

锻造/冲压/钣金 Metal Forming 篇▶▶

航空模锻、大锻件技术发展与思考

■ 航空工业模锻装备应用及发展趋势

曾凡昌

■ 国内外大锻件制造发展与对比

郭会光

■ 汽车杆类件热加工工艺现状及展望

邱绍虎

■ 500MN大吨位垂直热挤压钢管机组

刘强

新年新气象，2014《金属加工（热加工）》杂志全新改版，但关注行业形势走向，打造优质交流平台，报道先进的锻造/冲压/钣金成形技术与装备的栏目宗旨没有变，本期特邀行业专家畅谈行业发展趋势，可谓篇篇精品，值得推荐与珍藏。



曾凡昌：研究员、教授、国家科技部“科技评估中心”专家、国防科工局“国防科技工业精密塑性成形技术研究应用中心”专家委员会专家、国家商务部国际招标专家库专家。现任中国锻压协会航材成形委员会主任委员。



航空工业模锻装备的应用及其发展趋势

中国锻压协会航空材料成形委员会主任委员、行业知名专家 曾凡昌

航空工业历来重视材料、锻件及其技术装备的研究与发展，重要原因是基于它们是推动航空器发展的不可或缺的技术与物质基础之一。

自1903年12月17日美国莱特兄弟首次把有动力、可操纵和可持续飞行的飞机送上天空，迄今百余年以来，军用飞机发展到第五代服役，民用飞机发展到A380、A350和B777、B787等投入运营，标志着航空科学技术获得了巨大的成功，揭开了人类航空事业的新纪元。同时，标志着包括航空材料、锻件及其技术装备在内的、与航空工业产业链相关的工业领域都获得了巨大的技术进步。

航空工业是驱动和牵引模锻装备向大型、精密、专用和智能化方向发展的动力源，具有上述功能的模锻装备才能为飞机机体和发动机提供由先进材料制成的大型、整体、优质、精密的模锻件，如飞机机体的

框、梁、接头、起落架、桨毂壳体等结构件，发动机的压气机盘（叶盘）、涡轮盘（叶盘）、机匣壳体、轴和某些变形合金叶片等。

生产航空锻件的模锻装备包括锻锤、机械压力机、液压机和为某些特种锻造所需的专用锻压设备，以及辗环机等。大型模锻件用于制造飞机机体和发动机的关键零件和重要零件，其所必须的模锻装备同飞机发动机的更新换代存在互相依存和互为促进的因果关系。从这个意义上说，大半个世纪以来，模锻装备吨位（压力）的增大和功能的不断完善与进步，才能使由新型材料制成的航空锻件为飞机的更新换代成为现实并做出了应有的贡献。

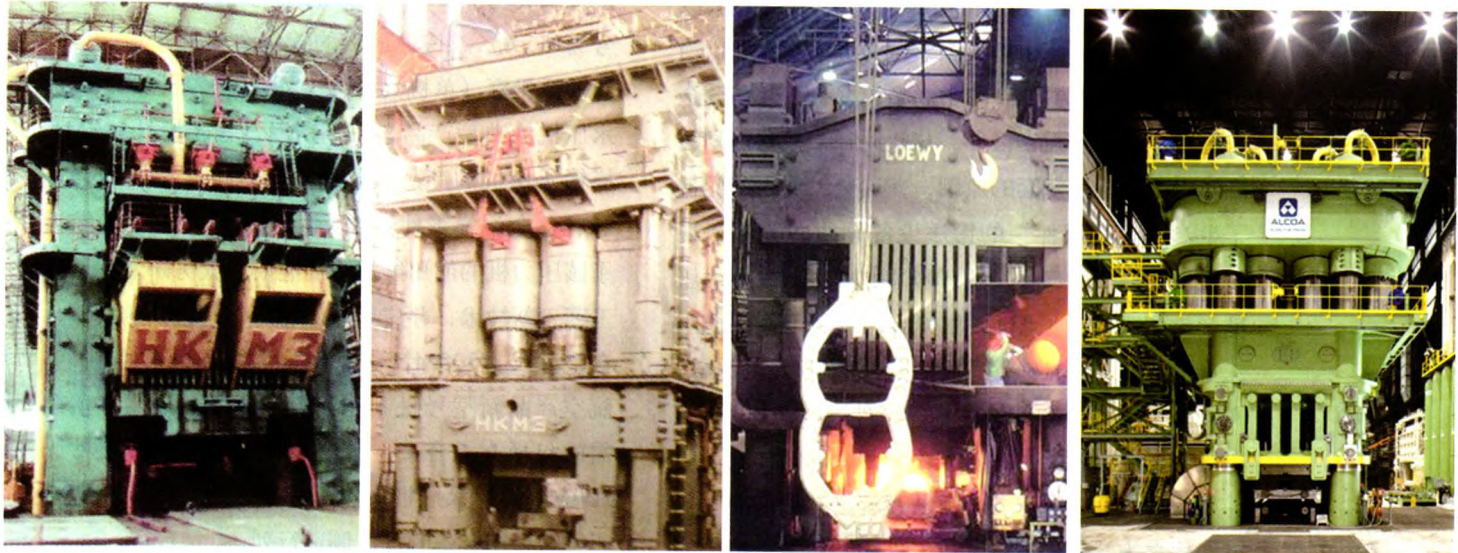
国外重型模锻液压机的发展历史回顾

第二次世界大战前，德国因战争需要于1934年建成了70MN模锻水压机用于生产铝合金航空模锻件，1938~1944年间又相继建造了三台150MN和一台300MN模锻水压机，用于生产大型铝合金航空模锻件，为发挥空战优势起到了很大作用。当时同盟国中仅英国拥有一台120MN模锻水压机，其他国家均无万吨级模锻水压机。美国在第二次世界大战期间，作为战争非常措施，曾建造了百余台中小型模锻和挤压水压机，其中最大的仅为50MN模锻水压机，用于生产B-17、B-25、B-29轰炸机铝合金锻件，由于缺乏大型模锻水压机，战时大型模锻件供应不足，连续几年飞机生产完不成任务，

在二次世界大战期间因此而吃了亏。

第二次世界大战结束后，美国、前苏联两个超级大国意识到重型模锻液压机对其国防建设，尤其是航空工业建设的重要战略作用，作为战争赔偿物资，分别从德国拆走万吨级模锻水压机（苏联当时拆走了德国300MN模锻水压机并安装于乌拉尔铝厂）并俘获了德国的水压机设计师回国为其服务。到1955年美国已先后建成了100MN和160MN模锻水压机各一台，315MN和450MN模锻水压机各2台。其中450MN模锻水压机一台装于克利夫兰的美国铝公司(ALCOA)，而另一台则装于马萨诸塞州的Wyman Gordon锻造公司。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。其中750MN模锻水压机一台装于古比雪夫（萨玛拉）铝厂，另一台则装于乌拉尔的上萨而达冶金生产联合厂(Б C M И O)。前苏联并于20世纪70年代为法国制造完成一台650MN的多向模锻水压机，并于1976~1977年安装于法国AUBERT&DUVAL公司投入使用(见图1a、b、c、d)。

总体来看，到20世纪末为止，全世界共有万吨以上模锻水压机30余台，美国、前苏联各占10余台，约为总台数和总吨位的70%左右。以上大型锻压装备所生产的大型整体模锻件和优质原材料，使美国、俄国、法国在航宇产品方面迄今仍位居世界前列，在国际政治斗争和军事斗争中处于拥有战略武器装备的优势，在民用航空方面造就了西方国家



(a) 前苏联750MN模锻压力机 (b) 法国650MN模锻压力机 (c) 美国450MN模锻压力机 (d) 美国450MN模锻压力机

图 1

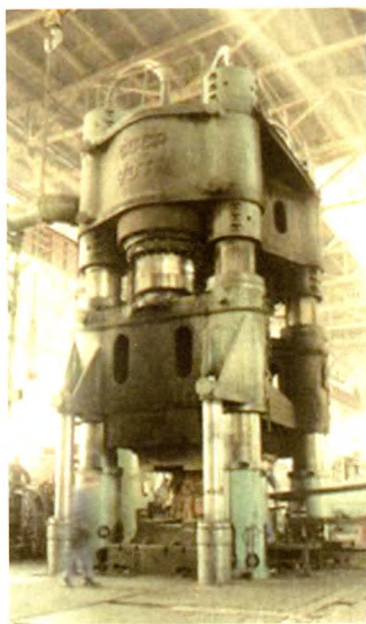


图2 100MN有色金属模锻液压机



图3 300MN有色金属模锻水压机

雄居大型飞机“巨无霸”的地位。

我国航空模锻装备发展历史回顾

我国航空工业从1951年建立到如今已经走过了62个春秋。基于历史条件，航空工业从无到有、从小到大，经历了修理、制造零件→仿制→改进、改型→自行设计研制航空产品的漫长发展道路。在锻件生产及锻压设备方面，在20世纪60年代前，按照前苏联模式在航空工业内部的飞机和发动机主机厂配备了只能生产中小型锻件的锻压设备，如5t及其以下的模锻锤、1~5t自由锻锤，以及40MN及其以下的热模锻机械压力机、摩擦压力机，用以生产当时称之为“部内锻件”的中小型铝合金锻件和合金结构钢、不锈钢强钢锻件。与此同时，按照计划经济的指令和系统配套的原则，在冶金工业内部配备了生产“大型锻件”的锻压设备，如1960年在现东北轻合金加工厂投产的50MN和100MN模锻水压机（前苏联产，见图2）和其后在机械工业部德阳二重投产的10t和16t模锻锤，用以生产第二代军用飞机的大型铝合金锻件和钢制锻件，以及Fe-Ni基高温合金盘类锻件。在“条块分割、部门林立”的计划经济时期，航空工业将从系统之外采购的大型锻件称之为“部外锻件”或“外购锻件”。按照部门分工，锻压装备一律由机械工业部门沿袭前苏联图样设计制造，清一色的蒸汽-空气有砧座模锻锤

和随后发展起来的25吨-米至100吨-米无砧座对击锤成为20世纪后半叶生产航空大型锻件的主力设备。值得铭记的史实是：在前苏联撕毁合同、撤走专家的“困难时期”，为应对国际形势斗争的需要，维系军用飞机大型锻件的生产供应，由时任机械部副部长沈鸿和三机部副部长刘鼎共同决策，在我国自行设计的安装于上海重型机器厂的第一台120MN自由锻水压机上开展钢制大型模锻件的试制生产，先后完成多个机型数以万件模锻件的应急供应。与此同时，在马鞍山车轮轮箍厂的80MN水压机生产线和轮箍生产线上，先后完成多个发动机型号数十万件盘类件和环形件的应急供应，为航空装备的发展做出了历史性的贡献。

结合“三线建设”的历史背景和试制航空航天等军事装备的需要，我国第一台由中国一重设计制造的300MN有色金属模锻水压机，自“6111工程立项”，历经15年于1974年在西南铝加工厂建成投产（见图3）。该压力机主要用于模压各种铝和铝合金模制品，模锻大型飞机、飞行器和导弹的重要零件，具有工作行程大、工作台面大（10m×3.3m）等特点，适合于模锻大、长形零件，最大可压制投影面积为1m²的模锻件。当时，牵引该压力机需求的大型飞机是我国于1959年引进的原苏联50年代初期研制成功、1958年停产的图-16轰炸机（我国型号为H-6）。该机最大的铝合金模锻件——中外翼前后梁框（单机共4件），即为研制300MN模锻水压机的典型产品之一。所以，当年设计300MN模锻水压机的产品服务对象是定位于铝及铝合金等有色金属模锻件。西南铝加工厂在成功地掌握了该压力机的使用维护特性之后，大力研发锻压新工艺、新技术，并应用于新材料、新锻件的试制，在我国仅有300MN模锻水压机的有限条件下，为航空产品新型号研制和其他工业产品提供了所急需的包括高温合金、钛合金材料的试制批锻件。300MN模锻水压机的建成投产，标志着我国迈入了重型模锻装备的设计制造行列。

关于在我国建设一台与美国、原苏联最大模锻液压机吨位相当的重型模锻液压机的问题，在国

家有关工业部门已经议论了约30年。其间，在1975年、1977年和1986年还曾得到中央领导同志和国务院有关部委的批示或批准立项。如1975年10月6日，国家计委以《关于建造大型模锻水压机基地的复文》批准立项建设650MN黑色金属模锻液压机，原一机部、三机部及其下属的有关企事业单位围绕大型模锻水压机的建设问题做了许多实际工作，在原一机部德阳二重还设计制造了一台1：10的65MN模拟样机。后因国家转入国民经济调整、改革、整顿、提高时期，大规模压缩基本建设投资，该建设项目于1983年停止实施。

应当指出，在关于发展我国大型模锻装备这一问题上，航空、机械和冶金工业的广大科技人员，从国家的长远利益和可持续发展的需要出发，几十年来为办成这件带有战略意义的大事献计献策，翘首以待。时至今日，我国在政治、经济、军事和科技等方面都取得了历史性的巨大成就，同时又面临着新形势下进一步发展国家综合实力和加强国防建设的新任务。大型飞机研制已列入《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006~2020年）》重大专项。两院院士师昌绪先生审时度势，强调指出“研发飞机大型整体优质锻件的锻压装置必须立足国内”，于是在2003年1月24日建议中国工程院列一个咨询项目课题。师院士作为咨询课题组长，组织各方专家30余人，在中国锻压协会协助下历时一年就项目的必要性、可行性及实施方案进行了多

次论证，最后决定建议国家批准立项制造一台世界上最大的8万t锻压机。国家发改委于2007年11月批准立项，800MN模锻液压机在中国第二重型机械集团公司和参研团队的合力攻关下，已于2013年4月10日正式投产（见图4）。800MN模锻液压机是“国之重器”，是我国工业实力的重要标志和综合国力的象征。中国二重自主设计、制造、安装的800MN模锻液压机是目前世界上规模大、技术先进、锻造能力强的模锻设备，压力机总高约42m，总重约22 000t，其中单件重量在75t以上的零件68件。压力机外形尺寸、整体重量和最大单件重量均为世界之首。800MN模锻液压机采用世界先进操作控制技术，可在800MN压力内任意吨位无级调控实施锻造，最大模锻压制力可达1000MN，压制时同步精度<0.01mm/m，其同步精度高、抗偏载能力强，可以实现无级调压、调速。800MN大型模锻液压机的建成投产，攻克了我国大型模锻装备极限制造的技术难题，从此将我国高端重大装备的制造能力提升到国际一流水平。800MN大型模锻液压机的建成投产，打破了制约我国航空航天和装备制造业发展的瓶颈，对改变我国大型模锻件依赖进口，实现大型模锻产品自主化、国产化，变锻造大国为锻造强国均具有十分重要的战略意义。

值得指出的是，在发展重型模锻装备的技术路线上，以清华大学为主与有关单位合作，创新了一种新的压力机设计思想和新的压力机机械本体结构

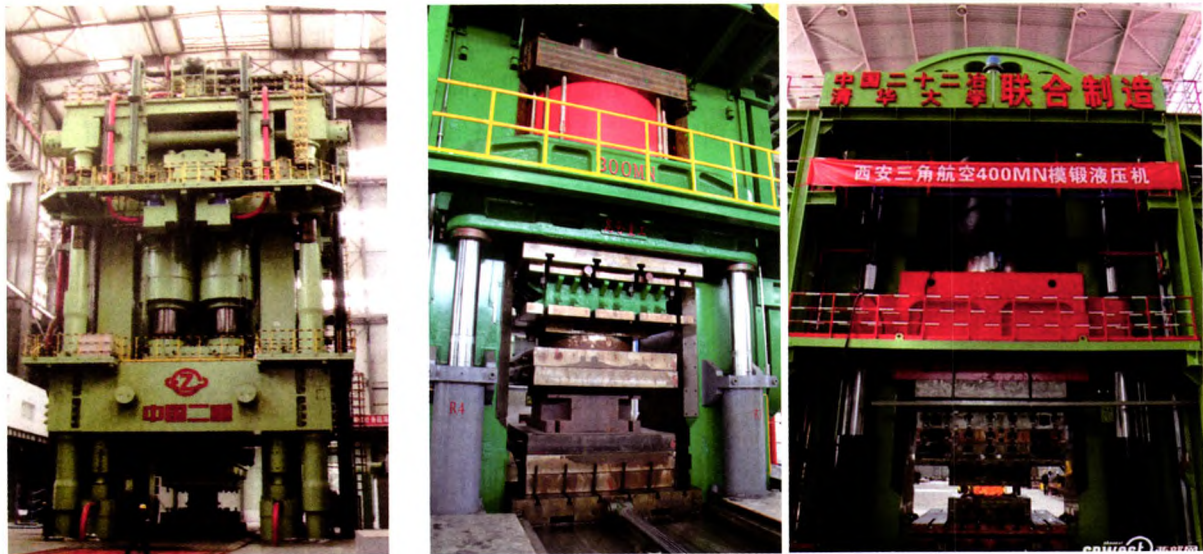


图4 中国800MN模锻液压机

(a) 300MN模锻液压机

(b) 400MN模锻液压机

图 5

形式,提出了“钢丝缠绕预应力板框”机架的设计方案,板框的立柱和上下半圆梁剖分为多块,以高强度扁钢丝将其缠绕为一个整体并使其处于压应力保护状态,极大地阻断了裂缝扩展的机会,使机架的抗疲劳性能和抗过载能力显著提高。压力机的活动横梁也剖分为多块施以钢丝缠绕预应力组合成一体。应用这种新的设计思想和新的结构形式成功建造的300MN和400MN模锻液压机,分别在苏州昆仑重型装备制造有限公司和西安三角航空科技有限公司投产(见图5)。

模锻装备发展趋势浅析

模锻压力机是生产模锻件的主要设备,压力机由机械本体、液压传动、检测与控制、操作系统等部分组成,必须满足航空锻件既“成形可控”又“组织性能可控”的基本要求。

模锻压力机吨位的大小取决于该设备所制锻件的材料变形抗力、锻件几何尺寸、形状特征、精密程度、投影面积,以及工艺水平等主要因素。飞机机体锻件大量应用高强铝合金、钛合金和超高强度合金结构钢,航空发动机锻件材料则以高温合金和钛合金为主,都属于变形温度范围窄、变形抗力大的难变形合金材料;轻量化和“为节省每1g质量而奋斗”是航空航天器结构设计者所追求的永恒主题,采用大型整体模锻件代替由多个零件组成的机械连接件和焊接件,可以有效减轻飞行器质量,实现结构减重和提高产品的可靠性。美国F-22战斗机的Ti6Al4V钛合金模锻件的投影面积达5.53m²、空客A380飞机整体翼梁由新型铝合金7085制成,堪称世界大型整体铝合金模锻件之最(见图6);

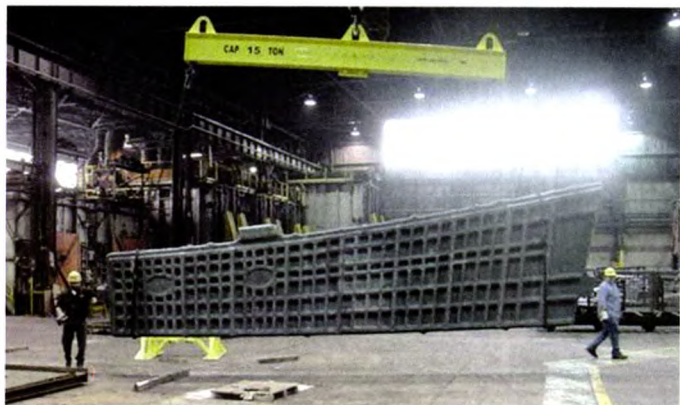


图6 A380飞机7085铝合金制大型整体模锻件

航空模锻件形状呈多维方向发展趋势,精密程度要求趋高,以及锻件生产中力求优质、高效、节能环保和低成本等因素,都会对模锻装备的吨位、结构、技术参数和压机功能提出相应的规定及技术要求。

针对国情,结合现实,对我国发展航空锻压装备如何形成“合力”和“由大变强”,有几点浅见供讨论。

(1) 从事航空锻件研发和生产的锻造企业即锻压设备的使用方,除必须谙熟并掌握锻件所用材料的生产工艺、材料变形特性及其与组织性能之间的规律关系外,还必须熟悉锻压设备的结构、主要技术规格,尤其是掌握锻压设备的使用性能参数或使用特性,以便正确地设计锻件的锻压工艺过程,生产出价廉物美的优质锻件,满足飞机和发动机制造商的需求。同样,作为锻压设备的设计制造供应方,也必须了解并掌握锻件材料和模锻工艺同设备性能及其各项技术参数之间的因果关系,如设备载荷或能量、强度与刚度、工作行程速度、精度和抗偏载能力等与所要求的锻压工艺、锻件质量、生产效率等的相符合性。只有构建起“做好设备”和“用好设备”两者间的利益共同体关系,改变我国两者之间目前实际存在的“分而治之”现象,加强材料制造-锻件制造-模锻设备制造-锻件用户企业之间的技术合作交流,着力落实和创新“产、学、研、用”合力攻关的措施,才是推动上述各方面相得益彰、“变大为强”的必由之路。最近十年我国从德国进口了若干先进的锻压装备(见图7),对设备供应商提供设备的终验收规定了“完成给定锻件的合格生产”的要求并如期实现,即所谓“交钥



图7 3.55万t离合器式螺旋压力机

匙工程”。我们应当由此得到启迪和深思。

(2) 同步发展模锻装备(硬件)和模锻工艺技术(软件),是技术创新的有效途径。

众所周知,20世纪中叶以来发展起来的等温锻造、等温超塑性锻造、“差温锻造”(也有称之为“近等温锻造”)等锻压工艺技术,其起因或因材料越来越难变形,或因锻件技术要求组织均匀一致性,更有现实锻压设备能力不足“小设备干大活”使然等。这种锻压工艺技术除了对锻件材料的“最佳可变形性”、锻压用模具材料及其加热系统、防护润滑等技术要研究更新外,更对锻压设备的结构和使用性能参数提出了新的相适应性的硬性规定。于是,一种新的模锻工艺和一种新的模锻设备,于20世纪70~80年代在美国陆续建成了5台50~150MN等温锻造工艺专用设备(见图8)。迄今,为美国的军用、民用航空发动机生产了数万件变形高温合金和粉末高温合金盘类锻件。这种专用锻造设备的系统集成和智能化控制,以及所产锻件精度之高和冶金质量近乎“零缺陷”,将锻压设备技术和锻造工艺技术发展到了新的阶段。我国的模锻设备工作者和模锻工艺从业者,应当融合彼此之长,弥补彼此之短,合力推动我国的锻造事业做强。

(3) 做强锻造企业,除要拥有先进的锻压设备及其完善、协调配套的辅助设施外,人才(技术的、管理的)素质及职业操守显得尤为重要,而这两者恰恰是我们锻造企业的软肋。

我国已经能够设计制造世界最大吨位的各种类型锻压机的机械部件及其总成,但关键核心技术如液压系统、电气与控制系统仍不能自给;锻造操作机或机械手智能化程度及其同主锻压机同步协调性不佳;锻造和热处理加热炉精度低,加热炉的控制技术、仪器仪表、燃烧系统、炉体结构及其炉衬耐火材料等有待改进和提高,……。这是一个系统工程集成优化和同步发展的问题,也是形成最优化生产力的必须条件,只抓某个大型锻压设备居世界第一而不言其他,是成就不了锻造强国梦的。

在软件方面,我们在材料成形与控制学科领域不重视基础理论研究和应用研究,缺乏激励机制,形成不了系统的材料精确成形和组织性能可控的工艺技术(专利)用于生产实践中。专业人才的缺失



图8 100MN等温锻造工艺专用设备

及趋利性流动,以及职业技术教育乏力导致生产一线熟练工人奇缺,对作为创新主体的锻造企业而言是极大的危机。针对时弊,增加高等院校高端人才培养数量并改进培养方式,大力发展职业技术学院教育并提高毕业生的待遇,使锻造及其所需的相关专业后继有人,方可在软实力方面逐渐逼近强国行列。

(4) 航空模锻装备面临“3D打印设备和制造技术”的挑战。

近几年出现的“3D打印技术”被用于飞机钛合金大型整体关键构件激光成形技术上。据称,其所制成构件的几何形状和组织性能,可与传统的模锻装备所锻造的大型模锻件媲美。3D打印这一崭新的技术是与产品创新紧密相关的,对传统制造业可谓是一次革命性的挑战。就航空锻件的生产而言,3D打印技术已有的成果和应用实例,表明这一新技术新设备能为航空锻件(构件)的制造另辟捷径,较之传统制造方法在技术经济综合性价比方面具有明显的优势,其潜在的生命力和产业化前景不可小视。但是,就这一崭新技术从构想、试验、验证到工程应用直至实现产业化,毕竟还需要一个再认识、再实践、再完善的过程。目前,3D打印设备在构件的打印精度、设备的可靠性及设备核心零部件如激光器的安全可靠,以及所制构件用的金属粉末等,都还存在需要研究、完善和提高的课题。从这个意义上说,3D打印技术取代传统的模锻装备批量生产大型航空锻件为时尚早,但催促传统制造技术向极致方向发展并提升其竞争力,不失为一股强大的正能量。MW (20131017)