

## 内高压成形起皱行为的研究 \*

王小松 苑世剑 王仲仁

(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘要** 对内高压成形起皱过程进行了理论分析、数值模拟和实验研究, 分析了加载路径、成形区长径比等因素对皱纹数量和工件成形效果的影响. 结果表明: 不是所有的皱纹都是失效形式, 在某些情况下, 管料起皱后仍然可以成形, 关键是获得有益皱而不是死皱. 通过起皱在成形区聚料是一种有效的预成形方法, 该方法拓宽了内高压成形区间.

**关键词** 内高压成形, 液力成形, 皱纹, 数值模拟

**中图分类号** TG394

**文献标识码** A

**文章编号** 0412-1961(2003)12-1276-05

## RESEARCH ON WRINKLING BEHAVIOR IN TUBE HYDROFORMING

WANG Xiaosong, YUAN Shijian, WANG Zhongren

School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001

Correspondent: WANG Xiaosong, Tel: (0451)86414761, E-mail: hitxswang@263.net

Supported by the Multi-disciplinary Foundation of Harbin Institute of Technology (HIT.MD2001-14)

Manuscript received 2003-01-16, in revised form 2003-05-08

**ABSTRACT** The common defects in tube hydroforming are buckling, wrinkling, bursting and folding. Wrinkling occurring as the axial force reaches a critical value is considered as one of defects in the past. Theoretical analyses, numerical simulation and experiment were conducted to control and use wrinkles in tube hydroforming. Effects of loading path and the ratio of length to diameter on the number of wrinkles and forming result were discussed. It has been shown that not all wrinkles are defects and tube can successfully be formed after wrinkling in some cases. The key issue is to obtain useful wrinkles instead of dead wrinkles. However, the thickness distribution is not even in the axial direction. Accumulation of material in the expanding area by formation of wrinkles is an effective method for preform. By use of this method, the zone of process window can be enlarged for hydroforming.

**KEY WORDS** internal high pressure forming, hydroforming, wrinkle, numerical simulation

内高压成形工艺广泛应用于汽车等工业中的空心变截面轻体构件生产. 内高压成形基本工艺过程是通过管坯内部加压与轴向加力补料, 把管坯压入到模具型腔成为所需零件<sup>[1]</sup>. 与传统冲压工艺相比, 主要优点是减轻重量、降低成本、提高整体刚度及使用寿命. 当轴向力与内压的组合不合理时会出现屈曲、起皱与破裂等失效形式.

文献 [2] 认为在成形模具的进口处起皱是不可避免的, 皱纹可以通过整形阶段内压的升高而胀平. 当轴向力过大时, 有可能在成形区中部起皱. 并认为通过适当的进程控制可以避免起皱, 但文献中没有提到可以通过起皱进

行成形.

文献 [3] 采用数值模拟方法对成形中可能出现的缺陷进行预测, 调整加载路径, 从而顺利成形. 在选择加载路径时, 以最大的补料量和最小的内压值为基准, 使管料处于起皱的临界状态, 在皱即将出现的时候, 提高内压, 将其胀平. 此方法是基于避免起皱的方法进行成形, 实时控制难度较大.

文献 [4] 对管料的轴压稳定性进行了分析, 对加载路径、管材性能和成形区长度等因素对成形的影响进行了研究, 并在应力应变状态图上, 对内高压成形的应力应变状态进行了分析, 提出可以在轴向压应力较大区进行加载. 在成形的早期允许出现轻微并可恢复的皱, 以避免壁厚过度减薄, 并在后续的成形中消除这些皱, 但文中只提到了初步的设想, 并没有进行实际的验证.

文献 [5] 中进行了铝合金管坯内高压成形的数值模

\* 哈尔滨工来大学跨学科交叉性基金资助项目 HIT.MD2001-14  
收到初稿日期: 2003-01-16, 收到修改稿日期: 2003-05-08  
作者简介: 王小松, 男, 1977 年生, 博士生

拟,在不同的路径下加载得到了不同数量和形状的皱纹,并通过起皱的方式成形了铝合金零件.提出了通过有益皱的形式在成形区聚料作为预成形的观点,文中没有进行系统的几何与力学分析,对皱纹的不同形式也没有进行分析.

本文在对管坯起皱过程几何分析和起皱后应力应变状态及壁厚变化趋势力学分析基础上,着重对铝合金内高压成形起皱过程及影响因素进行数值模拟,对内高压成形过程中起皱的控制与利用进行了系统研究.

### 1 理论分析

#### 1.1 起皱过程几何分析

利用起皱作为预成形坯的过程是:管坯在冲头向内推进一段距离  $\Delta'$ (称为补料量)下形成皱纹,然后加压将皱纹展平至模具型腔,成形为工件(如图 1 所示).

设管坯初始长度为  $l_0$ ,成形后工件长度为  $l_1$ ,成形区长度为  $l$ ,管坯原始外径为  $d$ ,成形后工件外径为  $D$ ,型腔过渡半锥角为  $\alpha$ .型腔整个长度为  $l'$ , $l' = l + (D - d)/\tan\alpha$ .

假设成形前后管坯壁厚不变,则管坯成形后,成形工件表面积等于初始管坯表面积,由此可以求出此理想状态下的补料量,此补料量称为理想补料量.

成形工件的表面积为

$$S = \pi D l + \frac{\pi(D^2 - d^2)}{2\sin\alpha} + \pi d(l_1 - l') \quad (1)$$

初始管坯表面积为

$$S_0 = \pi d l_0 \quad (2)$$

理想补料量

$$\Delta = l_0 - l_1 = \frac{2Dl\sin\alpha + D^2 - d^2}{2d\sin\alpha} - l' \quad (3)$$

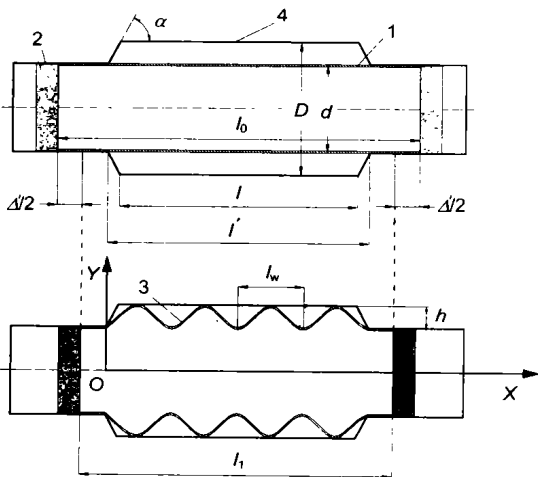


图 1 管坯起皱过程

Fig.1 Wrinkling process in tube hydroforming (1-Tube, 2-Punch, 3-Wrinkled tube, 4-Die)

假设起皱过程中壁厚不变,皱纹的数目为  $n$ ,在型腔均匀分布,皱纹波形为正弦曲线,曲线波峰贴模,波谷为原始管径.形成此理论皱形状态下的补料量称为理论补料量,形成皱纹数量不同,理论补料量也不同,图 1 为形成四个皱纹的情况.

设  $h$  为皱纹正弦曲线的幅值,则此幅值的最大值为  $(D - d)/2$ ,当半锥角较小时,半锥角区皱纹曲线的  $h$  值要小于此值.

设  $l_w$  为单皱纹长度,则  $l_w = l'/n$ ,单个皱纹曲线方程为

$$y = h\sin\left(\frac{\pi}{l_w}x\right) + \frac{d}{2} \quad (0 \leq x \leq l_w) \quad (4)$$

单个皱纹的表面积为

$$S' = 2\pi \int_0^{l_w} \left[ h\sin\left(\frac{\pi}{l_w}x\right) + \frac{d}{2} \right] \sqrt{1 + \frac{h^2\pi^2}{4l_w^2}\cos^2\left(\frac{\pi}{l_w}x\right)} dx \quad (5)$$

式(5)定积分无法给出显式解,采用数值积分法进行计算.

管坯形成  $n$  个皱纹时,起皱管坯的表面积  $S_n = nS'$ ,由  $S_n$  可以求出形成  $n$  个皱纹的理论补料量  $\Delta'$ ,如下式所示

$$\Delta' = \frac{S_n}{\pi d} - l' \quad (6)$$

对于  $D=88$  mm,  $d=65$  mm,  $\alpha=20^\circ$ ,成形区长度分别为 65, 97.5, 130 mm 三种情况,即长径比  $l/d$  分别为 1, 1.5, 2,计算不同皱纹数量对应的理论补料量、壁厚平均减薄率(负值代表壁厚增加),具体结果见表 1.

表 1 不同起皱数目对应补料量和壁厚平均减薄率  
Table 1 Feeding length and average thinning rate

$l/d$	Ideal feeding length $\Delta$ , mm	Wrinkle number $n$	Theoretical feeding length $\Delta'$ , mm	$\Delta'/\Delta$ %	Average thinning rate, %	
1	39.0	2	23.2	59.4	9.4	
		3	28.7	73.8	6.1	
		4	41.0	105.2	-1.2	
1.5	50.5	3	35.3	70.1	7.2	
		4	44.7	88.7	2.7	
		5	58.1	115.1	-3.6	
2	62.0	3	43.4	70.1	7.3	
		4	49.9	80.6	4.7	
		5	61.2	98.7	0.3	
			6	75.2	121.3	-5.2

从表 1 中可以看出, 对于不同长径比工件, 随皱纹数目增多, 补料量增加, 壁厚减薄变小, 甚至增厚. 通过起皱的方式可以将成形所需补料量预先聚集在成形区. 关键是控制皱纹的数量, 只要所起皱纹的数目合理, 可以保证成形后壁厚基本不变, 或将减薄控制在要求范围内.

### 1.2 起皱后的应力应变状态及壁厚变化趋势

起皱前, 变形区管坯的应力状态为环向受拉应力, 轴向受压应力. 起皱后应力状态如图 2a 所示, 皱峰 (A 区) 受双向拉应力, 由图 2b 得, 壁厚减薄; 皱谷 (B 区) 环向受拉应力, 轴向受压应力, 对应壁厚有三种变化:  $|\sigma_z| < \sigma_\theta$ , 壁厚减薄;  $|\sigma_z| = \sigma_\theta$  壁厚不变;  $|\sigma_z| > \sigma_\theta$ , 壁厚增加. 利用起皱作为预成形直接成形的工件, 成形区壁厚沿轴向分布不均匀.

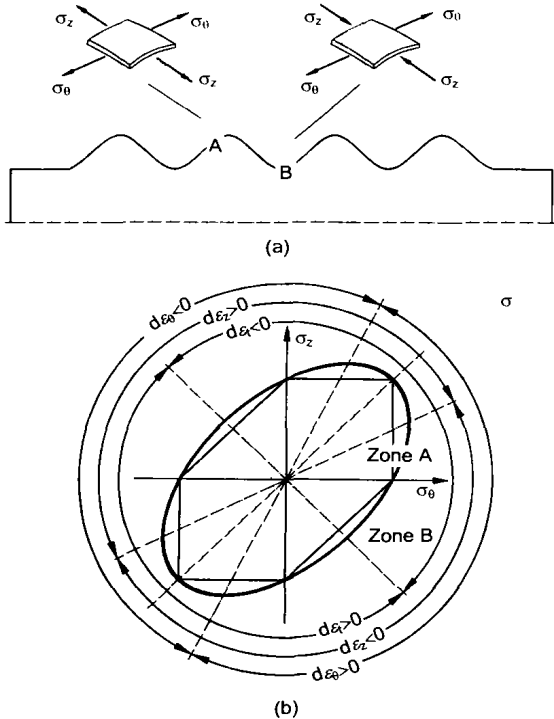


图 2 起皱后应力应变关系及壁厚变化趋势

Fig.2 Relationship of stress and strain and the changing trend of thickness after wrinkling  
(a) stress state of wrinkles (b) relationship of stress and strain

## 2 数值模拟的参数和方案

采用动态显式程序 LS-DYNA3D 进行数值模拟. 管坯划分为 Belytschko-Tsay 壳单元, 模具划分为刚性单元. 材料为各向同性材料, 服从 Mises 屈服准则, 摩擦选用 Coulomb 公式.

实验和模拟中采用的材料为铝合金, 其硬化规律为  $\sigma = Ke^n$ , 经电子拉伸机实验测得  $K = 365 \text{ MPa}$ ,  $n=0.23$ . 管坯外径  $d=65 \text{ mm}$ , 壁厚  $t=1.5 \text{ mm}$ .

共采用三种长径比工件方案进行模拟, 工件形状相同, 参数如图 1 定义, 数值与表 1 相同, 三种长径比  $l/d$  分别为 1, 1.5, 2.

限于篇幅, 下面对长径比  $l/d=1$  的情况进行详细分析, 并简要介绍其它两种情况.

## 3 数值模拟结果和分析

### 3.1 加载路径

图 3 是工件长径比为 1 的加载路径, 即内压与轴向位移匹配关系. 图 3 中轴向位移为单个冲头的补料量, 实际补料量采用理想值的 85%, 管材两端补料量相等分配.  $p_0$  称为补料压力 (MPa), 即保持此压力不变, 两端冲头同时向内补料. 当补料结束后, 提高内压至 100 MPa, 进行整形.

### 3.2 成形结果

表 2 为 7 条加载路径成形结果. 按加载路径 2, 3, 4 和 5 进行加载, 获得了起皱后直接成形的几何尺寸合格的工件, 但加载路径不同, 工件最大减薄率不同, 加载路径 4 减薄率最小. 加载路径 1 失效形式为折叠, 加载路径 6 为死皱, 加载路径 7 为破裂, 失效原因将在 3.4 节进行详细分析.

### 3.3 成形工件壁厚与应变分布

图 4a 为加载路径 3 成形工件沿轴向壁厚与减薄率分

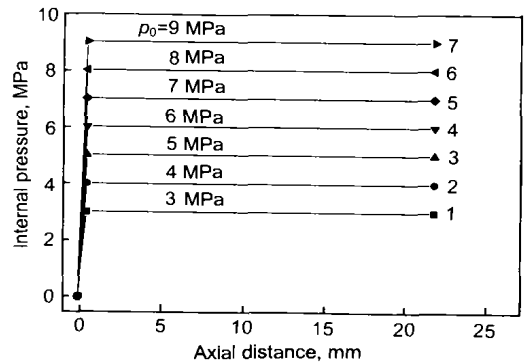


图 3 工件长径比为 1 的加载路径

Fig.3 Loading paths for part with ratio of length to diameter  $l/d=1$  ( $p_0$ -Feeding pressure)

表 2 模拟结果

Table 2 Result of simulation

Loading path	Quality	Max. TR, %	Wrinkle number	Failure mode
1	-		2	Fold
2	+	12.6	3	
3	+	10.4	3	
4	+	8.5	3	
5	+	10.2	3	
6	-		3	Dead wrinkle
7	-		0	Burst

Note: “+” successfully formed, “-” failure (TR-thinning rate)

布，横坐标零点为成形区中点。从图中可以看出，通过起皱直接成形的工件，成形区沿轴向壁厚分布不均匀。减薄较大区域为原波峰(图 2a 中 A 区)，减薄较小区域为原波谷(图 2a 中 B 区)。图 4b 所示为加载路径 3 与 5 工件在成形区的轴向应变，横坐标零点为成形区中点。

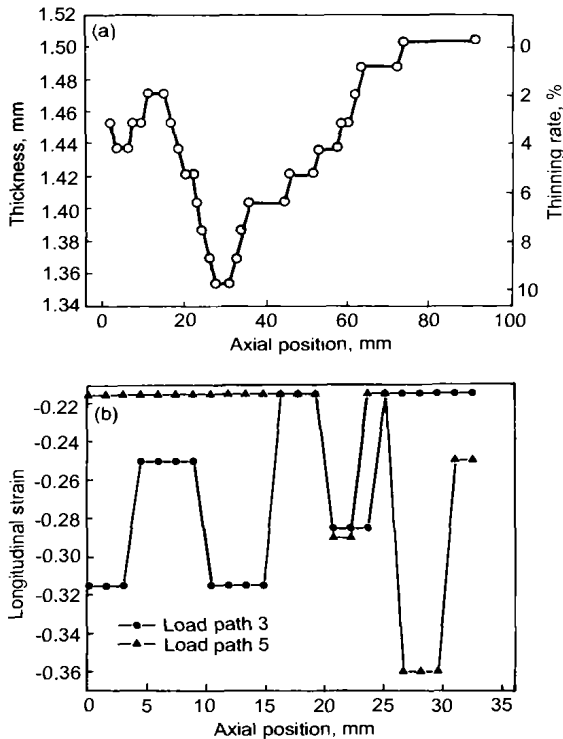


图 4 长径比 1 成形工件壁厚分布、减薄率及应变分布

Fig.4 Distribution of thickness, thinning rate and strain of part with ratio of length to diameter  $l/d=1$  (a) longitudinal thickness distribution and thinning rate of part for load path 3 (b) longitudinal strain of the workpiece of  $l/d=1$  for load paths 3 and 5

由体积不变公式得： $|\varepsilon_t| = \varepsilon_\theta - |\varepsilon_z|$ 。在成形区  $\varepsilon_\theta > 0$ ，并且相同，当  $|\varepsilon_z|$  增大时， $|\varepsilon_t|$  减小，减薄不严重；当  $|\varepsilon_z|$  减小时， $|\varepsilon_t|$  增大，壁厚减薄严重。

加载路径 3 成形区中部轴向应变较大，即得到的补料量多，壁厚减薄不严重；加载路径 5 成形区中部轴向应变小，壁厚减薄较大，变形区两端的轴向应变大，相应减薄较小。

两条加载路径轴向应变分布趋势相反，是补料压力不同的结果。由于路径 5 工件补料压力较高，当补料未完成时，成形区中部管料所起皱纹皱峰已贴模，导致后续所补管料无法进入成形区中部，而是集中在成形区两端。在高压整形时，成形区中部壁厚减薄严重，而成形区两端皱纹无法展平。

### 3.4 成形过程分析

根据工件最终成形状态，将皱纹分为折叠、有益皱和死皱。在三种长径比工件成形过程中，出现了折叠、起皱

后成形、起皱后无法展平皱纹和与破裂的情况。

图 5a, b 所示为加载路径 1 产生折叠现象。原因是补料压力低，随着补料进行，无法在变形区中部形成新皱纹，后续送进管料在管料一端聚集形成折叠。

如果皱纹数量、形状在变形区分布都较合理，工件可以直接利用带皱纹管坯(相当于预成形坯)成形，如图 5c 所示。这类皱纹称为有益皱纹。

如果管料形成皱纹在成形区分布不合理，如图 5d 所示，则整形时皱纹无法展平，无法成形，称为死皱，图 5e

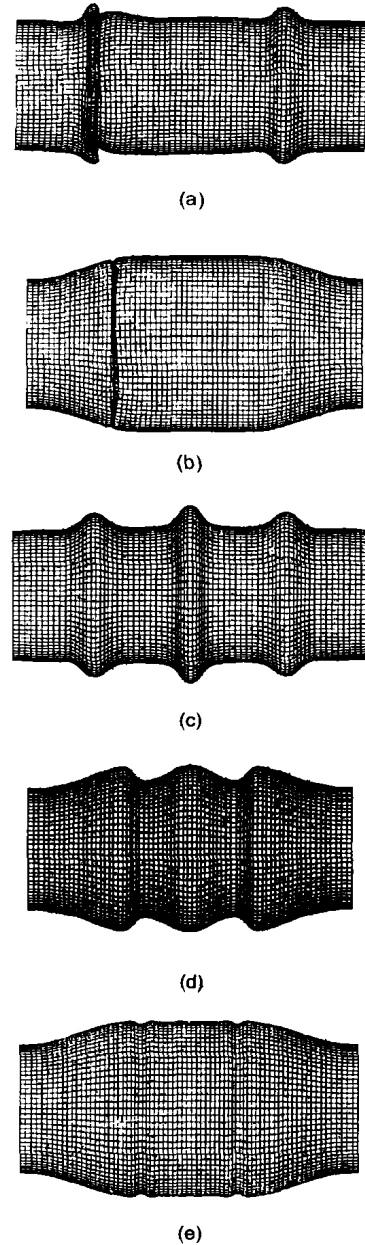


图 5 折叠、有益皱纹与死皱

Fig.5 Fold, useful wrinkles and dead wrinkles simulated for aluminum alloy (a) shape of wrinkles (b) final part (path 1) (c) useful wrinkles (d) dead wrinkles (e) final part of dead wrinkles

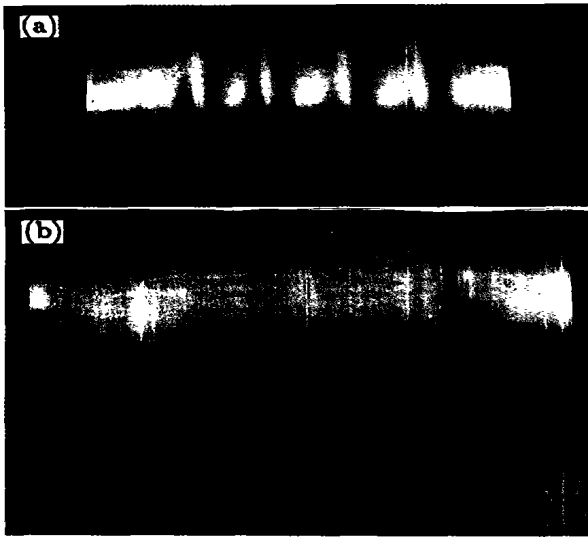


图6 内高压成形实验

Fig.6 Aluminum tube forming experiment

(a) useful wrinkles (b) final forming part through wrinkles

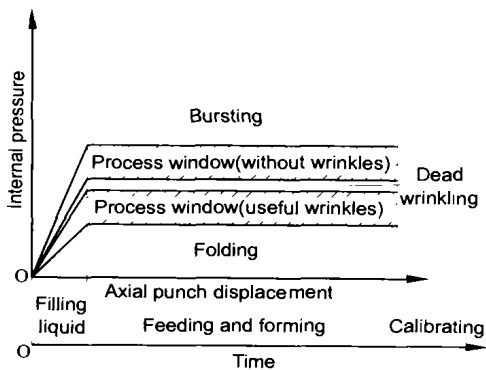


图7 内高压成形区间

Fig.7 Process window of tube hydroforming

所示为形成死皱后管坯整形结果。

当补料压力过大时,环向变形较大,轴向补料无法在变形区形成皱纹,管坯在变形区壁厚减薄较大,发生破裂。

长径比为 1.5 和 2 皱纹形成情况与长径比为 1 的情

况类似,也可以分为折叠、有益皱纹和死皱三种情况,只是有益皱纹数量及最终壁厚分布有所不同。

#### 4 实验验证

对长径比  $l/d=1.5$  的铝合金工件进行了内高压成形实验。图 6a 为管料所起有益皱纹,图 6b 为通过起皱成形工件。

在传统的认识中,将所有的起皱都认为是失效形式。但本文的研究结果表明,并不是所有的起皱都是失效形式,通过起皱可以直接成形出工件。这种皱纹称为有益皱,无法成形的皱纹为死皱。通过起皱直接成形的工件,成形区沿轴向的壁厚分布不均匀。

合理的内高压成形区间应包括两个区间:有益皱成形区与无皱成形区,在这两个区间管料都可以成形,但是工件成形后壁厚分布不同。图 7 为提出的铝合金内高压成形区间示意图。

#### 5 结论

本文对管料起皱过程进行了理论分析、数值模拟和实验研究。结果表明通过形成有益皱作为预成形坯可以直接成形工件,皱纹的数量、形状及在变形区的分布决定成形结果。当补料压力过低,会形成折叠;当补料压力过高,将无法形成皱纹。通过起皱成形工件,变形区沿轴向壁厚分布不均匀。

内高压成形区间由无皱成形区和有益皱成形区组成。通过形成有益皱方式成形可拓宽内高压成形区。

#### 参考文献

- [1] Yuan S J, Wang Z R. *Chin Mech Eng*, 2002; 13: 783
- [2] Dohmann F, Hartl C. *J Mater Proc Technol*, 1997; 71: 174
- [3] Altan T, Jiratheeranat S, Strano M, Shr S G. In: Siggert K ed, *Inter Conf on Hydroforming*, Fellbach Germany, 2001; 11: 363
- [4] Xing H L, Makinouchi A. *Int J Mech Sci*, 2001; 43: 1009
- [5] Yuan S J, Wang X S, Liu G, Lang L H, Li H Y, Wang Z R. *Processing of the 7<sup>th</sup> ICTP*. Yokohama, Japan: Japan Society for Technology of Plasticity, 2002: 1495