

# 关于航空叶片锻造工艺及其设备 技术改造的建议

北京航空材料研究所 王乐安

本文针对我国叶片锻造技术不能满足现代航空发动机生产要求的现状,建议从设备和工艺两个方面对叶片锻造技术进行改造。已损坏的热模锻压力机用新型设备取代;还能正常使用的热模锻压力机,换上新型模座,采用吻合板精锻法进行叶片精锻。该原则同样也适用于汽车和拖拉机零件及汽轮发电机叶片的锻造技术改造。

## Proposals Concerning the Technology Reform of Forging Process and Its Equipments for Jet Engine Blades

Wang Lean  
(Beijing Institute of Aeronautical Materials)

The blade forging technology which can not meet the requirements of the production for modern jet engine in our country is proposed to have a reform both at equipments and process. The damaged presses of hot die forging should be superseded by the modern presses; the presses of hot die forging which have been put in to the service normally should have new type die holders, and to forge the precision blades by using the method of precision forging with kiss plates. This principle is suited to the forging technology reform of automobile parts, tractor parts and turbogenerator blades also.

### 引 言

每台现代航空发动机均有数千件在高温和高应力条件下工作、形状复杂、冷和热加工困难的叶片,其加工工时往往占整台发动机总工时的三分之一,是发动机生产中的关键之一。为提高叶片质量和降低成本,国外从50年代开始发展叶片精锻技术,并逐步取代了叶片普通模锻工艺。在现代发动机中,叶片精锻件已占锻造叶片的80~90%,材料利用率已从50年代的20~30%提高到70%,切削加工量减少至原来的 $1/5 \sim 1/6$ ,中小型叶片精锻件的叶身型面单面余量减小到0.15~0.30mm(去除污染层的需要量)。经化铣和光饰后,不但叶身型面、叶根和叶冠的内缘板面不需要再机械加工,就连中间阻尼凸台也无需再机械加工。因此,叶片精锻件保持了流线的连续性,改善了叶片的抗疲劳性能和抗应力腐蚀性能;降低了成本;缩短了生产周期。

然而,三十多年来,我国叶片锻造基本上还是沿用苏联50年代的普通模锻法在40年代结构的热模锻压力机上进行,所生产的叶片不但材料利用率低、机械加工工时多和成本高,而且质量也较低,与国外叶片精锻技术相比,其差距甚大,已不能满足航空生产及新机研制的需要。建议在尽可能少花钱的条件下,从锻造工艺及其设备两个方面着手,将我国航空叶片的锻造技术尽快地改造为适应精锻或半精锻的要求。

### 一、锻造叶片的主要设备

锻造航空叶片的主要设备是机械(曲柄)压力机和螺旋压力机。机械压力机包括偏心轴式、楔块传动式和扼架式机械压力机,国内常称为热模锻压力机;螺旋压力机包括摩擦传动、电直接传动和液压传动螺旋压力机。这两种设备各有优缺点,但都适于模锻和精锻叶片,并且都正在使用,又都有新发展,已形成互相促进和互相补充的局面。目前,美、日和我国主要使用机械压力机锻造叶片,西欧各国则主要使用螺旋压力机。

### 二、螺旋和机械压力机精锻的原理

螺旋压力机是能量限定机器,滑块无固定下死点,只要能量足够,每次打击都可将模座(或模具)打靠(图1A),压力机的刚性只影响载荷和能量特征,不影响锻件厚度公差,故可锻出厚度一致的锻件。但若控制不当,设备给出能量过大,多余能量自动由模座(或模具)和机架吸收,并转化为该系统的附加载荷和变形,轻者造成能量损耗和噪音污染,重者可造成模具乃至机架开裂;若设备给出的能量不足,则锻件厚度随毛坯情况及工艺参数而有变化,锻件厚度就不一致了。因此,合理地使用螺旋压力机进行精锻或模锻,都必须根据锻件的需要进行能量控制。所以,用于叶片精锻的螺旋压力机应设有能量预选装置,

即螺旋压力机上的精锻是靠限定机器给出的能量稍大于锻件所需要的能量而实现的。

理论上, 曲柄压力机为行程限定机器, 即人们常说的“滑块有固定下死点”, 其传统的锻造方法是用调节模具垫板厚度的方法来控制锻件厚度 (图 1B)。然而, 由于毛坯尺寸、毛坯和模具温度、润滑条件以及操作速度等因素的变化, 使锻造载荷也随之变化, 导致了压力机机架及传动系统弹性变形的变化, 于是引起了锻件厚度的变化, 这就是在热模锻压力机上用传统的工艺方法锻造叶片时锻件厚度变化的原因。这种传统的工艺方法锻造的锻件厚度变化往往达 1mm 以上, 不能满足现代叶片制造技术的要求。

分析曲柄压力机的实际工作情况发现, 所谓“滑块有固定下死点”只是理论上的, 或者空载时是对的, 即在研究曲柄-连杆-滑块机构的运动学时, 把压力机的传动机构、机架及其他承力构件都看成理想刚体时是对的。但实际上压力机即使刚性很大也不是刚体, 而是弹性体, 实际锻造时压力机的运动学与力学特性同时在起作用。锻造载荷影响曲柄滑块机构的运动特性, 即锻造力使机床弹性变形 (机

身被拉长、曲轴产生挠度、连杆和滑块被压缩), 使压力机的实际闭合高度比理论值增大, 也就是说, 滑块的实际下死点比理论点上移, 其位移量随锻造载荷而变。由于每个锻件的毛坯尺寸和温度、润滑条件及操作速度等不同, 所需载荷就不同, 使滑块下死点的上移量也不同 (图 2), 因此, 每个锻件的厚度也就不同了。然而, 曲柄压力机有另一个使用特性: 在压力机能量允许范围内, 锻件变形需要多少能量, 压力机就自动供给多少, 绝对不多给一点。所给出的这些能量, 随锻件变形过程全部转化为锻件变形所需要的功、机床及模具系统等弹性变形所需要的功, 其值等于锻造载荷曲线与滑块位移线所包容的面积 (图 3)。根据这一原理, 在上下模座上加一对吻合板, 人为地使压力机滑块的下死点上移, 并使其上移量比锻造载荷造成的上移量稍大, 这样就十分近似地固定了滑块的下死点 (图 1C), 然后以吻合面为基准调节模具, 所锻锻件厚度就一致了, 即曲柄压力机是通过控制滑块下死点的位置来固定压力机载荷稍大于锻件需要的载荷实现精锻的。

由上述可知, 螺旋压力机是通过控制设备能量稍大于

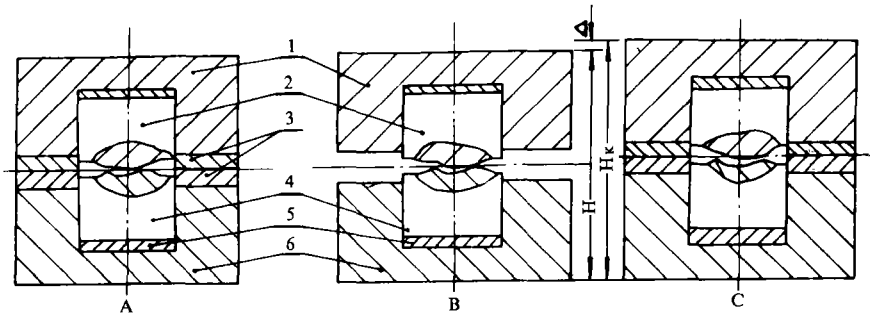


图 1 两种模锻方法及模座结构的比较(示意图)

A—螺旋压力机精密模锻; B—热模锻压力机普通模锻;

C—热模锻压力机精密模锻

1—上模座; 2—上模; 3—吻合板; 4—下模; 5—模具垫板; 6—下模座

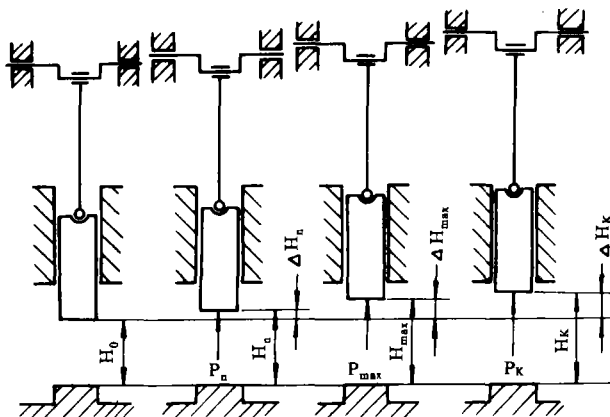


图 2 曲柄压力机滑块下死点位置与载荷的关系

$P_n$ —锻件  $n$  的载荷;  $P_{max}$ —锻件最大载荷;

$P_K$ —装吻合板时的载荷;

$H_0$ 、 $H_n$ 、 $H_{max}$  和  $H_K$ —分别为空载,

$P_n$ 、 $P_{max}$  和  $P_K$  载荷下的压力机闭合高度

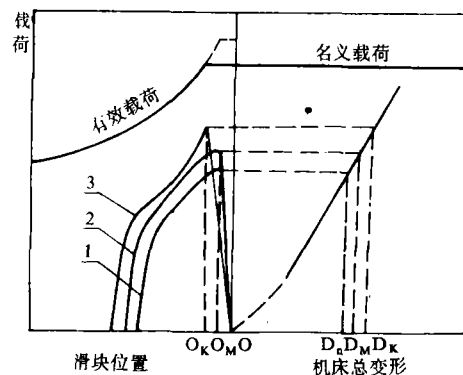


图 3 曲柄压力机的锻造载荷和滑块位置与机床变形的关系

1、2 和 3—分别为毛坯  $n$ 、最大毛坯

和装吻合板时的载荷曲线;

O、 $O_M$  和  $O_K$ —分别为理论、最大毛坯和

装吻合板时滑块下死点位置

锻件所需能量来控制设备最大载荷，而曲柄压力机则是通过控制设备载荷稍大于锻造载荷来控制设备能量而实现精锻的；此二种设备的精锻方法其本质相同，都是通过控制能量或载荷过盈而实现精锻的，其过盈部分均附加在机床及工艺装备上。

三、螺旋与机械压力机的比较

由于螺旋与机械压力机的动力学特性不同，因此，不应按其名义载荷进行比较，而应按其锻造的实际力、能进行比较。一般来讲，相同规格的螺旋压力机的实际锻造载荷约为曲柄压力机的 1.3 倍，例如，20000kN 的曲柄压力机与 16000kN 的螺旋压力机的承载能力大体相当。现从使用角度对两种设备比较于表 1。由表 1 可知，此二设备各有优缺点，一般来讲，对于 63000kN 以上的大型设备，由于不要求太多的打击次数，螺旋压力机的优势开始显示出来。而对于航空叶片锻造用 10000~40000kN 压力机，此二种设备大体相当，究竟选用哪种设备，应根据工厂具体条件综合比较表 1 所列各项内容；此外，还应考虑工厂工程技术人员和工人对哪种设备最熟悉和最有使用经验。

表 1 螺旋与机械压力机使用性能比较

项 目	螺旋压力机	机械压力机
价格	1	1.3
每分钟行程数	1	3~5
抗偏心载荷能力	差	好
打击速度	高	低
生产效率	低	高
机床刚性	小	大
抗错移能力	差	好
锻件厚度公差	采用“吻合板 锻造法”二者相当	
模具调节时间		
加压过程中锻件与模具接触时间	短	长
实现机械化与自动化的难易程度	难	易
维修工作量	大	小

四、国内螺旋和机械压力机使用及研制状况

沈发、成发和西发公司及新艺机械厂等四家航空叶片主要锻造厂都分别配备有 16000~40000kN 的热模锻压力机共数十台，价值数千万元，现在绝大多数都在正常用于叶片锻造；西发公司还有一套 4000~40000kN 的螺旋压力机，但尚未投入使用；天津机车车辆厂也用热模锻压力机模锻机车内燃机叶片；无锡动力机械厂有一台 40000kN 螺旋压力机用于锻造汽轮发电机叶片。另外，长春第一汽车制造厂和洛阳拖拉机制造厂用 16000~40000kN 热模锻压力机模锻汽油和柴油发动机连杆及凸轮轴等质量要求高的锻件；第二汽车制造厂的曲轴、羊角和前梁等所有模锻件均用 16000~120000kN 热模锻压力机模锻。这些压力机绝大多数都是 50 年代至 80 年代初由国外进口的。

第二重型机器制造厂定点生产机械压力机，现已引进联邦德国 Eumuco 公司的模块传动的机械压力机制造专利，已能制造 40000~80000kN 的压力机。螺旋压力机有三个定点生产厂——青岛、辽阳和鄂州锻压机床厂，过去主要生产 16000kN 以下的老结构摩擦压力机（不适于叶片锻造）。现在青锻厂已引进联邦德国 Hasenclever 公司的精锻用摩擦压力机制造技术，辽锻厂也引进了国外生产摩擦压力机的专利，但由于起步晚，尚未进行批量生产。

鄂州锻压机床厂和华中理工大学（下称华大）合作，从 70 年代初开始研制螺旋压力机，现已研制成功八种新产品，年产 400~16000kN 摩擦压力机 250 台，已自成系列，该两厂校于 1973 年联合研制 6300kN 副螺杆液压螺旋压力机，1980 年获国家三等奖，现已生产 12 台，是国内唯一投入小批量生产、并通过生产考验能正常使用的液压螺旋压力机。副螺杆传动的液压螺旋压力机结构简单、维护容易，但由于国外采用铜制副螺母，在大载荷下寿命低，一般用于小吨位压力机。华大改用自己研制的夹布胶木螺母，其摩擦系数比铜螺母降低一个数量级，耐磨性也好，不但解决了副螺母寿命低的问题，而且提高了传动效率。看来，副螺杆液压传动原理及 6300kN 压力机结构已趋于成熟，已具备发展更大能力压力机的条件。

基于上述情况，新艺机械厂提出请鄂锻厂和华大研制 16000kN 副螺杆液压螺旋压力机，代替已损坏的 20000kN 热模锻压力机锻造航空叶片。

五、我国航空叶片锻造工艺及其设备改造途径分析

如前所述，我国的叶片锻造技术已不能满足航空生产及新机研制需要，应尽快地结合国情将叶片锻造技术改造为适应精锻或半精锻的要求。其改造需要从锻造设备及工艺方法两个方面着手，不可孤立进行。

1.叶片锻造设备的改造

航空系统目前使用的叶片锻造设备主要还是 50 年代进口的热模锻压力机，其中有些设备已经损坏，或长期不能正常使用，这些设备应予以更新，例如新艺机械厂的 20000kN 热模锻压力机。但用什么设备代替，应根据具体情况而定。

如上所述，螺旋与机械压力机虽各有特点，但精锻原理及其精度是基本相同的。这两种设备，目前国内都在研制或已引进国外专利技术。由于各工厂把研制费及专利费计入成本的计算方法不同，其价格差别甚大，例如，用 Hasenclever 公司专利生产的 4000kN 摩擦压力机报价 42 万元/台，4000kN 双电机驱动摩擦压力机（国家三等奖）报价 14 万元/台；进口零部件组装的 16000kN 摩擦压力机报价 500 万元/台，国产长导轨“U”型滑块 16000kN 摩擦压力机报价 80 万元/台；16000kN 副螺杆液压螺旋压力机报价 180 万元/台；国产 40000kN 模块传动机械压力机报价 1200 万元/台。1980 年进口的联邦德国 Hasenclever 公司的 20000kN 液压螺旋压力机约 100 万美元/台；按一般规律，国外同等能力的机械压力机比螺旋压力机约贵 30%。

根据这一情况,可以认为,工厂目前进口设备或购买用国外专利技术生产的压力机在经济上是不合理的,而华大和鄂锻厂的 16000kN 副螺杆液压螺旋压力机价格比较合理,也能保证质量,看来是唯一可行的方案。

## 2. 叶片锻造技术的改造

航空系统现有的热模锻压力机多数还能正常使用,但锻造叶片仍沿用苏联 50 年代的普通模锻工艺方法,已不适应现代航空发动机对叶片质量和精度的要求了。因此,迫切需要对叶片锻造技术进行改造。将热模锻压力机的传统模锻方法改造为精锻或半精锻的最简单和廉价的方法是采用北京航空材料研究所研制的曲柄压力机上的“吻合板精锻法”。该工艺方法无需对压力机进行改造,只要对压力机进行动态刚性测量,装上新型模座,并按规定程序调节模具,即可锻出与螺旋压力机锻造精度相当的叶片精锻件。这种“吻合板精锻法”不但不会增加压力机闷车的几率和调节模具的复杂性,反而会大大减少闷车几率和简化模具调节程序。这是因为普通模锻法是在锻造现场工人凭经验调节模具(这种调节方法无固定程序,不小心会造成闷车),而“吻合板精锻法”把调节模具的相当大部分的工作量由工程技术人员按科学方法事先计算好,然后由工人按程序执行。这种工艺方法既可进行叶片精锻,也可进行半精锻,建议大力推广,以改善叶片质量和提高经济效益。北京航空材料研究所表示保证做好技术服务工作。

70 年代末,曾有人对用 50 年代进口的苏产热模锻压力机进行叶片精锻表示怀疑。十年过去了,北京航空材料研究所几乎每年都在苏产 K864 型 16000kN 热模锻压力机上用“吻合板精锻法”小批量生产钛合金叶片精锻件,供新机研制用,其精度达到国外同类产品水平。到目前为止,北京航空材料研究所仍是国内能精锻叶片的唯一单位,这一事实不但可澄清上述疑虑,而且可以说明,采用此工艺方法是目前国内实现叶片精锻的捷径。

## 3. 设备改造与工艺方法改造的关系

叶片锻造技术的改造包含工艺方法和设备两个方面,二者相互依存,又各自独立;互相促进,又互相制约。一种工艺方法可用不同的设备来实现,同一设备又可采用不同的工艺方法;新工艺方法有时要用新设备或新工艺装备来实现,而新设备又会促进新工艺方法的发展。因此,技术改造要综合考虑工艺和设备两个方面的改造,不可孤立进行。更新设备要考虑现在已掌握的工艺方法及将来要采取的工艺方法,以及产品质量和生产率的要求、工厂的特长和维修能力等。目前,新艺机械厂选用华大和鄂锻厂的 16000kN 液压螺旋压力机是适合的。至于今后航空航天工业部的其他工厂更新设备,应根据当时国内外锻压设备市场情况及工厂具体条件而定,不好一概而论。

综合上述,本文虽是针对航空叶片锻造技术的改造,但其分析结果和提出的原则也适用于民用机械工业部门的相应行业,可根据具体情况,灵活掌握。例如,汽轮发电

机叶片、机车内燃机叶片与航空叶片材料、锻造工艺及使用设备十分相似,上述技术改造原则基本适用;汽车和拖拉机锻件批量大,要求生产率高,用热模锻压力机锻造更为有利,采用“吻合板锻造法”更有利于节约原材料,减少加工量和稳定生产,从而收到降低成本和提高质量之效益。

\* \* \* \* \*

## 防 穴 蚀 涂 层

穴蚀本身是一种表面磨损,它受快速液流的影响,并与液流方向的变化有关。穴蚀这种现象通常出现在受到液体压力骤变影响的硬质界面上。如果流动液体中的压力突然降低到低于其饱和蒸汽压力时,在硬质物体的表面上就开始形成泡囊式的穴蚀点,而这些穴蚀点再遇压力升高时,就会成为祸害。在此情况下,脉冲的压力可达 200MPa,频率 200Hz~200kHz。穴蚀现象几乎不可避免地出现在所有液压装置中,如水轮机、泵、螺旋桨、水翼、泄水坝、阀门等。损坏的范围取决于装置的结构和工作速度,以及液体流速。为了防止穴蚀,可以完全改变设备的结构或安装防护装置,但改变设备的结构(如水轮机和泵的结构)造价太高。最经济的方法是,使用焊块或涂敷防护层。

标准的方法是,使用具有良好穴蚀稳定性的材料作为焊块,在数年内多次将其补焊在穴蚀处。采用这种方法,是由于温差使金属中产生了大小裂纹,构成了对设备完整性的现实威胁。还应指出,在焊块之间可能出现双金属腐蚀现象。此时应采用焊块补焊后,再涂敷涂层。以前研究出的许多涂层,因为附着力不好而未被完全采用。例如,对穴蚀区域不使用厚的陶瓷涂层,因为它不能消除作用到金属上并使涂层本身遭破坏的穴蚀脉冲。近来研制出一些新型涂层,它们不是阻止穴蚀脉冲,而是将其吸收。按照低强度振动穴蚀方法,在穴蚀孔和文氏管内进行试验后,从 30 种化合物中选出 6 种符合质量要求的材料,其中包括 Duratough DL 材料。超声波试验是在蒸馏水中进行的(频率 20kHz,振幅 0.001m,温度 22℃)。穴蚀动力为振动,而非液压脉冲。经试验, Duratough DL 涂层具有良好的附着力。

之后,又在文氏管内进行试验。试验时,水的流速为 36m/s,一昼夜用水  $9 \times 10^4 \text{m}^3$ ,管长 130m。

为了比较各种涂层的防护性能和附着力,故将其涂敷在水轮机的转子上。经 2 年运转, Duratough DL 涂层上并未出现明显的损伤和重量损失;而在同期内,硬质陶瓷涂层的重量损失 90%,硬质氨基甲酸乙酯涂层的重量损失 40~50%。另有实例证明:喷管穴蚀严重,管壁已穿透,维修时用 2.5cm 厚的钢板补焊穴蚀孔,而后涂敷两层 Duratough DL 防护层。经长期使用后检查,未发现穴蚀现象。

(邢 译)