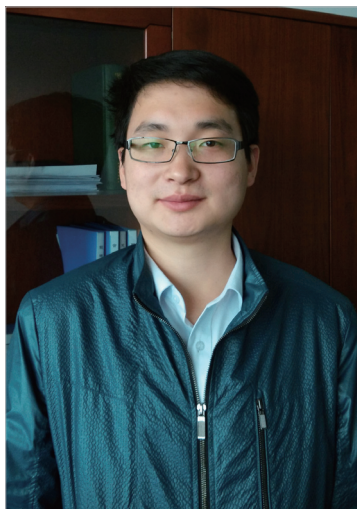


# 航空锻造技术的应用现状及发展趋势

## Application Status and Development Trend of Aeronautical Forging Technology

中航特材工业(西安)有限公司 张方 窦忠林 邹彦博



张方

毕业于西北工业大学材料学院材料加工工程专业,工学硕士。现任中航特材工业(西安)有限公司技术质量部副部长,主要从事钛合金、高温合金等原材料的热加工技术研究、原材料标准的编制、供应商管理等工作。

随着航空产业的不断发展,对航空装备极端轻质化与可靠化的追求越来越急迫,对材料和锻件的性能要求(如比强度、强韧性)也越来越高。钛合金、高温合金等材料的应用日益广泛,以航空工业为例,F-22和F-35飞机钛合金用量已分别高达39%和27%,先进航空发动机中高

温合金和钛合金锻件重量占发动机总结构重量的55%~65%<sup>[1]</sup>。而高温合金、钛合金属于难变形材料,即加工参数范围狭窄、变形抗力大、组织性能对加工过程十分敏感。所以锻造技术在航空制造领域的应用相比其他工业领域难度较大。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.07.060

温合金和钛合金锻件重量占发动机总结构重量的55%~65%<sup>[1]</sup>。而高温合金、钛合金属于难变形材料,即加工参数范围狭窄、变形抗力大、组织性能对加工过程十分敏感。所以锻造技术在航空制造领域的应用相比其他工业领域难度较大。

至今,我国航空锻造技术的发展已能满足第三代军用飞机及其发动机的批量生产需求,质量比较稳定,锻件组织致密、可控,性能优异,并通过工艺的调整可以使锻件不同部位具有不同的组织性能,已满足各部位性能要求显著不同的场合,如TC11钛合金双性能压气机盘的制造<sup>[2]</sup>。但与国外先进航空锻造技术相比,还有较大差距,并且随着新一代战机对航空装备极端轻质化与可靠性的不断追求,飞机和发动机正朝着高性

能、高减重、长寿命、高可靠、低成本的方向不断发展,这就对航空锻造技术有了更高的要求。

本文从国内外航空锻造技术的应用现状出发,结合当前航空锻造技术发展的需求。提出发展整体精密锻造技术、等温锻造技术、精密环轧技术、锻造工艺模拟技术及创建航空锻造技术推广平台的思路,为锻造技术在航空制造领域的发展提供新的思路。

### 国外航空锻造技术的应用现状

随着高新技术武器装备向小型化、精确化、轻量化、高可靠、低成本方向发展,对结构件及其成形技术的要求越来越高,促使塑性成形技术向精密、整体、复杂、高性能、高可靠、低

成本方向发展。如美国航空工业中的精密模锻件占零件品种的 80% 以上,俄罗斯占到 70%~75%,日本占到 63.9%<sup>[3]</sup>。以美国为代表的发达国家均投入大量人力物力开展了先进锻造技术与工程化应用研究。在环件精密轧制技术、钛合金和高温合金等难变形材料整体复杂构件的等温锻造技术以及精密热模锻造技术等方面形成了领先的技术优势,成为其先进军用飞机、发动机、战略战术导弹、兵器、舰船等高新技术武器装备研制生产的重要技术支撑。

### 1 精密环轧技术

无缝环件在航空、航天、船舶、兵器、核工业等诸多军工领域广泛应用。精确环轧技术是生产高性能无缝环件的首选工艺方法。发动机机匣、安装边、导弹舱体结合环、飞船加强环、火炮、坦克座圈等都是由轧制环件加工的。因此,精确环轧技术对于提高武器装备的性能水平、使用寿命和研发能力都有重要影响。工业发达国家大量装备了不同类型和规格的环轧生产线。目前,全世界范围内已拥有轧环机 500 余台,轧环生产线 100 余条。采用环轧件  $\phi 40\sim\phi 10000\text{mm}$ ,重量达 0.2~8200kg,环件材料包括各类金属。20 世纪 80 年代以来,美、俄、德、英、法等国家均采用精确轧制技术生产出高质量的压气机/涡轮机匣、燃烧室、密封环、安装边等精密环件,为现代高性能航空发动机的研制做出了重要贡献。GE 公司采用精确轧制技术生产的 CFM56 发动机 IN718 合金高筒薄壁环,晶粒度达到 ASTM-8 级以上,材料利用率达到 25%~30%,环件尺寸精度达到了环件外径的 1‰<sup>[4]</sup>。

### 2 等温锻造技术

先进军用飞机、战略战术导弹、装甲车辆、舰艇等武器装备的发动机、舱体中的关键部件,大部分采用难变形材料锻件。其中,航空发动机

涡轮盘、压气机盘、叶片是恶劣环境下服役的零部件的典型代表,对其强韧性、疲劳性能、可靠性及耐久性的要求十分严格。这些部件的选材和锻造技术已经成为衡量发动机先进程度的重要标志。早期的盘件和叶片多采用常规模锻技术生产。近年来,由于采用等温锻造技术可显著改善锻件的微观组织和性能,提高锻件组织性能均匀性和流线完整性,进一步提高零件使用可靠性,提高材料利用率,节约稀缺战略资源,发达国家已广泛采用等温锻造技术生产发动机关键锻件<sup>[5-7]</sup>。美国、英国、法国和德国等欧洲国家航空发动机盘件中 90% 以上采用等温锻造技术生产。采用等温锻造技术生产的高温合金、钛合金精锻叶片,非加工面  $\geq 80\%$ ,尺寸精度可达 0.01mm。

### 3 大型复杂构件整体精密锻造技术

为了在提高零件使用可靠性的同时,减轻结构重量、降低制造成本、缩短制造流程,发达国家已普遍应用复杂构件整体精密锻造技术,将原来的几个部件组合于一体整体成形。航空领域中大型整体隔框锻件为其中的典型代表,尤其以钛合金整体结构件的应用最为引人注目。国外先进军用飞机上已有 40% 左右的结构重量为钛合金构件,先进民航飞机上也有 10% 的结构重量为钛合金构件。钛合金整体结构件的应用可以有效降低飞机结构重量,增加发动机推重比,显著提高飞行器的总体功能,已经成为第三、四代飞机生产技术的重要标志性技术之一。

美国应用精密热模锻造技术生产 F-22 4 个承力隔框采用了大型整体隔框模锻件制造,材料最早设计采用 Ti6Al4V2Sn 合金,后改为 Ti6Al4VELI 合金,锻件投影面积为 4.06~5.67m<sup>2</sup>,其中机身整体隔框封闭式模锻件,投影面积达到 5.67m<sup>2</sup>,是目前世界上最大的钛合金整体隔框锻件<sup>[8]</sup>;美国 F/A-18 歼击机采用钛

合金整体隔框精锻件(投影面积为 4m<sup>2</sup>)取代原设计中的 368 种零件,使飞机减重 350kg,节约机械加工工时 50%<sup>[9]</sup>。

俄罗斯安-22 运输机采用 B95 合金 20 个隔框锻件(投影面积为 3.5m<sup>2</sup>),减少了 800 个零件,使飞机机体减重 1000kg,减少机械加工工时 20%<sup>[10]</sup>。

### 4 锻造过程数值模拟技术

锻造过程数值模拟技术是借助高速发展的计算机技术和现代数值算法,将实际的锻造过程进行模型化,通过数值计算在计算机中再现实际锻造过程,详细揭示变形过程中工件内热力参数的分布和演化情况,以及各个工艺参数的影响规律,优化工艺方案。由于数值模拟技术具有快速、精确、先验、灵活、低消耗等诸多独特优势,被公认为 20 世纪塑性加工领域最重要的成就之一。常用的数值模拟方法主要有边界元法、有限元法、分子(原子)动力学法、元胞自动机、Monte Carlo 法等。其中,又以有限元法的应用最为普遍,并已形成了若干专门针对锻造过程的商业软件,如 DEFORM、AUTOFORGE、SUPERFORM、FORGE2D、FORGE3D。这些软件能够处理复杂的动态边界条件,很好地进行二维、三维塑性成形问题的变形—传热耦合分析,并具有友好的前后置处理界面,大大降低了有限元方法的应用难度。目前,发达国家数值模拟技术在锻造领域的应用十分普遍,已经成为锻件生产关键工序实施前的必要环节,极大地提高工艺设计的科学性,减少摸索环节。数值模拟范围涵盖了从原材料冶炼、开坯、锻造、热处理等锻件生产的整个流程<sup>[11]</sup>。

## 国内航空锻造技术的应用现状

随着高新武器装备迅速的发展,近年来我国在精密环轧技术、等温锻

造技术、整体精密锻造技术等先进航空锻造技术领域也取得了许多成果,同时也存在不足。

### 1 精密环轧技术

我国于20世纪50年代开始应用环形件轧制技术生产航空发动机机匣和安装边等环形件,并逐渐形成几个环形件轧制专业化生产基地。经过科研人员的不懈努力,我国的环形件轧制技术有了很大提高。迄今,各种类型的环件应用于各类航空发动机,为我国第一、二、三代飞机和发动机的研制生产做出了重要贡献。

与国外相比,我国在环件轧制和特种精密锻造技术方面存在很大的差距,且精密锻造技术在整个成形生产中比重还比较低,成形件精度平均要比国外低1~2个等级,一些先进的精密成形技术在我国只有少数企业采用,一些复杂难成形件我国还不能生产。在重点型号飞机、导弹和战车部件中复杂结构件使用很少,大量高性能复杂精锻件仍然依赖国外或直接从国外购进,这些都已成为长期困扰国防企业的一个重大技术难题。

当前国内生产各类环形件的工艺方法主要是自由锻制环形件或轧制环形件,与自由锻制环形件相比,轧制环件有了较大进步,但是轧制毛坯相对于零件成品而言,特别是对于难变形材料环件成形,仍存在加工余量大、材料利用率低、尺寸精度低、缺乏先进的工艺设计手段及相关数据库的支持等问题。

### 2 复杂结构件整体等温锻造/热模锻造技术

我国对等温锻造技术的研究起步于20世纪70年代末期,开展研究的单位有专业化的研究所、高等院校、专业化锻造厂等,多数为航空、航天部门的有关单位,如北京航空材料研究院、西北工业大学等科研单位,陕西宏远航空锻造有限责任公司、贵州安大航空锻造有限责任公司、宝钢特钢有限公司等专业化锻造厂。研

究的成形材料主要为铝合金、钛合金及高温合金(含粉末冶金高温合金)。历经40年的研究与实践,在等温锻造技术开发及应用方面取得了丰硕的成果。目前,利用等温锻造技术研制生产的航空产品主要有TC11钛合金压气机盘、TC6钛合金压气机盘、TA19钛合金发动机机匣、TC4钛合金发动机轴颈、TB6钛合金飞机隔框、TA15钛合金整体框、GH4169高温合金压气机盘、FGH95粉末冶金高温合金涡轮盘等大量等温锻件<sup>[12]</sup>。

但目前,我国生产的各类军用锻件大部分还存在“肥大头耳”问题,锻件重量平均比国外重10%~20%,大型锻件的材料利用率一般只有10%~15%,高筋薄腹板的复杂结构件材料利用率往往仅有2%~5%,90%以上的贵重金属变为切屑,生产效率是国外的1/5~1/8。尤其是我国目前仅能够生产投影面积小于1.5m<sup>2</sup>以下的整体框梁类结构锻件,尺寸更大的整体结构锻件只能采用自由锻方法生产,或者将整体锻件分割为几个局部锻件进行锻造,最后通过焊接方法形成整体部件。且在等温锻造/热模锻造工艺稳定性、工艺参数优化、模具材料和模具制造等方面还存在相当多的问题亟待解决,与我国武器装备的应用需求和国际先进水平相比,差距巨大。

## 锻造技术在我国航空制造领域的发展趋势

结合国外先进航空锻造技术的应用,我国航空锻造技术的发展应从5个方面进行考虑:(1)满足新一代航空装备制造大型化、整体化的需求;(2)发展低成本高可靠锻造技术;(3)考虑低碳、环保的制造方式;(4)在锻造产业中发展循环经济制造;(5)创建相应的平台解决大量航空锻造技术成果工程化应用问题。

### 1 发展整体精密锻造技术

整体精密锻造技术可大大减轻

飞机重量(约20%)、提高疲劳寿命、降低制造成本。在航空制造领域,广泛采用大型整体结构件已成为新一代飞机提高结构效率、减少零件数量、降低成本和缩短周期的重要手段。

整体精密锻造技术需要大型设备的支撑,迄今,世界万吨级以上模锻水压机共有30余台,美、俄各有10余台,约占总台数和总吨位的70%左右。依靠这些大型模锻液压机生产的大型整体优质模锻件,为美、俄、法3国在航空产品方面能够生产出第四、五代军用战机和波音B747、空客A380空中“巨无霸”飞机提供了有力支撑,使其在航空航天产品方面居于世界前列,我国近年来也陆续具有万吨级模锻压力机,如德阳二重的800MN模锻液压机,西安三角航空的400MN模锻液压机,包括陕西宏远锻造的200MN模锻液压机,但整体精密锻造技术水平相比发达国家还有差距。目前,整体精密锻造技术已经攻克了投影面积在2m<sup>2</sup>以下的大型整体锻件技术,发展投影面积在2m<sup>2</sup>以上的超大型整体锻件是下一步攻关的方向。

### 2 发展低成本高可靠的锻造技术

锻造技术在航空制造领域主要用于飞机及发动机零件的制造,根据其结构特点,主要有自由锻技术、模锻技术和环轧技术,而自由锻技术在新型号飞机试制部分零件选用之外,很少直接应用于零件的制造,往往是作为给模锻制坯的工序。故发展先进的模锻技术和环轧技术是锻造技术在航空制造领域发展的方向。

#### 2.1 等温精密锻造技术

等温精密锻造技术近年来在国内航空制造领域发展较快,但还远远未达到大量推广应用的工业化技术水平,主要因为模具由特殊材料制造,费用比普通模具高得多;且需要温度均匀可控的模具加热系统;润滑剂要求高,能在高温下充分使用;

为防止工件和模具氧化,需要额外的真空或惰性气体保护装置。针对这些问题,后续应开发低成本高温合金模具材料;高温模具保护涂层和模具修复技术研究;真空或保护气氛下的等温锻造技术研究;高温合金模具结构设计、模具精密铸造<sup>[13]</sup>。

## 2.2 精密环轧技术

目前,我国在研和批产的各种型号航空发动机和其他军工项目中,高温合金、钛合金等难变形材料环件的应用十分广泛。但国内现生产的航空航天难变形材料环件多为矩形或简单异形截面,材料利用率低,约为5%~10%,且尺寸精度差、组织不均匀、加工变形严重等问题较突出。

针对上述问题,如何提高材料利用率、环件尺寸精度的同时,满足新型发动机对环件组织性能、组织均匀性及批次稳定性等要求,并降低生产成本、缩短研制周期、节约贵重材料和战略资源是发展环轧技术的方向。

根据相关报道,发展精密环轧技术可以从环件胀形工艺研究、异形环坯料设计与制备工艺研究、辗轧/胀形校正/热处理工艺研究、环件生产批次稳定性研究4方面推动精密环轧技术的发展<sup>[14]</sup>,重点突破环件辗轧与胀形匹配性技术、异形坯料设计优化技术、环件残余应力测试与控制技术等关键技术,最终满足先进航空发动机和其他武器装备对环形零件的高性能、低成本、精确化、轻量化、长寿命和短周期制造的需要,使我国军用精密环件的生产技术达到国际先进水平。

## 3 发展航空锻造工艺模拟技术

发展航空锻造工艺数值模拟技术,可以进行工艺设计并最终得到一个经过优化的成形工艺。由于工艺模拟计算是根据固体力学、材料科学与数值计算的基础理论进行的,因此这种数值模拟过程原则上与进行工艺试验具有相同的效果。由于工艺模拟是在计算机上进行的,它不需要

加工实际的模具和坯料,也不需要压力机,从而使工艺设计和优化上所花费的时间、成本大大降低。

目前,航空锻造厂锻造过程中,虽然各个企业内部都在应用,但没有起到应有的指导作用,还是沿用传统的经验方式进行新品的试制。效率低下,成本较高。锻造工艺模拟实施的过程,可以优化锻造工艺设计,减少试制次数,降低成本,并预测锻件的应力、应变分布及模具寿命,预测锻件缺陷,大力发展该技术可以提高企业产品质量及市场竞争力。

## 4 发展循环经济制造

我国经过多年的技术、工艺创新和升级,国际先进生产设备的进口和改造,具备了生产飞机发动机所需特殊钢材等高端产品的能力。且我国人力资源丰富,用工成本较低,与欧美国家相比,在价格方面应更有竞争优势。但是国内特钢产品报价却比国外同类产品高出了将近一倍,这对航空锻造产业来说成本巨大。

为何会形成如此高的材料成本,究其原因是废旧金属的再利用,如国外在生产过程中,废旧金属的再利用率已达70%,而国内特钢生产企业对废旧金属的应用为0;根据多年的生产经验,在生产过程中废旧金属再利用达不到60%,产品的价格就不可能降下来。由此可见,发展循环经济制造是航空锻造产业降低制造低成本的有效途径之一。

## 5 创建航空锻造技术应用推广平台

目前,我国各个高校及研究所承担着航空锻造技术的基础科研任务,在研究过程中,也会与企业联合进行工艺攻关,但离批量生产应用相差甚远,往往是研究成果出来后课题就结束了,工程化应用留给以生产为主的工厂,生产中暴露的问题大大影响了生产效率,产品质量不稳定。因此需要建立航空锻造技术应用推广的平台,以此来衔接航空锻造技术基础科研与工程化应用(批量生产)。提高

航空锻造工艺研发的充分性和稳定性。

从中航重机股份有限公司的子公司贵州安大航空锻造有限责任公司与西北工业大学成立的难变形材料应用中心前期的效果,可以看出,集成生产企业与各研究单位在各种航空锻造技术领域取得的成果,进行工程化研究和应用示范,可以为全行业相关企业提供成熟、配套的先进工艺和装备等制造技术。同时为相关航空制造企业引进国内外先进技术的消化吸收提供信息、咨询、中试等服务,促进行业研究成果的转化和技术创新。

## 结束语

近年来,我国在航空制造上的投入巨大,尤其将发动机列为专项来发展,而环形件、盘件、轴等几类锻件是航空发动机的重要组成部分,其质量在很大程度上影响航空发动机的性能;由此可以看出发展先进的航空锻造技术十分紧迫,对提高航空发动机整体性能有重要意义。对比国外先进的航空锻造技术,结合当前先进锻造技术发展的需求,航空锻造技术的发展离不开整体精密锻造技术、精密环轧技术、等温锻造技术、循环经济制造技术、锻造工艺模拟技术的支撑;而创建航空锻造技术应用推广平台是很好的解决我国大量研究成果无法应用推广的有效途径。

## 参考文献

- [1] 曾凡昌. 锻压先进制造技术及在航空工业领域的应用. 航空制造技术, 2009(6): 26-29.
- [2] 苏祖武. TC11 钛合金双性能盘研究. 金属学报, 1996, 4(32): 377-381.
- [3] 王田苗. 工业机器人发展思考. 机器人技术与应用, 2004, 2: 1-4.

本刊共有参考文献14篇,因篇幅所限未能一一列出,如有需要请向本刊编辑部索取。(责编 亿霖)