

DOI: 10.7652/xjtuxb201305017

拉应力内翻管成形中管件的应力及其成形条件

牛卫中

(兰州交通大学机电工程学院, 730070, 兰州)

摘要: 为促进拉应力内翻管技术的实际应用,对内翻口后管件的翻边与拉深翻管过程进行了研究。利用轴对称金属薄壳的塑性变形理论,推导出了管件应力与管坯尺寸、管材性能参数、模具尺寸、摩擦系数的解析关系式,得出了管件内层管壁成形、环形底部成形及不起皱的条件。研究表明,拉应力内翻管技术仅适用于成形内、外层间距与底部孔径处于较窄范围内的双层管件,对于材料与尺寸已确定的管坯,可利用文中给出的解析式来确定所能成形管件的尺寸范围。实例显示,根据解析式计算得到的管件拉深翻管力及变形参数与实测数据吻合得较好,而由成形条件预测出的管件变形模式也与实验结果相符。

关键词: 管件;翻管;应力;成形条件

中图分类号: TG302;TG386.43 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)05-0093-06

Stress and Forming Conditions of Tubular Parts in Tension-Driven Internal Inversion Processes of Tubes

NIU Weizhong

(School of Mechatronic Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To promote practical application of tension-driven internal inversion technique for tubes, the flanging and deep-drawing processes of an edge-incurved tubular part are investigated. Following plastic deformation theory of thin metallic axisymmetric shell, some analytic relations are established which reflect the influences of tube size, material property parameters, mould size and friction coefficient on tubular part stress, and tubular part forming conditions in deep-drawing process are also discussed. The results show that tension-driven internal inversion technique can only be applied to forming double-layered tubular parts whose layer distances and bottom hole sizes are limited in a narrow range. For a tube whose material and size have been known, the obtainable size range of tubular part can be determined by these conditional expressions. Application examples indicate that the calculated deep-drawing forces and deformation parameters reasonably coincide with the measured data, and the predicted deformation modes correspond well to actual experiments.

Keywords: tube; tube inversion; stress; forming condition

翻管是利用简单模具将金属薄壁圆管翻转成轴对称双层管状件(以下简称管件)的一种特种成形技

术,根据翻管时管壁所受应力的不同,翻管可分为轴压翻管与拉应力翻管 2 种方法。近年来,国内外对

轴压内、外翻管成形已进行了大量的研究,取得了许多重要的成果^[1-7],但自 1997 年 Tomesani 提出由圆管内翻口、再结晶退火、翻边、拉深翻管 4 个工序构成的拉应力内翻管法^[8]以来,却鲜有文献将这种新型内翻管法作为研究对象进行深入的力学分析。因此,基于研究轴压内、外翻管成形时所用的轴对称金属薄壳塑性变形理论^[9-12],文献^[13]对拉应力内翻管法第 1 道工序(即圆管内翻口成形)中的应力与变形进行了分析,得出了翻口区管壁失稳起皱前后的管件应力、变形参数与管坯尺寸,以及管材性能参数、模具尺寸、摩擦系数的解析关系式,并给出了翻口区管壁是否起皱与管件内翻口成形能否成功的判别式。

本文在文献^[13]的研究基础上,对管件在拉应力内翻管法中的后 2 个工序——翻边成形与拉深翻管成形中的应力及成形条件进行了分析,通过探讨确定了这种翻管法的适用范围及合理的工艺参数。

1 分析模型

利用拉应力内翻管法,将外径为 d_0 、壁厚为 t_0 的金属薄壁圆管成形为图 1 所示的具有环形底部的双层管件。第 1 道工序为内翻口,内翻口成形结束时管件的形状与尺寸如图 2^[13]所示。

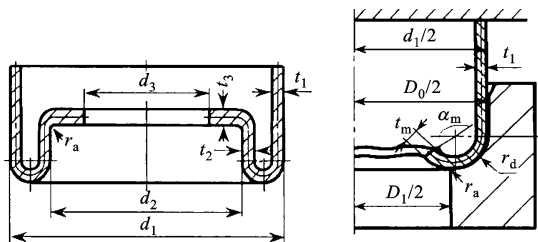


图 1 具有环形底部的双层管件形状

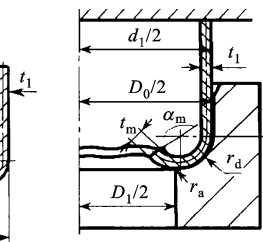


图 2 内翻口成形结束时的管件形状

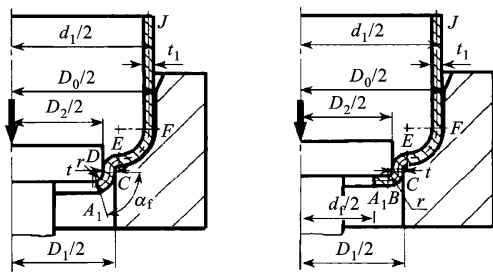
为了分析管件在翻边与拉深翻管成形工序中的应力与变形,提出以下假设。

(1)管坯材料各向同性,其应力 σ 与应变 ϵ 的关系为 $\sigma = K\epsilon^n$,其中 K 、 n 分别为管材的特性系数和应变强化指数。由于管材在内翻口成形中产生的加工硬化可被再结晶退火消除,因此在确定管件端头翻边区与中部翻卷区的流动应力时,可取 ϵ 为各变形

区的平均等效应变。

(2)如果 $D_0 \approx d_1$, $r_d \geq (D_0 - d_2)/2$, $D_1 = D_0 - 2(r_d + r_a)$,考虑到图 3 中翻边区的管壁径宽很小,在确定翻边成形中的应力时,可近似视其壁厚为定值,则 $D_2 \approx D_1 - 2t$ 。

(3)拉深翻管凸模的外径 $D_3 = d_2$,凹模内径仍为 D_0 ,如图 4 所示,由于翻卷区管壁在管件外层向内层的流动过程中,经向先受压后再受拉,导致 t_1 、 t_2 的差别不大,因此在确定翻卷区的应力时,可视其壁厚为定值。

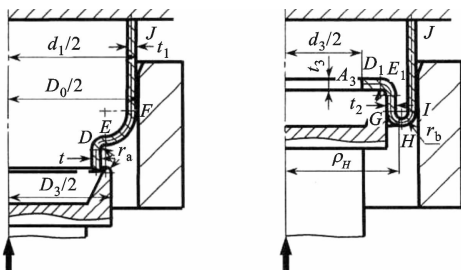


(a) $r \geq r_{cr}$

(b) $r < r_{cr}$

D_2 、 r :翻边凸模的外径及圆角半径; t :翻边后管件直筒形尾端的平均壁厚; α_f : $r \geq r_{cr}$ 时的圆心角; d_1 : $r < r_{cr}$ 时管壁的最小直径; A_1 、 J :管件的两端面; B 、 C 、 D 、 E 、 F :管件与翻边凸模、凹模圆角区接触段两端的纬切面

图 3 翻边成形中的管件形状



(a) 拉深翻管起始

(b) 稳定翻管阶段

G 、 I :管件翻卷区管壁两端的纬切面; H :翻卷区管壁径向受拉段与径向受压段的分界纬切面; ρ_H : H 面距管件轴线的距离; r_b :翻管区管壁的径向平均卷曲半径; D_3 :翻管凸模的外径

图 4 拉深翻管成形中的管件形状

2 管件在翻边成形中的应力

2.1 翻边区管壁的尺寸参数

由图 2 可见,内翻口成形后,管件翻口区母线近似为内凹圆弧,无论圆角半径 $r \geq r_{cr}$ 或 $r < r_{cr}$ (r_{cr} 为翻边凸模圆角半径的临界值),管件翻边成形中的最大翻边力均出现在翻边区管壁与凸、凹模圆角区且完全贴合,但尚未形成直筒壁(见图 3)。

对比图 3 与图 1 得到^[13]

$$\frac{\pi}{2} \left(r_{cr} + \frac{t}{2} \right) \approx \frac{d_2 - d_3}{2} - r_a$$

$$r_{cr} \approx \frac{d_2 - d_3 - 2r_a}{\pi} - \frac{t}{2}; \quad \alpha_f \approx \frac{d_2 - d_3 - 2r_a}{2r + t}$$

$$d_f \approx D_2 - 2r - (d_2 - d_3 - 2r_a) + \pi(r + t/2)$$

2.2 翻边区管壁的应力平衡方程与屈服方程

根据文献[9],轴对称等厚度薄壳的应力平衡方程为

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_\rho}{\rho} - \frac{\sigma_\theta}{\rho} - \frac{\mu}{\sin\alpha} \left(\frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \right) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为薄壳中变形单元体距薄壳轴线的距离; σ_ρ 、 σ_θ 分别为变形单元体的经、纬向拉应力; μ 为变形单元体与模具间的库仑摩擦系数; α 为变形单元体与薄壳轴线的夹角; R_ρ 、 R_θ 分别为变形单元体沿经、纬向的曲率半径。

将 $\rho = D_2/2 - r + (r + t/2)\cos\alpha$ 、 $d\rho = -(r + t/2)\sin\alpha d\alpha$ 、 $R_\rho = r + t/2$ 、 $R_\theta = \rho/\cos\alpha$ 代入式(1),便可得出图3a中母线为 A_1C 的弧面环形管壁段的应力平衡方程

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\alpha} + \left[\mu_1 - \frac{(2r+t)\sin\alpha}{D_2 - 2r + (2r+t)\cos\alpha} \right] \sigma_\rho + \frac{(2r+t)(\sin\alpha + \mu_1\cos\alpha)}{D_2 - 2r + (2r+t)\cos\alpha} \sigma_\theta = 0 \quad (2)$$

式中: μ_1 为翻边凸模与管件间的库仑摩擦系数。将 $\mu=0$ 代入式(1),又得到图3b中 A_1B 段环形管壁的应力平衡方程

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0 \quad (3)$$

显然,在 $r \geq r_{cr}$ 与 $r < r_{cr}$ 的2种情况下, A_1C 段管壁的屈服方程均为

$$\sigma_\theta = \beta\sigma_{f1} = \beta K \left[\ln\left(\frac{t_m}{t}\right) \right]^n \quad (4)$$

式中: β 为中间主应力影响系数,取为1.1; σ_{f1} 为管件翻边变形区的平均流动应力。根据文献[9],有

$$t = t_1 \left(\frac{D_2 + t}{d_1 - t_1} \right)^{-1/2} \approx t_1 \left[\frac{2(d_1 - t_1)}{D_1 + D_2} \right]^{1/2}$$

2.3 翻边区管壁的经向拉应力与翻边力

当 $r \geq r_{cr}$ 时,将式(4)代入式(2),并引入边界条件 $\sigma_{\rho A1}=0$,便可解得图3a中 A_1C 段管壁的经向拉应力

$$\sigma_\rho \approx (2r+t)\beta\sigma_{f1} \frac{We^{-\mu_1\alpha} + (\cos\alpha - 2\mu_1\sin\alpha)}{D_2 - 2r + (2r+t)\cos\alpha} \quad (5)$$

式中积分常数

$$W = e^{\mu_1\alpha_f} (2\mu_1\sin\alpha_f - \cos\alpha_f)$$

在式(5)中取 $\alpha=0$,考虑在管壁纬切面 C 处存在经向曲率突变后,可得出管件翻边区直筒壁上的

最大轴向拉应力

$$\sigma_{tm} =$$

$$\beta\sigma_{f1} \left\{ \left[1 + (2\mu_1\sin\alpha_f - \cos\alpha_f)e^{\mu_1\alpha_f} \right] \frac{2r+t}{D_2+t} + \frac{t}{4r+2t} \right\}$$

当 $r < r_{cr}$ 时,将式(4)代入式(3)并引入边界条件 $\sigma_{\rho A1}=0$,求得 A_1B 段管壁的经向拉应力

$$\sigma_\rho = \beta\sigma_{f1} \left(1 - \frac{d_f}{2\rho} \right)$$

由于此时 r 很小,根据文献[9],并考虑到在管壁纬切面 B 、 C 处均存在经向曲率突变,因此得到

$$\sigma_{tm} = \beta\sigma_{f1} \left[\left(1 - \frac{d_f}{D_2+t} \right) e^{\mu_1\pi/2} + \frac{t}{2r+t} \right] \quad (6)$$

2种情况下所需的翻边力均为

$$F_f = \pi t(D_1 - t)\sigma_{tm} \quad (7)$$

3 管件在拉深翻管成形中的应力

3.1 翻卷区管壁的应力平衡方程与屈服方程

管件翻卷区由经、纬向均受压的 IH 段管壁与经向受拉、纬向受压的 HG 段管壁所组成。从图4b可以看出, $r_b \approx (d_1 - d_2 - t_1 - t_2)/4$,虽然 IH 段管壁与 HG 段管壁的应力平衡方程同为式(3),但屈服方程有所不同,分别为

$$\sigma_\theta = -\beta\sigma_{f2} \quad (8)$$

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = \beta\sigma_{f3} \quad (9)$$

式中: σ_{f2} 、 σ_{f3} 为管件在 IH 段、 HG 段管壁的平均流动应力。若 $\rho_H = (d_1 - t_1)/2 - kr_b$, k 为待定系数,则有

$$\sigma_{f2} \approx K \left[\frac{1}{2} \left| \ln\left(\frac{2\rho_H}{d_1 - t_1}\right) \right| \right]^n \approx K \left(\frac{kr_b}{d_1 - t_1} \right)^n$$

$$\sigma_{f3} \approx K \left\{ \frac{1}{2} \left[\left| \ln\left(\frac{d_1 - t_1 - 4r_b}{d_1 - t_1}\right) \right| + \left| \ln\left(\frac{2\rho_H}{d_1 - t_1}\right) \right| \right] \right\}^n \approx$$

$$K \left(\frac{2r_b}{d_1 - t_1} + \frac{kr_b}{d_1 - t_1} \right)^n = \left(1 + \frac{2}{k} \right)^n \sigma_{f2} \quad (10)$$

3.2 翻卷区管壁的经向应力

将式(8)、式(9)分别代入式(3),并引入边界条件 $\sigma_{\rho H}=0$,可解得

$$\sigma_\rho = \begin{cases} \beta\sigma_{f2} \left(\frac{\rho_H}{\rho} - 1 \right), & \rho_H \leq \rho \leq \frac{d_1 - t_1}{2} \\ \beta\sigma_{f3} \ln \frac{\rho_H}{\rho}, & \frac{d_2 + t_2}{2} \leq \rho \leq \rho_H \end{cases}$$

由此可知,在管壁 I 、 G 纬切面偏向翻卷区一侧有

$$\sigma_{\rho I} = \beta\sigma_{f2} \left(\frac{2\rho_H}{d_1 - t_1} - 1 \right) = -\beta\sigma_{f2} \left(\frac{2kr_b}{d_1 - t_1} \right) \quad (11)$$

$$\sigma_{\rho G} = \beta \sigma_{f3} \ln \left(\frac{2\rho_H}{d_2 + t_2} \right) \approx \beta \sigma_{f3} \frac{2(2-k)r_b}{d_2 + t_2} \quad (12)$$

上式中管件内层壁厚 t_2 可由下式近似求得^[9]

$$t_2 \approx t_1 \left(\frac{d_2 + t_2}{d_1 - t_1} \right)^{-1/2} \approx t_1 \left(\frac{d_1 - t_1}{d_2 + t_1} \right)^{1/2} \quad (13)$$

3.3 内外层管壁的应力与所需拉深翻管力

考虑管壁经向应力由翻卷区到直筒壁的增量后,由式(11)、式(12)可分别得出在稳定翻管阶段,管件外层管壁上的轴向压应力、内层管壁上的轴向拉应力为

$$\sigma_c = -\sigma_{\rho l} + \frac{\beta \sigma_{f2} t_1}{4r_b} = \beta \sigma_{f2} \left(\frac{2kr_b}{d_1 - t_1} + \frac{t_1}{4r_b} \right) \quad (14)$$

$$\sigma_t = \sigma_{\rho G} + \frac{\beta \sigma_{f3} t_2}{4r_b} = \beta \sigma_{f3} \left[\frac{2(2-k)r_b}{d_2 + t_2} + \frac{t_2}{4r_b} \right] \quad (15)$$

所需的拉深翻管力

$$F_i = \pi t_2 (d_2 + t_2) \sigma_t = \pi t_1 (d_1 - t_1) \sigma_c \quad (16)$$

以上各式中的 k 值需采用迭代法确定,联立式(13)~式(16),并结合式(10)后可得出

$$k = \left(1 + \frac{2}{k} \right)^n \left[(2-k) \frac{t_2}{t_1} + \frac{t_1 (d_1 - t_1)}{8r_b^2} \right] - \frac{t_1 (d_1 - t_1)}{8r_b^2}$$

4 管件拉深翻管成形需满足的条件

4.1 内层管壁的成形条件

在拉深翻管成形中,凸模的外径 D_3 应取为管件内层的内径 d_2 ,但当 d_2 相对较小时,成形后管件内层的实际内径将有可能大于设计值^[8]。为确定拉深翻管成形可得到 d_2 的最小值 $d_{2\min}$,利用式(16)得

$$r_{b,\max} = \left[\frac{t_1 (d_1 - t_1) (1-n)}{8k(1+n)} \right]^{1/2} \quad (17)$$

由式(17)可得管件内层管壁的成形条件为

$$d_2 \geq d_{1\min} \approx$$

$$d_1 - t_1 - t_2 - \left[\frac{2t_1 (d_1 - t_1) (1-n)}{k(1+n)} \right]^{1/2} \quad (18)$$

4.2 环形底部的成形条件

在管件设计尺寸满足式(18)的情况下,为使拉深翻管能够稳定拉深,形成所需的环形底部,要求

$$\sigma_t < \sigma_{he} \approx \beta \sigma_{f1} \left[\left(1 - \frac{d_3}{d_2 + t_2} \right) e^{\mu_2 \pi/2} + \frac{t_2}{2r_a + t_2} \right] \quad (19)$$

式中: σ_{he} 为管件内层管壁上的轴向拉应力,可由式(6)得出; μ_2 为管件底部内壁与翻管凸模圆角间的库仑摩擦系数。

4.3 管件环形底部不起皱的条件

由图4可知,管件的环形底部由管件翻边后形

成的直筒形管壁翻转得到,其中壁厚与径宽分别为 t_3 与 $b \approx (D_1 - d_3)/2$ 的周向受压区管壁有可能在周向压应力作用下失稳起皱。假设失稳后,在径宽中部形成周向半波长为 l 的波纹,此处周向压应力所做的功应等于隆起波纹所需的弯曲功与虚拟压边力所消耗的功之和^[13-14],即管件环形底部的平均周向压应力为

$$(\sigma_\theta)_{cr} b t_3 \approx \frac{\pi^2 E_r I_b}{l^2} + \frac{b C_b l^2}{\pi^2} \quad (20)$$

式中: I_b 为管壁子午面的惯性矩; E_r 为管材的缩减弹性模量; C_b 为虚拟压边力与该区管壁径宽中部的挠度之比,且

$$(\sigma_\theta)_{cr} = K_1 (\epsilon_\theta)_{cr}^n \quad (21)$$

$$I_b = b t_3^3 / 12 \quad (22)$$

$$E_r \approx 4n K_1 (\epsilon_\theta)_{cr}^{n-1} \quad (23)$$

$$C_b \approx 2.37 E_r t_3^3 / b^4 \quad (24)$$

式中: K_1 为周向受压区管壁材料的特性系数; $(\epsilon_\theta)_{cr}^{n-1}$ 为管壁起皱时径宽中部的周向临界压应变。

将式(20)两端对 l 求导,并结合式(22)、(24),可得出起皱临界状态下 $l \approx 1.36b$,将其代入式(20),并引入式(21)~式(24),可得

$$(\epsilon_\theta)_{cr} = 3.56n \left(\frac{t_3}{b} \right)^2 \approx \frac{14.2n t_3^2}{(D_1 - d_3)^2}$$

为保证管件环形底部平整不出现皱曲,管件径宽中部的周向压应变应小于临界值,即

$$\epsilon_\theta = \left| \ln \left(\frac{D_1 + d_3}{2D_1} \right) \right| < (\epsilon_\theta)_{cr}$$

管件环形底部不起皱的条件为

$$d_3 > d_{3\min} = D_1 - (28.4n D_1 t_3^2)^{1/3} \quad (25)$$

$$t_3 \approx \frac{t_1}{2} \left[\left(\frac{d_1 - t_1}{D_1} \right)^{1/2} + \left(\frac{d_1 - t_1}{d_3} \right)^{1/2} \right]$$

5 算例与分析

Tomesani 曾以 $d_0 = 90$ mm、 $t_0 = 2.4$ mm 的 UNI Fe 370 低碳钢管^[15](材质与国产 20 钢基本一致,力学性能见表1)为毛坯,将其置入 $D_0 = 91$ mm、 $D_1 = 66$ mm、 $r_d = 11.5$ mm、 $r_a = 1$ mm 的凹模中,采用机油润滑内翻口后,在 700 °C 下再结晶退火 1 h,然后在机油润滑条件下,先用 $D_2 = 60$ mm 的凸模翻边,再用 D_3 分别为 68、70、72、73.4 和 75 mm 的凸模(不加润滑)进行拉深翻管,得到了 5 种尺寸的管件,并在实验中测出这 5 种管件的拉深翻管力,以及管件 3 成形后子午面上的多处壁厚值。为验证所推导的管件应力、变形计算式、管件成形条件的准确性,利用文献[13]中的解析式算出这 5 种管件的

d_1 、 t_1 、 t_m ,按文献[8]推算出每种管件的 d_3 值后,取 $\mu_1=0.15$ 、 $\mu_2=0.20$ ^[16],求得这些管件的翻边力、拉深翻管时的应力及变形参数,如表 2、图 5 所示。

表 1 算例中管材的力学性能数据

K/MPa	n	E_m/GPa	ν	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	R_t
746	0.223	207	0.28	252	1.27

E_m 、 ν 、 $\sigma_{0.2}$:管材的弹性模量、泊松比、条件屈服极限; R_t :管材的厚向异性指数,在解析计算中根据假设取为 1。

表 2 5 种管件在拉深翻管成形中的应力与变形参数

管件	$D_3(d_2)$	d_3	d_1	t_1	t_m	t_2	t_3	r_b	k	$d_{2\min}$	$d_{3\min}$	σ_t	σ_c	σ_{he}	F_i/kN	
	/mm	/mm	/mm	/mm	/mm	/mm	/mm	/mm		/mm	/mm	/MPa	/MPa	/MPa	计算值	实测值
1	68.0	54.0	90.6	2.42	2.96	2.64	2.91	3.48	1.355	71.4	50.8	130.5	119.9	228.4	80.4	77
2	70.0	56.0	90.6	2.42	2.96	2.64	2.88	3.48	1.355	71.4	50.9	130.5	119.9	267.9	80.4	77
3	72.0	58.0	90.6	2.42	2.96	2.63	2.86	3.39	1.365	71.5	50.9	130.8	120.5	358.8	80.8	82
4	73.4	59.4	90.6	2.42	2.96	2.61	2.84	3.04	1.407	71.7	51.0	133.1	123.7	355.4	82.9	90
5	75.0	61.0	90.6	2.42	2.96	2.58	2.82	2.65	1.476	72.0	51.1	138.3	129.9	351.7	87.1	106

注:因管件 1、2 的 $d_2 < d_{2\min}$,所以在计算 t_2 、 r_b 时取相应式中的 d_2 为 $d_{2\min}$,而在计算 σ_{he} 时将式(19)中的 d_2 、 μ_2 、 r_a 分别取为 D_3 、0 和 $(d_{2\min}-D_3)/2+r_a$ 。

由图 5 可见,管件的翻边力随翻边凸模圆角半径 r 的减小而增大,当 r 略小于 $r_{cr} \approx 2.4\text{ mm}$ 时,翻边力会因管壁纬切面 B 处(见图 3b)存在附加经向弯矩而急剧升高。这表明在对内翻口后的管件进行翻边时,应采用较大圆角半径的凸模,以减小翻边力。

分析表 2 中的数据可得出如下结果。

(1)管件 3、4、5 因满足式(18)、式(19)与式(25)的条件,所以均可顺利成形,这与文献[8]中的实验结果相一致。

(2)管件 1、2 由于不满足式(18),而导致内层的内径 d_2 为 $d_{2\min} \approx 71.4\text{ mm}$,说明拉深翻管仅适用于成形内、外层间距很小($r_b/t_0 < 1.47$)的管件。文献[8]中的实验结果亦证实了这一点。

(3)管件 3 的 t_2 、 t_3 计算值比实测值^[8]要略大些,这是因实际管材并非各向同性($R_t > 1$)所致,由于相对误差不超过 6%,因此解析计算中假设实际管材为各向同性还是可取的。

(4)拉深翻管力解析值的相对误差与管件 r_b/t_0 值的大小相关,当管件的 r_b/t_0 值在 1.4 附近时,其相对误差在 -2% 以内,当 $r_b/t_0 \approx 1.22$ 时,其相对误差已达 -10%。由于计算 σ_{t2} 、 σ_{t3} 时,将图 4b 中 IH 、 HG 段管壁的平均等效应变直接取为两端纬向应变的平均值,而未考虑管壁经向弯曲应变的影响,

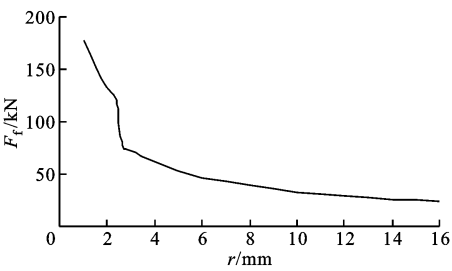


图 5 翻边力与翻边凸模圆角半径的关系

因此导致 σ_c 、 σ_t 与 F_i 的计算结果较实际值小,并且相对误差的绝对值随 r_b/t_0 值的减小而不断增大。鉴于此,当管件的 $r_b/t_0 < 1.22$ 时,可将管件 IH 段管壁的平均等效应变近似取为在 1/4 壁厚处的经向应变值,即

$$\sigma_{t2} \approx K \left(\frac{t_1}{4r_b} \right)^n$$

将上式代入式(14)、式(16),并取 $k=1$,便可得到更接近于实际的管件应力与拉深翻管力。对于管件 5 ($r_b/t_0 = 1.1$),由修正后的算法得出的 F_i 为 114.2 kN,其相对误差已由 -17.8% 变为 7.7%。

(5)对于 $r_b/t_0 < 1.22$ 的管件,由于修正算法得出的 σ_t 会随 r_b/t_0 的减小迅速增大,而 σ_{he} 则会随着 $d_3/(d_2+t_2)$ 的增大而不断减小,因此将导致式(19)不再成立。结合式(17)、式(25)可知,拉深翻管可成形管件的 r_b 、 d_3 的变化范围都较窄,而且 $r_{b,\min}$ 与 $d_{3\max}$ 直接相关。

6 结 论

本文利用轴对称金属薄壳塑性变形理论,推导了管件在翻边与拉深翻管成形中的应力与管坯尺寸、管材性能参数、模具尺寸、摩擦系数等的解析关系式,并得出了管件拉深翻管成形需满足的条件,结论如下。

(1)拉应力内翻管技术仅适用于成形的内、外层

间距与底部孔径处于较窄范围内的双层管件,对于材料与尺寸已确定的管坯,可利用本文的解析式求得成形管件内层管壁与底孔的最小直径。

(2)根据解析式计算得出的管件的拉深翻管力及变形参数与实测数据吻合得较好。

(3)利用管件成形条件预测出的管件变形模式与实验结果相符合。

参考文献:

- [1] REID S R, HARRIGAN J J. Transient effects in the quasi-static and dynamic internal inversion and nosing of metal tubes [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1998, 40(1/2/3): 263-280.
- [2] HARRIGAN J J, REID S R, PENG C. Inertia effects in impact energy absorbing materials and structures [J]. International Journal of Impact Engineering, 1999, 22(9): 955-979.
- [3] ROSA P A R, RODRIGUES J M C, MATINS P A F. External inversion of thin-walled tubes using a die: experiment and theoretical investigation [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43(8): 787-796.
- [4] SEKHON G S, GUPTA N K, GUPTA P K. An analysis of external inversion of round tubes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 133(3): 243-256.
- [5] ROSA P A, RODRIGUES J M C, MATINS P A F. Internal inversion of thin-walled tubes using a die: experimental and theoretical investigation [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44(7/8): 775-784.
- [6] 孙志超, 杨合, 李明奇. 管轴压精密成形过程有限元模拟研究 [J]. 机械工程学报, 2001, 37(9): 34-38.
SUN Zhichao, YANG He, LI Mingqi. FEM simulation of tube axial compressive precision forming process [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(9): 34-38.
- [7] 罗云华. 翻管变形机理及翻管成形极限的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [8] TOMESANI L. Analysis of a tension-driven outside-in tube inversion [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 64(1/2/3): 379-386.
- [9] 翁克索夫 E II, 约翰逊 W, 工藤英明, 等. 金属塑性变形理论 [M]. 王仲仁, 汪涛, 贺毓辛, 等译. 北京: 机械工业出版社, 1992: 463-499.
- [10] 牛卫中. 利用一种新的模型解析圆角模外翻管成形参数 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(9): 15-18.
- NIU Weizhong. Using a new model for analyzing forming parameters in external inversion process of round tubes on fillet die [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2007, 35(9): 15-18.
- [11] 牛卫中. 管件圆角模稳定内翻成形时应力与壁厚的解析 [J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(5): 752-756.
NIU Weizhong. Analyses of stress and wall-thickness of tubular piece in a steady internal inversion process on fillet die [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(5): 752-756.
- [12] 牛卫中. 薄壁铝合金管圆角模内翻成形性的若干判别式 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2009, 41(5): 114-119.
NIU Weizhong. Some discriminants for the formability of thin-walled tubes of aluminum alloy in internal inversion process on fillet die [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, 41(5): 114-119.
- [13] 牛卫中. 金属薄壁圆管内翻口过程中应力与变形的解析 [J]. 重庆大学学报, 2012, 35(7): 77-82.
NIU Weizhong. Analyses on stress and deformation of thin-walled metallic round tube in edge incurving process [J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(7): 77-82.
- [14] 胡世光, 陈鹤峥, 李东升, 等. 钣金冷压成形的工程解析 [M]. 2 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009: 185-189.
- [15] 杨连发, 郭成. 液压胀形薄壁管材料流动应力方程的构建 [J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(3): 332-336.
YANG Lianfa, GUO Cheng. Stress strain relationship of tubular metal in hydraulic bulging test [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(3): 332-336.
- [16] 李尧. 金属塑性成形原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 130.

[本刊相关文献链接]

- 王烨, 贺健康, 刘亚雄, 等. 三维微流道支架直接压印成形方法. 2012, 46(10): 116-120.
- 李泳峰, 赵升吨, 范淑琴, 等. 花键轴增量式滚轧成形工艺的分流方式及温度效应研究. 2012, 46(9): 60-65.
- 彭赫力, 刘纯国, 李明哲. 马鞍面件柔性夹钳多点拉形实验与数值模拟. 2012, 46(5): 109-113.
- 朱海波, 余增硕, 唐成磊, 等. 膨胀管膨胀参数优化和膨胀模拟. 2012, 46(1): 103-107.

(编辑 管咏梅)