

## 钢管的高圆度剪切

26-30

胡大超

(上海冶金专科学校)

TG335.7521

**摘要** 分析了钢管剪切过程中剪切力变化及钢管变形的原因,采用变态对数曲线方程设计了新型的刀片形状曲线,并在此基础上提出了钢管的无变形剪切方法——双向切割法。

**主题词** 钢管, 刃口曲线, 双向切割, 剪切

Highly-Circular Cutting of Steel Tube / Hu Dachao // Welded Pipe and Tube. — 1992, 15(3): 26-30

In this paper, a new curve of the blade is designed by using the metamorphic logarithm curve, which is based on the analyses of the Change of Cutting force and the Cause of tube's deformation. The results also mentions a method of the bidirectional cutting steel tube, a method of steel tube without deformation.

**Key words:** steel tube curve of the blade bidirectional cutting

在钢管生产中,一般焊管机组常采用冲压式剪切机,剪切小车与管速同步,保证了同步剪切和定尺精度。冲压式剪切与通常用的飞锯、旋转式圆切等相比,具有切断速度快,生产率高(经测定剪切 $\Phi 19.85 \times 2$ 钢管仅用0.05~0.06s)、小车行程短,工作噪音小、无飞溅金属粉末,切口处不产生毛刺等优点。其不足之处是管端的切口截面有塌陷变形。

钢管剪口质量与刀片刃口曲线的形状有很大的关系,常用的冲压式剪切机刀片曲线为直线或圆方程。使用这类方程曲线刀片剪切的钢管剪口质量不高,表现为管口不圆或切入点下陷,管口截面变形较大。

图1为剪切机刀片刃口曲线采用直线方程时,剪切刃倾角 $\theta$ 与管材正圆度的关系。试验时管材 $\Phi 15$ (黄铜硬材)管壁 $t$ 分别选取2.0mm、1.5mm和0.8mm。实验结果表明:随着刃倾角 $\theta$ 越小则切口变形也越小,在同样的刃倾角 $\theta$ 下,则切口变形越大(试验 $\theta$ 取30°、45°、60°、75°、90°),因此要提高钢管的剪切质量就必须选择合适

的刃口曲线。

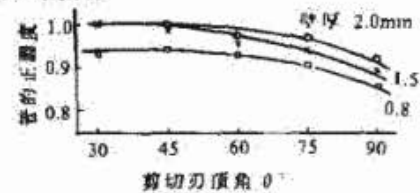


图1

## 1 冲压式剪切过程分析

以圆方程刀片为例,剪切过程如图2所示,刀片下压使刀尖与管壁接触,管材产生



图2

弹性变形, 随着刀尖的继续下移, 剪力不断增加, 达到一定值时, 刀尖切入管材, 刀尖在进入管腔的同时, 刀刃将剪切废料弯曲下推, 管子在瞬间剪断。

### 1.1 剪切力分析

由于目前对钢管剪切力计算等研究工作不够, 资料较少, 因此, 我们对精密焊接连续焊接—拉拔生产线上的冲压式剪切机性能参数进行了实测, 并高速拍摄记录了剪切过程图, 见图2。

由于剪切动作时间很短(剪切  $\Phi 16 \times 1.2$ 、 $\Phi 19.85 \times 2$  等仅在 0.05~0.08s 内完成) 为了便于分析, 假设剪切时间内冲剪速

度恒定, 将原来的  $P-t$  图转换为  $P-\epsilon$  图 ( $P$ : 剪切力,  $t$ : 时间,  $\epsilon$ : 相对切入量)。

图3(a)为测试中典型的  $P-\epsilon$  图, 图3(b)为刀片在剪切过程中对应于(a)图中某些点在钢管上的位置。刀剪切入管材后, 剪切力  $P$  直线上升到(a)图中的  $A$  点, 刀片在钢管上位置见(b)图  $A$  点, 刀尖即将刺破管壁。随着管壁的刺破, 剪切力  $P$  有一短暂的下跌到  $A'$ , 下跌量为  $P_{max}$  的 7%~8%,  $P$  下跌可以认为剪切部钢管由原封闭管成为开口管原因而引起的, 随后刀片靠两边刃口切管, 由  $A'$  到  $B$  点, 当剪切力  $P$  上升到  $B$  点时, 由(b)图可知, 此时刀

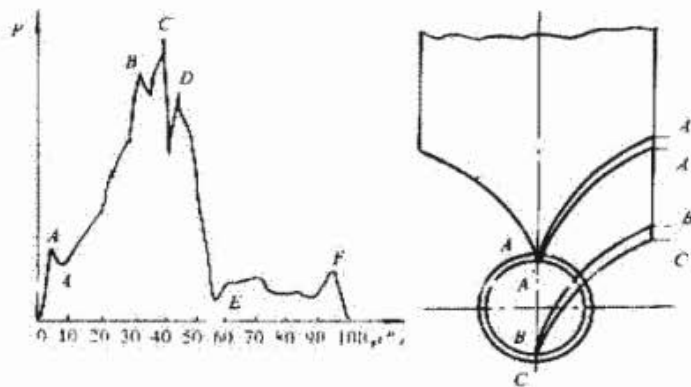


图3

片两边刃口局部和刀尖之处同时受力, 而当  $P$  上升到  $C$  点时, 刀片尖尚未刺破管壁, 而两边刃口通过内翻的剪切屑(见图2)与下半部管壁全部接触, 此时剪切力  $P$  达到最大峰值, 随刀片继续下压, 钢管其余金属沿剪切面产生滑移, 剪切力急剧下降。由此可见, 最大剪切力  $P_{max}$  发生在相对切入量  $\epsilon$  等于 38%~41% 之间。整个剪切过程由剪切和沿剪切面滑移两个阶段组成。

### 1.2 管变形分析

由图2可知, 刀尖接触钢管到穿透钢管时, 剪切力垂直于管壁, 由于管内无剪切模支撑, 剪切力使管子在刀尖处区域变形, 管子切

入口塌陷, 切屑向内卷入。当刀片继续深入时, 刀片两边刃口剪切, 钢管受力如图4。

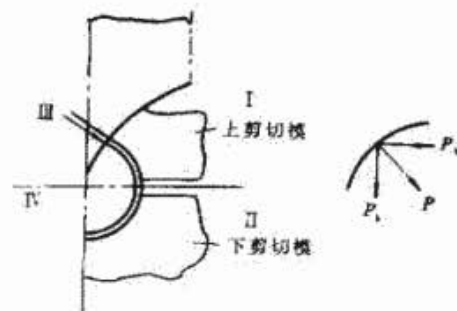


图4

$P$  的方向为钢管与刀刃接触处曲线的公法线方向。 $P$  可分解成水平力  $P_x$  和垂直力  $P_y$ 。在 I、III 象限 (钢管上半部)  $P_x$  与夹紧钢管外壁的剪切模产生剪切作用, 而  $P_y$  使钢管下陷, 起压扁作用。在 II、IV 象限 (钢管下半部),  $P_x$  与  $P_y$  和管外剪切模同时起剪切作用。由于剪切力  $P$  从一开始到 C 点的  $P_{max}$  都发生在 I、III 象限内, 因此剪切力中很大一部分并没有起到剪切作用, 而使钢管产生变形, 影响了剪口截面质量。当壁厚 / 钢管直径 =  $t/D < 0.1$  时, 变形尤为明显。

要提高钢管的剪口截面质量, 就必须使剪切力在 I、III 象限时,  $P_x$  大大超过  $P_y$ , 使钢管壁产生外翻的趋势, 以保证钢管外剪切模的剪切作用。这样既可以得到光滑的剪口, 截面又不会产生较大的压扁变形。对钢管下半部, 上述要求容易实现, 对钢管上半部, 则可由刀片的几何曲线来确定。

## 2 刀刃口几何曲线形状的设计与讨论

由于钢管截面的对称性, 只探讨圆截面第 I 象限, 并暂不考虑剪切对刃口与钢管的摩擦。

要得到好的剪口质量, 必须保证刀刃每次产生的剪切与钢管相切。要满足这一点, 可使钢管上每点的切线作为刀刃曲线上每一对应点的法线, 过这些点切线的垂直线所组成的包络线就是刀刃曲线的理论轮廓线。该理论轮廓线的数学公式推导如下:

设: 钢管外径为  $R$ , 坐标原点取在圆心

$$\text{钢管方程: } x^2 + y^2 = R^2$$

$$\text{满足第 I 象限: } y = \sqrt{R^2 - x^2}$$

钢管的切线方程:

$$y'_G = -\frac{x}{\sqrt{R^2 - x^2}} \quad (1)$$

(1) 式为刀刃曲线每点剪切力作用方向, 由刀刃曲线的每点斜率与剪切力垂直, 得刀

刃曲线斜率为:

$$y'_D = \frac{\sqrt{R^2 - x^2}}{x} \quad (2)$$

则刀刃曲线可通过对 (2) 式积分求得:

$$y = \int \frac{\sqrt{R^2 - x^2}}{x} dx \quad (3)$$

设  $x = R \cdot \cos\alpha$  代入 (3) 式积分, 则

$$y = R \sin\alpha - R \ln(\sec\alpha + \tan\alpha) + C \quad (4)$$

式 (4) 为刀刃曲线与钢管中心剪切角  $\alpha$  关系, 为方便起见, 经三角变换

$$\sin\alpha = \frac{\sqrt{R^2 - x^2}}{R};$$

$$\tan\alpha = \frac{\sqrt{R^2 - x^2}}{x};$$

$$\sec\alpha = \frac{R}{x}$$

代入 (4) 式得:

$$y = \sqrt{R^2 - x^2} - R \ln \frac{R + \sqrt{R^2 - x^2}}{x} + C \quad (5)$$

边界条件: 当  $x = R$  时, 刀片垂直位移绝对值为  $2R$ , 代入 (5) 式  $C = 2R$ , 则

$$y = \sqrt{R^2 - x^2} - R \ln \frac{R + \sqrt{R^2 - x^2}}{x} + 2R \quad (6)$$

(6) 式为变态对数曲线, 理论刀刃轮廓线见图 5。

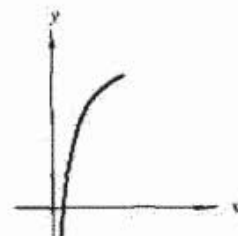


图 5

从公式 (6) 可知: 刀刃曲线是管子半径  $R$  的函数,  $R$  改变则曲线也改变, 若取  $R_k = kR$ , 横坐标  $x_k = kx$  时 ( $k$  为系

数), 则纵坐标为:

$$\begin{aligned}
 y_2 &= \sqrt{(kR)^2 - (kx)^2} \\
 -kR \ln \frac{kR + \sqrt{(kR)^2 - (kx)^2}}{kx} + 2kR \\
 &= k\sqrt{R^2 - x^2} - kR \ln \frac{R + \sqrt{R^2 - x^2}}{x} \\
 &\quad + 2kR \\
 &= k(\sqrt{R^2 - x^2} - R \ln \frac{R + \sqrt{R^2 - x^2}}{x} \\
 &\quad + 2R) \\
 &= ky
 \end{aligned}$$

由⑦式可知, 当  $R$  变化时, 刀刃曲线实际组成是一组曲线族, 各坐标值相差  $k$  倍, 这就使我们在讨论曲线时取某一具有代表性  $R$  即可。

由公式⑥看出, 当  $x \rightarrow 0$ ,  $y \rightarrow -\infty$ , 这就表明愈近刀片中心对称轴线, 刀刃理论曲线将无限向下伸展, 其斜率变化很小, 趋向于一直线。这在实际使用中无法实现, 必须修正。以剪切直径  $D=13\text{mm}$ , 厚度  $t=1\text{mm}$  的钢管为例, 考虑到刀片工作段性能和剪切机的压下行程, 用直线代替部分曲线。为了使直线与曲线光滑连接, 即直线斜率应与交接处曲线斜率相同, 我们用计算机逐步迭代求出, 当  $x=1.7277$ ,  $y=6.2661$  时, 其斜率误差为  $3.25 \times 10^{-5}$ , 这样只有在钢管顶端刀尖刺入点  $x$  向  $1.7277\text{mm}$  范围内易产生塌陷, 其余曲线均能满足剪切力切于钢管外壁, 使切屑外翻。对于其它的  $R$  可采用类似的修正法。

在设计刃口曲线, 未考虑刃口与钢管截面的摩擦, 但实际上是有摩擦的。这就影响了剪切力的作用方向, 设摩擦系数为  $f$ , 则实际剪切力  $P$  方向如图 6 所示。

实际剪切力  $P$  的方向转动了一个角度  $\beta$ ,  $\text{tg}\beta = \frac{P_f}{P} = f$ , 摩擦角  $\beta = \text{arctg}f$ , 由此可见, 作用点上刃口法线与钢管法线

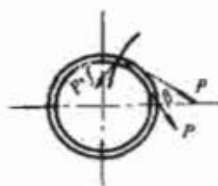


图 6

的夹角为  $90^\circ + \alpha$ , 才是保证切屑外翻的实际临界条件, 前面已得出理想刀刃曲线的

斜率为  $y_D' = \frac{\sqrt{R^2 - x^2}}{x}$ , 则刀刃实际临界廓线的斜率为:

$$y_1' = \text{tg} \left( \text{arctg} \frac{\sqrt{R^2 - x^2}}{x} + \alpha \right),$$

即:

$$y_1' = \text{tg} \left( \text{arctg} \frac{\sqrt{R^2 - x^2}}{x} + \text{arctg}f \right)$$

所以考虑摩擦效应后的刀刃曲线按下式积分:

$$y = \int \left( \text{tg} \left( \text{arctg} \frac{\sqrt{R^2 - x^2}}{x} + \text{arctg}f \right) \right) dx$$

显然, 上式积分后曲线更为复杂, 制造费用高, 若在加工时拟合不准确, 反而达不到预期效果。实际上剪切半径  $R$  的钢管, 可以从小于  $R$  的曲线族中选择刀刃曲线, 以补偿摩擦力的影响。这种方法经实际使用证明效果是很好的。

### 3 现场使用效果

经上海某钢管厂现场使用表明, 变态对数曲线刀片剪切质量较好, 大大地改善了切后圆管截面的塌陷变形。

前面谈到, 由于对刀尖处曲线经过修正, 修正曲线不满足剪切力切于钢管外壁的要求, 即在钢管顶端处发生塌陷变形, 然而在实际使用中, 只要合理地选择刀片的硬度, 刀片与剪切模之间的间隙等参数, 钢管顶端塌陷变形是不会明显出现的。这表明在

一定条件下, 钢管本身刚性使剪切时产生的塑性变形并不大, 这点对已冷拔过的钢管更为明显。

#### 4 改进方法

变态对数曲线刀片大大提高了剪切管口的截面质量, 由于曲线经过修正, 故从理论上分析是得不到高度圆整的钢管剪口截面, 要得到高度圆整的钢管剪口截面, 可采用双向切割法。即用一把水平割刀 2, 在钢管上部开槽切割 (水平割刀垂直于钢管轴向), 刀片可垂直调整到各种管径的切槽深度。钢管上部被横向切槽后, 另一把刀片垂直方向沿槽口冲压剪切, 这就完全避免了钢管顶端的塌陷变形, 实现了无变形剪切 (见图 7)。

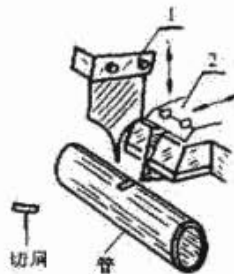


图 7

#### 4.1 最小开槽宽度的确定

$$\text{由 } y = \sqrt{R^2 - x^2}$$

$$= R \ln \frac{R + \sqrt{R^2 - x^2}}{x} + 2R$$

可知, 刀口曲线是钢管半径  $R$  的函数, 又由  $y_k = ky$  可知,  $R$  变化时, 刀刃曲线实际组成的是一组曲线族, 在讨论曲线时, 取某一具有代表性的  $R$  即可, 这结论同样适用于开槽宽度  $B$ 。

当  $R_k = kR$  时, 相应的开槽宽度为:

$$B_k = R_k B / R = kB$$

$B$  的具体数值, 就是刀片曲线修正一点的  $x$  坐标值的 2 倍, 仍以直径  $D=13\text{mm}$ , 壁厚  $t=1\text{mm}$  的钢管为例, 前面通过计算机迭代法算出直线与曲线光滑连接处  $x$  坐标值为 1.7277, 并指出只有钢管顶端刀尖刺入点左右 1.7277mm 范围内易产生塌陷变形, 其余曲线均能满足剪切力切于钢管外壁, 使切屑外翻, 显然, 当  $D=13\text{mm}$  最小开槽宽度,  $B_{\min} = 3.4554\text{mm}$ , 见图 8。

$$\text{如果 } D_k = 20\text{mm}, \text{ 则最小开槽宽度 } B_{k\min} = \frac{D_k \cdot B_{\min}}{D} = \frac{20 \times 3.4554}{13} = 5.316\text{mm}.$$

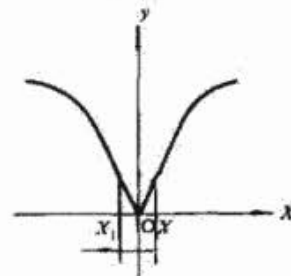


图 8

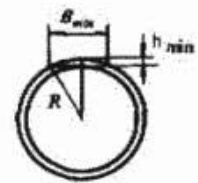


图 9

以此类推就可获得一系列规格的最小切槽宽度, 实际操作可调节水平割刀的切槽深度来控制, 由图 9 几何关系可得:

$$h_{\min} = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{B_{\min}}{2}\right)^2} \quad \text{⑧}$$

通过式⑧可算出最小切槽深度  $h_{\min}$ 。

双向切割法完全避免了钢管顶端的塌陷变形, 实现无变形剪切, 是一种高圆度的切管方法, 它可省去管口的精整工艺, 避免平头倒棱的金属消耗, 提高质量和出材率, 并节约了人力、设备和时间, 综合经济效益是显而易见的。

(收稿日期: 1991-08-12)