

锻压先进制造技术及在航空工业领域的应用

Advanced Forging Manufacturing Technology and Its Application in Aviation Industry

中国锻压协会航空材料成形委员会 曾凡昌



曾凡昌

研究员。曾在北京航空制造工程研究所、北京航空材料研究院从事航空材料和锻压工艺研究工作 20 年。1978 年起在航空工业部科技局从事航空材料、热加工工艺及理化测试技术方面的研发技术管理和行业冶金技术系统的技术管理工作,为我国航空材料、航空大型锻件实现国产化做出了很大贡献。退休后,被选聘为中国锻压协会航空材料成形委员会主任委员。

锻压 (Forging and Pressing) 是指利用锻压设备上的锤头、砧块或模具对金属坯料施力使其产生塑性变形,制成形状尺寸和组织性能合格的锻件的制造方法。锻压是航空制

造业的重要组成部分,属于材料工程热加工工艺范畴。

至今,我国航空材料和锻件的生产能力,已经能满足第三代军用飞机及其发动机的批量生产的需要,并为更先进的军用飞机和大型军、民用运输机的研发,以及航空产品的可持续发展奠定了良好的技术和物质基础。

造业的重要组成部分,属于材料工程热加工工艺范畴。

锻件在航空工业领域应用广泛,主要用于制造飞机、发动机承受交变载荷和集中载荷的关键零件和重要零件。如飞机机体中的框、梁、起落架、接头,发动机中的盘、轴、叶片、环等。所使用的金属材料主要是铝合金、钛合金、高温合金、超高强度合金结构钢、不锈钢等。锻件制成的零件重量约占飞机机体结构重量的 20% ~ 35% 和发动机结构重量的 30% ~ 45%,是决定飞机和发动机的性能、可靠性、寿命和经济性的重要因素之一。因此,各工业发达国家都十分重视发展航空锻压技术,以及与此相关的上游和下游产业链的技术研发和配套建设工作,重视航空锻件的研制和生产。我国航空锻压技术的发展与进步,紧紧伴随着共和国航空工业 58 年的成长壮大过程,在规划建设飞机、发动机制造工厂的同时,

相应地规划建设了与其相配套的材料和锻件生产能力,1956 年建立的航空材料研究所,是我国最早从事航空材料、热加工工艺(包括锻压技术)研发的专门机构。至今,我国航空材料和锻件的生产能力,已经能满足第三代军用飞机及其发动机的批量生产的需要,并为更先进的下一代军用飞机和大型军、民用运输机的研发,以及航空产品的可持续发展奠定了良好的技术和物质基础。

锻压先进制造技术应当实现的 2 项基本任务是:

(1) 满足航空零部件对锻件形状与几何尺寸的精准要求,其中飞机结构件的大型整体化趋势更是对锻件的锻压技术提出了新的挑战。

(2) 主动控制并赋予航空锻件具有优良的组织结构和性能。

新一代飞机、发动机的发展同航空材料及锻压技术的不断进步是相辅相成的:一方面,飞机、发动机的

技术进步,牵引并主导着包括航空材料、锻压等热加工工艺技术的发展方向,满足飞机、发动机日益严格的综合性能和结构设计要求,成为材料和锻压技术发展的驱动力;另一方面,航空材料、锻压技术本身的发展和不断完善,又推动并支撑着飞机、发动机技术的持续进步,使飞机、发动机更新换代应用新结构、新技术、新材料、新功能成为可能。没有先进的材料和制造技术,不可能研制生产出先进的航空产品,惟有建立在先进材料和制造技术基础上的产品设计方案,才能物化为现实的先进的飞机和发动机。航空材料和锻压技术,正是在“产品型号需求牵引”和“制造技术发展推动”二者相互激活且相互作用下才成其为先进制造技术的。

航空锻压技术的先进性,体现在对锻件生产全过程涉及的锻压工艺、锻压设备以及对锻件材料质量的控制等诸多方面,为飞机发动机提供优质、精密、高效、环保、低成本的锻件,是发展先进锻压技术追求的目标。

优质

“航空产品,质量第一”。相对于零部件的机械加工(冷工艺)而言,锻压属于热加工工艺,在质量控制上归属于特种工艺的监控范围。总结我国数10年来在材料、热加工工艺技术方面的经验与教训,我们把材料、热加工存在的冶金质量问题称为“内科病”,具有“隐患深、危害大、涉及面广、诊断难、处理问题周期长”等特点。用于制造飞机、发动机关键件和重要件的锻件,确保锻件优质是首要任务,否则,锻件生产便毫无意义。为此,必须对锻件生产全过程与质量相关的环节进行系统的质量控制。首先要确保用于航空锻件的原材料是优质的,这是生产优质锻件的基础。原材料应具有“三高”特性,即高纯净性(Purity)、高洁净性(Cleaness)、高均匀性

(Homogeneity)。“三高”特性牵引并推动着材料冶炼、加工、检测技术不断发展和进步,使材料科学与工程由于航空材料的特殊要求和推动变得日益完善。例如,航空发动机的核心部件——涡轮盘,从早期的铁基合金发展到镍基合金、粉末合金,对材料的“三高”特性规定愈益严格,从而带动着冶炼、加工、检测技术与装备的更新和现代化。GH4169合金(似Inconel 718合金)是一种广泛应用于推重比为8左右航空发动机涡轮盘的材料,为满足锻件对原材料的“三高”特性要求,对合金的杂质、夹杂物、痕迹元素、偏析以及晶粒度控制等都有严格的要求与限定,采用传统的双真空熔炼、铸锻工艺和质量控制手段,可以生产出符合质量要求的涡轮盘坯料。但对于更高推重比要求的航空发动机的涡轮盘材料,欲获得更高质量要求的坯料则难胜其

高致密度)→锭坯经热挤压成棒材(挤压比 $>6:1$,破碎脆性夹杂、细化晶粒组织)→棒材超声波检测一切割成涡轮盘锻件所需的坯料。

在原材料质量保证条件下,确保涡轮盘锻件质量还取决于发展与材料技术进步相适应的锻压新工艺、新技术、新设备,并对涡轮盘锻件的生产工艺过程实施精准的工艺质量控制,等温锻造工艺的完善和设备的更新有力地推动着涡轮盘锻件生产的现代化。坯料加热及锻造均在密闭的有保护气氛的真空室内进行,模具材料为TZM钼合金,模具温度与锻坯温度一致,金属成形是在等温条件下完成的。美国采用上述等温锻造工艺技术生产了数万件优质的涡轮盘锻件,在军、民用发动机上使用可靠,被认为是现阶段大批量生产优质高性能涡轮盘的一种先进可靠的工艺技术。我国航空材料冶金工作者



采用锻压工艺的发动机涡轮盘(组件)

负。因而一种能够确保达到坯料质量要求的粉末高温合金先进制造技术便应运而生。

粉末高温合金制坯过程是:预合金粉末制备(氩气雾化制粉AA粉,等离子旋转电极制粉PREP粉,为保证高的纯度对母合金、粉末筛分、去夹杂、除气均有严格规定)→粉末热等静压HIP固化成锭坯(提

结合国情及已经掌握的预研成果,研究开发出在大气条件下、采用铸造高温合金模具、控制变形过程的等温锻造技术,在万吨级液压机上成功地研制出FGH4095粉末高温合金涡轮盘锻件和FGH4096粉末高温合金全尺寸涡轮盘锻件试验件,为我国航空发动机高性能涡轮盘锻件的研制和生产探索出一条经济可行的工艺

技术路线。

精密

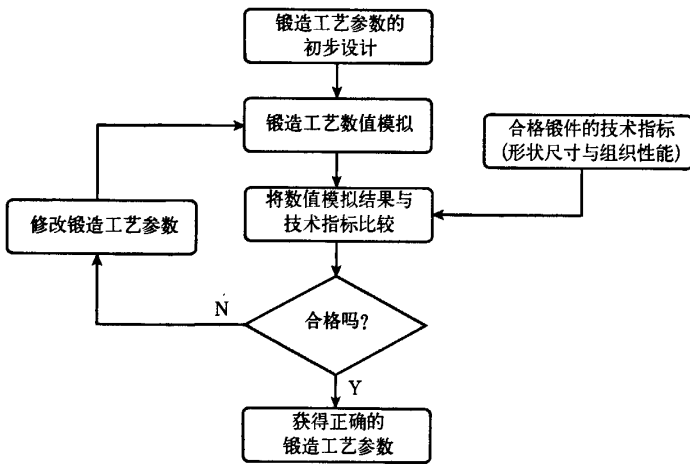
在保证锻件内部组织与性能的前提下,力求锻件的形状接近零件,大力发展净近成形工艺是先进锻压技术的主攻方向之一。

航空锻件除新型号飞机先锋批试制时选用一部分自由锻件外,一般都是采用模锻件,并以锻件加工余量的大小依次区分为粗模锻件、普通模锻件和精密模锻件。囿于锻压设备能力和工艺技术基础薄弱等条件的限制,我国航空锻件目前仍然是以粗模锻件和普通模锻件占多数,精密锻件仅在发动机叶片类锻件中工程应用。据统计,以整机锻件重量和整机锻件制成零件重量相比较,我国航空锻件的材料利用率约为15%~25%,其中大型锻件的材料利用率为10%~15%,环形锻件的材料利用率仅3%~10%。锻件“肥大头耳”,造成零件加工时大量的昂贵金属材料变

织性能可控,在锻压设备等各项硬件固有的条件下,实现锻件精化的主要技术途径依赖于软件开发。工业发达国家早在20世纪80~90年代便广泛应用数值模拟技术全面仿真航空锻件的研制生产过程,取得了很好的技术经济效益,以“模拟式设计”取代传统的“经验式设计”已成为必然的趋势。所谓“模拟式设计”方法,就是借助计算机数值模拟技术、应用成熟的锻件设计软件,或在此平台基础上针对需要开发和完善软件,如锻件三维CAD设计、锻造工艺设计CAPP、锻造坯料和中间毛坯优化设计CAO、锻模CAD/CAE/CAM等,对锻件热加工过程的各个环节进行数值仿真,获得锻件成形过程中的各种有用的技术信息,改进和优化预定的设计方案并付诸实施,达到锻件精化的目的和应有的效益。我国航空锻压科技工作者结合国情,在难变形高温合金锻件、高强高韧钛合金隔框锻件以及复杂型面环形件

代快以及对产品成本控制日趋严格等特点,航空锻件的生产与交付,发展高效与低成本技术是提升锻件竞争力的必由之路。所谓“高效与低成本技术”是指对锻件传统工艺技术的改性或利用学科交叉技术创新的新工艺、新技术、新设备。例如快速原型制造技术RPM与设备(如激光熔化沉积成形Lasform、喷射成形Osprey等);特种轧制技术与设备(楔横轧、辊锻等);超塑成形/扩散连接(SPF/DB)等。应用上述新工艺、新技术、新设备生产的制件,其组织与性能达到甚至优于传统工艺生产的锻件的水平,且实现了高效、短流程和降低成本的效果,是对传统工艺生产某些锻件方法的替代与挑战。

有必要指出的是即使是采用传统的锻压工艺,为追求降低锻件成本的目的,在工艺技术上仍然是有“计”可施的。例如:热模锻造(Hot-Die Forging)代替等温锻造,从节省模具、燃料费用中降低成本;空心轴类件以径向精锻代替普通模锻,从节省材料中获取成本效益。至于从节约资源、能源和环境保护等各个方面着手,降低锻件成本技术更是多方面的:(1)节约原材料或发展可以减少或取代Ni、Co等中国稀缺元素的新型合金材料;(2)采用少或无氧化节能加热技术;(3)提高模具寿命和模具与坯料的润滑技术;(4)金属废料如毛边、料头、切屑等的回收及合理利用;(5)减震降噪节能等新型锻压设备的推广应用,逐步改造或淘汰旧式的蒸汽-空气模锻锤等。



锻件计算机数字模拟程序

为切屑,锻件近表面的致密层不复存在,纤维组织被分割,影响和降低零件的力学性能和表面完整性。因此,主攻锻件精化不仅是个经济问题,而且是确保锻件组织性能所必须的。

锻件精化是考量锻压技术先进性的重要指标。围绕精确成形和组织

的研制生产中,运用“模拟式设计”方法改进和优化工艺方案获得成功并取得较好的成效,为推广锻件精化先进技术奠定了良好的基础。

高效与低成本技术

为适应航空产品批量少、更新换

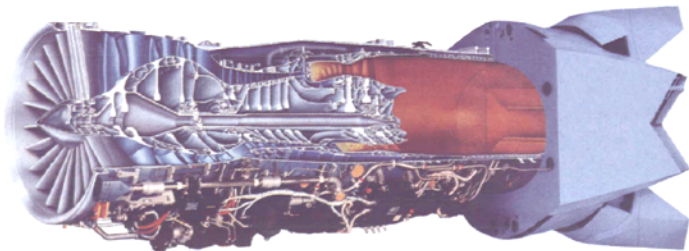
彰显国家综合实力

航空大型整体模锻件的生产能力和技术水平是彰显国家综合实力的重要标志之一,减轻飞行器的结构重量,增强结构的可靠性耐久性,缩短装备的制造周期和降低制造成本,是飞行器设计时采用大型整体结构件的主要原因,但能否实现并获得大

型整体结构件又取决于大型整体模锻件的有与无。大型模锻液压机是生产航空大型整体模锻件,发展大型军事装备和大型民用飞机的基础设备。纳粹德国在第二次世界大战前就建成了70MN、3台150MN和1台300MN模锻水压机,用于生产大型铝合金模锻件,为其侵略战争中争得空中优势起到了关键作用。而当时同盟国中仅英国有1台120MN模锻水压机,其他国家均无万吨级模锻水压机。美国在二战期间作为非常措施曾建造了百余台中小型模锻设备,其中最大的仅为50MN模锻水压机,由于战时大型模锻件供应不足,B-17、B-25、B-29轰炸机连续几年生产完不成任务,在二战期间因此而吃了亏。二战之后,美、苏2个超级大国意识到大型模锻液压机对其国防建设尤其是发展航空工业的重要战略作用,以战争赔偿为名,分别从德国拆走万吨级模锻水压机并将水压机设计师带回为其服务。至1955年美国已先后建成了100MN和162MN模锻水压机各1台,315MN和450MN模锻水压机各2台,前苏联也在1959年先后建成了300MN模锻水压机3台和750MN模锻水压机2台,法国于1976年从苏联引进了1台650MN模锻水压机,近期又建成了1台400MN模锻水压机。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”飞机提供了有力的支撑,使其在航空航天产品方面居于世界前列,在国际政治斗争和军事斗争中处于拥有战略武器装备的明显优势,彰显其综合国力和科技水平。

20世纪60年代初期,我国实施

了以发展重大技术装备的“6111”工程,并于1974年建成了以生产航空大型有色金属模锻件为主要目的



大量应用钛合金和高温合金锻件的美F119发动机

300MN模锻水压机。改革开放以来30年以来,随着我国经济发展和国家安全的需要,特别是发展航空航天产品及其他重大技术装备方面,对大型精密模锻设备的需求更为迫切。结合我国30年来在技术与物质方面积聚起来的综合实力,在不久的将来,我国将建成技术含量高、居世界顶级吨位的800MN模锻液压机。该压机将面向国内和国际2个市场,研发和生产大型、整体、优质、精密的航空模锻件和其他大型模锻件。

展望与期待

“发展航空,材料先行”这是航空工业发展历史经验的总结。金属材料一制成锻件→再制成飞机、发动机优质可靠的零部件,靠的是先进的锻压制造技术。由于历史原因,我国当前的航空锻压事业仍旧保留着航空工业系统内、外都从事航空锻件研发和生产的格局,“部内锻件和部外锻件”的称谓沿用至今,“口内、口外”重复研制,有限资源得不到充分有效的利用。在我国航空工业体制由计划经济向市场经济彻底转变的今天,在中国航空工业集团公司全力实施“两融、三新、五化、万亿”战略目标的大好形势下,整合全社会从事航空锻压的资源并加以合理配置,实行更大范围的专业化整合显得更为迫切。当我们的材料、锻压预研成果能够顺利地转化为企业的生产力时,当跨部

门的“产、学、研”能够形成有实用价值的创新成果或专利时,我们的航空锻压先进制造技术就能够为飞机、发

动机的更新换代做出更大的贡献。“为了中国”,我们应当期待这一天早日到来。

结束语

锻压是航空制造业的重要组成部分,属于航空材料工程热加工工艺范畴。锻件应广泛应用于飞机、发动机,用于制作关键件或重要件,对飞机、发动机的性能、可靠性和经济性影响重大。因此,采用先进的锻压制造技术(新工艺、新技术、新设备),追求锻件的优质、精密、高效和低成本,以及有利于环境保护的生产方式,是航空锻压制造技术研发的基本方向。

大型整体模锻件是实现飞机结构整体化、减轻结构重量、增强结构的可靠性耐久性和缩短产品研制周期的重要条件。世界工业强国都十分重视航空大型模锻件生产条件的建设,领先于我国30~50年建成了450MN、650MN、750MN模锻液压机,生产了技术含量居世界领先地位的铝合金、钛合金、高温合金和合金钢优质大型模锻件。我国作为发展中国家,历经半个多世纪的发展,已经具备了建设世界顶级吨位且技术含量高的800MN模锻液压机的技术与物质基础,该模锻液压机的建成与投产,必将大大提升我国航空大型模锻件的研发和生产能力,推动我国航空锻压制造技术跻身于世界强者行列。(责编 仝昉)