

# 航空发动机 制造工艺学

A. B. 鮑德捷等著

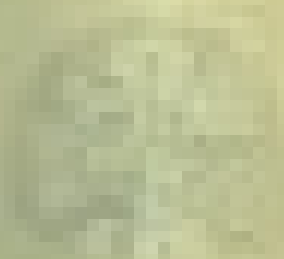


国防工业出版社

1980年

航空工业  
制造工程学

.....



航空工业

# 航空发动机制造工艺学

A. B. 鮑德捷, A. M. 苏里瑪,

B. П. 費拉果, И. С. 楚卡諾夫 著

北京航空学院译



國防工業出版社

1959

## 出版者的話

本书論述了航空发动机主要零件和部件的制造工艺过程，包括构造特点，制造的技术条件和材料工艺規程的編制，主要工序的进行方法和檢驗。

原书經苏联高等教育部审定为高等航空院校的教学参考书。

参加本书譯校的为刁正邦、張继堂、戴約真、鄧学礼、周士炎、楊光熏、王延芳、鄒逸安等，由闕国光总校，并由李哲浩最后校訂。

苏联 А. В. Подзен, А. М. Сулима, В. П. Фираго, И. С. Цуканов 著 'Технология авиадвигателестроения' (Оборонгиз 1957 年第一版)

\*

机械工业出版社

北京市書刊出版业营业許可証出字第 074 号  
机械工业出版社印刷厂印刷 新华書店發行

\*

787 × 1092  $\frac{1}{25}$  15  $\frac{21}{25}$  印張 350 千字

1959年12月第一版

1959年12月第一次印刷

印数: 0,001—1,600 册 定价: (11) 2.45 元

NO. 3103

# 目 录

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| 序言 .....                                 | 5   |
| 緒論 .....                                 | 7   |
| 第一章 軸的加工 .....                           | 9   |
| §1 构造、技术条件与材料 .....                      | 9   |
| §2 直軸加工工艺規程的制訂 .....                     | 13  |
| §3 直軸的主要加工工序的进行方法 .....                  | 18  |
| §4 曲軸加工工艺規程的制訂 .....                     | 34  |
| §5 曲軸加工主要工序的进行方法 .....                   | 39  |
| 整体曲軸的加工(39)——組合式曲軸的加工(45)                |     |
| §6 軸的檢驗 .....                            | 51  |
| 第二章 活塞加工 .....                           | 53  |
| §1 构造、技术条件与材料 .....                      | 53  |
| §2 活塞加工工艺規程的制訂 .....                     | 54  |
| §3 活塞加工主要工序的进行方法 .....                   | 57  |
| §4 活塞的檢驗 .....                           | 63  |
| 第三章 气缸排衬筒和气缸筒的加工 .....                   | 64  |
| §1 构造、技术条件与材料 .....                      | 64  |
| §2 衬筒和气缸筒加工工艺規程的制訂 (与气缸头組合以前) .....      | 65  |
| §3 加工衬筒和气缸筒主要工序的进行方法 .....               | 69  |
| §4 衬筒和气缸筒的檢驗 .....                       | 76  |
| 第四章 联杆加工 .....                           | 77  |
| §1 构造、技术条件与材料 .....                      | 77  |
| §2 联杆加工工艺規程的制訂 .....                     | 78  |
| §3 联杆加工主要工序的进行方法 .....                   | 82  |
| §4 联杆的檢驗 .....                           | 89  |
| 第五章 齿輪加工 .....                           | 91  |
| §1 构造、技术条件与材料 .....                      | 91  |
| §2 齿輪加工工艺規程的制訂 .....                     | 99  |
| §3 齿輪加工主要工序的进行方法 .....                   | 106 |
| 切齿前的加工(105)——圆柱齿輪齿的切制(109)——伞齿輪齿的切制(122) |     |
| 齿的精加工工序(127)                             |     |
| §4 齿輪的檢驗 .....                           | 144 |
| 第六章 盘的加工 .....                           | 150 |
| §1 构造、技术条件与材料 .....                      | 150 |

|                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| § 2 盘的加工工艺規程的制訂                                                                               | 153 |
| § 3 盘的加工主要工序的进行方法                                                                             | 159 |
| § 4 盘的檢驗                                                                                      | 173 |
| 第七章 叶片加工                                                                                      | 176 |
| § 1 构造、技术条件与材料                                                                                | 176 |
| § 2 叶片加工工艺規程的制訂                                                                               | 185 |
| 燃气渦輪发动机渦輪工作叶片(185)——液体燃料火箭发动机渦輪泵組件的<br>渦輪叶片(193)——燃气渦輪发动机导向器叶片(196)——燃气渦輪发动机軸<br>流式压气机叶片(206) |     |
| § 3 叶片加工主要工序的进行方法                                                                             | 211 |
| 燃气渦輪发动机渦輪工作叶片(211)——液体燃料火箭发动机渦輪泵組件的<br>叶片(240)——燃气渦輪发动机渦輪导向叶片(242)——燃气渦輪发动机軸<br>流式压气机叶片(244)  |     |
| § 4 叶片的檢驗                                                                                     | 251 |
| 第八章 叶輪加工                                                                                      | 268 |
| § 1 构造、技术条件与材料                                                                                | 268 |
| § 2 叶輪加工工艺規程的制訂                                                                               | 272 |
| § 3 叶輪加工主要工序的进行方法                                                                             | 277 |
| § 4 叶輪的檢驗                                                                                     | 295 |
| 第九章 板制零件及部件的加工                                                                                | 299 |
| § 1 构造、技术条件与材料                                                                                | 299 |
| § 2 板制零件及部件加工工艺規程的制訂                                                                          | 301 |
| § 3 板制零件及部件加工主要工序的进行方法                                                                        | 302 |
| § 4 板制零件和部件的檢驗                                                                                | 334 |
| 第十章 螺旋桨叶加工                                                                                    | 340 |
| § 1 构造、技术条件与材料                                                                                | 340 |
| § 2 实心桨叶加工工艺規程的制訂                                                                             | 342 |
| § 3 实心桨叶加工主要工序的进行方法                                                                           | 348 |
| § 4 空心鋼质桨叶的加工工艺規程的制訂                                                                          | 350 |
| § 5 空心鋼质桨叶主要加工工序的进行方法                                                                         | 352 |
| § 6 桨叶的檢驗                                                                                     | 361 |
| 第十一章 本体零件加工                                                                                   | 364 |
| § 1 构造、技术条件与材料                                                                                | 364 |
| § 2 本体零件加工工艺規程的制訂                                                                             | 367 |
| § 3 本体零件加工主要工序的进行方法                                                                           | 370 |
| § 4 本体零件的檢驗                                                                                   | 383 |
| 第十二章 环形零件加工                                                                                   | 385 |
| 毛坯的取得(385)——机械加工(393)                                                                         |     |
| 参考文献                                                                                          | 395 |

## 序 言

本书为高等航空学校中讲授[航空发动机制造工艺学]课程的教学参考书。其内容符合课程大纲中专门部分的要求，并且包括活塞式与喷气式发动机的主要零件和部件以及螺旋桨叶的制造工艺的问题。

全书共包括十二章，章目划分的原则是将具有共同工艺特点的零件和部件安排在一起。

著者引用了本国工厂的经验、科学研究所的资料、各种文献以及著者自己的教学和生产实践经验。

本书每一章的内容叙述都是采用下列的次序：

1. 构造、制造的技术条件与材料。
2. 工艺规程制订的一般原则。
3. 主要工序的进行方法。
4. 零件与部件的主要部分的检验。

著者尽量使叙述的材料简练，略去学生在以前的课程和相近的课程中已经学过的问题，同时对新的航空技术中的发动机零件和部件的制造问题给予充分的注意。

第一、九、十与十二章是由A. B. 鲍德捷(Подзей)副教授编写的；第七章是由A. M. 苏里玛(Сулима)副教授编写的；第二、三、四与十一章是由B. П. 费拉戈(Фираго)副教授编写的；第五章由И. С. 楚卡诺夫(Цуканов)副教授编写的；第六章与第八章是由A. B. 鲍德捷与И. С. 楚卡诺夫两位副教授共同编写的。

在编写时，著者得到下列同志的巨大帮助：E. П. 罗哥日金(Рогожкин)与Л. С. 苏里可夫(Суриков)两位工程师参加了第九章中焊接一节的编写；莫斯科航空学院B. H. 别里可夫(Беликов)副教授，O. П. 别罗夫斯基(Беловский)、E. И. 沃罗金(Володин)、C. С. 罗雪夫(Лосев)、C. Я. 魏斯曼(Вейсман)、H. Г. 杰奇(Дейч)与H. Г. 苏沃洛夫(Суворов)等六位工程师帮助选材。莫斯科航空学院[航空发动机

制造]教研室的同事А. Н. 巴巴也夫 (Бабаев)、К. П. 德米特里也夫 (Дмитриев)与О. Н. 舒巴也夫 (Шубаев) 参加了整理工作。

А. А. 庫因德日 (Куинджи) 工程师、古比雪夫航空学院[航空发动机制造]教研室的И. А. 依瓦新柯 (Иващенко)、Г. Д. 馬克西莫夫 (Максимов)、А. С. 謝維列夫 (Шевелев) 三位副教授、技术科学碩士В. Ф. 巴拉蒙諾夫 (Парамонов) 与В. А. 什曼涅夫 (Шманев) 以及И. А. 安尼西金 (Аниськин)、Н. М. 巴依塔里斯卡婭 (Байтальская)、А. И. 拉尔金 (Ларкин)、С. В. 龙捷夫 (Ломтев) 等四位工程师、技术科学碩士И. И. 普德可夫 (Пудков) 与Г. Т. 謝皮洛夫 (Шепилов) 等人在評閱与审查原稿时提出了許多宝贵的意見。参加原稿的校訂工作的В. Г. 斯坦凱維奇 (Станкевич) 工程师也提出了許多宝贵的意見。

著者对所有这些同志表示感謝。

本书在所叙述的問題本身以及方法上都可能还存在許多缺点。著者将以感激的心情来接受今后的一切指正和希望, 并請按下列地址寄給出版社: Москва, И-51, Петровка, 24, Оборонгиз。

## 緒 論

航空发动机的主要参数的改善——增大功率（拉力）与工作寿命、降低燃料的消耗率、减小重量和外廓尺寸——总是与提高发动机的零件和部件的质量有关。航空发动机制造的特点是：在保持零件特有的薄壁（精雕細鑲）性的条件下要求具有高的几何准确度，广泛使用高温材料与輕合金，采用最現代的方法制造毛坯和零件。

甚至在生产規模較小的情况下，在制造零件的毛坯时也要采用像热模鍛、压制、抽拔、光压等类的压力加工的方法。此时必須要得到一定的流紋方向与应有的材料鍛造变形率。在航空发动机制造中，自由鍛业已很少采用。由于对材料质量的要求很高，所以必須采用利用同位素和超声波原理的特种檢驗方法。

在許多零件的制造当中，采用各种精密鑄造的方法已成为常見的事了。

几乎所有发动机上的主要零件都要进行热处理或热化学处理。这种情况使工艺过程变得复杂，并且使加工的周期延长。在选择热处理在工艺过程中的位置时，要考虑一系列的專門問題，例如零件的质量以及进行机械加工的可能性等。

工艺过程之所以变得复杂，同样也与在加工准确度上要求很高有关。考虑到这些要求，在設計工艺規程时就要特別注意基准的选择以及零件的定位方法。由于这一原因，零件的表面常常要用各种方法經過几次的加工，而且航空发动机上的重要零件照例是所有的表面都要进行加工。选择加工方法时还必須考虑到冷作硬化的現象，它对零件的使用性能和发动机的寿命都能有很大的影响。

对航空发动机的零件來說，甚至非配合的表面也要求进行仔細的加工。这是由于要尽量提高零件的疲劳强度与其抗蝕性能。为此目的，表面强化工艺方法以及表面处理和化学加工方法的应用日益增多。

由于采用了难于加工的耐热合金，使航空发动机制造遇到巨大的

困难，用这些合金制成的零件是在极低的切削用量下进行加工的，但是刀具的耐用度仍然极低。这种情况使工具方面的工作大为复杂，特别是像拉刀这一类的刀具。

现代的航空发动机上有着大量的锻料制成的零件和部件。在制造时对准确度、材料的质量、气密性与接缝强度等方面的要求都很高。在这些零件和部件的表面上不容许有任何像皱纹与裂纹等类的缺陷。这些要求促使了冲压拉深与弯曲等过程的改善，采用新的电焊方法并且仔细地进行检查。对发动机上的重要零件几乎已不采用气焊的方法。

近年来在部件装配的冶金方法中已广泛采用钎焊的方法（其中包括高温钎焊）。

检验特别仔细也是航空发动机制造的特点。所有重要的零件和部件照例都要百分之百地进行全面的检验，检验的项目包括：材料的质量、形状的误差、尺寸、表面之间的相对位置、表面质量、重量的平衡性以及零件的连接质量（特别是不可拆卸的连接零件）。

既要非常注意产品的质量，同时还要考虑到生产的经济性，要尽力使航空发动机制造的生产率高而且成本低。要利用改善工艺过程和最合理的生产组织形式的方法来解决这一问题。例如，对于叶片的制造，由于每台发动机所需的叶片数目很大，因此即使在生产规模不大时也宜于按照大量生产的原則来组织生产。

# 第一章 軸的加工

## §1 构造、技术条件与材料

航空发动机上重要的軸是在載荷大和轉速高的条件下工作的。由于重量必須減輕，所以使軸的形状变得复杂，势必将它作成空心的和薄壁的。航空发动机上的軸，从构造上来看可分为两类：直軸和曲軸。曲軸又可分为整体的曲軸（直列式活塞发动机用的）与組合的曲軸（星型发动机用的）。

直軸中包括有：渦輪軸、压气机軸、減速器軸、增压器軸、渦輪泵組合件軸、凸輪軸等（图1）。这些軸的外表面是由光滑的軸頸、花鍵、螺紋、齒輪、凸緣、凸輪型面等表面构成的不同組合。某些軸（如渦輪軸、減速器軸）的凸緣上常有各种形状的内花鍵或端面花鍵，另外还有撐入紧固螺栓用的孔。

曲軸的外表面的形状更为复杂。整体的曲軸（图2）可分为前部（头部）1，曲軸頸2，联杆軸頸3，曲臂4与后部（尾部）5。

軸的头部根据它与減速器軸連接的方式不同可以在它上面有矩形或漸开綫形的花鍵、带孔的凸緣，有时还可能有端面花鍵。軸的曲臂形状可以是棱柱形、橢圓形或其他的形状。如果軸上有可卸式的配重，曲臂的形状就变得复杂；在曲臂上应具有夹紧配重用的一部分，例如将一部分作成梳齿状。

軸的后部常带有为垂直傳动齒輪用的尾部。

組合式曲軸构造的示例見图3。

航空发动机的軸上常常有軸心孔，孔的形状主要是根据零件等强度的条件来規定的。这些孔有直的、台阶形的、球形的或其他的形状。大多数的軸，除有軸心孔之外，还有徑向孔，这些孔通常是用来将滑油从軸的内腔通向外面的相摩擦的表面。

軸的工作条件严格决定了对加工准确度的要求也高，即：

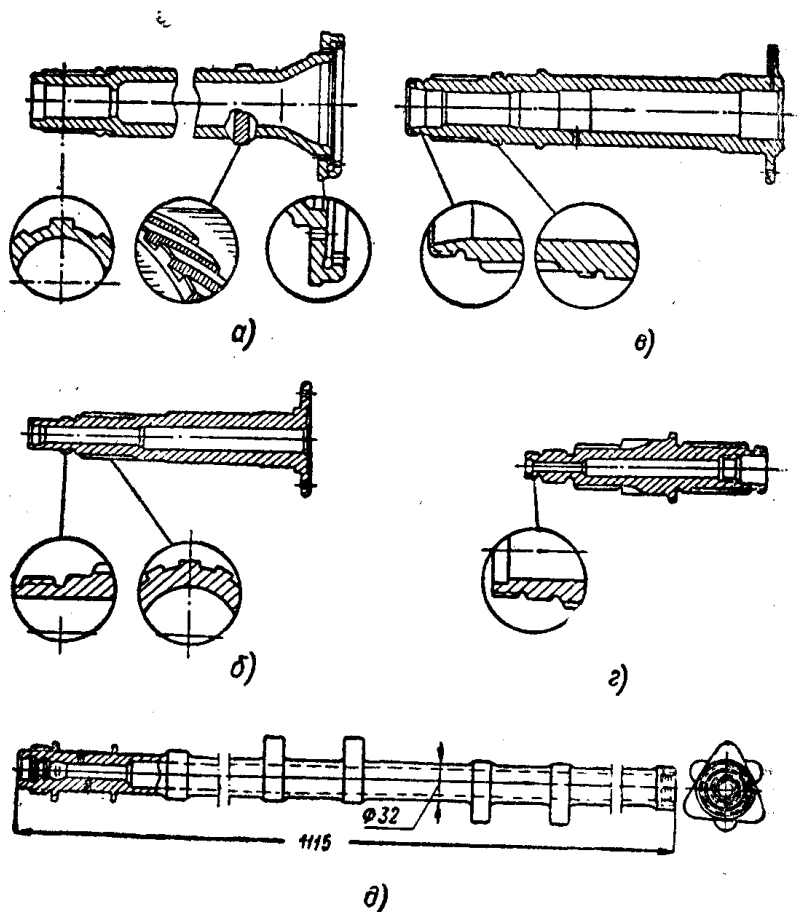


图1 直轴:

*a*—涡轮轴；*б*—压气机轴；*в*—减速轴；*г*—涡轮泵组合件轴；*д*—曲轴。

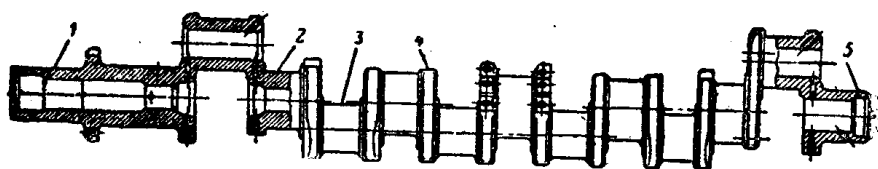


图2 直列活塞式发动机的曲轴。

1. 工作轴颈的准确度——1~2级。
2. 工作轴颈的形状误差容许在0.005~0.02毫米范围内。
3. 非工作轴颈的准确度——3~4级。
4. 轴内孔的准确度——3~4级。

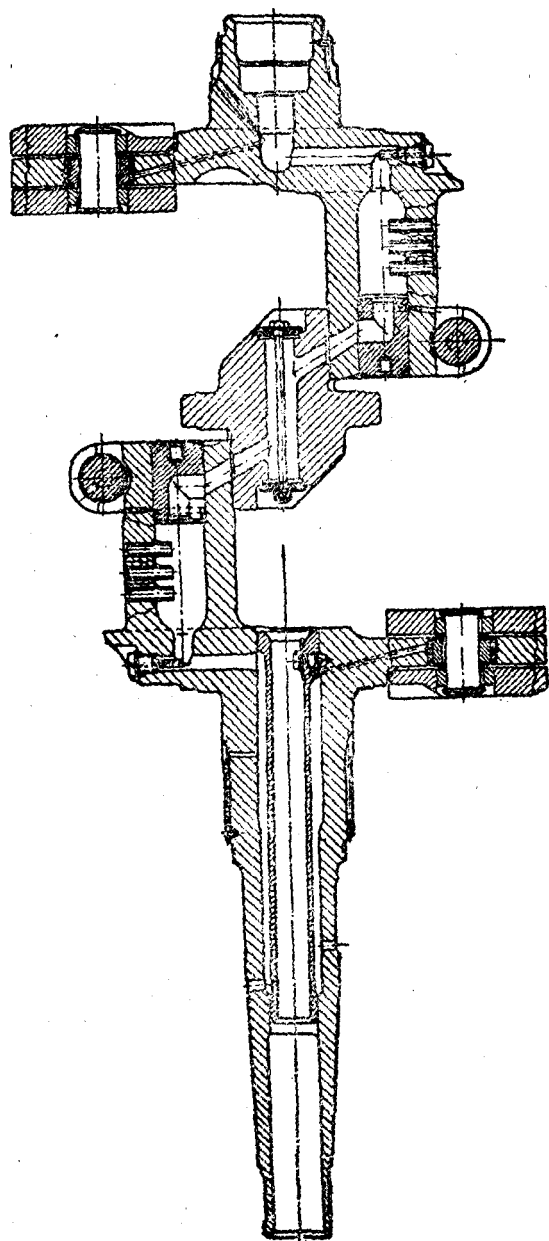


图 3 星型活塞式发动机的剖

5. 配合孔的准确度——1~2 級。
6. 螺紋的准确度——1~2 級（螺紋的准确度等級）。
7. 花鍵的准确度——2 級。
8. 凸輪軸上凸輪的名义尺寸上的偏差为  $\pm 0.05$  毫米。
9. 直軸上的工作軸頸之間相对的跳动量容許为  $0.01 \sim 0.04$  毫米。

10. 工作軸頸与非工作軸頸之間的相对跳动量容許在  $0.05 \sim 0.2$  毫米範圍內。

11. 曲軸上的曲臂半徑的准确度为  $0.15 \sim 0.2$  毫米。

12. 支承軸頸軸綫与联杆軸頸軸綫的不平行度在 100 毫米的长度上不大于 0.05 毫米。

13. 联杆軸頸角向位置的容許誤差为  $\pm 15' \sim 20'$ 。

14. 工作表面的加工光滑度为  $\nabla \nabla \nabla 7 \sim \nabla \nabla \nabla \nabla 10$ 。

15. 非工作表面的加工光滑度为  $\nabla \nabla 5 \sim \nabla \nabla \nabla 7$ 。

曲軸应进行靜平衡与动平衡并使其准确度达  $20 \sim 80$  克厘米。

軸的工作表面常常要进行渗碳至  $0.7 \sim 1.2$  毫米的深度。渗碳表面的硬度为  $R_c \geq 58$ 。星形发动机的曲軸軸頸有时要渗氮。渗氮层的厚度为  $0.6 \sim 0.9$  毫米，它的硬度为  $R_c \approx 85$ 。经过調质的（淬火与回火）軸的硬度在  $R_c = 42$  以下。

在制造重要的軸时，不許有表面层的缺陷（裂紋、擦伤、划痕与烧伤）。但是有时在磨削时很难避免在表面形成細小的髮裂。这种缺陷常常在技术条件中加以規定。例如，在凸輪軸或增压器軸的驗收时，如果髮裂距离轉角处不小于 5 毫米，并且彼此之間的距离不小于 3 毫米，則在工作軸頸上容許有不多于 5 条髮裂，每条髮裂的长度不大于 5 毫米。对于更重要的軸（如渦輪軸），在髮裂方面的規定更加严格。

航空发动机的軸所用的材料为高质合金鋼。最常采用的是 18XHBA、12XH3A 与 40XHMA 等牌号的鉻鎳鋼，这些鋼料在經過淬火与回火后具有下列的机械性能： $\sigma_b = 100 \sim 115$  公斤/毫米<sup>2</sup>； $\delta = 11 \sim 12\%$ ；硬度为  $H_B = 390$  ( $d \frac{10}{3000} \approx 3.1$  毫米)。

对于只一次作用的发动机的軸，采用較便宜的鋼料，如 38XA 与

CT. 45。

## § 2 直軸加工工艺規程的制訂

### 总 述

軸的毛坯(图 4) 即使在生产規模較小的情况下也是用鍛錘在鍛模中鍛出, 或者在压力机或鍛造机上鍛出。根据毛坯的形状, 鍛模的分模面可以順着軸的軸綫方向或垂直于軸綫方向。通常是在軸的一端有凸緣而其余部分为光軸或为直径逐漸减小(从凸緣处开始)的台阶軸的情况下才可能采用橫向分模。

橫向分模时, 特别是当毛坯在臥式鍛造机上鍛造时, 可以从大端靠分模面这一边鍛出孔来。但是, 这只有当孔的直径足够大时才这样做。孔的鍛造斜度取  $10\sim 15^\circ$ , 外表面的則取  $3\sim 7^\circ$ 。毛坯上各处的轉接应平滑, 組織流紋的方向应与軸的外形相符合。发动机上的非常重要的軸的毛坯按第 1 类的檢驗接受<sup>●</sup>。在这种情况下, 从每个軸的毛坯的一端切下一段长度为 70~75 毫米的材料作为机械試驗用的試件, 因此, 毛坯应相应地規定得比較长些。根据軸的尺寸和形状的不同, 加工余量在直径上为 6~12 毫米, 应当利用航空工业中的相应規格以計算的方法来确定加工余量的大小。

送至机械加工車間的毛坯应經過正火处理, 硬度为  $H_B = 190\sim 270$ , 毛坯表面上的氧化皮应除去(用酸洗或噴砂方法), 如果外表面的缺陷的深度小于每边加工余量的一半的話, 也应把这些缺陷清除。

軸的机械加工通常分为三个阶段: 粗加工(去外皮)、光加工与最后加工。

在粗加工阶段中可使以后加工用的余量均匀, 并且去掉表面上的缺陷。粗加工时所采用的加工用量很大, 用量的大小以切削力与夹紧力作用下軸的容許变形为限。在生产規模相当大时, 常常在粗加工阶段采用大的功率和剛度的高生产率机床。

● 关于机械性能規定个别驗收。

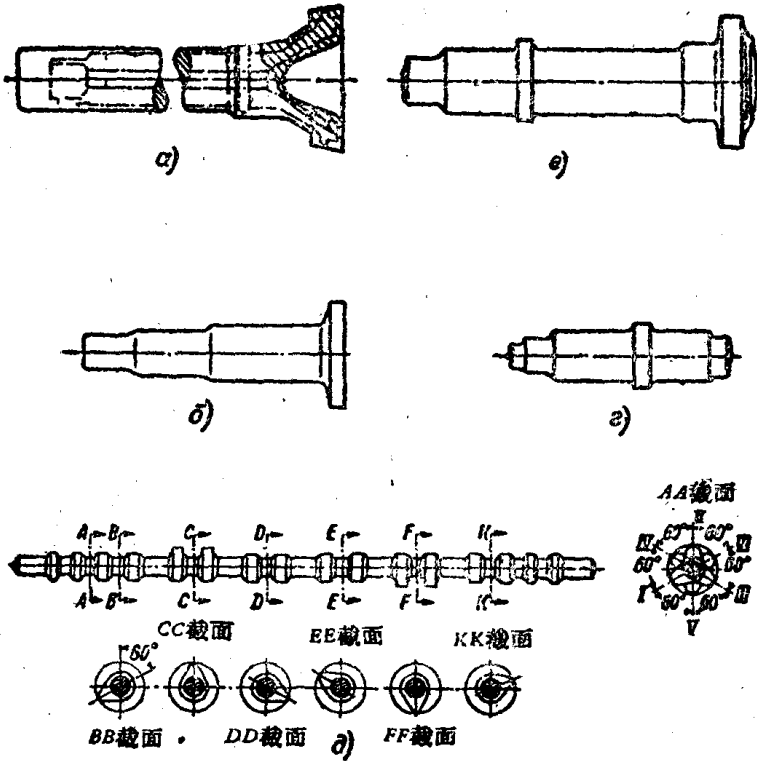


图4 直轴的毛坯:

a—涡轮轴毛坯; b—压气机轴毛坯; B—减速轴毛坯; e—涡轮泵组合件轴的毛坯; d—凸轮轴毛坯。

在光加工阶段中去掉的加工余量比粗加工时的要小得多。此时所用的用量也较小，以免整个轴的变形和轴的表面层的变形。在同样的生产规模下，在光加工阶段中采用的高生产率的多刀车床与一般车床上常常装有随动的靠模装置。这一阶段的主要目的是为最后加工留下小的余量。第一阶段所产生的误差以及热处理时产生的翘曲都应在这一阶段中加以消除。

在最后加工阶段中要求达到规定的准确度和表面光滑度，因此在这里不容许有由于变形而产生很大的误差的情况。在这一阶段中，在磨床上加工所占的比重最大，此外还采用各种不同的精加工方法（砥磨、超级光磨与抛光）。通常也在这一阶段中加工螺纹、细花键及其它表面，这些表面如果放在以前加工可能会被碰伤。

在制訂軸的加工工艺过程时，通常遵循这样的順序：在后面的加工阶段中內表面在外表面之前进行加工。采用这种加工順序的原因有二：第一，在加工孔时刀具可能产生引偏，因而使軸产生壁厚差，而要消除壁厚差就必须增大余量；第二，如果先加工內表面就比较容易保証外表面与內表面之間的同心的度，因为在加工外表面时利用內表面作为定位基准就有可能用較简单的方法达到較高的定位准确度。

但是，也会有不同于上述規則的情况，孔的最后加工是放在外表面的最后加工之后进行。

特别是当軸內压入有軟金屬（例如鉛青銅）作的衬套时就应采用这种順序。因为利用最后加工好的衬套来作定位基准就可能在心軸上定位时擦伤衬套的表面。

在設計工艺过程时要特別注意热处理位置的选择。例如，要进行調质处理的軸，既可以在机械加工之前进行淬火与回火，也可以在机械加工的第一阶段之后进行。在第一种情况下，显然可以不必从机械加工車間将毛坯运送至热处理車間并运回，这样就可以减少劳动量与縮短加工的周期。但是并不是总能这样做的；当加工余量較大时就会有淬火淬不透的危險。这种軸就要先进行粗加工，然后进行热处理。

对于需要进行局部渗碳的軸來說，热处理的位置主要决定于不渗碳表面的保护方法。

在航空发动机制造中采用下列的保护方法：

1. 在渗碳工序之前将不渗碳的表面鍍銅（銅层厚度为0.02~0.04毫米）。
2. 在渗碳之前，在不渗碳的表面上留下較大的余量，在渗碳之后淬火之前将这部分余量切去。
3. 第1与2两种方法的組合，在不渗碳的表面上增大余量并且鍍銅，在零件淬火以后将余量切去（双重保护）。

对于硬度完全不容許提高的表面來說，最后一种方法可以完全避免表面受到渗碳。在用第1种和第3种保护方法时，鍍銅、渗碳、淬火与回火通常都是在光加工阶段之前进行，但是須在渗碳表面的最后加工之前的准备加工已經作完之后。