

# 钛合金精密热成形技术在航空航天 的应用进展

## Application Progress of Titanium Alloy Precision Thermo- Forming Technology in Aerospace

航天动力技术研究院西安航天动力机械厂 张立武 写 旭 杨延涛



张立武

研究员,中国航天科技集团航天动力技术研究院西安航天动力机械厂党委书记。主要研究方向:固体火箭发动机金属成形工艺。

钛合金具有低密度、高比强度、使用温度范围宽(-269~600℃)、耐蚀、低阻尼和可焊等诸多优点,是航空航天飞行器轻量化和提高综合性能的最佳用材,其应用水平是体现飞行器先进程度的一个重要方面<sup>[1-2]</sup>。

钛合金精密热成形技术是先进制造技术的重要组成部分,在航空航天工业中占有举足轻重的地位。结合航空航天领域钛合金成形需整体、轻量及精密化的特点,综述了钛合金精密热成形技术在国内外航空航天工业装备中的应用进展及国内与国外的差距,指出各精密成形技术发展应用中存在的问题及在航空航天领域的发展趋势。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.19.014

提高飞行器的综合力学性能并降低成本,是推动钛合金在航空航天领域应用的重要措施。

随着航空航天技术的发展,钛合金在航空航天领域的应用范围不断扩展,钛合金结构件也越来越呈现出大尺寸、薄壁曲面、变厚度和整体结构的趋势,进一步提高了航空航天飞行器的性能、结构刚性,减轻了重量,钛合金精密成形技术将是航空航天制造技术的研究重点。

精密成形是指零件成形后接近或达到零件精度要求的成形技术,它是建立在新材料、新设备、新工艺、计

算机辅助工艺设计等技术成果的基础上,发展了传统的成形技术,实现产品高效、高性能、低成本的少无余量制造技术,精密成形的零件具有高的几何精度和表面粗糙度、精确的外形及优良的机械性能<sup>[3]</sup>。钛合金精密成形技术广泛应用于航空航天领域,它的使用能显著提高各类作战飞机、航空发动机、战略战术导弹、运载火箭等航空航天产品的综合性能和保障能力。针对精密成形技术中精密热成形(包括精密铸造、超速成形/扩散连接、精密旋压和激光直接快速成形)技术的应用进展进行分析,这

些技术可以实现近净形生产,材料利用率高达70%~90%,已经在航空航天领域凸显出广阔的发展前景和良好的应用价值。

### 钛合金精密铸造技术

美国于20世纪60年代开始研究应用钛合金精密铸造技术,处于世界领先水平,开发出了熔模陶瓷铸型技术、机加石墨铸型技术和热等静压技术<sup>[4-5]</sup>。国外先进国家已成功研制了F-100、CFM-56、CF6-80、F-119等航空发动机的大型薄壁整体钛合金中介机匣、风扇、高压压气机机匣等铸件,最大直径已经大于1000mm、最小壁厚小于3mm、尺寸精度达到CT6~CT7级水平,冶金质量高<sup>[6]</sup>。

美国F-22战斗机在垂尾方向舵作动筒支座与其他关键承力部位大量采用钛合金精密铸件,约占其整体结构重量的7.1%<sup>[7]</sup>。德国钛铝精铸公司采用近 $\alpha$ 型钛合金IMI834生产了燃气涡轮航空发动机的零部件。目前,大型复杂的发动机中介机匣式风扇框架基本采用Ti-6Al-4V及Ti6242精铸件<sup>[6,8-9]</sup>,见表1。

我国的钛精铸技术起步于20世纪60年代,是借鉴和引进国外技术发展起来的,经过多年发展开发出了钛合金熔模铸造技术、捣实型铸造技术、石墨加工型铸造技术等。钛合金熔模精密铸造技术结合离心浇铸工艺技术,实现了尺寸900mm、整体壁厚2.5mm的薄壁复杂

钛合金结构件浇铸成型,尺寸精度达到CT6~CT8级,铸件表面黏污层厚度减少到0.3mm。对于中小型铸件尺寸精度可以达到CT6~CT7级,表面粗糙度达到 $R_a3.2\text{mm}$ ,最小壁厚 $1.5\mu\text{m}$ ,达到国际先进水平<sup>[6]</sup>。北京航空材料研究院曾成功浇铸出尺寸 $630\text{mm}\times300\text{mm}\times130\text{mm}$ 、最小壁厚仅为2.5mm的复杂框形结构<sup>[10]</sup>。

随着航空航天装备升级换代,对构件的大型化、复杂化和高精度提出了更高要求,钛合金精密铸造技术结合先进熔炼技术、计算机仿真技术、热等静压技术、数字化检测技术等是今后的主要发展方向。目前,与欧美发达国家相比,我国在技术基础、设备、过程控制、成形改性一体化、工艺仿真和数字化检测等方面存在一定的差距,攻克大型薄壁复杂整体精铸件铸造关键技术,满足先进航空航天装备研制的需要是今后工作的重点。

### 钛合金超塑成形 / 扩散连接技术(SPF/DB)

超塑成形 / 扩散连接(SPF/DB)是一种把超塑成形与扩散连接相结合用于制造高精度大型零件的近无余量加工方法,在现代航空航天工业发展的推动下,经过30多年的开发研究和验证试验,已进入了实用阶段<sup>[11-12]</sup>。

20世纪70年代早期,美国洛克威尔公司首先将超塑成形技术应用到飞机结构件制造中,使钛合金制造

工艺发生了技术变革。随后,欧美将钛合金SPF、SPF/DB技术列为重点研究项目,促使超塑成形整体钛合金结构件已获得工程应用,并产生了巨大的技术经济效益:联合战斗机(JSF)的后缘襟翼和副翼、F-22后机身隔热板等重要结构均采用了钛合金超塑成形 / 扩散连接的整体结构。英国罗·罗公司采用SPF/DB技术研制出了第二代钛合金宽弦无凸肩空心风扇叶片,每个叶片实现减重35%~40%,处于世界领先地位<sup>[13-14]</sup>。欧盟采用超塑成形的Ti-6Al-4V合金高度控制仪气瓶还应用于阿里安V火箭<sup>[15]</sup>,国外一些导弹上用的钛合金蜂窝结构的翼面也采用SPF/DB技术成形<sup>[16]</sup>。

国内对SPF/DB技术的研究开始于70年代末,经过30多年的发展,我国SPF/DB技术取得了很大的进步。近年来,我国新机研制及改进机型中,前缘襟翼、鸭翼、整体壁板和腹鳍等大尺寸钛合金构件采用SPF/DB技术。针对航天型号对金属耐热结构的需求,航天材料及工艺研究所开展了钛合金波纹板SPF技术研究,成功制备出TC4钛合金耐热瓦等热结构部件<sup>[3]</sup>。

SPF/DB应用于航空航天具有两方面的优势,一方面是满足航空航天复杂几何形状零件的要求,另一方面可以不用接头(紧固件或铆钉等)获得整体结构<sup>[17]</sup>。SPF/DB技术的应用方向为:大型结构件、复杂结构件、精密薄壁件的超塑成形;高速超塑成形技术的研究与开发。SPF/DB技术应用表明:尽管钛合金成本高,但成本效益、可靠性、长寿命和重量轻量化对航空航天的吸引力更大。

### 钛合金精密旋压技术

旋压成形技术制造的薄壁回转壳体构件解决了在车削加工时存在的刚度低、颤动大、加工精度低等技术问题或根本无法加工的技术难

表1 国外航空发动机用大型钛合金精铸件

	发动机名称	铸件尺寸/mm	铸件重量/Kg
中介机匣	RB199	$\phi 740$	48
中介机匣	CF6-80	$\phi 1275$	136
中介机匣	PW2037	$\phi 1020$	107
中介机匣	F100	$\phi 860$	54
风扇机匣	PW2037	$\phi 710$	71
风扇机匣	PW4000	$\phi 854$	72
风扇机匣	F110	$\phi 1070$	130

题,应用于航天领域具有诸多优势。

美国强力旋压生产的  $\phi 3900\text{mm}$  大型导弹壳体,径向尺寸精度达到  $0.05\text{mm}$ ,表面粗糙度  $R_a$  为  $1.6\sim 3.2\mu\text{m}$ ,壁厚差  $\leq 0.03\text{mm}$ 。美国钛制造公司采用  $1.5\text{m}$  立式旋压机旋压  $\phi 1524\text{mm}$  的 Ti-6Al-4V 钛合金导弹压力容器封头,每个封头的旋压时间为  $5\text{min}$ <sup>[18]</sup>。民兵洲际导弹第二级固体发动机壳体采用了 Ti-6Al-4V 钛合金,并用强力旋压成形,成形后的钛合金壳体重量减轻  $30\%$ 。围绕航天型号对轻质、高强、大型化航天需求,德国 MT 宇航公司采用旋压工艺制备出  $\phi 1905\text{mm}$  的高强 Ti-15V-3Cr 合金推进系统贮箱,并应用于欧洲阿尔法通信卫星巨型平台,实现了卫星平台的大幅度减重、增加有效载荷<sup>[19-20]</sup>。

我国的旋压工艺与设备的研究源于 60 年代初期,钛合金的旋压研究始于上世纪 70 年代,经过 40 多年来的发展,基本形成了从设备的研制到工艺开发一套成熟的体系<sup>[21-22]</sup>。国内航天所用钛合金及旋压制品,如火箭发动机外壳、叶片罩、陀螺仪导向罩、内蒙皮等, Ti8Al1Mo1V 高钛合金用于发动机叶片热处理强化钛合金旋压成形; TB2 钛合金用于小型喷管旋压等。

西安航天动力机械厂研制出国内最大直径的钛合金筒形件;通过正反 2 道次普旋翻边成功旋压出  $\phi 500\text{mm}$  的薄壁半圆钛圈,零件用于空间飞行器微动力姿态调整<sup>[23]</sup>。

中国航天科技集团公司第 703 研究所采用普旋与强旋相结合的技术,以 TC3、TC4 2 种钛合金板材为坯料,热旋压制备出了 2 种钛合金半球形( $\phi$  内  $522\text{mm} \times 2.0\text{mm}$ )、圆柱形储箱壳体( $\phi 163\text{mm} \times 2.0\text{mm} \times 200\text{mm}$  的杯形件,  $\phi 163\text{mm} \times 2.0\text{mm} \times 360\text{mm}$  及  $\phi 112\text{mm} \times 6.0\text{mm} \times 1000\text{mm}$  的筒形件)<sup>[24]</sup>。

近几年来,随着计算机模拟技术的发展,数值模拟已广泛应用于金属部件旋压成形过程的分析。航天材料及工艺研究所对 TC4 筒形件进行了计算机模拟,分析了旋轮攻角、旋轮运动轨迹、普旋道次等工艺参数对旋压成形的影响规律,成功旋制了高深径比的 TC4 钛合金筒形件<sup>[25]</sup>。尽管钛合金精密旋压技术为航天领域提供了各类合金普旋成形高深径比旋压件,但从零件的工程化应用和旋压成形的复杂性分析,还需进一步加强。总的来说,旋压技术在国内航天工业获得广泛应用,但大直径、薄壁整体钛合金热旋压成形工艺尚无应用实例,直径  $2.25\text{m}$  贮箱箱底整体旋压技术、直径  $5\text{m}$  低温贮箱箱底瓜瓣成形、钛合金及高温合金复杂结构件成形等技术还处在工艺摸索阶段。

### 钛合金激光直接快速成形技术

自 20 世纪 90 年代开始,随着计算机技术的飞速发展,激光直接制造技术逐渐成为制造领域研究的热点。激光直接快速成形技术中有 2 种方法可以用于直接制造金属零件,即区域选择激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)技术和近净成形(Laser Engineered Net Shaping, LENS)技术。国外有关大型钛合金结构件激光直接快速成形技术的研究主要集中在美国。美国 AeroMet 公司在 2002~2005 年间实现了激光直接快速成形钛合金结构件在飞机上的应用。2001 年 Aero-Met 公司开始为波音公司 F/A-18E/F 舰载联合歼击/攻击机小批量试制发动机舱推力拉梁、机翼转动折叠接头、翼梁、带筋壁板等机翼钛合金次承力结构件。2002 年制定出了“Ti6Al4V 钛合金激光快速成形产品”宇航材料标准(ASM 4999)并于同年在世界上率先实现激光快速成形钛合金次承力结构件在 F/A-18 等战机上

的验证考核和装机应用<sup>[26-32]</sup>。在航天领域, NASA 马歇尔航天飞行中心(NASA's Marshall Space Flight Center in Huntsville, Ala.)于 2012 年将选区激光熔化成形技术应用于多个型号航天发动机复杂金属零件样件的制造<sup>[33]</sup>。激光直接快速成形技术还常常被用于钛合金零件或者模具的修复<sup>[34]</sup>。

我国钛合金结构件激光直接快速成形技术的研究,从 2001 年开始一直受到政府主要科技管理部门的高度重视,在飞机、发动机等钛合金结构件激光快速成形制造工艺研究、成套装备研发及工程应用关键技术攻关等方面取得了较大进展。

北京航空航天大学激光材料加工制造技术实验室以飞机次承力钛合金复杂结构件为对象,开展激光快速成形工程化应用技术研究,先后制造出 TA15 钛合金角盒近 200 件,完成了“激光快速成形 TA15 钛合金结构件在某型飞机上的装机评审”,首件激光快速成形 TA15 钛合金结构件顺利通过在某型飞机上的全部应用试验考核,使我国成为继美国之后世界上第二个掌握飞机钛合金复杂结构件激光快速成形工程化技术并实现激光快速成形钛合金结构件在飞机上应用的国家<sup>[26,30]</sup>。

北京航空航天大学王华明主持的“飞机钛合金大型复杂整体构件激光成形技术”项目研制生产出我国飞机装备中迄今尺寸最大、结构最复杂的钛合金等高性能难加工金属关键整体构件,并在我国大型飞机等

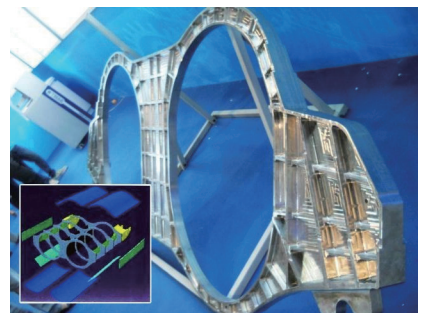


图1 激光快速成形的战斗机钛合金构件

多型飞机研制和生产中得到实际应用,从而使我国成为目前世界上唯一突破飞机钛合金大型主承力结构件激光快速成形技术并实现装机应用的国家,如图1。

相对于国内的航空领域的研究应用,目前激光直接快速成形技术在我国航天领域的应用研究基本上还是处于起步阶段。实际上,航天液体和固体火箭发动机难加工材料、复杂型面的结构件及武器型号难加工材料轻质耐热结构件可以很好地采用选区激光熔化技术实现高精度加工<sup>[35]</sup>。

采用激光直接快速成形技术制造航空航天用的整体钛合金结构件具有材料利用率高、加工余量小、周期短和柔性高等优点。但激光快速成形过程中零件变形开裂预防,内部质量(内部缺陷、晶粒及显微组织等)及力学性能控制依旧是制约大型整体钛合金关键结构件激光直接快速成形技术发展和应用的技术瓶颈。

## 结束语

综上所述,钛合金精密热成形技术在获得不断进步的同时,也遇到了一些技术难题,大型整体钛合金构件的工程化应用范围还比较小,但随着航空航天产业的快速发展,钛合金精密热成形技术必定步入一个新的发展期,鉴于钛合金和精密热成形技术的突出优点,二者的结合在未来航空航天工业中的贡献作用将更为显著,今后其主要发展方向是:(1)大型或者超大型复杂(薄壁)结构件的整体精密成形、低成本、工程化应用;(2)计算机模拟(仿真)技术、CAD/CAM技术、数控技术等与精密成形技术的结合,为航空航天新构件的成形提供技术途径。

## 参考文献

[1] 张慧芳,张治民.钛合金薄壁复杂构件精密成形技术现状及发展.航空制造技术,2008(24):47-49.

[2] 张成,杨海成,韩冬,等.钛合金旋压技术在国内航天领域的应用及发展.固体火箭技术,2013,36(1):127-131.

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

[4] Chen Y, Dave C, Xu C, et al. The influence of polymer content and sintering temperature on yttria face-coat moulds for TiAl casting. Journal of the European Ceramic Society, 2012, 32:4041-4049.

[5] 樊振中,徐秀丽,王玉灵,等.熔模精密铸造技术在航空工业的应用及发展.特种铸造及有色合金,2014,34(3):285-289.

[6] 南海.轻合金精密铸造技术.新技术新工艺,2009(2):9-12.

[7] Wang S, G Miranda A, Shih C. A study of investment casting with plastic patterns. materials and manufacturing process, 2010, 25: 1482-1488.

[8] 熊艳才.精密铸造技术在航空工业中的应用和发展.航空制造技术,2008(22):32-35.

[9] 南海,谢成木.国外铸造钛合金及其铸件的应用与发展.中国铸造装备与技术,2003(6):1-3.

[10] 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.稀有金属材料与工程,2006,35(5):678-681.

[11] 张向辉.超塑成形/扩散连接技术在航空航天上的应用.科技视界,2014,22:345-346.

[12] 李志强,郭和平.超塑成形/扩散连接技术在航空航天工业中的应用.锻压技术,2015(1):79-80.

[13] 于卫新,李森泉,胡一曲.材料超塑性和超塑成形/扩散连接技术及应用.材料导报:综述篇,2009,23(6),8-12.

[14] 曾元松.先进航空板材成形技术应用现状与发展趋势.航空科学技术,2012(1):1-4.

[15] Peters M, Kumpfert J, Ward C H, et al. Ti-tanium alloys for aerospace applications. Advanced Engineering Materials, 2003, 5(6):419-427.

[16] HAN W B, ZHANG K F, WANG G F. Superplastic forming and diffusion bonding for honeycomb structure of Ti-6Al-4V alloy. J Mater Proc Techn, 2007, 183:450.

[17] 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.航天制造技术,2009(1):1-5.

[18] 曹运红.钛合金成型工艺在飞航导弹上的应用研究.飞航导弹,2002(7):50-59.

[19] Radtke W. Novel manufacturing methods for titanium tanks and liners. Proceedings of Joint Propulsion Conference & Exhibit, Sacramento: California, 2006.

[20] Hegels J. Optimized manufacturing methods for large light-weight-overwrapped titanium satellite propellant tanks. Proceedings of Joint Propulsion Conference & Exhibit, Hartford, CT, 2008.

[21] 牟少正,韩冬.有色金属旋压技术研究现状.航天制造技术,2008(4):38-42.

[22] 李继贞,李志强,余肖放.我国旋压技术的现状与发展.锻压技术,2005(增刊):17-20.

[23] 韩冬,赵升吨,张立武.TC4合金复杂型面工件薄壁旋压成形工艺探.锻压装备与制造技术,2005,6(3):66-68.

[24] 杨英丽,郭荻子,赵庆永,等.钛旋压技术研究进展.稀有金属材料与工程,2008,37(增刊4):625-629.

[25] 吕昕宇,侯红亮,张士宏,等.TC4合金流动旋压三维弹塑性有限元模拟.锻压技术,2005,6:38-41.

[26] 王华明,张述泉,王向明.大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战.中国激光,2009,36(12):3204-3209.

[27] 张安峰,李涤尘,卢秉恒.激光直接金属快速成形技术的研究进展.兵器材料科学与工程,2007,30(5):68-72.

[28] 张凯,刘伟军,尚晓峰,等.金属零件激光直接快速成形技术的研究(上)——国外篇.工具技术,2005,39(5):3-8.

[29] P A Kobryn, S L Semiatin. The laser additive manufacturing of Ti-6Al-4V. JOM, 2001, 53(9):40-42.

[30] 王华明,张述泉,汤海波,等.大型钛合金结构激光快速成形技术研究进展.航空精密制造技术,2008,44(6):28-30.

[31] 杨建,黄卫东.激光直接制造技术及其在飞机上的应用.航空制造技术,2009(7):36-38.

[32] 王华明.航空高性能金属结构件激光快速成形研究进展.航空制造技术,2005(12):26-28.

[33] 董鹏,陈济轮.国外选区激光熔化成形技术在航空航天领域应用现状.航天制造技术,2014(1):1-5.

[34] 张冬云,冯清华,李志波,等.激光直接制造金属零件技术在航空航天领域的应用.航空制造技术,2011(9):38-41.

[35] 陈济轮.激光快速制造技术在我国航天制造领域的应用展望.航天制造技术,2010(6):1-3.

(责编 叶枫)