

航天用钛合金及其精密成形技术研究进展

陆子川 张绪虎 微石 纪玮 温涛

(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

文 摘 对航天领域用钛合金材料及其精密成形技术(精密铸造、精密锻造、超塑成形、旋压成形、粉末冶金成形)的国内外研究进展和应用现状进行了较系统的概述。最后基于我国航天工业发展的实际需求,对钛合金材料及其精密成形技术的未来发展趋势进行了展望与总结。

关键词 航天工业, 钛合金, 精密成形, 应用现状, 发展趋势

中图分类号: TG146.23

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2020.04.001

Research Progresses of Titanium Alloys and Relevant Precision Forming Technology for the Aerospace Industry

LU Zichuan ZHANG Xuhu WEI Shi JI Wei WEN Tao

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 10076)

Abstract The research and application of titanium alloys and their precision forming technologies, including precision casting, precision forging, superplastic forming, spinning forming and powder metallurgy, are reported systematically. Based on the actual requirements of aerospace industry in china, the development trend of titanium alloys and relevant precision forming technologies are summarized and forecasted.

Key words Aerospace industry, Titanium alloy, Precision forming technology, Application situation, Development trend

0 引言

航天飞行器往往在大应力、超高/低温、强腐蚀等极端条件下工作,对材料及构件提出了较为苛刻的服役需求,而轻质并适应这些服役环境需求是航天产品选择材料及其成形技术的主要标准^[1-3]。钛合金具有比强度比模量高、抗腐蚀性能好、高/低温性能优异等特点,集航天材料所需特质于一体,成为了航天领域应用广泛的关键材料之一^[1-6]。从工艺技术角度出发,航天领域主流的钛合金精密成形技术可分为精密铸造、精密锻造、旋压成形、超塑成形和粉末冶金成形^[3,6]。目前,国内外对钛合金及其精密成形技术在航空领域的研究进展已有大量总结性报道^[5-9],但是航天领域的相关概述较少。为此,本文从航天领域钛合金相关构件的研制角度出发,对国内外航天用钛合金及其精密成形技术的研究现状进

行了分类与总结,最后结合我国航天工业的实际需求,对其未来发展进行了展望。

1 航天钛合金精密成形技术研究进展

1.1 钛合金精密铸造技术

钛合金精密铸造技术具有成形精度高、生产周期短、尺寸灵活性好等特点,可以很好地适应高精度、复杂钛合金薄壁构件的研制^[10-13]。其中,石墨型铸造和熔模精密铸造在航天领域应用广泛,主要用于叶轮类、舱体类、机匣类产品的研制^[12-14]。

目前,国外在中温中强钛合金精密铸造技术方面已十分成熟,主要合金牌号为Ti-6-4和BT20。在高温高强钛合金精密铸造方面主要涉及 β -21S、BT35、Ti1100、IMI834等牌号,但是其铸造工艺目前仍存在铸件性能低、焊接困难、铸件开裂倾向高等缺点。我国在铸造钛合金材料研发方面多为仿制国外

收稿日期:2020-05-14

基金项目:装备预先研究项目(项目编号:61409220123)

第一作者简介:陆子川,1992年出生,博士,主要从事先进钛合金材料及其超塑成形工艺研究工作。E-mail:luzichuan1992@163.com

铸造钛合金牌号,其发展也基本呈现出中温中强到高温高强的趋势,航天领域主流铸造钛合金牌号为ZTC4和ZTA15,主要用作弹翼类、舵面类、舱段类产品的研制。此外,我国也相继开发了诸如ZTi55、ZTi600、ZTi65、ZTA35等新型铸造高温钛合金,室温抗拉强度可达1.1 GPa,高温抗拉强度可达625 MPa,使用温度为550~700 °C^[15]。但是这几类新研发的铸造高温钛合金存在合金成分复杂、铸件开裂倾向高、焊接困难等问题,相应的铸造工艺还不够成熟,目前仅为工程研制阶段^[15-16]。

航天领域大型、复杂精密结构以及钛合金铸件高性能化的发展需求,快速推动了磁悬浮熔炼、3D打印、计算机数值模拟、热等静压致密化等新技术新工艺在精密铸造领域的应用和发展^[17-20]。目前,3D打印技术已可实现1 800 mm×1 000 mm×700 mm整体铸造型壳或型芯的制作,其精度可控制在0.3 mm以内,代表性厂商主要有德国ExOne、Voxeljet公司、美国SolidScape、3DSystem公司^[21]。此外,数值模拟技术已被广泛应用于铸造的充型、凝固、缩松及缩孔预测、应力分布预测等过程,可有效指导铸造工艺、提高铸件精度和质量,目前主流的数值模拟软件厂商有美国Procast、日本Soldia、德国Magma Soft、中国华铸CAE等。在性能改进方面,热等静压致密化技术已被广泛应用于铸件后处理过程中,可使缺陷发生冶金闭合、消除缩松及缩孔、改善成分偏析,有效提升铸件的显微组织及力学性能,但仍需要关注并解决铸件在热等静压过程中组织粗化、相变导致的性能下降以及变形控制的问题^[12-13]。目前,随着多种工艺技术的进步,钛合金精密铸造技术呈现出了技术种类多元化、交叉化、普适化的发展趋势,已可生产出直径2 m量级的大型钛合金铸件,铸造公差可达±0.13 mm,最小壁厚可控制在1.0 mm^[13]。

1.2 钛合金精密锻造技术

钛合金精密锻造技术是常规的近净成形工艺,目前主要通过改进锻造工艺来提高构件的使用性能^[22]。其中,精密模锻和等温超塑性锻造在航天领域应用广泛,主要用于气瓶类、贮箱类产品的研制。

国外精密锻造工艺所涉及的钛合金牌号主要有Ti-6Al-4V、Ti-5Al-2.5Sn ELI、OT4-1、BT5-1、LT700等^[23-24]。例如,美国采用精密锻造工艺成功研制了Ti-6Al-4V和Ti-5Al-2.5Sn ELI钛合金压力容器类构件,在大力神Ⅲ过渡级发动机得到了应用。俄罗斯采用精密锻造生产的OT4-1、BT5-1燃料贮箱已成功应用到进步号探测器上,日本采用精密锻造工艺生产的LT700锻件已成功运用到H2A、H2B火箭压力容器等低温结构零部件中^[23]。

我国航天领域钛合金精密锻造技术主要涉及TC4ELI、TA7ELI、TC4、TC11等牌号,目前多用于压力容器类、轻质高强承力结构件的研制^[25-26]。其中,钛合金气瓶类构件的精密锻造技术在我国航天领域已得到了广泛应用,主要朝着大尺寸、大变形量、高成形精度、高成形性的方向发展,目前已迅速接近或达到国际先进水平^[27]。例如,我国采用精密模锻技术已成功研制出容积为20 L的TA7ELI钛合金低温气瓶,目前已在XX-3A、XX-5运载火箭增压输送系统中得到大量应用[图1(a)]^[24]。近期,航天材料及工艺研究所首次采用TA7ELI钛合金宽厚板结合等温超塑性锻造技术成功研制出体积为130 L的TA7ELI钛合金低温冷氦气瓶[图1(b)],解决了TA7ELI热加工性能差、易成分偏析、制造成本高等短板,其在20 K条件下低温抗拉强度可达1.45 GPa,延伸率≥10%,壁厚尺寸精度可达±0.2 mm,且具有变形速率低、成形过程易控制、质量可靠性高、成形精度高等优势。

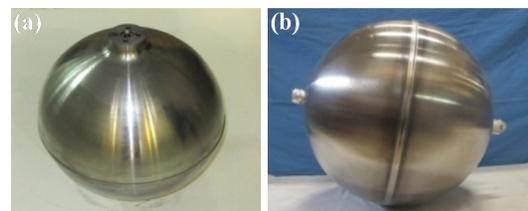


图1 精密锻造技术生产的钛合金气瓶类产品

Fig. 1 Titanium alloy cylinders developed by precision forging technology

1.3 钛合金超塑成形技术

超塑成形技术由于具有成形精度高、近无回弹、无残余应力等优势,目前已成为了推动航天钛合金构件设计概念发展的开创性近净成形工艺之一,特别适用于复杂薄壁结构件的研制^[28-32]。

国外在超塑成形钛合金材料领域已经历了由常规钛合金(Ti-6Al-4V、IMI550、BT6)到金属间化合物、钛基复合材料的研发历程,目前已形成了多种超塑专用钛合金(超细晶Ti-6-4、SP700、BT23)^[29-30]。我国对超塑性钛合金材料的早期研究主要以仿制国外牌号为主,目前已实现了TC4钛合金超塑用细晶板材的工业化生产,平均晶粒尺寸可控制在5 μm左右,板幅尺寸可达(0.8~3.0) mm×(1 300~1 500 mm)×L,纵横向力学性能差异可控制在50 MPa以内^[29]。近期,我国已成功研制出超塑用高强细晶SP700钛合金板材,其晶粒尺寸可达1~2 μm量级,板材规格可达(0.6~3.0) mm×1 000 mm×(2 000~3 000) mm。该合金在770~800 °C即可体现出优异的超塑性,延伸率高达2 000%,较细晶TC4板材而言其超塑成形温度可降低约140 °C,在航天领域具有广阔的应

用前景^[29,33]。此外,在其他先进超塑钛合金材料研制方面,我国相继开发了诸如SPTi55、BTi-62421S、BTi-6431S等高温钛合金超塑板,并在金属间化合物(TiAl、Ti₃Al、Ti₂AlNb)等先进超塑钛合金材料研发领域已着手开展了大量工作,目前已突破了国外对我国高质量超塑用钛合金板材的技术封锁与限制^[29-30,34]。

在钛合金超塑成形工艺技术方面,国外目前已具备单层构件、多层构件、桁架及正弦波等异型构件的批量化生产能力,使超塑成形技术的研究热点逐渐由材料研发转向实际工程应用^[24,35-36]。例如,美国利用超塑成形技术成功研制了150 mm直径的Ti-6Al-4V钛合金推进剂贮箱,可实现降低成本60%,结构质量减轻30%的目标。日本ISAS和MHI公司采用板材预焊接+吹胀的方式成功研制出Ti-6Al-4V钛合金超塑成形N₂H₄燃料贮箱(图2),已在卫星上得到大量应用^[36]。

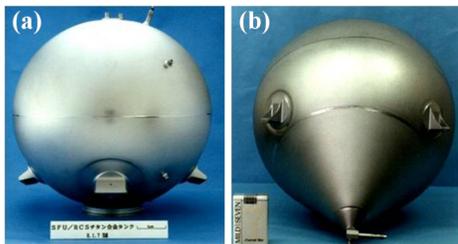


图2 日本采用超塑成形技术研制的钛合金燃料贮箱
Fig. 2 Titanium alloy fuel tanks developed by superplastic forming technology

我国目前在钛合金超塑成形领域已突破单层胀形控壁厚技术、SPF/DB空心构件成形技术以及大型三层/四层空腔翼板成形技术等关键技术,在我国航天领域主要应用于研制卫星、导弹、运载火箭用大型单层构件(压力容器、蒙皮)、多层结构(舱段、舵翼)以及大型空心结构翼面类产品^[24]。

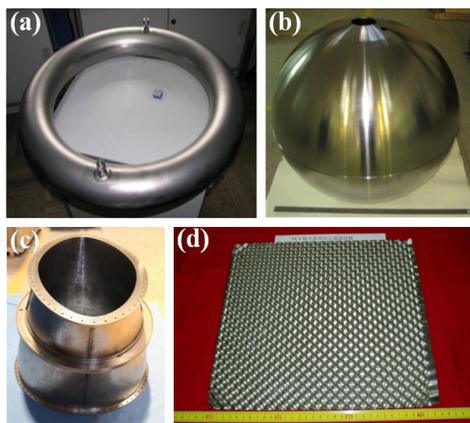


图3 钛合金超塑成形技术在我国航天领域的典型应用
Fig. 3 Typical applications of titanium alloy superplastic forming technology of aerospace industry in china

例如,航天材料及工艺研究所采用超塑成形正反胀技术成功研制出TC4钛合金环形气瓶[图3(a)],其半环毛坯壁厚在环向和径向控制误差分别为 ± 0.2 mm和 ± 0.3 mm,基本达到了净成形水平^[37]。除半环产品外,航天材料及工艺研究所亦开展了诸如卫星用大规格TC4钛合金表面张力贮箱(直径覆盖0.6~1.0 m量级,且基本已具备净成形能力)、TA15钛合金发动机喷管(外形及壁厚尺寸精度可达 ± 0.2 mm,并实现了2 m量级变壁厚异型构件的制造能力),以及TC4钛合金波纹板等构件的研制[图3(b)~3(d)]^[24,37]。

1.4 钛合金精密旋压技术

旋压成形技术结合了锻造、挤压、拉伸、弯曲、环轧等工艺优势并可实现少无切削加工,能够满足航天器用钛合金空心回转体结构件的多品种小批量、轻质精密、高可靠的服役需求,在航天领域特别适用于壳体类、压力容器类、封头、喷管延伸段等产品的研制,是钛合金回转型薄壁构件的首选工艺^[38-43]。

目前,国外钛合金旋压技术已突破了大型薄壁构件精密化、无模低成本快速旋压、轧-旋/挤-旋/锻-旋连续复合成形等先进技术,使钛合金精密旋压技术在航天领域得到广泛应用^[44]。例如,德国MT宇航公司采用强力旋压工艺制备出 $\Phi 1.905$ m的高强Ti-15V-3Cr钛合金推进系统贮箱[图4(a)],在“阿尔法”通信卫星得到了应用^[24]。美国采用无模旋压技术成功研制了直径1.2 m量级的Ti-6Al-4V钛合金封头,实现了单道次90%的冷旋压变形量,成功应用于“阿波罗”号宇宙飞船服务舱贮箱封头的制造[图4(b)]。我国在钛合金旋压技术领域所涉及钛合金牌号有TA1、TA2、TA15、TC3、TC4、TB2等,典型航天构件包括波纹管、气瓶、火箭发动机外壳、喷管、蒙皮、筒形件等^[38,40,45]。例如,哈尔滨工业大学利用有限元模拟技术结合普旋成形工艺成功研制出0.8 mm壁厚的TC4钛合金月球车轮圈[图4(c)]^[46]。航天材料及工艺研究所通过开展大尺寸薄壁TC4钛合金筒形件强力旋压缺陷形成机理研究,并结合有限元数值模拟技术,成功研制出 $\Phi 670$ mm的TC4卫星用贮箱筒段[图4(d)],其壁厚尺寸精度为0~0.2 mm,轮廓尺寸精度为0~0.5 mm^[42-43]。西安航天动力机械厂采用正旋拉旋+反旋拉旋的工艺方案成功研制出直径 $\Phi 500$ mm的TC4钛合金薄壁环形内胆^[47]。

钛合金精密旋压技术虽然已经在我国航天领域得到较为广泛的应用,但是受温度场均匀性、回弹效应、扩散效应、料模尺寸匹配性等关键技术的局限,我国航天钛合金旋压制品目前基本采用高温有模成形工艺,且快速精密旋压技术处于起步阶段,连续复

合成形技术仍处于工程试验研究阶段,尤其是大直径、薄壁整体钛合金旋压成形件仍未实现批量性应用,需着重开展钛合金材料可旋性、旋压尺寸精度控制、控形/控性及热处理、旋压模拟仿真等技术研究^[44-45,48]。

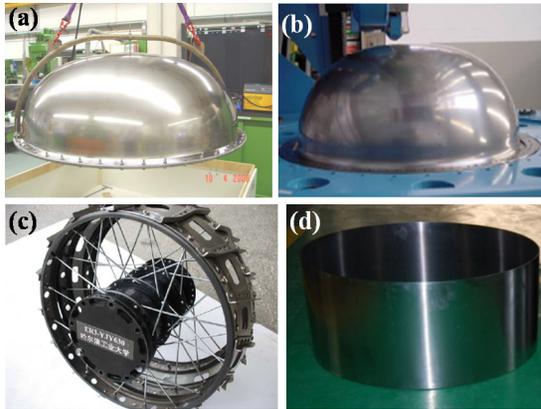


图4 钛合金精密旋压技术在国内外航天领域的应用

Fig. 4 Applications of titanium alloy spinning forming technology in the aerospace industry

1.5 钛合金热等静压粉末冶金技术

热等静压(HIP)粉末冶金技术具有致密度高、无织构和偏析、内应力小、材料利用率高、可近净成形等优势,其成形的构件可兼具铸件的复杂型面特点以及锻件优异的力学性能优势,特别适合航天工业对大型、复杂、薄壁、高可靠性结构件的研制需求^[49-54]。

随着钛合金熔炼技术、致密化变形精度控制技术、先进制粉技术、有限元分析技术等关键技术的突破,国外目前已实现了钛合金HIP粉末冶金技术在航天领域的大规模工程化应用。法国Senecma公司研制的低温粉末钛合金叶轮在 $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下工作转速达 550 m/s ,并可大幅缩短加工周期[图5(a)~(b)]。美国P&W Rocketdyne和Synertech PM公司采用等离子旋转电极法(PREP)制粉并借助计算机模拟等先进技术,成功研制出火箭发动机钛合金壳体、阀体等构件,已在航天领域得到应用并实现了大批量市场化供货[图5(c)]^[51]。英国伯明翰大学研制的钛合金发动机机匣成功实现了复杂型面构件的一体化近净成形,并已达到了工程化应用水平,其采用 60 kg 粉末可生产出 56 kg 的最终样件,成形精度高达近 90% ,仅需少许机加工即可实现最终产品的研制[图5(d)]。

随着多年的技术发展,我国目前已具备航天领域所需的中高强钛合金、低温/高温钛合金、超高强钛合金以及金属间化合物等材料和构件的HIP粉末冶金一体成形能力,所涉及的产品主要有舵翼类、舱体类、异形曲面类以及机匣类等构件,可以很好地满足航天领域的任务需求^[50,53,55-57]。作为国内最先研究钛合金HIP粉末冶金成形工艺的单位,航天材料及

工艺研究所在型号需求的牵引下,目前已突破了高品质钛合金粉末研制技术、粉末冶金构件变形控制技术、大型复杂结构件的制备技术等关键技术,并实现了钛合金HIP粉末冶金关键产品的研制和工程化批量生产^[51,53-55]。

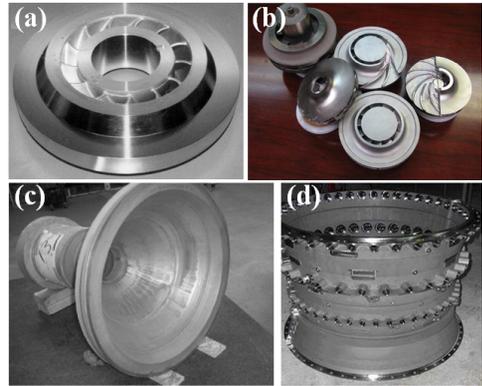


图5 钛合金HIP粉末冶金技术在外国航天领域的应用

Fig. 5 Applications of titanium alloy powder metallurgy technology of aerospace industry in the foreign countries

例如,航天材料及工艺研究所研制的TA15钛合金舵翼件已具备内部框架结构净成形能力[图6(a)],其力学性能与锻件持平,材料利用率可达 70% 以上,并且可实现减重 15% 以上的目标,满足了飞行器对轻质高强、高耐温结构件的需求。此外,通过合理的包套设计结合有限元分析,成功研制出高性能TA7 ELI钛合金氢泵叶轮[图6(b)],其在液氢条件下抗拉强度可达 1.46 GPa ,延伸率 $\geq 12\%$,尺寸精度 $< 0.2\text{ mm}$,目前已通过全面考核,有效地支撑了我国航天型号的发展^[55]。近期,航天材料及工艺研究所成功研制了TA15钛合金中介机匣[图6(c)],尺寸精度可控制在 $\pm 0.3\text{ mm}$ 以内,材料利用率 $\geq 70\%$,可实现整体成形,其加工周期可由6个月缩短至1个月,大幅提高了生产效率且性能超过锻件水平。此外还研制了 Ti_3Al 发动机延伸段[图6(d)]以及TA15发动机喷管[图6(e)]。

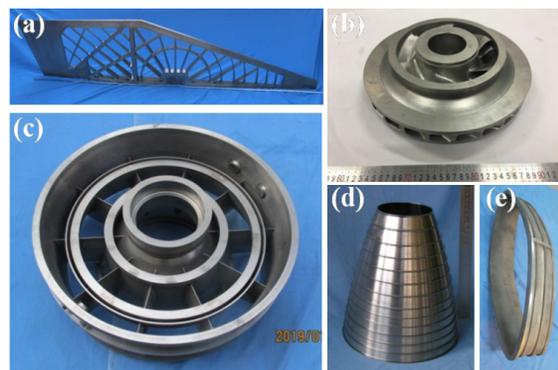


图6 钛合金HIP粉末冶金技术在我国航天领域的应用

Fig. 6 Applications of titanium alloy powder metallurgy technology of aerospace industry in china

随着航天型号的发展,我国目前钛合金 HIP 粉末冶金技术不仅可以研制出复杂程度高的产品,并且已实现了工程化应用。但是与国外先进技术相比,我国在耐 600 ℃ 以上高温钛合金粉末冶金技术的净成形能力方面仍有差距,目前仅处于工程试验阶段;在有限元模拟分析方面缺乏相关理论模型,大多数计算机模拟局限于粉末成形初期和变形量的分析;在批量生产过程中芯模快速去除技术缺乏、流程长,且可重复使用率低、生产成本低,在短流程低成本控制方面仍有欠缺^[24,51]。

2 钛合金精密成形技术在航天领域中的发展方向

针对我国未来航天领域的科研项目需求,急需提高飞行器运载效率、降低飞行器结构系数、提高飞行器的总体技术指标,应进一步推动以钛合金为代表的材料、新工艺的应用发展。因此,在大型、复杂、薄壁航天器结构件的研制中,采用钛合金精密成形技术是未来制造不可或缺的关键性选择。

(1) 在低温环境应用领域,需着重关注诸如 CT20、TC4ELI、TA7ELI 钛合金精密锻造、超塑成形、粉末冶金成形技术的发展,以满足管路类、气瓶类、叶轮类结构件的使用需求。

(2) 在高温环境应用方面,需重点关注 TA15、TC11、Ti60、Ti600、Ti65 钛合金精密铸造、超塑成形、精密旋压、粉末冶金成形技术的发展及工程化应用推广,以满足舵翼类、复杂进气道类、喷管类、防/隔热结构件类的使用需求。

(3) 此外,对耐 600 ℃ 以上的高温、复杂热结构件的研制,需着重推进 Ti-Al 系金属间化合物和钛基复合材料超塑成形、精密旋压、粉末冶金成形技术的工程化应用推广工作。

3 结语

材料和制造技术是航天领域发展的基础,为推动钛合金及其精密成形技术在我国航天领域的应用并缩短与国外先进水平的差距,需重点关注、加强新型钛合金材料(高/低温、高强韧钛合金及金属间化合物)的工程化研制与大型、轻质、薄壁、复杂钛合金构件精密成形技术的协同发展,提高我国钛合金构件成形工艺成熟度、精密度以及产品合格率,控制并降低研制成本,缩短生产周期,未来我国先进钛合金材料的研发以及精密成形技术的进步必将迎来飞跃式发展。

参考文献

[1] 邹武装. 钛及钛合金在航天工业的应用及展望[J]. 中国有色金属, 2016(1): 70-71.
ZOU W Z. The application and prospect of titanium and titanium alloys in the aerospace industry [J]. China Nonferrous Metals, 2016(1): 70-71.
[2] 赵永庆. 国内外钛合金研究的发展现状及趋势[J]. 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2020年 第4期

中国材料进展, 2010(5): 1-8.

ZHAO Y Q. Current situation and development trend of titanium alloys[J]. Materials China, 2010, 29(5): 1-8.

[3] 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.

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.

[4] LEYENS C, PETERS M. Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications [M]. John Wiley & Sons, 2003.

[5] 钱九红. 航空航天用新型钛合金的研究发展及应用[J]. 稀有金属, 2000, 24(3): 218-223.

QIAN J H. Application and development of new titanium alloys for aerospace [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2000, 24(3): 218-223.

[6] 刘全明, 张朝晖, 刘世锋, 等. 钛合金在航空航天及武器装备领域的应用与发展[J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(3): 1-4.

LIU Q M, ZHANG C H, LIU S F, et al. Application and development of titanium alloy in aerospace and military hardware [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2015, 27(3): 1-4.

[7] EZUGWU E O, WANG Z M. Titanium alloys and their machinability—a review [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 68(3): 262-274.

[8] LUTJERING G. Influence of processing on microstructure and mechanical properties of ($\alpha + \beta$) titanium alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 1998, 243(1-2): 32-45.

[9] PETERS M, KUMPFERT J, WARD C H, et al. Titanium alloys for aerospace applications [J]. Advanced Engineering Materials, 2003, 5(6): 419-427.

[10] 李玉梅, 弓炎. 航天用钛合金铸造工艺性能研究[J]. 铸造技术, 2013(8): 1024-1026.

LI Y M, GONG Y. Study on casting process for titanium alloy in aerospace [J]. Foundry Technology, 2013(8): 1024-1026.

[11] 张立武, 写旭, 杨延涛. 钛合金精密热成形技术在航空航天的应用进展[J]. 航空制造技术, 2015, 58(19): 14-17.

ZHANG L W, XIE X, YANG Y T. Application progress of titanium alloy precision thermo-forming technology in aerospace [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(19): 14-17.

[12] 肖树龙, 陈玉勇, 朱洪艳, 等. 大型复杂薄壁钛合金铸件熔模精密铸造研究现状及发展[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(5): 678-681.

XIAO S H, CHEN Y Y, ZHU H Y, et al. Recent advances on precision casting of large thin wall complex castings of titanium alloys [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(5): 678-681.

[13] 赵瑞斌. 大型复杂钛合金薄壁件精铸成形技术研究进展[J]. 钛工业进展, 2015(2): 7-12.

ZHAO R B. Research progress of precision casting of large complex thin-walled titanium alloy [J]. Titanium Industry Progress, 2015(2): 7-12.

[14] 高婷, 赵亮, 马保飞, 等. 钛合金铸造技术现状及发展趋势[J]. 热加工工艺, 2014(21): 5-8.

GAO T, ZHAO L, MA B F, et al. Present situation and development trend of titanium alloy casting technology [J]. Hot Working Technology, 2014(21):5-8.

[15] 王清江, 刘建荣, 杨锐. 高温钛合金的现状与前景 [J]. 航空材料学报, 2014, 34(4):1-26.

WANG Q J, LIU J R, YANG R. High temperature titanium alloys: status and perspective [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(4):1-26.

[16] MITCHELL A. Melting, casting and forging problems in titanium alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 1998, 243(1-2):257-262.

[17] 史玉升. 3D 打印技术的工业应用及产业化发展 [J]. 机械设计与制造工程, 2016, 45(2):11-16.

SHI Y S. The industrial application and industrialization development of 3D printing technology [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2016, 45(2):11-16.

[18] HUMPHREYS N J, MCBRIDE D, SHEVCHENKO D M, et al. Modelling and validation: casting of Al and Ti alloys in gravity and centrifugal casting processes [J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(14-15):7633-7643.

[19] DU PLESSIS A, YADROITSAVA I, Le ROUX S G, et al. Prediction of mechanical performance of Ti6Al4V cast alloy based on micro-CT-based load simulation [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 724:267-274.

[20] 张殿喜, 周士芸, 张在玉, 等. HIP 技术在改善铸件致密化方面的应用 [J]. 粉末冶金工业, 2015, 25(1):46-48.

ZHANG D X, ZHOU S Y, ZHANG Z Y, et al. Application of HIP technology in improving casting densification [J]. Powder Metallurgy Industry, 2015, 25(1):46-48.

[21] 于彦奇. 3D 打印技术的最新发展及在铸造中的应用 [J]. 铸造设备与工艺, 2014(2):1-4.

YU Y Q. The development of 3D printing technology and its application in foundry [J]. Foundry Equipment and Technology, 2014(2):1-4.

[22] 张方, 王林岐, 赵松. 航空钛合金锻造技术的研究进展 [J]. 锻压技术, 2017(6):1-6.

ZHANG F, WANG L Q, ZHAO S. Research development on forging technology for aviation titanium alloys [J]. Forging and Stamping Technology, 2017(6):1-6.

[23] YURI T, ONO Y, OGATA T. Effects of surface roughness and notch on fatigue properties for Ti-5Al-2.5Sn ELI alloy at cryogenic temperatures [J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2003, 4(4):291-299.

[24] 陈永来, 张帆, 单群, 等. 精密成形技术在航天领域的应用进展 [J]. 材料科学与工艺, 2013, 21(4):57-64.

CHEN Y L, ZHANG F, SHAN Q, et al. Application progress of precision forming technology in aerospace [J]. Materials Science and Technology, 2013, 21(4):57-64.

[25] 周建华, 庞克昌, 王晓英. 航天用钛合金等温锻件的研制 [J]. 上海航天, 2003, 20(6):54-58.

ZHOU J H, PANG K C, WANG X Y. Development of titanium alloy isothermal forgings applied in aerospace [J].

Aerospace Shanghai, 2003, 20(6):54-58.

[26] 李建军, 黄茂林, 彭谦之, 等. 锻造技术的发展现状与趋势 [J]. 热处理技术与装备, 2015(3):63-68.

LI J J, HUANG M L, PENG Q Z, et al. Development status and trends of forging technology [J]. Rechuli Jishu Yu Zhuangbei, 2015(3):63-68.

[27] 郭鸿镇, 姚泽坤, 魏迎光, 等. 等温精密锻造技术的研究进展 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1):593-599.

GUO H Z, YAO Z K, GUO Y G, et al. Research progress of isothermal precision forging technology [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1):593-599.

[28] RITAM C, JYOTI M. A review of super plastic forming [J]. Materials Today: Proceedings, 2018(5):4452-4459.

[29] 王小翔. 钛合金超塑板制备研究进展 [J]. 钛工业进展, 2016, 33(6):1-4.

WANG X X. Research development of preparation of superplastic titanium alloy sheet [J]. Titanium Industry Progress, 2016, 33(6):1-4.

[30] DU Z, JIANG S, ZHANG K, et al. The structural design and superplastic forming/diffusion bonding of Ti2AlNb based alloy for four-layer structure [J]. Materials & Design, 2016, 104:242-250.

[31] SIENIAWSKI J, MOTYKA M. Superplasticity in titanium alloys [J]. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2007, 24(1):123-130.

[32] 欧阳金栋, 刘慧慧, 马俊飞, 等. 基于钛合金舵面的超塑成形/扩散连接工艺 [J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(1):66-69.

OUYANG J D, LIU H H, MA J F, et al. Analysis of SPF/DB combination process based on titanium alloy rudder [J]. Machine Building and Automation, 2018, 47(1):66-69.

[33] 李蒙, 李晓燕, 马家琨, 等. SP700 钛合金板轧制过程的组织演变和力学性能研究 [J]. 有色金属材料与工程, 2019, 40(3):31-38.

LI M, LI X Y, MA J K, et al. Research of microstructure evolution and mechanical properties of SP700 titanium alloy sheet [J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2019, 40(3):31-38.

[34] WANG C, ZHAO T, WANG G, et al. Superplastic forming and diffusion bonding of Ti-22Al-24Nb alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 222:122-127.

[35] 李志强, 郭和平. 超塑成形/扩散连接技术的应用进展和发展趋势 [J]. 航空制造技术, 2010(8):32-35.

LI Z Q, GUO H P. Application progress and development tendency of superplastic forming/diffusion bonding technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(8):32-35.

[36] 丁新玲, 安孟长. 超塑成形技术研究及其在航空航天上的应用 [J]. 航天制造技术, 2009(1):1-5.

DING X L, AN M C. Superplastic forming technology research and application on aerospace industry [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2009(1):1-5.

[37] 微石, 阴中炜, 高鹏, 等. TC4 半环超塑正反胀形工艺 [J]. 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2020年 第4期

艺研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46: 139-144.

WEI S, YIN Z W, GAO P, et al. Direct-reverse SPF process for TC4 semi-annular part [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46: 139-144.

[38] 杨英丽, 郭荻子, 赵永庆, 等. 钛旋压技术研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(A04): 625-629.

YANG Y L, GUO D Z, ZHAO Y Q, et al. Progress on the spin-forming technology of titanium in China [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(A04): 625-629.

[39] 朱宁远, 夏琴香, 肖刚锋, 等. 难变形金属热强旋成形技术及研究现状[J]. 锻压技术, 2014, 39(9): 42-47.

ZHU N Y, XIA Q X, XIAO G F, et al. Hot power spinning technology and research status of difficult-to-deform metal [J]. Forming and Stamping Technology, 2014, 39(9): 42-47.

[40] 张成, 杨海成, 韩冬, 等. 钛合金旋压技术在国内外航天领域的应用及发展[J]. 固体火箭技术, 2013(1): 127-132.

ZHANG C, YANG H C, HAN D, et al. Applications and development of titanium alloys spinning technology in domestic aerospace field [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2013(1): 127-132.

[41] 写旭, 张立武, 杨延涛, 等. Ti55531 钛合金筒形件的旋压成形[J]. 宇航材料工艺, 2016, 46(6): 50-53.

XIE X, ZHANG L W, YANG Y T, et al. Spinning of Ti 55531 titanium alloy cylinder [J]. Aerospace Materials & Technology, 2016, 46(6): 50-53.

[42] 李启军, 范开春, 王琪, 等. 大尺寸薄壁钛合金筒体旋压成形质量影响因素[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(1): 94-96.

LI Q J, FAN K C, WANG Q, et al. Factors influencing spinforming of large-diameter, thin-walled TC4 alloy tube [J]. Aerospace Materials & Technology, 2012, 42(1): 94-96.

[43] 李启军, 吕宏军, 王琪. 高深径比TC4钛合金筒形件普旋成型有限元数值模拟[J]. 宇航材料工艺, 2006, 36(s1): 88-92.

LI Q, LYU H J, WANG Q, et al. FEM numerical simulation of spinning processing for workpiece of TC4 alloy with great ratio of height to diameter [J]. Aerospace Materials & Technology, 2006, 36(s1): 88-92.

[44] 郭靖, 詹梅, 杨合. 钛合金筒形件轧-旋成形研究进展[J]. 中国材料进展, 2016, 35(4): 275-283.

GUO J, ZHAN M, YANG H. Advances in rolling-spinning technique of titanium tubes [J]. Materials China, 2016, 35(4): 275-283.

[45] 李中权, 肖旅, 李宝辉, 等. 航天先进轻合金材料及成形技术研究综述[J]. 上海航天, 2019, 36(2): 13-25.

LI Z Q, XIAO L, LI B H, et al. Review of Study on Advanced Light Alloy Materials and Forming Technique in Spaceflight Industry [J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(2): 13-25.

[46] 张恒大. 月球车钛合金轮圈的热旋压成形工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

ZHANG H D. Hot spinning process of titanium alloy collar rim of lunar rover[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.

[47] 韩冬, 赵升吨, 张立武, 等. TC4合金复杂型面工件薄

壁旋压成形工艺[J]. 锻压装备与制造技术, 2005(6): 70-72.

HAN D, ZHAO S D, ZHANG L W, et al. Research on spinning process for complex workpiece of TC4 alloy with thin wall and special shape [J]. China Metal Forming Equipment and Manufacturing Technology, 2005(6): 70-72.

[48] 韩冬, 杨合, 詹梅, 等. 工艺参数对Ti75合金筒形件旋压成形的影响[J]. 宇航材料工艺, 2011, 41(4): 48-50.

HAN D, YANG H, ZHAN M, et al. Influence of process parameters on Ti75 alloy tube spinning [J]. Aerospace Materials & Technology, 2011, 41(4): 48-50.

[49] YILDIZ T, KATI N, GUR A K. The effect of sintering temperature on microstructure and mechanical properties of alloys produced by using hot isostatic pressing method [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 737: 8-13.

[50] 徐磊, 郭瑞鹏, 刘羽寅. 钛合金粉末热等静压近净成形成本分析[J]. 钛工业进展, 2014, 31(6): 1-6.

XU L, GUO R P, LIU Y Y. Cost analysis of titanium alloy parts through near-net-shape hot-isostatic-pressing technology [J]. Titanium Industry Progress, 2014, 31(6): 1-6.

[51] 刘文彬, 陈伟, 王铁军, 等. 粉末钛合金的热等静压技术研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2018, 28(2): 1-7.

LIU W B, CHEN W, WANG T J, et al. Research progress of hot isostatic pressing technology of titanium alloy powder [J]. Powder Metallurgy Industry, 2018, 28(2): 1-7.

[52] ZHOU S, SONG B, XUE P, et al. Numerical simulation and experimental investigation on densification, shape deformation, and stress distribution of Ti6Al4V compacts during hot isostatic pressing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(1-4): 19-31.

[53] 张绪虎, 徐桂华, 孙彦波. 钛合金热等静压粉末冶金技术的发展现状[J]. 宇航材料工艺, 2016, 46(6): 6-10.

ZHANG X H, XU G H, SUN Y B. Research progress of titanium products fabricated by hot isostatic pressing (HIP) [J]. Aerospace Materials & Technology, 2016, 46(6): 6-10.

[54] 叶呈武, 王亮, 张绪虎, 等. 钛合金 HIP 近净成形技术在航天上的应用[J]. 材料导报, 2012, 26(23): 112-114.

YE C W, WANG L, ZHANG X H, et al. Application of titanium alloy HIP near shape technique in aerospace [J]. Materials Reports, 2012, 26(23): 112-114.

[55] 李圣刚, 吕宏军, 何士桓, 等. 低温复杂结构件特种成形工艺[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(1): 82-85.

LI S G, LYU H J, HE S H, et al. Special forming process of cryogenic complicated structural parts [J]. Aerospace Materials & Technology, 2012, 42(1): 82-85.

[56] CAI C, SONG B, XUE P, et al. Effect of hot isostatic pressing procedure on performance of Ti6Al4V: surface qualities, microstructure and mechanical properties [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 686: 55-63.

[57] XU L, GUO R, BAI C, et al. Effect of hot isostatic pressing conditions and cooling rate on microstructure and properties of Ti-6Al-4V alloy from atomized powder [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2014, 30(12): 1289-1295.