

# 变曲面封头的研制

刘 仁 发

在火箭发动机的结构设计中,往往由于受总体布局、发射筒径向尺寸等条件的限制,发动机后封头的二个圆开口需相互倾斜某一角度,且开口的二轴心线不相交在开口的轴心上。为了满足上述的结构要求,用简单的球面斜开口的型式是不行的,但是可以采用一种曲面曲率不断变化的封头,即变曲面封头。我们曾对变曲面封头的设计与制造开展了一定的科研活动,获得了初步认识。为了使变曲面封头的研制进一步深入,下面仅就我们在变曲面封头的研制过程中,所遇到的变曲面封头的曲面设计、展开面积的计算、强度的近似计算、冲压工艺、冲压模具变曲面的机械加工等方面的问题,简要地报告如下:

## 一、变曲面的设计

### 1. 原始数据

如图 1 所示,图中实线为已知部分:直开口内径为 $\phi 354$ ,斜开口内径为 $\phi 269$ ,倾斜角为 $10^{\circ}33'$ ,轴线抬高距离为26.5,直开口圆柱段长20,直开口与斜开口上端距离为168(长度单位均为毫米,后同)。图中虚线为待求的变曲面部分。

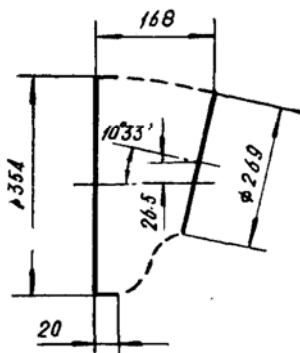


图 1 曲面原始数据

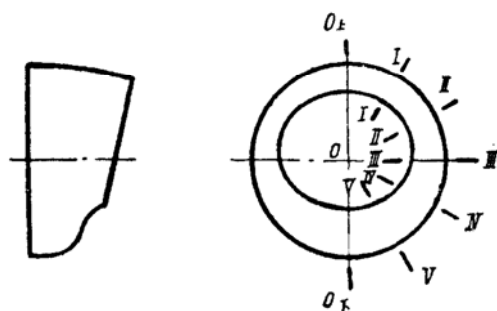


图 2 曲面的表示

### 2. 变曲面的表示

如图 2 所示,该曲面很难以某个数学解析式来表示。我们采取的是截面表示法,即通过直开口轴心O点,每隔 $30^{\circ}$ 均匀地在圆周上作截面。在半个圆周上共作O-O<sub>上</sub>, I-I, II-II, III-III, IV-IV, V-V,……O-O<sub>下</sub>均布的七个截面。分别求出各截面与变曲面的相交曲线,这些截面曲线就能比较准确地表示变曲面。

### 3. 各截面曲线的设计

#### 1. 出口点 $P_I$ 的确定

在各截面曲线上, 其曲线的二个端点分别是直开口、斜开口两圆弧与截面的交点。我们将斜开口圆弧与截面的交点 $P_I$ 称为出口点。

出口点 $P_I$ 的确定对于确保斜开口 $\phi 269$ 圆弧的尺寸及截面曲线的设计是很重要的。出口点 $P_I$ 可以用图解法或计算法来求得, 但计算法比图解法精确, 下面仅介绍计算法。如图3所示, 现以 I - I 截面为例。图中 $P_I Q_I$ 曲线即为所求的截面曲线,  $P_I$ 即为出口点, 其位置可用互相垂直的 $h_I$ ,  $S_I$ 二个坐标值来确定。根据

$h_I$ ,  $S_I$  分别平行和垂直直开口面, 所以如图4所示,  $h_I$  在左视图中反映实长, 而  $S_I$  在主视图中反映实长。在左视图中, 以直开口轴心 $O$ 为坐标原点, 水平和垂直方向分别为二坐标轴方向建立直角坐标系  $xoy$ 。

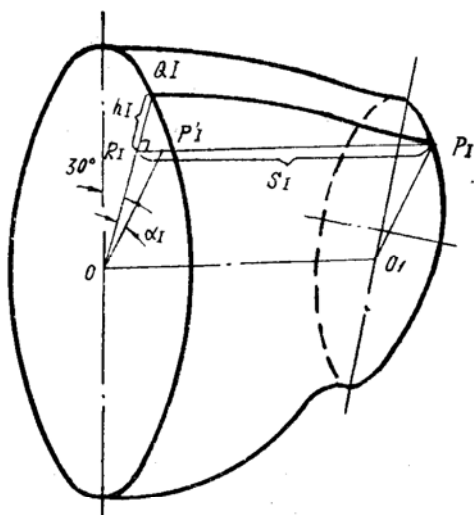


图3 出口点 $P_I$ 的确定

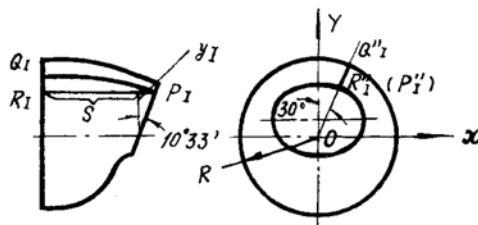


图4  $h_I$ ,  $S_I$ 的计算

得:

$$\begin{cases} h_I = P_I' Q_I' = R - OP_I' & (1) \\ S_I = P_I R_I = S + y_I \cdot \tan 10^\circ 33' & (2) \end{cases}$$

同理可得: 对一般截面

$$\begin{cases} h_i = R - OP_i' & (3) \\ S_i = S + y_i \tan 10^\circ 33' & (4) \end{cases}$$

式中  $R$ : 直开口圆半径, 等于177;

$OP_i'$ : 出口点 $P_i$ 与轴心 $O$ 点在左视图中的投影距离;

$S$ : 直开口轴心线夹在直、斜开口面间的长度, 等于138.4;

$y_i$ : 出口点 $P_i$ 在 $xoy$ 坐标系中的纵坐标值。

又因为斜开口圆在图4所示的左视图中投影为一椭圆, 设该椭圆的长、短半径分别为:  
a、b, 椭圆轴心至原点 $O$ 垂直距离为 $h$ , 根据图1所示的原始数据可得:

$$a = 134.5$$

$$b = 134.5 \times \cos 10^\circ 33' = 132.23$$

$$h = 26.5$$

该椭圆方程为:

$$\frac{(y-h)^2}{b^2} + \frac{x^2}{a^2} = 1 \quad (5)$$

$P_i''$  为椭圆与  $y=kx$  直线的交点,  $P_i''$  的坐标值由下列方程组决定:

$$\begin{cases} \frac{(y-h)^2}{b^2} + \frac{x^2}{a^2} = 1 \\ y = kx \end{cases} \quad (6)$$

$$y = kx \quad (7)$$

由 (6)、(7) 解得  $P_i''$  点的坐标值:

$$\begin{cases} x = \frac{a^2kh \pm ab\sqrt{b^2 + a^2k^2 - h^2}}{b^2 + a^2k^2} \\ y = kx \end{cases} \quad (8)$$

$$y = kx \quad (9)$$

将各截面的不同  $K$  值代入 (8), (9) 二式, 即可求出  $P_i''$  点的坐标, 计算结果如表 1。

表 1  $P_i''$  点的坐标

| 截 面   | 0-0上  | I-I        | II-II        | III-III | IV-IV         | V-V         | 0-0下   |
|-------|-------|------------|--------------|---------|---------------|-------------|--------|
| K 值   | /     | $\sqrt{3}$ | $\sqrt{3}/3$ | 0       | $-\sqrt{3}/3$ | $-\sqrt{3}$ | /      |
| $X_i$ | 0     | 77.6       | 126.0        | 131.8   | 102.5         | 54.4        | 0      |
| $y_i$ | 158.7 | 134.4      | 72.7         | 0       | -59.2         | -94.4       | -105.7 |

注: 0-0上、下截面的  $X_i$ ,  $y_i$  值可由几何计算直接求得。

知  $P_i''$  坐标值后, 极易求得线段  $OP_i''$  的值, 计算结果如表 2。

表 2  $OP_i''$  的值

| 截 面      | 0-0上  | I-I   | II-II | III-III | IV-IV | V-V   | 0-0下  |
|----------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|
| $OP_i''$ | 158.7 | 155.2 | 145.4 | 131.8   | 118.4 | 109.0 | 105.7 |

将表 1, 表 2, 中的  $y_i$ 、 $OP_i''$  之值以及  $R=177$ ,  $S=138.4$  分别代入 (3), (4) 式, 即得各截面的  $h_i$ 、 $S_i$  值, 计算结果如表 3。

表 3  $h_i$ 、 $S_i$  值

| 截 面   | 0-0上 | I-I   | II-II | III-III | IV-IV | V-V   | 0-0下  |
|-------|------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|
| $h_i$ | 18.3 | 21.8  | 31.6  | 45.2    | 58.6  | 68.0  | 71.3  |
| $S_i$ | 168  | 163.5 | 152.0 | 138.4   | 127.3 | 120.9 | 118.8 |

## 2. 各截面曲线半径的选定

考虑加工工艺的方便, 在封头的直开口端全部选用一半径为  $R90$  的环面。然后再过各  $P_i$  点作与  $R90$  相切的圆弧, 且根据圆弧半径随截面  $O-O_{上} \cdots O-O_{下}$  逐渐由大至小变化的规则, 使

曲面逐渐由较平直向较弯曲变化。通过试凑及作图可求得各截面的斜开口端的曲线半径，其结果如表4。

表 4 斜开口端的曲线半径*R<sub>i</sub>*

| 截 面                  | 0-0上 | I - I | II - II | III - III | IV - IV | V - V | 0-0下 |
|----------------------|------|-------|---------|-----------|---------|-------|------|
| <i>R<sub>i</sub></i> | ∞    | 120   | 100     | 74.9      | 28.6    | 18.9  | 16.7 |

3. 在各截面上斜开口面与直开口面间夹角的计算：

由于加工各截面所用的样板都是以斜开口平面为基准，所以需要求出各截面中斜开口平面与直开口平面的夹角，以便于截面样板的制造和使用。

由图3知：在 I - I 截面上，截面与斜开口面、直开口面的相交线分别为*O<sub>1</sub>P<sub>I</sub>*和*OR<sub>I</sub>*，作*OP'<sub>I</sub>//O<sub>1</sub>P<sub>I</sub>*，则*OP'<sub>I</sub>*与*OR<sub>I</sub>*的夹角*α<sub>I</sub>*即为 I - I 截面上，斜开口面与直开口面之间的夹角。

$$\operatorname{tg} \alpha_{\mathrm{I}}=\frac{R_{\mathrm{I}} P_{\mathrm{I}}^{\prime}}{O R_{\mathrm{I}}} \quad(10)$$

对照图4可知，(10)式中的*R<sub>I</sub>P'<sub>I</sub>*，*OR<sub>I</sub>*与图4中的*y<sub>I</sub>*，*OP'<sub>I</sub>*有如下关系：

$$R_{\mathrm{I}} P_{\mathrm{I}}^{\prime}=y_{\mathrm{I}} \cdot \operatorname{tg} 10^{\circ} 33^{\prime}$$

$$O R_{\mathrm{I}}=O P_{\mathrm{I}}^{\prime \prime}$$

将上述关系代入(10)式，得：

$$\operatorname{tg} \alpha_{\mathrm{I}}=\frac{y_{\mathrm{I}} \cdot \operatorname{tg} 10^{\circ} 33^{\prime}}{O P_{\mathrm{I}}^{\prime \prime}}$$

同理可推得：对一般截面

$$\operatorname{tg} \alpha_{\mathrm{i}}=\frac{y_{\mathrm{i}} \cdot \operatorname{tg} 10^{\circ} 33^{\prime}}{O P_{\mathrm{i}}^{\prime \prime}} \quad(11)$$

将各截面的*y<sub>i</sub>*，*OP''<sub>i</sub>*值代入(11)式即可求得夹角*α<sub>i</sub>*，计算结果如表 5。

表 5 夹 角 *α<sub>i</sub>*

| 截 面                  | 0-0上   | I - I | II - II | III - III | IV - IV | V - V | 0-0下   |
|----------------------|--------|-------|---------|-----------|---------|-------|--------|
| <i>α<sub>i</sub></i> | 10°33′ | 9°10′ | 5°19′   | 0°        | 5°19′   | 9°10′ | 10°33′ |

根据以上的变曲面的设计数据，即可将整个的变曲面封头设计出来，如图5所示。

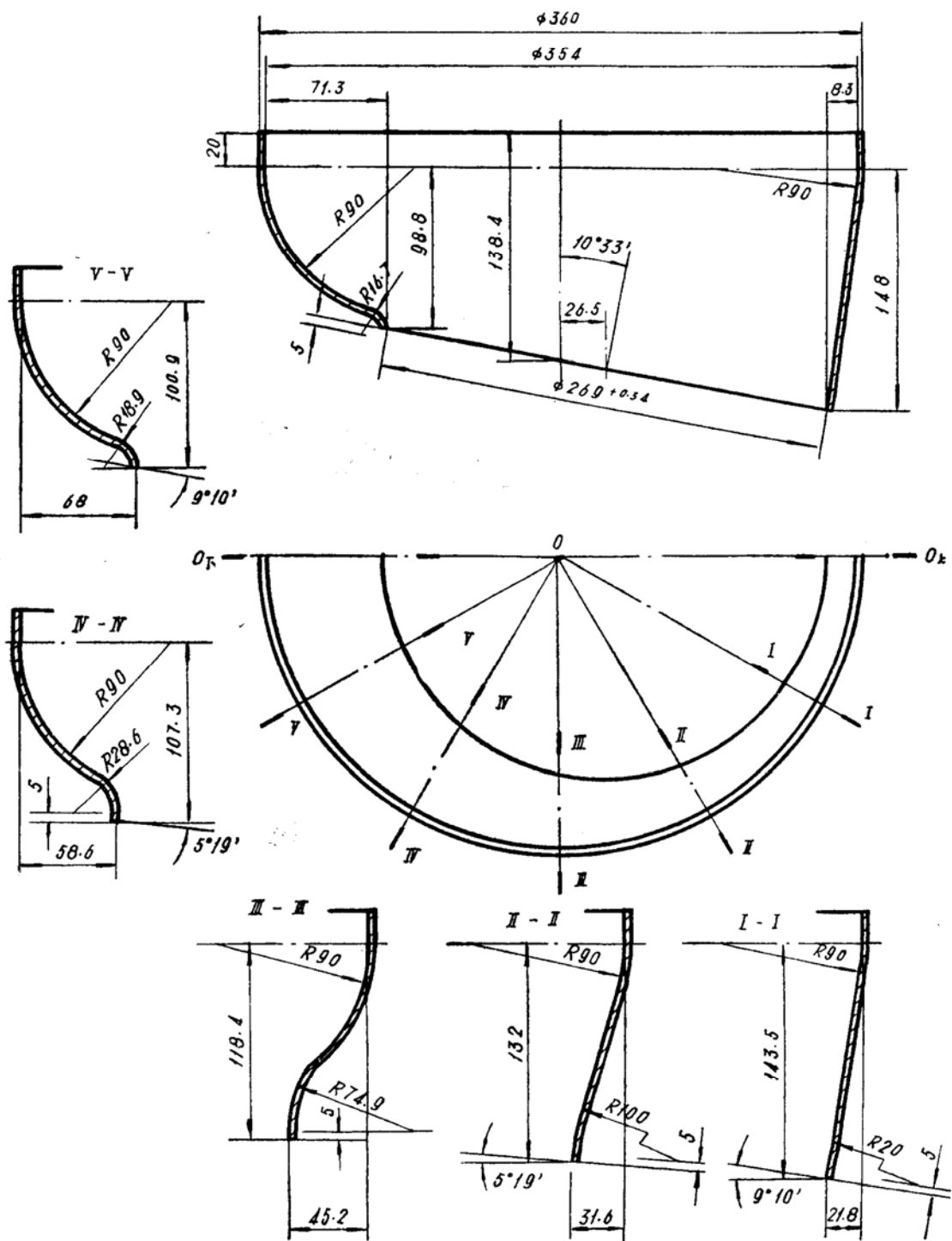


图5 变曲面封头

## 二、展开面积的计算

### 1. 计算公式简介:

由于变曲面的表面积很难以解析法来计算,现采用等高线(Волков)法来近似计算。用该法计算时,首先由制高点向外一圈一圈地画等高线 $L_n, L_{n-1}, L_{n-2} \cdots L_0$ 取最低点的高度为0,最高点的高度为 $h$ 。 $L_1$ 与 $L_{1+1}$ 之间的面积用 $B_1$ 表示(图6 阴影部分),然后按如下步骤来计算表面积:

$$1. \quad L = \sum_{i=0}^n L_i \quad L \text{ 为等高线的总长度}$$

$$B = \sum_{i=0}^n B_i \quad B \text{ 为总投影面积}$$

$$2. \quad \text{由} \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta h \cdot L}{B}$$

得出平均倾角 $\alpha$

$$3. \quad S = B \sec \alpha = \sqrt{B^2 + (\Delta h \cdot L)^2}$$

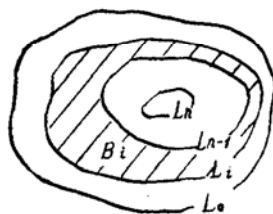


图 6 等高线法

$S$  就是所要求的曲面积的渐近值。此法所计算出的表面积,一般来说比实际值略小。华罗庚同志所著的《积分的近似计算》一书对此方法有较详细的讨论。

2. 计算数据:

### 1. 由各截面曲线求出等高线图

如图 7 所示, 先将各截面曲线重叠绘在以 MN 线为基准的图中, 然后在 MN 上每隔 20 作

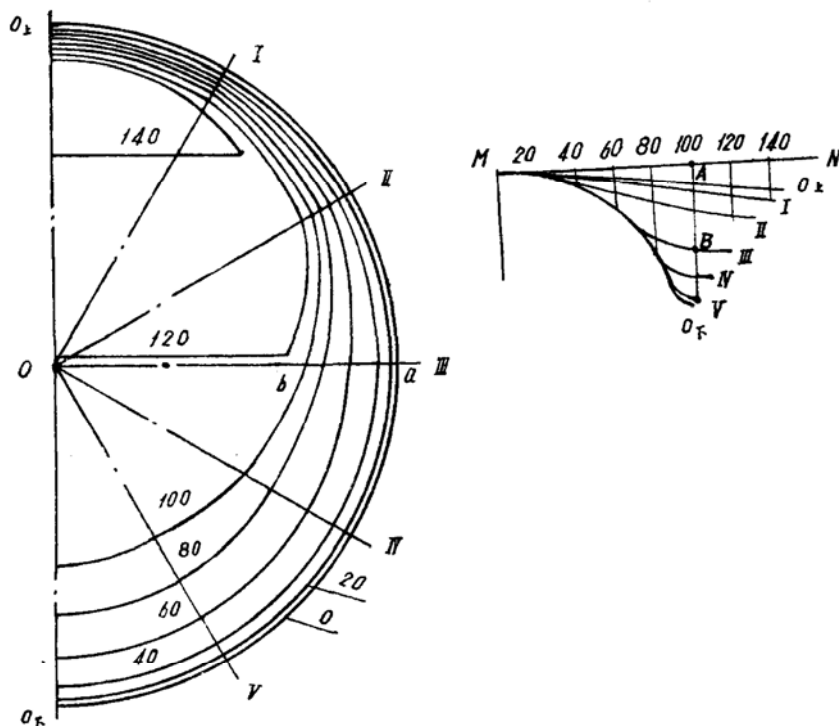


图 7 变曲面封头等高线图

垂直线与各截面曲线相交，各交点至MN的距离，即可作为该点在等高图中至零线圆的距离，如图中AB=ab。

2. 由等高线图测量及计算：

从等高线图中直接测量各等高线长度，测量结果如表 6。

表 6 等 高 线 长 度

| $L_0$ | $L_1$ | $L_2$ | $L_3$ | $L_4$ | $L_5$ | $L_6$ | $L_7$ | $L_8$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1112  | 1100  | 1070  | 1010  | 916   | 858   | 716   | 414   | 0     |

$$L = \sum_{i=0}^8 L_i = 7196$$

$$B = \pi R^2 = 3.1416 \times 177^2 \approx 98423$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta h L}{B} = \frac{20 \times 7196}{98423} \approx 1.46226$$

$$\alpha = 55^\circ 37' 58''$$

$$\sec \alpha = 1.77150$$

$$S = B \sec \alpha = 98423 \times 1.77150 \approx 174356$$

$$R'_{\text{展}} = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = \sqrt{\frac{174356}{3.1416}} \approx 236$$

考虑到封头还有20直边段，加放34加工余量(估计了余量的不均匀性)，取实际下料尺寸为：

$$R_{\text{展}} = R'_{\text{展}} + 20 + 34 = 290$$

通过试冲压检查，证明此下料尺寸是适合的。

— 30 —

现校核A处强度，其中 $\sigma_1$ ， $\sigma_2$ ， $\sigma_3$ 可按

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{PR_2}{2\delta_{\min}} \\ \sigma_2 = 0 \\ \sigma_3 = \sigma_1 \times \left(2 - \frac{R_2}{R_1}\right) \end{cases}$$

式中： $R_1, R_2$ 为A处主曲率半径，其值分别为 $R_1 = 7.49$ ， $R_2 = 21$   
 $\delta_{\min}$ 为实际最小板厚，等于0.25

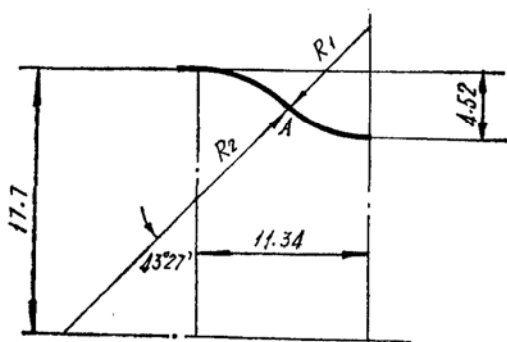


图8 平均截面

P 为最大工作压力, 等于 95 公斤/厘米<sup>2</sup>

$[\sigma]$  为许用应力, 等于 7000 公斤/厘米<sup>2</sup>

将上述数值代入公式计算得:

$$\sigma_1 = \frac{95 \times 21}{2 \times 0.25} = 3990$$

$$\sigma_3 = 3990 \times \left(2 - \frac{21}{7.49}\right) = -3207$$

$$\therefore \sigma_{\text{IV}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{3990^2 + 3207^2 + 7197^2} = 6245 < 7000 = [\sigma]。 \text{故符合强度要求。}$$

#### 四、冲压工艺简介

我们所选用的变曲面封头的材料是 30CrMnSiA 板材, 板厚为 3 毫米。该材料的延伸率  $\delta_{10} \geq 16\%$ , 而一般 20 号钢的延伸率  $\delta_{10} \geq 26\%$ , 故知 30CrMnSiA 板材的冲压成型较困难。我们经反复试验, 最后是采取四次成型的冷冲压工艺。

##### 1. 模具

采用了四套模具, 其中

1. 模 1, 由阴模、阳模、底座、压边圈等大件组成。Φ580 的圆板料经模 1 冲压成图 9(a) 所示形状。此模具有一特点: Φ580 板料放在阴模定位槽时, 使其与阳模轴心线不同心, 偏心距为 25, 这样做能使所成坯料为一个两边高度不同的盘形。

2. 模 2, 由阴模、阳模、底座、压边圈等大件组成。模 1 所成的坯料反扣在阴模上, 冲压成图 9(b) 所示形状。此模具也有一特点: 是采取反冲压的方式, 这样做能避免坯料在冲压时起皱等缺陷。

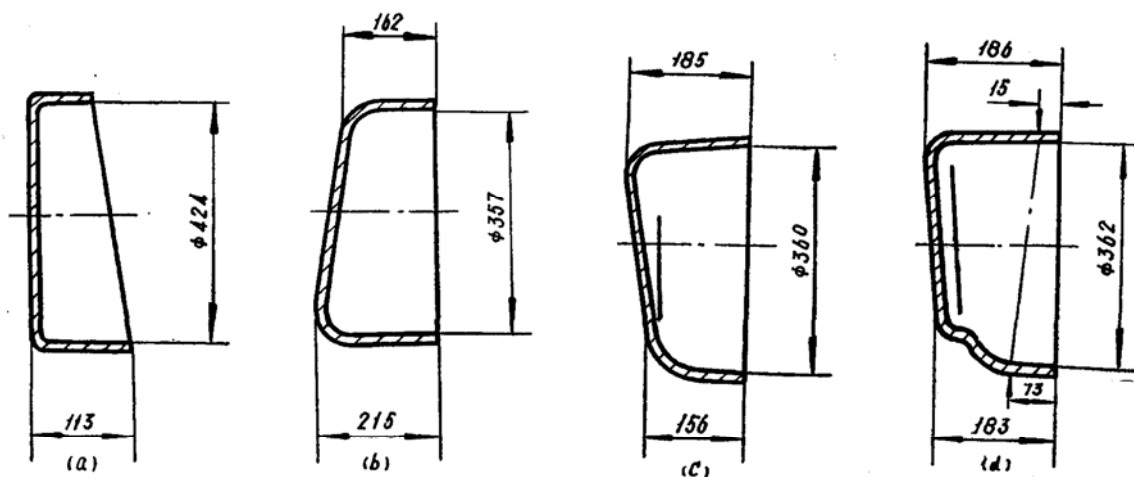


图9 冲压坯料形状

3. 模 3, 由阴模、阳模、脱料板、托板等大件组成。模 2 所成坯料放在阴模内, 由阳模及托板冲压成图 9(c) 所示形状。此模具的特点是阳模和托板是组合加工的, 然后再分开使用。

4. 模 4, 由阴模、阳模、脱料板、标志冲头等大件组成。此模为最后一道成型模, 其阴模是和模 3 共用的。此模具的特点是, 冲压至所需压力后, 用标志冲头在坯料上冲出基准孔, 然后再松压, 提起阳模。最后成型如图 9(d) 所示。

## 2. 工艺

1. 检查材料合格证、炉号、牌号、厚度及表面质量(按 YB540—65 三级)
2. 剪八角形板料(龙门剪床)八角内切圆为  $\phi 590$
3. 退火: (箱式电炉) 加热  $900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ , 保温 1.5~2 小时, 随炉冷至  $650^{\circ}\text{C}$  后室温冷却。
4. 矫正: 翘曲度应小于 1.5
5. 除锈
6. 车圆片:  $\phi 580 \pm 0.15$  (CQ61100 大车) 并去毛刺
7. 一冲: 工件涂锭子油(500 吨油压机) (模具 1)
8. 退火(箱式电炉)加热  $690^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$  保温一小时, 空气中冷却
9. 二冲: 工件涂锭子油(500 吨油压机) (模具 2)
10. 退火: 同 8
11. 三冲: 工件涂锭子油(500 吨油压机) (模具 3)
12. 退火: 同 8
13. 四冲: 工件涂锭子油(500 吨油压机) (模具 4) 打标志
14. 退火: 同 8
15. 检验并转机械加工切端面等。

## 五、模具变曲面的加工

前面所介绍的模 3, 模 4 的阴、阳模都是变曲面的, 在通用的设备上用常规的加工方法是不好加工的。通过摸索, 我们在一般的 CQ61100 大车上采用分段加工的方法, 解决了模具变曲面的加工问题。现以模 4 的阳模加工为例, 说明变曲面的加工方法。

(一) 将  $\phi A$ 、 $\phi B$ 、M 面 N 面加工出, 在加工  $\phi B$ 、M 面时可采用斜面夹具, 使 M 面与车床旋转轴心线垂直, 然后校正  $\phi B$  中心, 即可在车床上加工出。

(二) 然后以  $\phi A$  为基准, 套上阳模车削偏心筒(参看图 11), 在车床上四爪卡盘上进行校调, 使机床旋转中心分别对准该偏心筒上所刻的 0, I, II, ……V 中的某一点。校调时可利用机床尾架上的顶尖来进行。

(三) 取下阳模车削偏心筒, 以所校正的偏心点为旋转中心, 进行车削变曲面的相应部分。例如以偏心筒中 I 为旋转中心, 则能加工出阳模 I—I 截面及其附近的一段曲面。重复(二)(三)的加工步骤, 就可以依次加工出变曲面的各个截面。在加工各截面时, 可以  $\phi A$

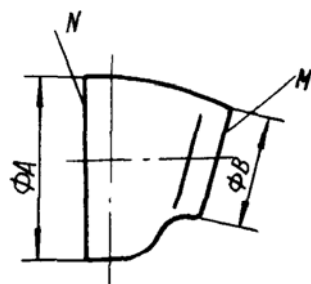


图 10 模 4 阳模

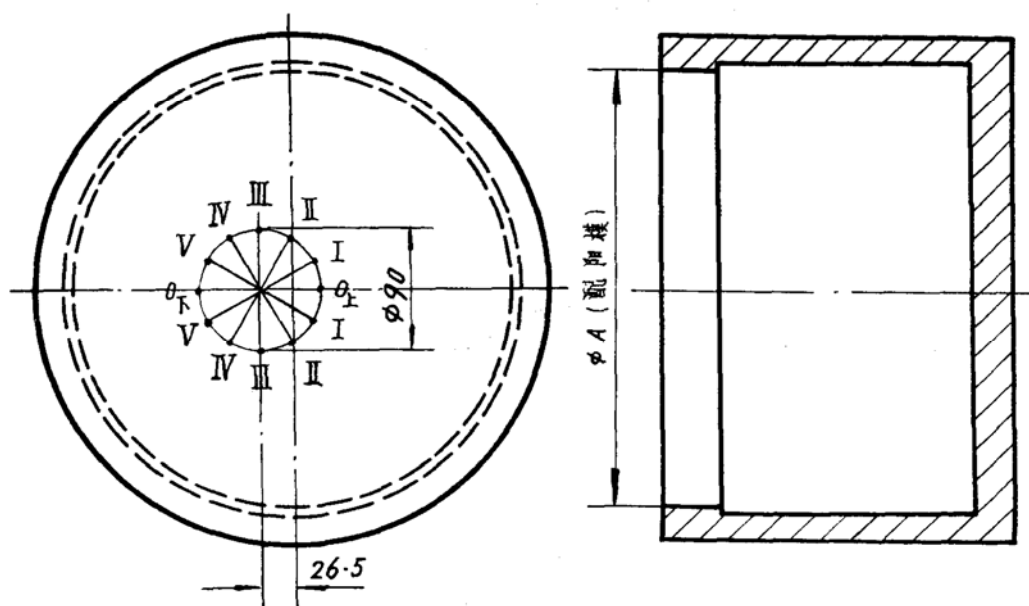


图 11 偏心筒

及M面为基准，使用截面样板，用双手控制法来车削。这时车削出来的曲面是不很光滑的，特别是各段曲面的连接处存在不规则的转折线。

（四）利用整形样板，手工打磨。磨除各转折线及不贴合样板的部位，使曲线各部分形状符合要求，各剖面连接处光滑。

## 六、结 束 语

本文仅以我们在研制中所遇到的某一变曲面封头为例，说明变曲面封头的设计和制造。其中所采用的设计方法或计算公式，比如用截面法来表示变曲面，用等高线法来计算下料尺寸，用平均截面法来估算强度等也能适用于其它变曲面封头。其中所采用的制造工艺方法，比如逐步成型的冲压工艺，模具的分段车削法等，由于不需要特殊的设备，简单易行，有一定的经济效果，对试制单位比较适用。但是，由于我们对变曲面封头的研制时间还较短，感到无论是理论上，还是在实践中都有不少问题需进一步探讨，如变曲面封头强度的精确计算，变曲面模具加工时劳动强度的减轻等都需要进一步做工作，也欢迎对此问题感兴趣的同志们给予指导和帮助。

## 参 考 文 献

- （1） 华罗庚、王元著《积分的近似计算》1961科学出版社出版
- （2） 北京航空学院403教研室编《旋转薄壳》1976.7出版