

钛合金薄壁复杂构件精密成形技术现状及发展

Present Status and Development of Precision Forming Technology for Ti Alloy Thin-Walled Complicated Structures

中北大学材料科学与工程学院 张慧芳
国防科技工业精密塑性成形技术研究中心 张治民



张慧芳

国防科技工业精密塑性成形技术研究应用中心博士研究生,主要从事钛合金形变强化和机理研究,山西省太原市科技立项技术创新计划资助项目“钛合金复杂零件多向加载整体成形技术”项目负责人。

钛合金具有低密度、高比强度、耐高温、耐蚀、可焊等许多优点,是航空、航天飞行器轻量化和提高综合性能的最佳用材,其应用水平是体现了飞行器先进程度的一个重要方面。钛合金在航空、航天飞行器上所占的比例应以达到总性价比最佳化为目

随着我国航空工业的发展,钛合金构件大型化、整体化是必然趋势,大型钛合金薄壁复杂构件的整体精密成形技术是必须解决的重大技术关键。在过去的几年内,先进的设备、加工过程的控制和数值模拟的应用使得航空航天用的钛合金薄壁复杂构件整体精密成形有了一定的发展。

标。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。

现代航空、航天飞行器不但要求轻型化、速度高,还要求性能好、寿命长、安全可靠。为了进一步提高飞行器的性能,必须尽一切可能降低重量,以往采用由小锻件连接的一些大部件将尽可能改用整体的结构形式,这样可以明显提高结构的刚性和减轻重量。尤其是钛合金件,由于焊接技术难度很大,更希望做成整体构件,因此大型、薄壁、复杂、整体、精密制造技术已经成为国外航空、航天飞行器用的钛合金结构件制造技术的发展趋势。

随着我国航空工业的发展,钛合金构件大型化、整体化是必然趋势,大型钛合金薄壁复杂构件的整体精密

成形技术是必须解决的重大技术关键。

国内外研究现状

钛合金原材料价格昂贵,加上废料回收难、加工难等缺点,使钛合金的使用成本增加,因而限制了钛合金的进一步应用。为推广钛合金的应用,世界主要钛合金生产国包括美国、日本、俄罗斯、中国等都开展了低成本钛合金精密成形技术的研究。

精密成形技术主要包括精密铸造技术、等温锻造技术、粉末冶金技术等。这些技术可以实现近净形生产,材料利用率高达70%~90%,大大降低了成本。

1 钛合金精密铸造技术

近年来,钛合金精铸技术发展很快,如开发了钛精密铸造+热等静

压+热处理技术,可保证钛合金铸件质量接近于 β -退火的钛合金锻件;开发了浮熔铸造技术,采用减压吸引法进行铸造,浇注时很少产生紊流,基本无气泡夹杂,很少产生铸造缺陷。在美国,真空压铸法作为新的钛铸造方法已进入实用阶段,这种方法不会产生铸件表面污染,质量比较稳定,也省去了后续的酸洗工序。

在产品方面,美国Howmet公司及PCC能浇出730~770kg的工件,PCC可生产出直径达2m的大型铸件,铸造尺寸公差可达 $\pm 0.13\text{mm}$,最小壁厚达1.0~2.0mm。最近,Howmet公司、波音公司与美国空军研究实验室联合进行薄壁钛铸件的开发,选择了C-17军用运输机发动机挂架的鼻帽和防火封严件为对象,各用一个整体铸件取代由17个Ti-6Al-4V合金钣金件组成的鼻帽和由多个零件、紧固件组成的防火封严件。经过努力,目前已达到1.27mm厚度的要求,并在新生产的C-17飞机中得到应用。美国近期的突出成就是通过计算机工艺模拟、组织控制、热等静压和BST0A热处理等综合技术获得了高性能的Ti-6Al-4V钛合金大型精铸件,其静力及疲劳性能达到了与锻件相同的高水平,因此已将钛铸件的应用扩大至F-22战斗机和新型V22“鱼鹰”垂直起落飞机的大型主要承力件。德国钛铝精铸公司采用近 α 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间机匣式风扇框架基本采用Ti-6Al-4V及Ti6242精铸件。

在国内,北京航空材料研究院曾成功浇铸出尺寸为630mm \times 300mm \times 130mm、最小壁厚仅为2.5mm的复杂框形结构。哈尔滨工业大学陈玉勇等采用从德国引进的水冷铜坩埚真空感应熔炼炉及从美国引进的激光快速制模设备和压蜡

机,研究了低成本的陶瓷型壳制备工艺,并在离心力场条件下成功浇铸了航空、航天用发动机进气道Ti-Al-Zr合金部件。

精密铸造技术目前存在以下问题:

(1)大型钛合金构件将越来越多地应用在易疲劳断裂的关键部位,但大型复杂薄壁钛合金浇铸时液态金属流将部分造型材料卷入金属流冷却后形成的夹杂容易导致裂纹的产生与扩展,尤其是钛合金铸件中大于10mm的缩孔,很难在热等静压中压扁焊合。

(2)熔模铸造的充型凝固过程容易产生许多如卷气、夹杂、缩孔、冷隔等铸造缺陷,从而影响铸件性能

(3)虽然真空压铸法不存在以上问题,但它仅适于制造形状简单的零件,铸件最大质量为18kg,最大尺寸为61cm \times 46cm \times 25cm,一次最多可铸造12个零件。

2 钛合金等温锻造技术

钛合金等温锻造的研究已有30年的历史,等温锻造的大型钛合金锻件已经生产了几十种,最大的钛合金锻件投影面积有0.48m²。国外很早就有等温锻造技术成功应用于制造IMI834钛合金压缩机盘、Ti-6Al-4V钛合金叶片等零件的报道。德国GKSS研究中心成功开发了等温锻造加工近 γ -TiAl合金零件的技术。欧美、日本一些国家等温锻造的硬件条件已很成熟,如温控器、常应变率控制器和微型计算机的反馈系统等。

在国内,宝山钢铁股份有限公司特殊钢分公司特殊钢技术中心采用等温锻造工艺成功地试制出BT25钛合金精密锻件——直径为500mm的高压压气机盘及TC17钛合金整体叶盘,锻件的组织、性能良好,锻件金属流线分布合理。中北大学完成了钛合金炮口止退器等温成形,大幅度提高了产品的力学性能,多向加载等温挤压成形出了某复杂零件。上

海五钢有限公司运用等温锻造技术生产出表面光洁、外形精确的TC11钛合金收敛段、扩张段,TC4钛合金翼芯、气瓶等航天精密优质锻件;哈尔滨工业大学采用等温闭式模锻成功完成了有径向扭转叶片的钛合金叶轮的精密锻造;甘肃兰石集团锻造热处理厂采用等温复合闭式模锻成功完成了某控制仪器的重要杯形零件的近净成形。

此外,国内外研究机构还利用钛合金在特定条件下所呈现的超塑性进行锻压成形。超塑成形可以一次成形复杂的薄壁零部件,其成形比(成形面积与原材料面积比)可达4,而且精度较高,工件在750mm长度之内的公差为 $\pm 0.1\%$;工件圆角半径可小于0.025mm。美国军工材料及机械研究中心用超塑性模锻加工Ti-6Al-4V钛合金的直升机风扇叶轮。我国对钛合金的超塑性研究主要对象是TC4(Ti-6Al-4V)、 β 钛合金等材料,此外,完成了发动机涡轮盘、压气机涡轮叶片等超塑性成形。超塑性成形的难点在于解决大型结构复杂构件加热技术和模具设计问题,此外超塑性成形难以适应产品的大批量生产。

等温锻造技术目前存在以下问题:

(1)大型钛合金薄壁复杂构件形状复杂,变形工作量大,操作时间长。而钛合金的锻造温度范围窄,通常为150 $^{\circ}\text{C}$ 左右,如果模具温度稍低或操作时间稍长,将使坯料(尤其在薄壁处)温度迅速降低,导致变形抗力增大,塑性降低。

(2)钛合金在锻造过程中对变形温度很敏感,例如Ti-6Al-4V钛合金,当变形温度由920 $^{\circ}\text{C}$ 降为820 $^{\circ}\text{C}$ 时,变形抗力几乎增加一倍。模压时由于热导率小,坯料表层温度低,内部温度高,内外层变形不均匀,流速不均匀,可能引起较大的附加应力,形成裂纹。

磨粒流—— 数控去毛刺、抛光、表面处理系统

■ 汽车工业零部件



■ 刀具行业



■ 航空航天领域



中国区授权代理

Champion®
精品机械有限公司

广告索引号 08-062

地址: 北京海淀区知春路1号学院国际大厦1605A室(100083)
电话: 010-51608160 Fax: 010-82337720
http://www.champion.com.cn Email: chambj@champion.com.cn

此外,等温锻造还需解决以下一些关键技术:

(1)薄壁(变壁厚)复杂零件如带枝芽、凸腔等零件精密成形金属流动控制技术;

(2)大型件的组织性能控制技术;

(3)大型薄壁件整体成形省力技术;

(4)形状复杂零件多向加载成形模具结构的设计技术。

3 钛合金粉末冶金技术

金属粉末注射成形技术(MLM)作为一种近净成型技术,可制造高质量、高精度的复杂零件,被认为是目前最有优势的成形技术之一。

航天材料及工艺研究所王亮、史鸿培等采用热等静压预合金粉工艺对Ti-6Al-4V钛合金粉末冶金技术进行了研究,同时就原料粉状态对粉末钛合金性能的影响进行了初步研究,并进行了近净成形工艺试验。研究认为钛合金的热等静压粉末冶金技术易于制备形状复杂的部件,且所制备的部件基本为净形,与传统的锻材加工技术相比,二者材料性能接近。且热等静压固结的粉末钛合金可达到100%致密,具有良好的微观结构,晶粒细小,组织均匀,无织构、偏析现象,性能可达到不低于锻件的水平。

目前,国外高性能钛合金粉末冶金技术已发展到较高的水平,在航空航天等诸多领域已开始得到应用。国内在钛合金粉末冶金技术方面也开展了不少工作,但对可用于关键结构件的高性能粉末钛合金技术的研究还不多。

此外,还有一些其他的钛合金成形技术,如激光成形技术等。激光成形技术是采用计算机模型直接由金属粉末生产零件的一种工艺,可用合金粉末一次成形形状复杂的最终零件,无需继续加工。激光成形技术特别适用于加工内部有复杂异型的结

构(如空腔),或用于加工传统方法无法制造的复杂工件。可显著缩短零件制造周期,增强产品竞争优势,尤其有利于复杂形状零件的多品种小批量生产。但是激光成形方法制造的钛合金零件尺寸精度相对较低,且力学性能远低于锻造状态。

发展趋势与关键技术

随着航空、航天工业的发展,复杂形状构件整体精密成形取代传统的“多件连接”结构和“锻造—切削加工”生产方式已成为必然趋势,目前大型钛合金薄壁复杂构件的精密成形技术的关键在于微观组织和金属流动的控制,因此应从以下几个方面进行改进:

(1)采用铸造工艺制造复杂坯料、多向加载塑性成形的铸挤复合化短流程制造,是降低成本、实现钛合金薄壁复杂构件成形的关键,是今后钛合金薄壁复杂构件的精密成形技术的发展方向。

(2)用铸造方法制造复杂坯料,通过塑性变形提高产品性能,保证和提高钛合金薄壁复杂构件综合力学性能,是实现保证和提高产品性能,促进大型钛合金薄壁复杂构件应用的有效途径。

(3)多向加载合理控制金属流动,降低成形力,是实现大型钛合金薄壁复杂构件整体塑性成形的关键技术。

此外,钛合金薄壁复杂构件精密成形还需解决以下技术关键:

- 大型锻件模具的设计、制造技术;
- 整体框锻件是不均匀环形件,预制坯技术;
- 铸造—挤压复合化成形组织性能控制技术;
- 复杂零件多向主动加载金属流动控制理论与方法;
- 钛合金薄壁复杂构件整体塑性成形技术。(责编 侧卫)