产品及航天器的设计、研制、生产、试验及使用维护的全寿命周期,其性能与水平在很大程度上制约着航天高技术的发展和运载器装备的研制进程,也是衡量我国航天产品和科技发展水平的重要标志之一^[1]。

随着航天运载器装备迭代发展速度不断加快,

性能要求不断提升,运载火箭结构不断向整体化、大型化、轻量化发展,运载能力与可靠性持续增强。航天运载器不断向高射程、高精度发展,打击能力不断提升;空天飞行器在天地往返运输、天基跨域等方向多面推进,空天安全装备体系加快构建。新型航天运载器的发展需要先进材料与先进工艺技术的不断创新予以全面支撑^[2-3]。本文介绍了当前我国航天运载器结构主要采用的先进主体结构材料和先进工艺技术的应用情况与研究进展,并对未来研究与发展需求进行了工作展望。

收稿日期:2021-06-21

第一作者简介:刘观日,1975年出生,博士,研究员,主要从事运载火箭总体设计工作。E-mail:13683157563@139.com

通信作者:王非凡,1987年出生,博士,高级工程师,主要从事箭体结构设计工作。E-mail:wangff_casc@163.com

1 航天运载器结构概述与发展趋势

航天运载器通常可按照总体、动力、结构、控制、发射支持、有效载荷等重要专业系统^[2-3],其中结构系统是运载器的“脊梁”,是所有系统及其功能实现的基本载体。图1所示为典型液体运载火箭结构,箭体结构主要由贮箱和舱段两大类结构组成,共同形成箭体锥形、结构传力、增压输送及其他系统仪器电缆安装载体。贮箱结构除了承力以外,还用于贮存液体推进剂。舱段结构是除了贮箱以外的箭体结构统称,包括了整流罩、级间段、箱间段、翼舵、口盖、特殊功能快速锁等结构。

随着空间站建设、载人登月、行星探测等重大航天工程的提出,我国航天运输任务需求已进入持续快速增长阶段,运载火箭发展趋势主要表现为结构的尺寸大型化、结构轻质化和重复使用化。在尺寸大型化方面,以10 m级超大直径重型运载火箭为典型代表的箭体结构的研制已成为航天强国建设的重要标志之一。在结构轻质化方面,箭体结构效率,高性能材料的研发与应用、整体化高精度制造技术应用是关键。在重复使用化方面,回收系统结构机构、返回防热结构研制已形成迫切需求。

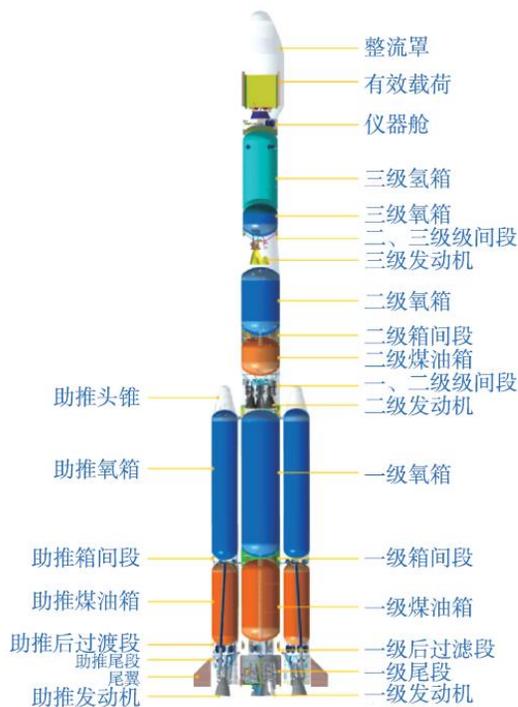


图1 液体运载火箭组成示意图^[2]

Fig. 1 Composition of liquid rocket

除了常规构型的运载火箭,航天运载器的研究交叉越发明显,空天跨领域结合飞行器已成为这类航天运载器在当前世界航天角逐的技术前沿,尤其是快速多模航天运载器的发展更是研究热点,其结构特征主要表现在抗极端力热环境承载的舱段、翼舵及热防护

需求^[4]。以美国的快速全球打击计划为例,已先后完成X37-B轨道试验飞行器、HTV-2“助推-滑翔”组合飞行器系统、X-51巡航飞行器等研制,该类运载器结构因其特殊飞行任务剖面,在具有满足传统航空航天飞行器承受载荷、安装设备和提供构型的主要功能基础上,还具有包含空间、再入等环境的适应性、重复使用条件下的结构耐久性、损伤容限特性以及承受包含着陆在内等非传统航天载荷的能力。空天运载器结构发展主要呈现轻质化、整体化、高耐温、高精度等趋势,结构功能一体化纤维增强复合材料的使用已成为结构提升的重要途径。

2 航天运载器结构先进材料应用与发展展望

高性能材料是航天运载器研制发展的关键基础,轻质、高强度是航天结构材料的永恒追求。由于需要在高应力、超高温、超低温、强腐蚀等极端条件下工作,运载器性能设计高度依赖所选用结构材料本身所具有的特性和功能。目前,国内外航天运载器结构材料主要涉及轻质高强金属材料(高强度铝合金、镁合金、钛合金、高温合金等)和轻质复合材料(结构复合材料、功能复合材料等),同时也开展了智能变形材料的探索研究。

2.1 轻质高强金属材料

2.1.1 高强铝合金

铝及铝合金因其密度低、力学性能好、加工性和焊接性优良,在弹箭体舱段、贮箱、支架等结构获得了广泛应用,是世界上大多数航天运载器的主体结构材料^[5]。

高强铝合金作为航天应用最多的轻质材料,主要包括2XXX系和7XXX系铝合金,按照我国航空航天发展历程可以分为5个阶段^[6]。以2A12、2014、7A04为代表的第一代高静强度铝合金和以2219、7A09、7075为代表的第二代高强耐蚀铝合金在我国长征系列运载火箭及弹体中已经得到了广泛应用。以7050为代表的第三代高强高韧耐蚀铝合金和以7A60、7055、7056等第四代高耐损伤系列的高强铝合金正处于航天推广应用阶段,同时以7085为代表的第五代高强高韧低密度、低淬火敏感性铝合金也已进入新一代运载火箭研制的应用评价环节。尽管超高强铝合金在强度性能取得了重要突破,如7055-T6拉伸强度已经超过700 MPa,但是力学性能的大幅提升也造成了塑性降低、淬透性差、淬火残余应力大、机加工变形等一系列问题,这是超高强铝合金开发和应用亟须解决的关键难题。

铝锂合金具有高比强度、高比模量、耐腐蚀性好、低密度等一系列优势,用于取代传统高强Al-Cu合金可为航天运载器结构带来显著减重效果。以2195、2198为代表的先进铝锂合金已经在航天飞机

外挂贮箱、Falcon 9 火箭等型号中已经得到了成熟应用,产生了巨大经济价值。目前国内在 1420、2195、2A97 等铝锂合金的小规格材料制备,并在卫星支架、桁条、弹头头罩等结构中取得了重要应用,进一步突破大规格的铝锂合金的原材料低成本制备、塑性成形、热处理、焊接等技术是实现我国航天结构轻量化研制的关键。

随着航天装备轻量化发展要求的不断提升,超轻质、超高强度、超高模量、高耐热、高耐蚀等综合性能的新型铝合金及铝基复合材料研发也越来越受到航空航天领域的重视。以 Sc、Er 元素强化的高可焊耐蚀铝钪合金(5B70、5028、5024 等)、铝钪合金为国防军工产业开辟了特殊条件应用的新领域,进一步开展自主创新研究、推动制造工艺成熟化和低成本化已成为工程应用关注的重点。

2.1.2 高强耐热镁合金

镁及镁合金是目前最轻的金属结构工程材料之一,具有比强度、比模量高、优良的导热性和导电性、减震系数高、电磁屏蔽性能好等一系列优点,我国作为世界上镁资源最丰富的国家,原镁的年产量占到了世界总年产量的 80%,推动镁合金替代铝合金实现航天结构减重具有天然优势。

高强耐热镁合金作为航空航天结构材料的主要需求方向,稀土元素强化镁合金展现了独一无二高性能优势,用于弹箭体整体舱段结构可带来近 30% 的减重效果,使用温度提升至 200 °C 以上,可大大提升航空航天结构的轻质化水平和结构的承载效率^[7]。Mg-Gd-Y 系高强耐热镁合金具有优异的高温强度、抗蠕变性能及耐蚀性能,属于高强度铸造和变形镁合金系,已先后开发了 GW63K、GWNK7511 和 AQ80M 等镁合金。Mg-Gd-Y-Ca-Zr 镁合金 200 °C 时高温强度仍可达 360 MPa,并且 Mg-Gd-Y-(Zr) 合金系镁合金已在温度承载 250~300 °C 的弹体舱段上得到应用^[8]。此外,弹箭体惯组仪器安装平台支架结构已逐步推进镁合金材料的升级替换,在实现结构减重、提高振动阻尼等方面展现突出优势,部分大尺寸承力镁合金壳体产品抗拉强度已达到 400 MPa 量级,有力支撑了航天运载器结构轻质化水平的提升。

整体而言,镁合金在航天结构领域的应用已处于快速推广阶段,但是随着航天要求的不断提高,镁合金工程应用仍面临一部分问题,主要表现在:一方面,相比高强铝合金,镁合金结构的抗拉强度、延伸率和弹性模量仍偏低,而且稀土元素合金化导致镁合金成本偏高,亟需开发更高性能低成本镁合金材料体系,如轻质 Mg-Li 合金材料已成为国内外研究热点。另一方面,镁合金工程应用技术仍需进一步

成熟化,尤其是大尺寸镁合金结构件的精密熔铸缺陷抑制、弱刚性整体机加工变形控制、高可靠表面防护等技术仍需进一步研究。

2.1.3 高强韧钛合金

钛是地球上储量仅次于铝的重要轻质材料,钛合金的强度达到 500~1 400 MPa,比铝合金、镁合金高得多,钛合金的高温及低温性能更具优势,能在 550 °C 高温和 -250 °C 低温下长期工作而保持性能不变,已成为航空航天结构关键战略材料。针对航天运载器高应力承载、超高/低温、强腐蚀等极端条件下服役需求,国内外已开发出各种性能钛合金系列和加工制造技术^[9]。

国内航天领域钛合金精密锻造技术主要涉及 TC4ELI、TA7ELI、TC4、TC11、TA15 等牌号,大量应用于压力容器、局部高强承力结构及大承载紧固件^[10]。其中,钛合金气瓶在我国航天领域最典型的应用之一,采用精密模锻成形的 TA7ELI 钛合金低温气瓶,已在 CZ-3A、CZ-5 等运载火箭中得到广泛应用。用 TC4 钛合金管材取代传统传力钢结构杆系,实现结构大幅减重及抗腐蚀性能。增材制造 TA15 钛合金舵翼件骨架结构,力学性能与锻件持平,材料利用率达 70% 以上,可实现减重 15% 以上。

中/高温高强韧大承载是未来航天钛合金结构面临的主要挑战,为支撑我国航天快速航天运载器耐热承载一体的发展的迫切需求,亟须加快对 600 °C 及 650 °C 以上的高温高强钛合金、Ti-Al 系金属间化合物等材料体系的研究与工程应用突破。工程应用中受室温塑性差的反向制约,针对高强钛合金难变形的特点,需结合航天结构大尺寸、高成形精度及高性能需求,推动精密铸造、超塑性成形、扩散焊/激光焊连接、粉末冶金及增材制造等应用技术的发展,提升钛合金在航天结构中的应用成熟度。

2.1.4 高温合金

高温合金是指具有优异的 600 °C 以上的高温热力学性能,具体表现为耐高温、抗氧化、高强度等,主要包含铁基高温合金(600~800 °C)、镍基高温合金(650~1 000 °C)和钴基高温合金(730~1 100 °C)三大类,是航空航天发动机结构的首选服役材料。由于高温合金材料密度较大,难以满足航天运载器结构轻质应用要求,因此主要用于大承载紧固件和局部承力轴舵等。以 GH4169、GH2132 等为代表的高温合金,因其高/低温力学强度高、线胀系数低、耐蚀性强,在低温运载火箭、空天飞行器的紧固件方面得到了广泛的应用。GH4099 在 960 °C,拉伸强度仍能保存在 250 MPa 以上,因此在快速飞行航天运载器的舵部件上得到应用。此外,新型金属材料,如因瓦合

金,在200℃以下具有陶瓷材料接近的线胀系数,在快速飞行航天运载器中得到广泛应用。

随着航天运载器的进一步发展,针对长时间大气层内快速飞行运载器活动部件操纵需求的不断增加,需设计耐热1000℃以上的高温合金轴系部件;针对高温合金与热结构复合材料高温热匹配差异性问题,开展低热膨胀系数的高温合金材料及其精密成型工艺研究;为应对新一代航天运载器高性能连接需求,需全面开展以高温合金材料为基础的高强度高可靠紧固件制造、试验与评价技术研究。

2.2 轻质复合材料

2.2.1 结构复合材料

自上世纪50年代起,结构复合材料的轻质高性能就引起了航空航天领域的高度关注,相比铝合金构件,可实现30%以上的结构减重,主要形成了环氧树脂、双马来酰亚胺树脂和耐高温聚酰亚胺树脂基体的三大结构复合材料体系^[11]。以碳纤维增强树脂基复合材料典型代表,因其高比强度、高比模量、高温尺寸稳定性和可设计性等突出优点,广泛应用于运载火箭、空天飞行器等大型舱筒段、支架结构,已成为先进弹箭体结构轻质化的重要标志。

环氧树脂基结构复合材料由于成形性好,工艺发展最成熟,是目前应用最广的结构复合材料,服役温度通常低于180℃。随着双马来酰亚胺树脂基复合材料的发展,提升服役温度到230~280℃,并形成了以TG800/802为典型代表的推广应用。目前,耐高温聚酰亚胺树脂基复合材料体系已提升服役温度超过500℃的研究目标,随着材料工艺性改善和应用技术的突破,已在快速飞行航天运载器产品实现了应用。

随着航天运载器对减重、增程等指标的要求不断提高,成形性更好、耐高温等级更高的结构复合材料已成为运载器结构复合材料的重点研究方向。但是,高强/高模碳纤维仍然是制约我国高性能复合材料发展瓶颈难题,亟需突破国外技术封锁,从制造工艺、生产成本等方面同步推进,集中攻关T1000、T1100等为代表的高强碳纤维技术,加速突破M45、M50高模量碳纤维技术,在研发的同时加强逐步提高碳纤维工程化应用的成熟度。此外,高性能连续纤维增强热塑性复合材料的研制将大幅提升结构可设计性,航空结构已实现初步应用^[12]。随着结构/防热/承力一体化技术的发展,格栅结构、蜂窝结构、泡沫结构与复合材料蒙皮、骨架等结构形式与材料设计制造一体化研究,已形成一类轻质承力复合材料结构新体系。此外,将主被动防隔热、雷达吸波等功能特征与结构承力相结合,也是结构复合材料向功能化融合发展的研究热点。

超低温复合材料贮箱作为一个特殊研究领域,国内外均开展了碳纤维增强低温环氧树脂基复合材料的研制。美国先后完成了多种规格类型的低温复合材料贮箱研制,图2为美国SpaceX公司研制的12m直径复合材料贮箱实物^[13]。2020年,国内在低温环氧树脂研制的攻关的基础上,已完成3.35m直径复合材料贮箱原理样机研制。相比铝合金贮箱,复合材料贮箱可缩短生产周期超过30%,实现结构减重超过30%。然而,针对低温树脂的液氢介质渗漏、低温脆性等重大难题,还需在先进低温树脂材料、高性能纤维树脂匹配、无缺陷铺放成形工艺、界面缝合连接、在线健康监测与评价等技术方面开展深入研究。



图2 12m直径复合材料贮箱

Fig. 2 Composite tank with 12 m in diameter

2.2.2 功能复合材料

功能复合材料主要涉及防热、隔热、透波等功能要求,是先进热防护系统设计研制的关键,在快速飞行器和重复使用运载器等领域具有不可或缺的作用。国内外已发展出树脂基烧蚀防热材料、热结构材料、碳基防热材料、透波多功能防热材料、高效隔热材料等功能复合材料体系^[14]。高温防热材料以烧蚀型防热材料为主,通过材料升华带走热量,通过材料设计控制烧蚀形貌;中温防热材料主要通过低热导率实现隔热,同时需要承受温度和热流冲刷,不产生显著烧蚀导致外形后退。图3所示为烧蚀材料烧蚀过程物理和化学变化示意图。

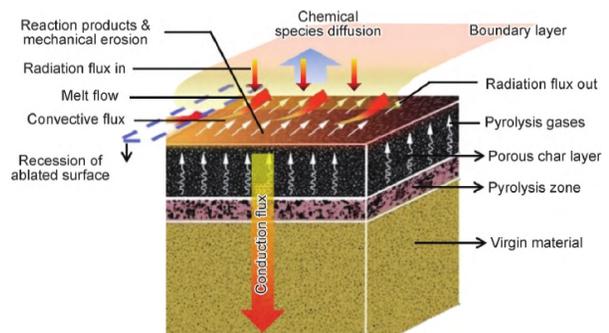


图3 烧蚀材料烧蚀过程中物理和化学变化

Fig. 3 Complicated physical and chemical changes during ablating of ablative materials

国内在航天热防护系统中,重点发展了烧蚀型隔热复合材料、微烧蚀C/C复合材料和热透波复合材料体系^[14-15]。目前,编制碳/酚醛烧蚀型材料已实现了稳定批量生产,并陆续发展了第二代和第三代空间探测用烧蚀隔热材料。航天材料及工艺研究所已研制出2 000 ℃以上表现为微量烧蚀的C/C复合材料,相比传统纯C/C复合材料抗烧蚀性能提高了50%,在隔热承力一体化热结构、飞行器前缘、端头、舵、翼等部位具有广泛应用。在透波多功能隔热复合材料方面,已初步实现了对超高温热透波材料、天线罩等产品的快速批量化应用。

整体而言,我国高效防隔热材料体系与欧美先进国家发展水平相当且部分领先。为支撑新型航天运载器等长时间防隔热服役、重复使用运载火箭防隔热重复应用及未来飞行器功能结构一体化融合发展的需求,未来需进一步加大功能复合材料基础研究和原创技术的研究力度,争取在高温树脂、透波超材料、多模式隔热、防隔热一体化等领域实现技术创新与突破。牵引高性能碳纤维、碳化物纤维、氮化硅纤维等高性能纤维及PCS、SiBCN等陶瓷前驱体、空心玻璃小球等特种填料关键原材料的研发,推动航天关键原材料全面实现自主可控。实现超低密度、超低热导率、隔热和隔热功能兼备,同时具备轻质隔热/隔热/锥形、隔热/隔热/隐身\隔热/隔热/承载等多功能一体化材料研发与工程应用目标。

2.3 智能变形材料

智能变形材料即能够实现形状记忆、磁致伸缩、电致伸缩、压电效应等功能材料。随着航天运载器型号智能化、集成化发展需求,智能材料备受关注,特别是在变形蒙皮、折叠驱动等领域的需求尤为迫切^[16-17]。目前,智能材料和结构在蒙皮、驱动器及变形结构等方面有了初步尝试。

德国空间中心曾用智能变速箱杆代替原有的变速箱杆在BK117直升机上做了飞行测试,测试结果表明这种基于压电陶瓷的主动减振系统在任何环境下工作都很稳定,并且在试验频率下变速箱支撑杆的振动得到了良好的控制,智能变速箱杆在BK117上的实际安装如图4所示。针对ARIANE 5运载火箭尝试开发了一种主动有效载荷隔振适配器,用于将火箭有效载荷中的振动隔离开,在低频段内有效改善航天器载荷环境^[18]。

根据目前的发展水平,智能材料只在航天器的部分单一功能开展了应用尝试,还不能满足高性能集成需求。例如,形状记忆聚合物存在高效加热问题、柔性变形过程中的气动承载问题以及变形有限次数开裂和断裂问题。形状记忆合金输出力大的特

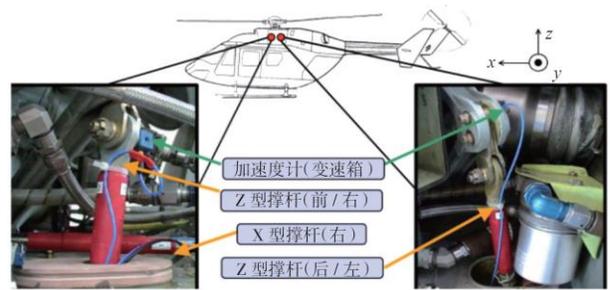


图4 智能变速箱杆在BK117直升机的应用^[18]

点,引起了广泛的科研关注,如图5所示,具有突出轻质化特性的Mg基记忆合金已成为新的研究热点^[17]。压电材料变形频率高但单次变形输出功率偏小。因此,针对未来智能变形材料的航天应用,一方面,需从材料角度提高材料综合性能,改善蒙皮变形性能与承载隔热性能之间的矛盾、智能驱动输出能量与承载水平及变形响应速率的矛盾,是材料研发的重要方向;另一方面,需提高材料、结构、控制的集成设计水平,充分发挥智能材料的优势。

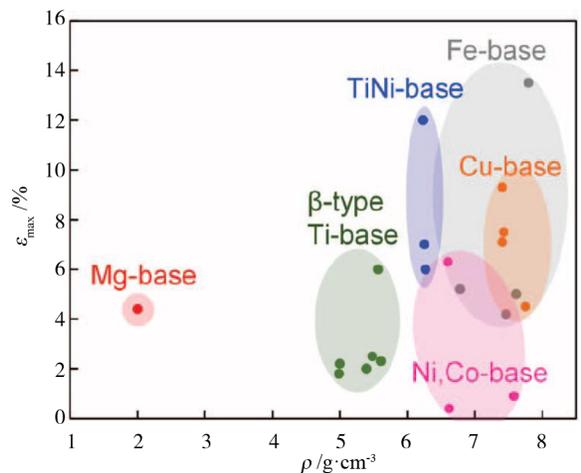


图5 形状记忆合金材料最大弹性应变与密度的关系^[17]

Fig. 5 Relationship between maximum superelastic strain and density of polycrystalline SMAs

3 航天运载器结构工艺技术应用与发展展望

3.1 超大型结构制造技术

超大型结构制造与装配是液体运载火箭结构的重要发展趋势^[19]。对于重型运载火箭超大直径贮箱制造,焊接与成形是其研制的两大主要关键技术^[5]。搅拌摩擦焊接技术已成为世界航天贮箱焊接装配的主流技术,美国SLS火箭、Falcon 9,我国CZ-5和CZ-7系列等火箭均已成熟采用,避免了高强铝合金在传统熔化焊的热裂纹缺陷问题,有效提升了结构焊接强度和可靠性^[20],图6所示为美国SLS火箭搅拌摩擦焊接一级氢箱箱底。同时,弧焊技术作为不可或缺的常规焊接技术,由于成本低,可操作性强,提升焊

接自动化具有重大意义。此外,应对未来超大贮箱壁板与环缝封箱焊接与装配需求,需对超大结构焊接、在线塞补焊、原位快速无损检测等先进工艺和装备开展集成技术研究。



图6 SLS火箭箱底搅拌摩擦焊接

Fig. 6 Friction stir welded propellant tank dome for SLS rocket

针对大尺寸钣金成形技术,火箭大型钣金结构件包括瓜瓣、顶盖、壁板、型材框、钣金框等。其中,瓜瓣和顶盖多数为椭球面,成形复杂要求高,成形工艺有压力机拉深成形、拉形机拉形、蠕变时效成形等方法,为满足自动化焊接装配的高精度要求,需进一步研究成形技术经济性。在大型加筋网格壁板制造方面,国外重型火箭研制主要发展平板机铣和等距压弯成形技术,而国内成形工艺路线繁杂,如滚弯后机铣、平板机铣后滚弯、平板机铣后蠕变弯曲等多种成形工艺路线,为适应结构最终性能与经济匹配要求,需开展深入工艺评价和选优。

此外,针对未来2195高强铝锂合金、7085超高强铝合金大厚锻件成形技术亟需完成瓶颈突破,超大型弱刚性整流罩夹层结构成形技术、大型舱段智能自动化铆接装配技术^[20]、超大直径低温共底成形技术等也是重型运载火箭的攻关研制的重点研究方向。

3.2 整体形性协同制造技术

整体化制造是实现航天结构高性能研制的重要途径之一。火箭贮箱箱底整体成形、弹体舱段整体精密环锻成形与机加、飞行器复合材料整体骨架一体化成形技术等为提升航天结构性能提供了新途径。

在贮箱箱底整体制造方面,整体旋压成形、整体液压成形、快速电磁脉冲成形等技术均可突破传统瓜瓣拼焊方案,大幅减少焊缝数量,提高结构安全可靠^[20]。其中,整体旋压成形工艺已成为国外贮箱箱底制造的关键核心技术^[21],目前国内已完成2.25 m直径5A06铝合金和3.35 m直径2219铝合金箱底

的整体旋压制造与飞行验证,图7所示为传统拼焊成形和旋压整体成形贮箱箱底流程对比示意图。未来针对5 m以上大直径的高强2219铝合金及新材料2195铝锂合金整体箱底,需结合大型板材开发、旋压成形、热处理、机加减薄等系列工艺技术研究。

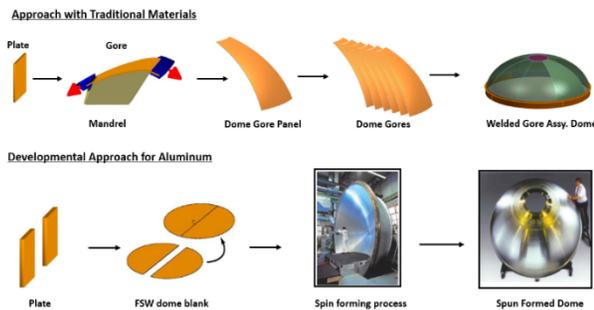


图7 箱底制造方案

Fig. 7 Manufacturing approach of propellant tank dome

此外,针对快速飞行器的严酷多变气动特性,整体高精结构装配技术的迫切需求,通过为减少骨架、舵、翼等部件间的连接,降低装配后部件的变形。在金属材料结构方面,需进一步开展大型复杂铝合金和镁合金整体舱段整体制造技术研究,重点解决大尺寸构件制造缺陷抑制、整体机加应力变形预测与控制、连接结构防护等难题。在复合材料结构方面,研究整体编织和整体成型的工艺,突破飞行器复合材料整体骨架一体化成形技术,实现整体高精高性能一体化制造具有重要意义。

3.3 复合材料结构制造技术

随着航天器复合材料结构的大型化、集成化、轻量化、批量化等需求发展,大尺寸复合材料构件整体成型技术、复合材料高效自动铺放技术以及低成本工艺技术得到了广泛的工程应用^[11]。一方面提高了结构件的性能和减重效率;另一方面提高了结构件的生产效率和质量一致性,同时降低了制造成本和周期。降低成本,实现最佳的性能价格比,探索低成本高性能的成型工艺技术,是未来较长时期复合材料结构制造的发展趋势和热点^[22]。通过结构设计制造一体优化思想,开展树脂体系和工艺设备的集成研发,提升计算机等数据处理技术和智能制造技术在复合材料结构成型过程控制和成型工艺模拟等方面的推广应用,使复合材料结构成型更科学、合理,保证性能满足的同时,实现成本下降。

复合材料结构高性能制造面临着结构复杂化、曲率变化剧烈、承载要求显著提升等挑战,未来低成本高性能复合材料工艺技术发展重点方向包括:非热压罐成型工艺^[23];结合注射工艺过程数字模拟的RTM成型工艺;低温低压成型工艺;自动铺带和铺丝

成型工艺;Z-Pin增强连接技术^[24];设计制造一体化工艺仿真制造技术等。在工程应用方面,亟需突破大型异型结构的高精整体成型、机加、切割、连接技术,重点解决复合材料零件连接紧固件工艺性差、连接材料间电位腐蚀等关键难题。此外,在振动和冲击等复杂飞行条件下,对于复合材料缺陷的监测和损伤容限的研究亟需深入。



图8 复合材料蒙皮桁条结构

Fig. 8 Skin-stringer structures made by composite material

3.4 增材制造技术

增材制造技术是近二十年来迅速发展起来的高端数字化制造技术,特别适合于具有多批次、小批量、研制与设计迭代频繁的航天产品快速研制,NASA率先在航天发动机零部件的制造实现应用验证^[25]。随着增材制造装备性能显著提升,关键技术不断突破,我国在航空航天装备领域的应用已形成良性生态体系。目前,我国航天用增材制造技术涵盖了激光熔化沉积、选区激光熔化、电弧增材和冷喷涂增材制造等关键基础技术,涉及了钛合金、高温合金、铁基合金、铝合金、铜合金、陶瓷、工程塑料等材料体系^[26]。以我国长征五号火箭捆绑接头增材制造技术应用为典型代表,实现了箭体结构减重200 kg,并成功通过飞行验证。此外,针对外形复杂、传统加工方式难以实现的零件,如小火箭推力套筒、复杂铝合金整体舱段、发动机零件、大型金属骨架等结构已实现样机研制和部分工程应用,有效解决了生产周期长、合格率低等问题。

为充分发挥技术优势,传统增材制造技术正逐步转向“结构-材料-性能一体化增材制造”(MSPI-AP)的制造内涵,变革传统的串联式增材制造路线,发展新的材料结构-材料-性能一体化“并行模式”。图9所示为面向下一代空间探测器着陆器系统的整体化和多功能化构件增材制造设想示例^[27]。在设计方面,开展面向增材制造的结构设计技术研究,如拓扑优化、点阵结构设计、多材料一体化和功能梯度结构设计等,为构件轻质化、多功能和快速研发提供保障。在材料设计方面,开展低成本高性能、仿生多功能等新材料研发,形成航天产品增材制造材料标准体系和数据库。在工艺方面,提升工艺稳定性研究,

抑制制造缺陷,开发增减材一体工艺、无损检测和工艺流程控制方法。通过结构、材料、工艺的一体化结合,在复杂整体构件内部可同步实现多材料设计与布局、多层级结构创新与打印,以主动实现构件的高性能和多功能,对于未来航天领域先进合金和复合材料开发、结构-功能梯度化设计、复杂智能仿生制造等具有重要应用前景。

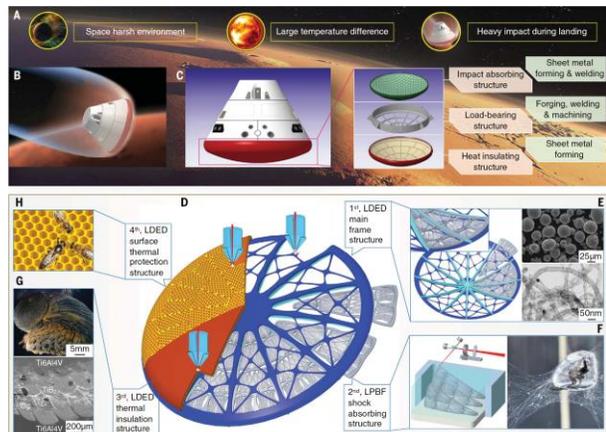


图9 航天应用材料-结构-性能一体增材制造技术示例^[27]

Fig. 9 Example of material-structure-performance integrated additive manufacturing for potential aerospace applications

3.5 绿色制造技术

绿色制造是一种综合考虑环境影响和资源消耗的现代制造模式,其目标是产品从设计、制造、包装、使用到报废处理的整个生命周期中,对环境负面影响小、资源利用率高、综合效益大,使企业经济效益与社会效益得到协调优化^[28]。航天制造作为中国先进制造的代表,在实现企业可持续发展的同时,还承担了对我国高技术发展方向的牵引职责,绿色制造的模式转变是响应国家政策导向的唯一途径^[5,19]。

针对现有航天产品,推进绿色制造的概念和路径非常丰富。首先,促进绿色加工工艺研究与应用,如铝合金等金属的低污染表面处理技术、机械铣削替代化学铣切加工、激光清洗技术^[29]、树脂基复合材料回收利用技术,低温非热压罐成型^[23]等低能耗制造技术等均可显著减少对环境及人体的伤害。其次,提高材料利用率是绿色制造的一种思路,一方面减少材料去除量,如发展整体旋压成型技术^[20]、高性能近净成型技术^[30];另一方面采用增材制造思想,发展基于薄壁焊接与铆接结构的局部原位冷喷涂技术^[31],节约原材料和能耗。最后,推进绿色制造系统方法的建立,推广并行工程的设计理念,面向制造和装配、面向成本、面向环境进行设计,使航天产品全寿命周期成本更优、效率更高。

4 结语

总体而言,航天运载器结构技术发展是以轻质

化为核心,以先进材料及工艺技术为支撑不断追求高结构效率。其中,高性能轻质金属材料作为航天结构材料的重要组成部分,为满足结构的强度极限设计要求,高强、耐热、耐损伤的轻质金属材料是航天应用和发展的主要发展方向,突破高强/超高强难变形和大型整体高精度制造的双重挑战,是进一步推动高强轻质金属材料成熟化应用的研究重点。先进复合材料在高温性能、力学性能等方面具有突出优势,在新型航天结构中的应用比例日益增加,提升高强/高模碳纤维和耐高/低温树脂材料及其匹配成型技术、发展承载/防隔热/透波/隐身等功能结构一体化技术、降低制造成本是该材料的研究和发展的重点。此外,智能变形结构、结构功能一体化制造、绿色制造理念等代表了先进航天技术的发展方向,推动智能变形材料技术、材料-结构-性能一体化增材制造等前沿技术的研究,对于促进航天结构材料与技术的发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 沈自才,高鸿,欧阳晓平. 航天材料工程学内涵及其体系构建[J]. 宇航材料工艺, 2018, 48(2): 1-6.
- [2] SHEN Z C, GAO H, OUYANG X P. Connotation and system construction of aerospace material engineering [J]. Aerospace Materials & Technology, 2018, 48(2): 1-6.
- [3] 王小军,徐利杰. 我国新一代中型高轨运载火箭发展研究[J]. 宇航总体技术, 2019, 3(5): 1-9.
- [4] WANG X J, XU L J. Research on the development of new generation medium high-orbit launch vehicle in China [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2019, 3(5): 1-9.
- [5] 鲁宇,汪小卫,高朝辉,等. 重复使用运载火箭技术进展与展望[J]. 导弹与航天运载技术, 2017(5):1-7.
- [6] LU Y, WANG X W, GAO Z H, et al. Progress and prospect of reusable launch vehicle technology [J]. Missiles and Space Vehicles, 2017(5):1-7.
- [7] 左光,艾邦成. 先进空间运输系统气动设计综述[J]. 航空学报, 2021, 42(2): 7-17.
- [8] ZUO G, AI B C. Aerodynamic design of advanced space transportation system review [J]. Acta Astronautica ET Astronautica Sinica, 2021, 42(2): 7-17.
- [9] 刘欣,王国庆,李曙光,等. 重型运载火箭关键制造技术发展展望[J]. 航天制造技术, 2013, 177(1): 1-6.
- [10] LIU X, WANG G Q, LI S G, et al. Forecasts on crucial manufacturing technology development of heavy lift launch vehicle [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2013, 177(1): 1-6.
- [11] 邓运来,张新明. 铝及铝合金材料进展[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 2115-2141.
- [12] DENG Y L, ZHANG X M. Development of aluminium and aluminium alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 2115-2141.
- [13] 王群,王婧超,李雄魁,等. 航天用轻质结构材料研究进展及应用需求[J]. 宇航材料工艺, 2017, 47(1): 1-4.
- [14] WANG Q, WANG J C, LI X K, et al. Research progress and application requirements of lightweight structure materials for aerospace applications [J]. Aerospace Materials & Technology, 2017, 47(1): 1-4.
- [15] WU G H, WANG C L, SUN M, et al. Recent developments and applications on high-performance cast magnesium rare-earth alloy [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2021, 9(1):1-20.
- [16] 张绪虎,单群,陈永来,等. 钛合金在航天飞行器上的应用和发展[J]. 中国材料进展, 2011, 30(6): 28-32.
- [17] ZHANG X H, SHAN Q, CHEN Y L, et al. Application and development of titanium alloys for aircrafts [J]. Materials China, 2011, 30(6): 28-32.
- [18] 陆子川,张绪虎,微石,等. 航天用钛合金及其精密成形技术研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2020, 50(4): 1-7.
- [19] LU Z C, ZHANG X H, WEI S, et al. Research progresses of titanium alloys and relevant precision forming technology for the aerospace industry [J]. Aerospace Materials & Technology, 2020, 50(4): 1-7.
- [20] 蒋诗才,包建文,张连旺,等. 液体成形树脂基复合材料及其工艺研究进展[J]. 航空制造技术, 2021, 64(5): 70-81,102.
- [21] JIANG S C, BAO J W, ZHANG L W, et al. Research progress of liquid molding resin matrix composites and its technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(5): 70-81,102.
- [22] 谌广昌,姚佳楠,张金栋,等. 高性能热塑性复合材料在直升机结构上的应用与展望[J]. 航空材料学报, 2019, 39(5): 24-33.
- [23] CHEN G C, YAO J N, ZHANG J D, et al. Application and prospect of high-performance thermoplastic composites in helicopter structure [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39(5): 24-33.
- [24] NASA, NASA tests game changing composite cryogenic fuel tank [J], Defense & Aerospace Week, 2013, 2013(1):23.
- [25] 李仲平. 耐热复合材料发展与展望[J]. 复合材料学报, 2011, 28(2): 1-9.
- [26] LI Z P. Major advancement and development trends of TPS composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(2): 1-9.
- [27] 冯志海,师建军,孔磊,等. 航天飞行器热防护系统低密度烧蚀耐热材料研究进展[J]. 材料工程, 2020, 48(8): 14-24.
- [28] FENG Z H, SHI J J, KONG L, et al. Research progress in low-density ablative materials for thermal protection system of

aerospace flight vehicles [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48(8): 14-24.

[16] 许云涛. 智能变形飞行器发展及关键技术研究[J]. *战术导弹技术*, 2017(2): 26-33.

XU Y T. Research on the development and key technology of smart morphing aircraft[J]. *Tactical Missile Technology*, 2017(2): 26-33.

[17] YUKIKO O, DAISUKE A, YUJI S, et al. A lightweight shape-memory magnesium alloy [J]. *Science*, 2016, 353(6297): 368-370.

[18] 杨正岩, 张佳奇, 高东岳, 等. 航空航天智能材料与智能结构研究进展[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(17): 36-48.

YANG Z Y, ZHANG J Q, GAO D Y, et al. Advance of aerospace smart material and structure [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(17): 36-48.

[19] 张智, 容易, 秦瞳, 等. 重型运载火箭总体技术研究[J], *载人航天*, 2017, 23(1): 1-7.

ZHANG Z, RONG Y, QIN T, et al. Research on overall technology of heavy launch vehicle [J]. *Manned Spaceflight*, 2017, 23(1): 1-7.

[20] 杨瑞生, 陈友伟, 王婧超, 等. 商业化液体火箭箭体结构低成本快捷制造技术[J]. *深空探测学报*, 2021, 8(1): 70-79.

YANG R S, CHEN Y W, WANG J C, et al. Low-cost and fast manufacturing technology for commercial liquid rocket structure[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2021, 8(1): 70-79.

[21] STEPHEN J H, WESLEY A T. Heat treatment of a friction-stir-welded and spin-formed Al-Li alloy [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 10: 2502-2507.

[22] 刘东辉. 复合材料低成本化进展与分析[J]. *纤维复合材料*, 2012(2): 41-44.

LIU D H. Analysis and development of low cost composites technology[J]. *Fiber Composites*, 2012(2): 41-44.

[23] 许皓, 欧秋仁, 张帅, 等. 低温固化非热压罐成型树脂及其复合材料性能[J]. *宇航材料工艺*, 2021, 51(1): 50-54.

XU H, OU Q R, ZHANG S, et al. Properties of low temperature curing out of autoclave resin and its composites [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2021, 51(1): 50-54.

[24] JULIAN H. Z-pin insertion process for through-thickness reinforced thermoplastic composites [J]. *Journal of Composite Materials*, 2019, 53(2): 173-181.

[25] 李良琦. 美国国防部推动增材制造在零部件维修保障中的应用[J]. *国防制造技术*, 2020(1): 3-8.

LI L Q. DOD promotes the use of additive manufacturing in component maintenance support [J]. *Defense Manufacturing Technology*, 2020(1): 3-8.

[26] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造:若干材料基础问题[J]. *航空学报*, 2014, 35(10): 2690-2698.

WANG H M. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components [J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2014, 35(10): 2690-2698.

[27] GU D D, SHI X Y, POPRAWA R, et al. Material structure performance integrated laser-metal additive manufacturing [J]. *Science*, 2021, 372: 1487.

[28] 曹华军, 李洪丞, 曾丹, 等. 绿色制造研究现状及未来发展策略[J]. *中国机械工程*, 2020, 31(2): 135-144.

CAO H J, LI H C, ZENG D, et al. The state-of-art and future development strategies of green manufacturing [J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(2): 135-144.

[29] SARAH M B, DAVID F Y, TYLER O N, et al. Effect of laser cleaning and hyperpassivation on the electrochemical behavior of AA2024-T3 [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2021, 168(3): 031501.

[30] DANIELE M, JONATHAN R C. Process selection methodology for near net shape manufacturing [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 106: 1967-1987.

[31] LI W Y, CAO C C, WANG G Q, et al. 'Cold spray+' as a new hybrid additive manufacturing technology: a literature review [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2019, 24(5): 420-445.