

# 螺旋焊管的成型技术

白 忠 泉

(中国石油天然气管道局钢管厂)

**摘 要** 对螺旋焊管成型技术的辊形设计、预弯定位、成型控制以及弯板辊的适用性等问题进行了研究,并给出了成型工艺设计示例,对成型设计和现场调试具有一定的指导意义。

**关键词** 螺旋焊管 成型技术 辊形曲线 预弯 弹复

## 1 一种线接触式内压辊

### 1.1 设计方法

在螺旋焊管产品中,经常可以看到一些钢管的管体上存在着波浪弯压痕,这种波浪弯压痕属制造缺陷。导致钢管波浪弯压痕的直接原因是制造过程中成型装置内压辊辊形设置不合理。过去由于缺乏内压辊辊形设置的应用技术,内压辊辊形只能用比较法确定,结果与理想的辊形差距较大,这是导致钢管波浪弯压痕的主要原因。

轧辊与管坯的接触状态由轧辊的表面形状决定。笔者所述“一种线接触式内压辊”采用了一种新的内压辊辊形曲线设计方法,利用这种方法设计的辊形,能够与被预弯管坯保持线接触,避免由于点接触而对管坯产生的波浪弯压痕,提高钢管的外观质量,同时能够使带钢在成型的预弯过程中变形均匀,提高钢管的内在质量。

本方法所述的内压辊辊形曲线是指内压辊的母线形状。由于内压辊的母线形状通常设计为圆弧形,所以本方法所述的内压辊辊形曲线的设计实际上就是内压辊母线半径的设计。

图1是螺旋焊管成型内压辊工作位置示意图。图中: $r_t$ —内压辊辊面在管坯轴线方向投影的弧半径; $r_b$ —内压辊的半径; $r_m$ —内压辊的母线半径; $\widehat{ab}-r_t$ 的弧长; $a_1b_1-\widehat{ab}$ 在俯视图的投影。

图中各参数之间的关系为(经验公式):

$$r_m = (r_t - r_b \sin^2 \alpha_n) / \cos^2 \alpha_n \quad (1)$$

$$\text{或 } r_t = r_b \sin^2 \alpha_n + r_m \cos^2 \alpha_n \quad (2)$$

根据(1)式,当已知参数 $r_b$ 、 $\alpha_n$ 、 $R_{2n}$ 时,便可以

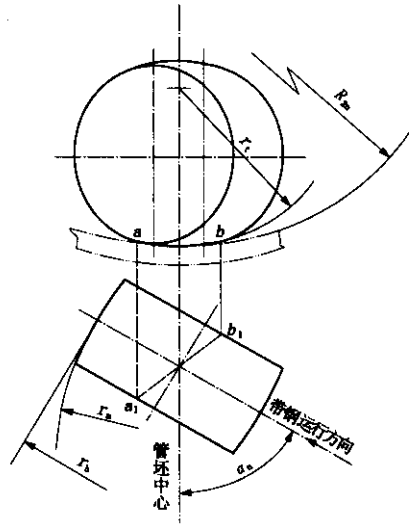


图1 成型内压辊工作位置示意图

确定内压辊为线接触时(此时 $r_t = R_{2n}$ )所适用的内压辊母线半径 $r_m$ 。 $r_m$ 确定后,适用于特定条件的线接触式内压辊的辊形也就确定了。

### 1.2 方法的应用

#### 1.2.1 设计新辊形(确定内压辊的母线半径)

根据螺旋焊管产品的工艺设计结果,提取必要的参数值作为实施本设计方法的输入条件,这些条件包括:内压辊的半径 $r_b$ ;内压辊的安装角度 $\alpha_n$ ;预弯管坯的内半径 $R_{2n}$ ,并令 $r_t = R_{2n}$ 。

将上述参数值代入(1)式,得出内压辊的母线半径 $r_m$ 。 $r_m$ 值确定后,适用于预弯管坯(半径为 $R_{2n}$ )的线接触式内压辊的辊形也就确定了。

#### 1.2.2 验证已知辊形的适用性

给出内压辊的已知条件,这些条件包括:内压辊的半径 $r_b$ ;内压辊的母线半径 $r_m$ ;内压辊的安

装角度  $\alpha_n$ 。将上述值代入 (2) 式,得出内压辊的投影半径  $r_t$ ,并令  $r_t = R_{2n}$ ,则适用于已知辊形的线接触式预弯管坯的内半径  $R_{2n}$  也就确定了。

## 2 成型预弯的定位

预弯与定径是螺旋焊管成型过程中的主要工序。预弯的主要目的是解决管坯的弹复问题,因为弹复的大小直接影响钢管的内在质量;定径的主要目的是为了得到更加精确的管坯直径,因为直径控制是钢管的主要质量指标之一。预弯与定径之间需要有一个合适搭配才能得到理想的钢管管坯。

### 2.1 预弯与弹复的基本状态

图 2 为带钢(中性层)弯曲与弹复的状态示意图,图中  $\widehat{AC}$  为  $R_{1z}$  的控制范围; $\widehat{CG}$  为  $R_{2z}$  的控制范围,中心为  $O_2$ ;  $\widehat{GD}$  为  $R_{3z}$  的控制范围,中心为  $O_3$ 。在图 2 中,  $C$  点为  $\widehat{AC}$  与  $\widehat{CG}$  的拐点,  $\widehat{AC}$  与  $\widehat{CG}$  在  $C$  点处的斜率相等(公切)。 $G$  点为  $\widehat{CG}$  与  $\widehat{GD}$  的拐点,  $\widehat{CG}$  与  $\widehat{GD}$  在  $G$  点处的斜率相等(公切)。这种设置比较真实地反映了带钢弯曲过程中曲率的变化情况。

### 2.2 预弯的定位方法

根据图 2,我们就能够解决成型预弯的定位问题,即这种定位必须以  $G$  点为基准点,使定径弧、预弯弧、弹复弧在  $G$  点公切。因为只有这样的定位方法才能满足预弯弧在定径套内的充分弹复。为了便于叙述我们可以把这种方法叫做“公切”定位法。

图 3 ~ 图 6 为按  $G$  点公切设置的不同弹复状态的预弯定位示意图,其中:

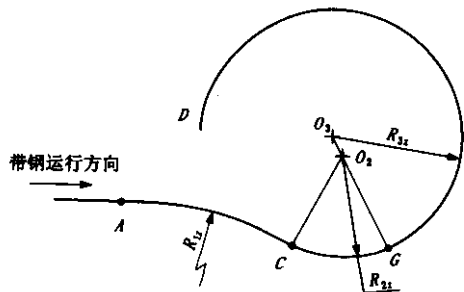


图 2 带钢的弯曲与弹复示意图

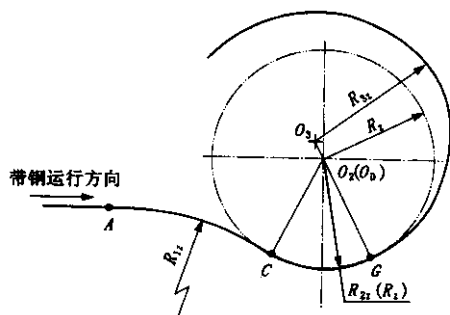


图 3 等量预弯设置示意图

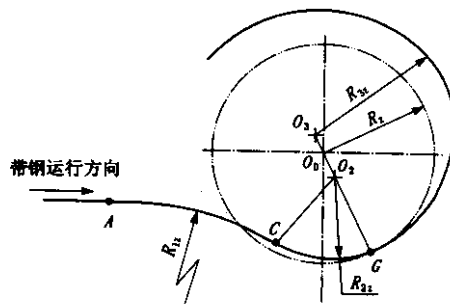


图 4 正弹复设置示意图

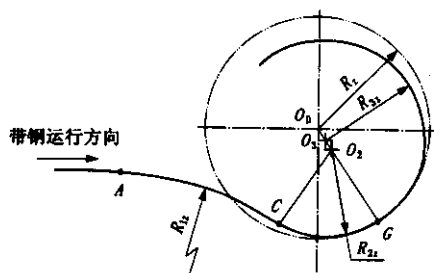


图 5 负弹复设置示意图

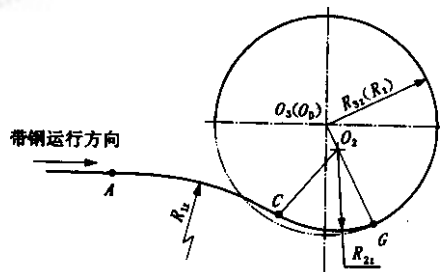


图 6 适量成型设置示意图

(1) 图 3 为等量预弯设置示意图,这种设置的特点是①符合“公切”条件;②预弯值( $R_{2z}$ )与定径值( $R_z$ )相等;③预弯中心( $O_2$ )与定径中心( $O_D$ )同心;④管坯的正弹复量( $R_{3z}$ )处于最大状态;⑤ $R_{2z}$ ,  $R_{3z}$ ,  $R_z$  所对应的弧在  $G$  点有公切线。

(2) 图 4 为正弹复设置示意图,这种设置的特点是①符合“公切”条件;②管坯的弹复量( $R_{3z}$ )为正值(向外弹);③ $R_{2z}$ , $R_{3z}$ , $R_z$ 所对应的弧在  $G$  点有公切线;④预弯值( $R_{2z}$ )小于定径值( $R_z$ )。

(3) 图 5 为负弹复设置示意图,这种设置的特点是①符合“公切”条件;②管坯的弹复量( $R_{3z}$ )为负值(向内弹);③ $R_{2z}$ , $R_{3z}$ , $R_z$ 所对应的弧在  $G$  点有公切线;④预弯值( $R_{2z}$ )比正弹复设置时要小。

(4) 图 6 为适量成型设置示意图,这种设置的特点是①符合“公切”条件;②弹复值( $R_{3z}$ )与定径值( $R_z$ )相等;③弹复中心( $O_3$ )与定径中心( $O_D$ )同心;④ $R_{2z}$ , $R_{3z}$ , $R_z$ 所对应的弧在  $G$  点有公切线。

众所周知,实际意义的适量成型是不存在的。因此,当选用这种方法时,应当有相应的辅助控制手段。

(5) 图 7 为一种非“公切”设置示意图,这种设置的特点是① $R_{2z}$ , $R_{3z}$ , $R_z$ 所对应的弧在  $G$  点呈相交状态,不符合“公切”条件;②预弯中心( $O_2$ )与定径中心( $O_D$ )在同一条垂线上;③预弯值( $R_{2z}$ )小于或等于定径值( $R_z$ );④工件值( $R_g$ )小于定径值( $R_z$ )。显然,这是一种不合理的设置状态。

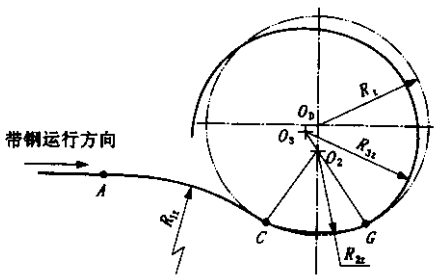


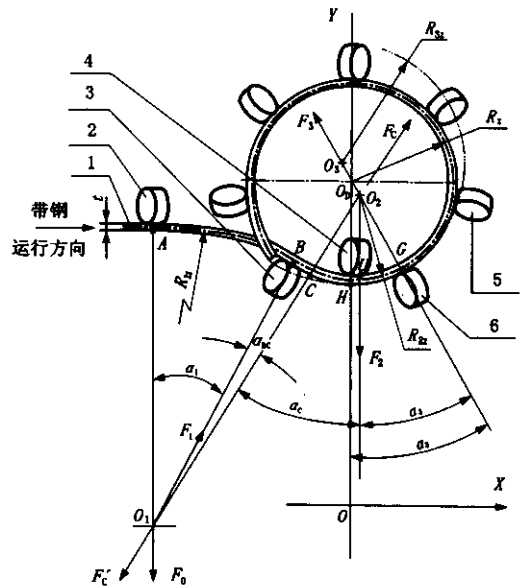
图 7 预弯与定径对中设置示意图

### 3 成型控制方法(一) — 公切、正压预弯法

公切、正压预弯的含义就是在预弯成型的控制过程中(见图 8),预弯弧( $R_{2z}$ )、弹复弧( $R_{3z}$ )与定径弧( $R_z$ )在 3<sup>#</sup>辊处公切,内压辊的力作用线( $F_2$ )与预弯弧( $R_{2z}$ )的垂直中心线相重合,即内压辊的作用力垂直正压。

#### 3.1 主要特征

(1) 内压辊受正压力,轧辊的承载能力能够



1—带钢 2—带钢输入定位辊(0<sup>#</sup>辊) 3—预弯下辊(1<sup>#</sup>辊)

4—预弯上辊(2<sup>#</sup>辊) 5—定径辊 6—预弯下辊(3<sup>#</sup>辊)

图 8 公切、正压预弯法

充分发挥;

(2) 容易实现内压辊外表面与预弯弧内表面的线接触,避免由于点接触产生的压力集中而将管坯压出波浪弯压痕;

(3) 内压辊中心与定径套中心之间需具备横向相对移位功能;

(4) 能够适用于对弹复有要求的管坯控制。

#### 3.2 基本原理

图 8 为本控制方法的原理示意图。图中  $XOY$  为平面直角坐标系; $A(X_A, Y_A)$  为 0<sup>#</sup>辊的定位控制点, $F_0$  为 0<sup>#</sup>辊的作用力; $B(X_B, Y_B)$  为 1<sup>#</sup>辊的定位控制点, $F_1$  为 1<sup>#</sup>辊的作用力, $\alpha_1$  为  $F_1$  的夹角, $R_{1z}$  为该阶段输入带钢的中性层半径, $O_1(X_1, Y_1)$  为  $R_{1z}$  的弧心, $\widehat{AC}$  为带钢变形的第一阶段,也叫输入阶段; $U(X_U, Y_U)$  为 2<sup>#</sup>辊的定位控制点, $F_2$  为 2<sup>#</sup>辊的作用力, $R_{2z}$  为该阶段输入带钢的中性层半径,其外半径为  $R_{2w}$ ,内半径为  $R_{2n}$ , $O_2(X_2, Y_2)$  为  $R_{2z}$  的弧心, $R_{2w}$  的曲率区间为  $\widehat{CG}$ , $\widehat{CG}$  为带钢变形的第二阶段,也叫预弯阶段; $C(X_C, Y_C)$  为  $R_{1n}$  与  $R_{2w}$  的拐点,在此截面处带钢只受内剪力,而弯矩为零, $F_C$  与  $F_C'$  是该截面处的一组平衡内剪力。 $C$  点的位置夹角为  $\alpha_C$ , $B$  点与  $C$  点的位置夹角为  $\alpha_{BC}$ ; $G$

( $X_G, Y_G$ ) 为 3<sup>#</sup> 辊的定位控制点,  $F_3$  为 3<sup>#</sup> 辊的作用力,  $\alpha_3$  为 3<sup>#</sup> 辊的夹角;  $G$  点是预弯弧( $R_{2w}$ ) 的终点, 也是定径弧( $R_w$ ) 的起点和弹复弧( $R_{3w}$ ) 的起点,  $G$  点是以上三弧的公切点; 沿定径位置( $R_w$ ) 布置的一套控制辊, 通常称为定径辊, 当采用外控定径方法时轧辊布置在管坯的外侧, 当采用内控定径方法时轧辊布置在管坯的内侧。  $R_z$  为管坯中性层半径,  $O_D(X_D, Y_D)$  为  $R_z$  的圆心点。  $H(X_H, Y_H)$  点为受控管坯的最低点, 也是成型控制过程的基准点, 该阶段称为带钢变形的第三阶段, 也叫定径阶段。

带钢经过输入、预弯、定径三个阶段形成了管坯, 而带钢的输入、预弯、定径三个阶段的位置是由 0<sup>#</sup> 辊、1<sup>#</sup> 辊、2<sup>#</sup> 辊、3<sup>#</sup> 辊、定径辊所决定的, 因而只要确定了 0<sup>#</sup> 辊、1<sup>#</sup> 辊、2<sup>#</sup> 辊、3<sup>#</sup> 辊、定径辊的安装位置, 既确定了  $A, B, C, H, U, G$  各点的位置, 也就实现了对带钢的输入、预弯和定径的控制。

### 3.3 设计要点

#### 3.3.1 给出条件

(1) 确定基准面 一般以安装成型装置的设备表面为基准面( $X$  轴在该面内)。

(2) 确定  $H$  点坐标  $X_H = 0, Y_H = h_0$ 。

(3) 给出设定条件 ① 3<sup>#</sup> 辊夹角  $\alpha_3$  值(或  $G$  点坐标值  $X_G, Y_G$  中的一个) ② 拐点  $C$  夹角  $\alpha_C$  值(或  $C$  点坐标值  $X_C, Y_C$  中的一个) ③ 输入钢带的  $r_1$  值(或  $A$  点坐标值  $X_A, Y_A$  中的一个)。

#### 3.3.2 参数计算

(1) 定径段参数(第三阶段参数)

$O_D$  点坐标  $X_D = 0, Y_D = R_w + Y_H$ ;

$G$  点坐标  $X_G = R_w \sin \alpha, Y_G = Y_D - R_w \cos \alpha_3$ 。

(2) 预弯段参数(第二阶段参数)

根据弹复理论:

$R_{3z} = R_z + T/2\pi$ ;

$r_3 = R_{3z}/t$ ;

$r_2 = r_3/[1 + 2(k_1 + k_0/2r_3)r_3\sigma_s/E]$ ;

$M_2 = (k_1 + k_0/2r_2)W\sigma_s$ ;

$R_{2z} = r_2 t$ ;

$R_{2w} = R_{2z} + t/2$ ;

$R_{2n} = R_{2z} - t/2$ 。

式中  $T$ —弹复量(周长方向), mm;

$R_{3z}$ —自由弹复后中性层半径, mm;

$r_2$ —预弯阶段中性层相对弯曲半径, mm;

$r_3$ —自由弹复后中性层相对弯曲半径, mm;

$M_2$ —弯曲力矩, N·mm;

$E$ —弹性模量,  $E = 2.1 \times 10^5$  MPa;

$k_0$ —相对强化模数, 其值为  $2.1/\delta$ ;

$k_1$ —形状系数, 其值为 1.5。

$O_2$  点坐标  $X_2 = X_G - R_{2w} \sin \alpha_3$ ,

$Y_2 = R_{2w} \cos \alpha_3 + Y_G$ ;

$U$  点坐标  $X_U = X_2, Y_U = Y_2 - R_{2n}$ ;

$C$  点坐标值  $X_C = X_2 - R_{2w} \sin \alpha_C$ ,

$Y_C = Y_2 - R_{2w} \cos \alpha_C$ ;

$C$  截面剪力  $F_C(F_C')$   $= M_2/R_{2z} \sin \alpha_C$ 。

(3) 输入段参数(第一阶段参数)

$O_1$  点坐标  $X_1 = -(R_{1z} + R_{2z}) \sin \alpha_C$ ,

$Y_1 = Y_2 - (R_{1z} + R_{2z}) \cos \alpha_C$ ;

弯矩值  $M_1 = [K_1 + 2(r_1 \sigma_s/E)^2] W \cdot \sigma_s$ ;

$\widehat{BC}$  夹角  $\alpha_{BC} = \arcsin[M_1/R_{1z} F_C']$ ;

1<sup>#</sup> 辊夹角  $\alpha_1 = \alpha_C - \alpha_{BC}$ ;

$B$  点坐标  $X_B = [R_{1z} - t/2] \sin \alpha_1 + X_1$ ,

$Y_B = [R_{1z} - t/2] \cos \alpha_1 + Y_1$ ;

$A$  点坐标  $X_A = X_1, Y_A = Y_1 + R_{1z} - t/2$ 。

(4) 各辊作用力

3<sup>#</sup> 辊  $F_3 = M_2/R_{2z} \sin \alpha_3$ ;

2<sup>#</sup> 辊  $F_2 = [1/\tan \alpha_C + 1/\tan \alpha_3] M_2/R_{2z}$ ;

1<sup>#</sup> 辊  $F_1 = F_C' \sin \alpha_C / \sin \alpha_1$ ;

0<sup>#</sup> 辊  $F_0 = F_C' \sin \alpha_{BC} / \sin \alpha_1$ 。

## 4 成型控制方法(二)—公切、偏压预弯法

公切、偏压预弯的含义就是在预弯成型的控制过程中(图 9), 预弯弧( $R_{2z}$ )、弹复弧( $R_{3z}$ ) 与定径弧( $R_z$ ) 在 3<sup>#</sup> 辊处公切, 内压辊的力作用线( $F_2$ ) 相对预弯弧( $R_{2z}$ ) 的垂直中心线有一个偏转角, 即内压辊的作用力呈偏心压下。

### 4.1 主要特征

(1) 内压辊偏心受力, 轧辊的承载能力得不到充分发挥;

(2) 内压辊外表面与预弯弧内表面点接触, 容易产生压力集中而将管坯压出波浪弯压痕;

(3) 内压辊中心与定径套中心在同一条垂线上, 横向定位比较方便, 但由于内压辊偏心接触,

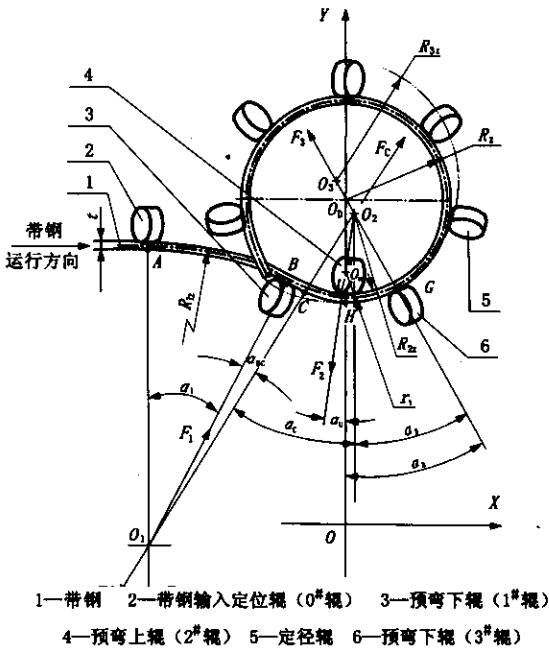


图9 公切、偏压预弯法

因而内压辊的纵向定位比较困难；

(4) 也可用于对弹复有要求管坯的控制。

鉴于上述情况,此方法不推荐使用。

#### 4.2 基本原理

图9为本控制方法的原理示意图。图中 $XOY$ 为平面直角坐标系,其中 $U(X_U, Y_U)$ 为2#辊的定位控制点, $\alpha_U$ 为 $U$ 点的偏转角。 $F_2$ 为2#辊的作用力。 $r_t$ 为2#辊的辊面投影半径, $O_n$ 为 $r_t$ 的中心点。其他各点的控制原理与3.2论述相同。

#### 4.3 设计要点

##### 4.3.1 给出条件

(1) 确定基准面 与3.3.1论述相同。

(2) 确定 $H$ 点坐标 与3.3.1论述相同。

(3) 给出设定条件 给出内压辊辊面的投影半径值 $r_t$ ,其他条件与3.3.1论述相同。

##### 4.3.2 参数计算

(1) 定径段参数(第三阶段参数)

各参数与3.3.2论述相同。

(2) 预弯段参数(第二阶段参数)

$O_2$ 点坐标 与3.3.2论述相同；

$U$ 点偏转角： $\alpha_U = \arcsin[X_2/(R_{2n} - r_n)]$ ；

$O_n$ 点坐标： $X_n = 0, Y_n = Y_2 - X_2 \tan \alpha_U$ ；

$U$ 点坐标： $X_U = -r_n \sin \alpha_U, Y_U = Y_n - r_n \cos \alpha_U$ ；

$C$ 点坐标值 与3.3.2论述相同；

$C$ 截面剪力： $F_C' = M_2/R_{2z} \sin(\alpha_C - \alpha_U)$ 。

(3) 输入段参数(第一阶段参数)

各参数与3.3.2论述相同。

(4) 各辊作用力

3#辊： $F_3 = M_2/R_{2z} \sin(\alpha_3 + \alpha_U)$ ；

2#辊： $F_2 = [1/\tan(\alpha_C - \alpha_U) + 1/\tan(\alpha_3 + \alpha_U)] \cdot M_2/R_2$ ；

1#辊： $F_1 = F_C' \sin \alpha_C / \sin \alpha_1$ ；

0#辊： $F_0 = F_C' \sin \alpha_{BC} / \sin \alpha_1$ 。

## 5 成型控制方法(三)—等量预弯法

等量预弯的含义就是在成型的控制过程中(图10),预弯半径 $R_{2z}$ 与拟定的管坯半径 $R_z$ 之值相等且重合。显然,本方法是成型的控制(一)和成型的控制(二)中的一种特例情况,单独提出的原因在于这种情况的典型性和应用的普遍性。

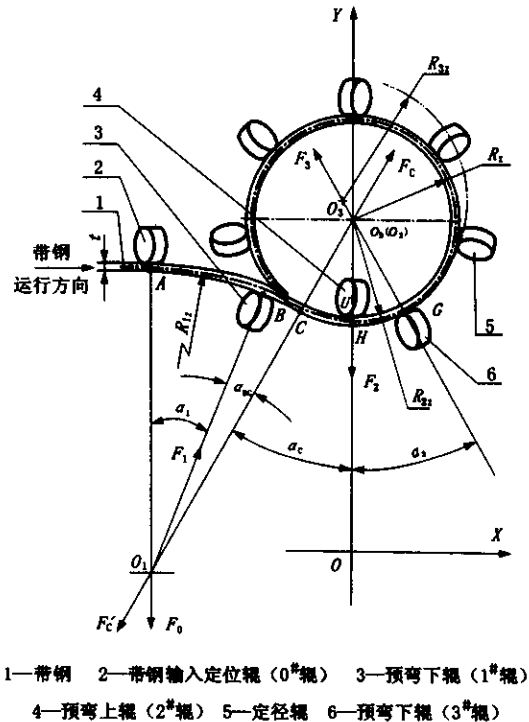


图10 公切、等量预弯法

#### 5.1 主要特征

(1) 内压辊垂直受力,轧辊的承载能力能够充分发挥；

(2) 容易实现内压辊外表面与预弯弧内表面的线接触,避免由于点接触产生的压力集中而将管坯压出波浪弯压痕；



- (3) 内压辊位置容易控制；
- (4) 管坯处于最大弹复状态。

5.2 基本原理

图 10 为本控制方法的原理示意图。图中： $XOY$  为平面直角坐标系，本方法只能采用外控定径即轧辊布置在管坯的外侧。 $R_z$  为管坯中性层半径， $O_D(X_D, Y_D)$  为  $R_z$  的圆心点，这里  $O_D$  与  $O_2$  相重合。其他各辊的控制原理与 3.2 论述相同。

5.3 设计要点

5.3.1 给出已知条件

- (1) 确定基准面 与 3.3.1 论述相同。
- (2) 确定 H 点坐标 与 3.3.1 论述相同。
- (3) 给出设定条件 预弯中性层半径  $R_{2x} = R_z$ ，其他条件与 3.3.1 论述相同。

5.3.2 参数计算

- (1) 定径段参数(第三阶段参数)

各参数与 3.3.2 论述相同。

- (2) 预弯段参数(第二阶段参数)

根据弯曲理论：

$r_2 = R_{2x}/t, M_2 = (K_1 + K_0/2r_2) W \cdot \sigma_s$ ；

$O_2$  点坐标： $X_2 = X_D, Y_2 = Y_D$ ；

U 点坐标： $X_U = 0, Y_U = Y_H$ ；

C 点坐标值 与 3.3.2 论述相同；

C 截面剪力 与 3.3.2 论述相同。

- (3) 输入段参数(第一阶段参数)

各参数与 3.3.2 论述相同。

- (4) 各辊作用力

各辊作用力与 3.3.2 论述相同。

6 弯板辊的适用性设计

在上述“成型控制方法”中，已经给出了成型过程弯板装置的控制方法，而且这种方法能够对同一种弯曲曲率实行多点区域性弯曲控制，以满足不同情况（如厚度变化）的弯曲需要。但是，实现这些控制方法的前提是弯板辊本身必须具备相应的调整功能，即具备适用性。

6.1 3# 辊的适用性设计

图 11 是 3# 辊的适用性设计示意图。图中： $R_{w \min}$  为管坯的最小外半径； $R_{w \max}$  为管坯的最大外半径； $\alpha_{G1}$  为  $R_{w \min}$  的最小控制夹角，交点为  $G_1$ ； $\alpha_{G2}$  为  $R_{w \min}$  的最大控制夹角，交点为  $G_2$ ； $\alpha_{G3}$  为  $R_{w \max}$

的最小控制夹角，交点为  $G_3$ ； $\alpha_{G4}$  为  $R_{w \max}$  的最大控制夹角，交点为  $G_4$ 。其余代号含义与图 8 相同。

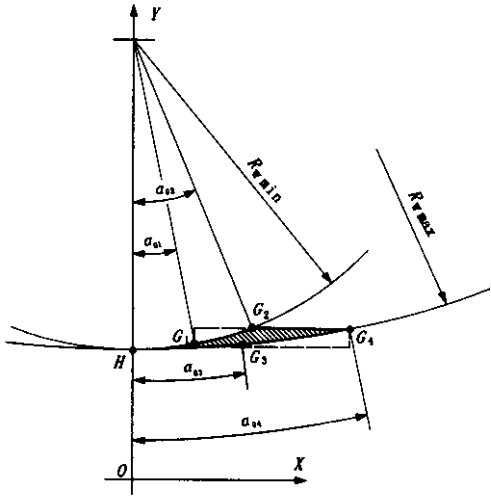


图 11 G 点调整区间示意

图中的阴影部分（图形  $G_1 G_2 G_4 G_3$ ）为 3# 辊的有效调整区间。而由  $X_{G1}, X_{G4}, Y_{G2}, Y_{G3}$  所组成的正交矩形则是满足 3# 辊有效调整区间的最小正交矩形区间（一般情况下）。3# 辊实现这种最小正交矩形可调区间应具备的条件是：

- (1) 水平移动功能

最近位置为  $X_{G1} = R_{w \min} \cdot \sin \alpha_{G1}$ ；

最远位置为  $X_{G4} = R_{w \max} \cdot \sin \alpha_{G4}$ ；

移动距离为  $\Delta_{X3} = X_{G4} - X_{G1}$ 。

- (2) 垂直移动功能

最低位置为  $Y_{G3} = Y_H + R_{w \max} - R_{w \max} \cdot \cos \alpha_{G3}$ ；

最高位置为  $Y_{G2} = Y_H + R_{w \min} - R_{w \min} \cdot \cos \alpha_{G2}$ ；

移动距离为  $\Delta_{Y3} = Y_{G2} - Y_{G3}$ 。

- (3) 转动角度功能

最大角度为  $\alpha_{G2}$ ，最小角度为  $\alpha_{G3}$ ，转动范围为  $\Delta \alpha_G = \alpha_{G2} - \alpha_{G3}$ 。

- (4) 转动中心设置

转动中心应与 G 点重合。因为只有这种设置才能实现调整辊子角度时 G 点位置不变，调整 G 点坐标时辊子角度不变。这将给调型工作带来极大的方便。

6.2 1# 辊的适用性设计

1# 辊的定位取决于拐点 C 的位置，图 12 是 1# 辊的适用性设计示意图。图中： $\alpha_{C1}$  为  $R_{w \min}$  和最

近拐点( $C_1$ )的控制夹角,可按  $\alpha_{C1} = \alpha_{C1}$  控制; $\alpha_{C2}$  为  $R_{w \min}$  和最远拐点( $C_2$ )的控制夹角,可按  $\alpha_{C2} = \alpha_{C2}$  控制; $\alpha_{C3}$  为  $R_{w \max}$  和最近拐点( $C_3$ )的控制夹角,可按  $\alpha_{C3} = \alpha_{C3}$  控制; $\alpha_{C4}$  为  $R_{w \max}$  和最远拐点( $C_4$ )的控制夹角,可按  $\alpha_{C4} = \alpha_{C4}$  控制;点  $B_5$  为 1<sup>#</sup> 辊的最远可控点。其余代号含义与图 11 相同。

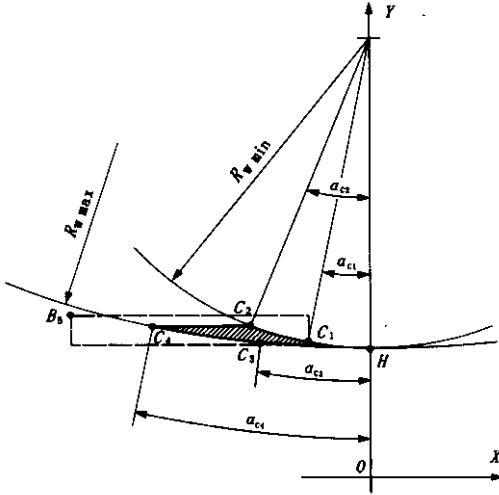


图 12  $C(B)$  点调整区间示意

图中的阴影部分(图形  $C_1C_2C_4C_3$ )为拐点  $C$  的调整区间。而根据  $C_1, C_2, C_3, C_4$  各点通过计算才能求得 1<sup>#</sup> 辊的相应控制点区间,这个过程很麻烦。为了简化,我们采用区间覆盖法 确定一个简单的几何区间,使该区间能够覆盖控制点区间。即增加了  $B_5$  点作为最远控制点进行控制,且选:  $X_{B5} = 2X_{C4}, Y_{B5} = Y_{C1} + 2(Y_{C2} - Y_{C1})$ 。而由点  $C_1, B_5$  为对角所组成的正交矩形则是 1<sup>#</sup> 辊的可调整区间。1<sup>#</sup> 辊实现这种调整应具备的条件是:

#### (1) 水平移动功能

最近位置为  $X_{C1} = -R_{w \min} \cdot \sin \alpha_{C1}$ ;

最远位置为  $X_{B5} = 2X_{C4}$ ,

$$(X_{C4} = -R_{w \max} \cdot \sin \alpha_{C4});$$

移动距离为  $\Delta_{X1} = X_{C1} - X_{B5}$ 。

#### (2) 垂直移动功能

最低位置为  $Y_{C3} = Y_H + R_{w \max} - R_{w \max} \cdot \cos \alpha_{C3}$ ;

最高位置为  $Y_{B5} = Y_{C3} + 3(Y_{C2} - Y_{C3})$ ,

$$(Y_{C2} = Y_H + R_{w \min} - R_{w \min} \cdot \cos \alpha_{C2});$$

移动距离为  $\Delta_{Y1} = Y_{B5} - Y_{C3}$ 。

#### (3) 转动角度功能

最大角度为  $\alpha_{B \max} = \alpha_{C2}$ ;

最小角度为  $\alpha_{B \min} = \alpha_{C3}/2$ ;

转动范围为  $\Delta \alpha_B = \alpha_{B \max} - \alpha_{B \min}$ 。

#### (4) 转动中心设置

转动中心应与  $B$  点重合。因为只有这种设置才能实现调整辊子角度时  $B$  点位置不变,调整  $B$  点坐标时辊子角度不变。这将给调型工作带来极大的方便。

### 6.3 2<sup>#</sup> 辊的适用性设计

图 13 是 2<sup>#</sup> 辊的适用性设计示意图。图中:  $U_1$  为最小钢管外径、最小壁厚、等量预弯时( $R_{n \min}$ )的控制点; $U_2$  为最小钢管外径、最小壁厚、最大预弯时( $R_{n2 \min}$ )的控制点; $U_3$  为最大钢管外径、最大壁厚、等量预弯时( $R_{n \max}$ )的控制点; $U_4$  为最大钢管外径、最大壁厚、最大预弯时( $R_{n2 \max}$ )的控制点。其余代号含义与图 11 相同。

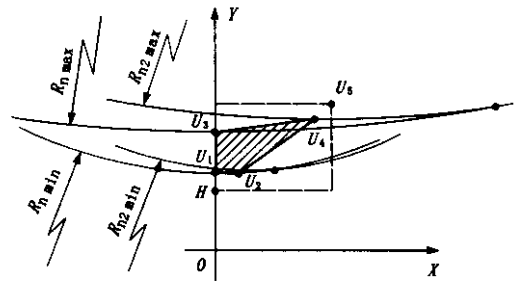


图 13  $U$  点调整区间示意

图中的阴影部分(图形  $U_1U_2U_4U_3$ )为 2<sup>#</sup> 辊的有效调整区间。显然,这种求解过程也比较麻烦,同样用简单覆盖法解决,即另增加一个控制点  $U_5$ ,并令:  $X_{U5} = 2t, Y_{U5} = Y_H + 1.5t$ ,而由点  $H, U_5$  为对角所组成的正交矩形则完全能够覆盖 2<sup>#</sup> 辊的有效调整区间。2<sup>#</sup> 辊实现这种正交矩形可调区间应具备的条件是:

#### (1) 水平移动功能

最近位置为  $X_U = X_H = 0$ ;

最远位置为  $X_{U5} = 2t$ ;

移动距离为  $\Delta_{X2} = X_{U5} - X_H = 2t$ 。

#### (2) 垂直移动功能

最低位置为  $Y_U = Y_H$ ;

最高位置为  $Y_{U5} = Y_H + 1.5t$ ;

移动距离为  $\Delta_{Y2} = Y_{U5} - Y_H = 1.5t$ 。

## 6.4 0<sup>#</sup>辊的适用性设计

0<sup>#</sup>辊的定位取决于拐点  $C$  的位置,图 14 是 0<sup>#</sup>辊的适用性设计示意图。图中  $A_1, A_2, A_3, A_4$  点为 0<sup>#</sup>辊(导板的末辊)分别与  $C_1, C_2, C_3, C_4$  相对应控制点,控制半径分别为  $R_{C1}, R_{C2}, R_{C3}, R_{C4}$ 。其余代号含义与图 11 相同。

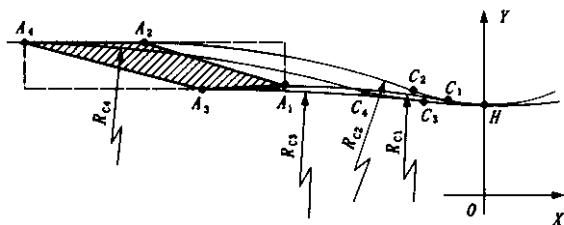


图 14 A 点调整区间示意

图中的阴影部分(图形  $A_1A_2A_4A_3$ )为 0<sup>#</sup>辊的有效调整区间,而由  $X_{A1}, X_{A4}, Y_{A2}, Y_{A3}$  所围成的正交矩形则构成了 0<sup>#</sup>辊的可调区间。0<sup>#</sup>辊实现这种正交矩形可调区间应具备的条件是:

### (1) 水平移动功能

最近位置为  $X_{A1} = -(R_{w \min} + R_{C1}) \sin \alpha_{C1}$ ,

其中  $R_{C1} = 200t_1$ , ( $t_1$  为最小管径时的最小壁厚);

最远位置为  $X_{A4} = -(R_{w \max} + R_{C4}) \sin \alpha_{C4}$ ,

其中  $R_{C4} = 200t_4$ , ( $t_4$  为最大管径时的最大壁厚);

移动距离为  $\Delta_{X0} = X_{A1} - X_{A4}$ 。

### (2) 垂直移动功能

最低位置为

$Y_{A3} = Y_H + R_{w \max} - (R_{w \max} + R_{C3}) \cos \alpha_{C3} + R_{C3}$ ,

其中  $R_{C3} = 200t_3$ , ( $t_3$  为最大管径时的最小壁厚);

最高位置为

$Y_{A2} = Y_H + R_{w \min} - (R_{w \min} + R_{C2}) \cos \alpha_{C2} + R_{C2}$ ,

其中  $R_{C2} = 200t_2$ , ( $t_2$  为最小管径时的最大壁厚);

移动距离为  $\Delta_{Y0} = Y_{A2} - Y_{A3}$ 。

## 6.5 设计示例

某成型器的适用范围为:外径  $D_w$  从 508 mm ( $t$  为 6 ~ 10 mm 时)到 1620 mm ( $t$  为 10 ~ 20 mm 时),成型基准点为  $H(0, 550)$ ,进行弯板辊的适用性设计。

根据已知条件可知:

$$D_{w \min} = 508 \text{ mm}, t_1 = 6 \text{ mm}, t_2 = 10 \text{ mm},$$

$$D_{w \max} = 1620 \text{ mm}, t_3 = 10 \text{ mm}, t_4 = 20 \text{ mm},$$

$$X_H = 0, Y_H = 550 \text{ mm}。$$

### 6.5.1 3<sup>#</sup>辊的适用性设计

设定条件:

$$\alpha_{C1} = 11^\circ, \alpha_{C2} = 22^\circ, \alpha_{C3} = 5.5^\circ, \alpha_{C4} = 11^\circ。$$

#### (1) 水平移动

$$X_{G1} = R_{w \min} \cdot \sin \alpha_{C1} = 48.47 \text{ mm};$$

$$X_{G4} = R_{w \max} \cdot \sin \alpha_{C4} = 154.56 \text{ mm};$$

$$\Delta_{X3} = X_{G4} - X_{G1} = 106.1 \text{ mm}。$$

#### (2) 垂直移动

$$Y_{G3} = Y_H + R_{w \max} - R_{w \max} \cdot \cos \alpha_{C3} = 553.7 \text{ mm};$$

$$Y_{G2} = Y_H + R_{w \min} - R_{w \min} \cdot \cos \alpha_{C2} = 568.5 \text{ mm};$$

$$\Delta_{Y3} = Y_{G2} - Y_{G3} = 14.77 \text{ mm}。$$

#### (3) 转动

转动角度范围  $\Delta \alpha_G = \alpha_{C2} - \alpha_{C3} = 16.5^\circ$ ;

转动中心 转动中心设在  $G$  点。

### 6.5.2 1<sup>#</sup>辊的适用性设计

设定条件:  $\alpha_{C1} = \alpha_{G1} = 11^\circ, \alpha_{C2} = \alpha_{G1} = 22^\circ$ ,

$$\alpha_{C3} = \alpha_{G3} = 5.5^\circ, \alpha_{C4} = \alpha_{G4} = 11^\circ。$$

#### (1) 水平移动

$$X_{C1} = -R_{w \min} \cdot \sin \alpha_{C1} = -48.47 \text{ mm};$$

$$X_{C4} = -R_{w \max} \cdot \sin \alpha_{C4} = -154.56 \text{ mm};$$

$$X_{B5} = 2X_{C4} = -309.11 \text{ mm};$$

$$\Delta_{X1} = X_{C1} - X_{B5} = 260.64 \text{ mm}。$$

#### (2) 垂直移动

$$Y_{G3} = Y_H + R_{w \max} - R_{w \max} \cdot \cos \alpha_{C3} = 553.7 \text{ mm};$$

$$Y_{G2} = Y_H + R_{w \min} - R_{w \min} \cdot \cos \alpha_{C2} = 568.5 \text{ mm};$$

$$Y_{B5} = Y_{G3} + 3(Y_{G2} - Y_{G3}) = 598.04 \text{ mm};$$

$$\Delta_{Y1} = Y_{B5} - Y_{G3} = 44.31 \text{ mm}。$$

#### (3) 转动

转动角度范围:

$$\Delta \alpha_B = \alpha_{B \max} - \alpha_{B \min} = \alpha_{C2} - \alpha_{C3} / 2 = 19.25^\circ;$$

转动中心 转动中心设在  $B$  点。

### 6.5.3 2<sup>#</sup>辊的适用性设计

#### (1) 水平移动

$$X_U = X_H = 0;$$

$$X_{U5} = 2t = 40 \text{ mm};$$

$$\Delta_{X2} = X_{U5} - X_H = 40 \text{ mm}。$$

#### (2) 垂直移动

$$Y_U = Y_H = 550 \text{ mm};$$



$$Y_{U5} = Y_H + 1.5t = 580 \text{ mm};$$

$$\Delta_{Y2} = Y_{U5} - Y_H = 1.5t = 30 \text{ mm}。$$

#### 6.5.4 0<sup>#</sup>辊的适用性设计

##### (1) 水平移动

$$R_{C1} = 200t_1 = 1200 \text{ mm};$$

$$X_{A1} = -(R_{w\min} + R_{C1}) \sin \alpha_{C1} = -277.44 \text{ mm};$$

$$R_{C4} = 200t_4 = 4000 \text{ mm};$$

$$X_{A4} = -(R_{w\max} + R_{C4}) \sin \alpha_{C4} = -917.7 \text{ mm};$$

$$\Delta_{X0} = X_{A1} - X_{A4} = 640.35 \text{ mm}。$$

##### (2) 垂直移动

$$R_{C3} = 200t_3 = 2000 \text{ mm};$$

$$Y_{A3} = Y_H + R_{w\max} - (R_{w\max} + R_{C3}) \cos \alpha_{C3} + R_{C3} \\ = 562.94 \text{ mm};$$

$$R_{C2} = 200t_2 = 2000 \text{ mm};$$

$$Y_{A2} = Y_H + R_{w\min} - (R_{w\min} + R_{C2}) \cos \alpha_{C2} + R_{C2} \\ = 714.13 \text{ mm};$$

$$\Delta_{Y0} = Y_{A2} - Y_{A3} = 151.19 \text{ mm}。$$

## 7 成型工艺设计示例

### 7.1 已知条件

#### 7.1.1 带钢的已知条件

板宽  $b = 1520 \text{ mm}$ , 板厚  $t = 15 \text{ mm}$ , 屈服强度  $\sigma_s = 510 \sim 550 \text{ MPa}$  (以  $530 \text{ MPa}$  计算), 延伸率  $\delta = 0.36 \sim 0.42$  (以  $0.39$  计算), 弹性模数  $E = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ , 相对强化模数  $K_0 = 2.1/\delta = 5.385$ , 形状系数  $K_1 = 1.5$ 。

#### 7.1.2 钢管的条件

外直径  $D_w = 1016 \text{ mm}$ , 外半径  $R_w = 508 \text{ mm}$ , 中性层直径  $D_z = 1016 - 15 = 1001 \text{ mm}$ , 中性层半径  $R_z = 1001/2 = 500.5 \text{ mm}$ , 最大弹复量  $T_{\max} = 100 \text{ mm}$  (按  $T = 0$  计算)。

### 7.2 内压辊辊形设计

已知  $R_{2n} = R_{2z} - t/2 = 387.75 \text{ mm}$ ,  $r_t = R_{2n} = 387.75 \text{ mm}$ ,  $r_b = 75 \text{ mm}$ ,  $\alpha_n = 60.728^\circ$ 。

据(1)式,得:

$$r_m = (r_t - r_b \times \sin^2 \alpha_n) / \cos^2 \alpha_n = 1383 \text{ mm}。$$

### 7.3 预弯的定位

采用  $G$  点公切法。

### 7.4 成型控制

根据产品的弹复要求和成型的设备功能,选用“公切、正压预弯法”进行成型控制(见图8)。

#### 7.4.1 给出条件

(1) 确定基准面 以弯板辊安装面为基准。

(2) 确定  $H$  点坐标  $X_H = 0, Y_H = 550 \text{ mm}$ 。

(3) 给出设定条件

$$\alpha_3 = 13^\circ, \alpha_C = 11^\circ, r_1 = 200 \text{ mm}。$$

#### 7.4.2 参数计算

(1) 定径段参数(第三阶段参数)

$O_D$  点坐标  $X_D = 0, Y_D = R_w + Y_H = 1058 \text{ mm};$

$G$  点坐标  $X_G = R_w \sin \alpha_3 = 114.28 \text{ mm};$

$$Y_G = Y_D - R_w \cos \alpha_3 = 563.02 \text{ mm}。$$

(2) 预弯段参数(第二阶段参数)

根据弹复理论得:

$$R_{3z} = R_z + T/2\pi = 500.5 \text{ mm};$$

$$r_3 = R_{3z}/t = 33.37 \text{ mm};$$

$$r_2 = r_3/[1 + 2(k_1 + k_0/2r_3)r_3 \cdot \sigma_s/E] = 26.35;$$

$$M_2 = (k_1 + k_0/2r_2)W \cdot \sigma_s = 55289432 \text{ N} \cdot \text{mm};$$

$$R_{2z} = r_2 t = 395.25 \text{ mm};$$

$$R_{2w} = R_{2z} + t/2 = 402.75 \text{ mm};$$

$$R_{2n} = R_{2z} - t/2 = 387.75 \text{ mm};$$

$O_2$  点坐标  $X_2 = X_G - R_{2w} \sin \alpha_3 = 23.68 \text{ mm},$

$$Y_2 = R_{2w} \cos \alpha_3 + Y_G = 955.45 \text{ mm};$$

$U$  点坐标  $X_U = X_2 = 23.68 \text{ mm},$

$$Y_U = Y_2 - R_{2n} = 567.7 \text{ mm};$$

$C$  点坐标  $X_C = X_2 - R_{2w} \sin \alpha_C = -53.17 \text{ mm},$

$$Y_C = Y_2 - R_{2w} \cos \alpha_C = 560.1 \text{ mm};$$

$$C \text{ 截面剪力 } F_C (F_C') = M_2/R_{2z} \sin \alpha_C \\ = 733114 \text{ N}。$$

(3) 输入段参数(第一阶段参数)

中性层半径  $R_{1z} = r_1 t = 3000 \text{ mm};$

$O_1$  点坐标:

$$X_1 = -(R_{1z} + R_{2z}) \sin \alpha_C = -647.8 \text{ mm},$$

$$Y_1 = Y_2 - (R_{1z} + R_{2z}) \cos \alpha_C = -2377.4 \text{ mm};$$

$$\text{弯矩值 } M_1 = [K_1 + 2(r_1 \sigma_s/E)^2] W \cdot \sigma_s \\ = 34177545 \text{ N} \cdot \text{mm};$$

$$\widehat{BC} \text{ 夹角 } \alpha_{BC} = \arcsin [M_1/R_{1z} F_C'] = 0.8904^\circ;$$

$$1^\# \text{ 辊夹角 } \alpha_1 = \alpha_C - \alpha_{BC} = 10.1096^\circ;$$

$B$  点坐标:

$$X_B = (R_{1z} - t/2) \sin \alpha_1 + X_1 = -122.52 \text{ mm},$$

$$Y_B = (R_{1z} - t/2) \cos \alpha_1 + Y_1 = 568.64 \text{ mm};$$

$A$  点坐标  $X_A = X_1 = -647.8 \text{ mm},$

$$Y_A = Y_1 + R_{1z} - t/2 = 615.1 \text{ mm}。$$

(下转第59页)

因此中心变形角为：

$$\theta_i = (180 \times 3B/4) / (\pi R_i) \approx 43B/R_i$$

式中  $\theta_i$ —第  $i$  架导向辊中心变形角, (°) ；

$B$ —钢带宽度, mm ；

$R_i$ —第  $i$  架导向辊中心弯曲半径, mm。

(2) 边缘变形角圆心及半径的确定

在中心弯曲半径上确定边缘变形角圆心  $O_1$  和  $O_2$ , 如图 4 所示,  $O_1$  和  $O_2$  中心距值为：

$$|O_1O_2|_i = b_i = K_i D_T$$

式中  $|O_1O_2|_i$ —第  $i$  架导向辊边缘变形角中心距, mm ；

$b_i$ —第  $i$  架导向辊导向片厚度, mm ；

$K_i$ —第  $i$  架辊导向片厚度系数, 见表 2 ；

$D_T$ —成品管外径, mm。

表 2 导向辊导向片厚度选择系数  $K$

| $D_T/\text{mm}$         | $K_1$         | $K_2$  | $K_3$    |
|-------------------------|---------------|--------|----------|
| $\phi 32$ 以下            | 0. 78 ~ 0. 92 | 0. 157 | 3 ~ 4    |
| $\phi 33 \sim \phi 60$  | 0. 28 ~ 0. 30 | 0. 166 | 3. 5 ~ 5 |
| $\phi 60 \sim \phi 114$ |               |        | 5 ~ 8    |
| $\phi 114$ 以上           | > 0. 31       | > 0. 2 | 10 ~ 12  |

钢带边缘弯曲半径  $r_i = R_i - |OO_1|_i$

式中  $r_i$ —第  $i$  架导向辊边缘变形半径, mm ；

$R_i$ —第  $i$  架导向辊中心变形半径, mm ；

$|OO_1|_i$ —第  $i$  架导向辊中心变形角与

边缘变形角中心距, mm。

4 结束语

导向辊崩裂, 在生产中较为常见。这里仅分析了通过改进孔型, 从而改变轧辊受力状态, 来减少或消除导向辊崩裂。但解决该问题的根本办法, 仍是改进轧辊的制造工艺, 使轧辊硬度既能满足生产需要, 又有足够韧性。因此, 解决导向辊在生产中崩裂掉块问题, 主要工作还需由轧辊生产厂家来做。

参考文献

1 中华人民共和国冶金部统编培训教材. 高频直缝电焊管生产. 北京 冶金工业出版社

作者 韩锋, 1971 年生, 1995 年毕业于包头钢铁学院轧钢专业, 工程师。现工作于 包头钢铁集团有限责任公司带钢厂第一焊管车间。联系地址 内蒙古包头市 包头钢铁集团有限责任公司带钢厂 邮编 014010 电话 0472-2185913

(收稿日期 2003-09-19)

编辑 谢淑霞

(上接第 56 页)

(4) 各辊作用力

3<sup>#</sup>辊作用力  $F_3 = M_2/R_{2z} \sin \alpha_3 = 621845 \text{ N}$  ；

2<sup>#</sup>辊作用力：

$F_2 = [1/\tan \alpha_C + 1/\tan \alpha_3] M_2/R_{2z} = 1\,325\,552 \text{ N}$  ；

1<sup>#</sup>辊作用力  $F_1 = F_C' \sin \alpha_C / \sin \alpha_1 = 796\,920 \text{ N}$  ；

0<sup>#</sup>辊作用力  $F_0 = F_C' \sin \alpha_{BC} / \sin \alpha_1 = 64\,902 \text{ N}$ 。

8 结束语

笔者根据自己多年来得到的工作经验为螺旋焊管的成型控制提供了一些技术手段, 并建立了相应的数学模型。这些手段为实现螺旋焊管成型过程的量化控制创造了条件。由于个人水平所限, 文内错误在所难免, 敬请读者批评指正。

参考文献

1 莫施宁(前苏联)著. 弯卷机和矫正机. 徐鲤庭译. 北京 机械工业出版社, 1958  
2 徐灏. 机械设计手册. 北京 机械工业出版社, 1991  
3 成大先. 机械设计手册. 北京 化学工业出版社, 1993  
4 白忠泉. 一种具有辊形轮廓线与螺旋管坯相吻合的内压辊. 中国专利, ZL02132903. 6. 2002-09-10

作者 白忠泉, 男, 1945 年生, 毕业于锦州工学院机械制造工艺及设备专业, 高级工程师, 主要从事螺旋焊管生产工艺及其装备的设计和研究工作。通讯地址 辽宁省辽阳市文圣区鹅房街 7 号 中国石油天然气管道局钢管厂研究所 邮编 111000

(收稿日期 2003-09-03)

编辑 郑一维