

# TRB 管无补料液压胀形波纹管的研究

何 滔, 顾 栩

(云南能源职业技术学院 机械与电气工程学院, 云南 曲靖 655000)

**摘要:** 首次通过理论设计建立了在无补料液压胀形波纹管时, TRB 管参数与 S、V、U 型波纹管参数的关系, 并建立了 TRB 管液压胀形 S 型、V 型、U 型波纹管的有限元模型, 验证了无补料液压胀形技术的可行性。有限元模拟结果显示, S 型波纹管的最大壁厚差为设计壁厚的 8%, 壁厚差大部分为设计壁厚的 0%~2.25%; V 型波纹管的最大壁厚差为设计壁厚的 9.33%, 壁厚差大部分为设计壁厚的 0%~4.17%, 壁厚分布均匀。成形极限图显示, S 型和 V 型波纹管的成形应力状态均在安全区内, 而 U 型波纹管在成形过程中发生破裂。因此, TRB 管能成形为壁厚均匀的 S 型和 V 型波纹管, 但不能成形为壁厚均匀的 U 型波纹管, 模拟与理论设计基本吻合。

**关键词:** TRB 管; 液压胀形; 均匀壁厚; 波纹管; S 型; V 型; U 型

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.04.014

**中图分类号:** TG394      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2023) 04-0103-07

## Research on TRB pipe hydraulic bulging bellows without feeding material

He Tao, Gu Xu

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Yunnan Vocational Institute of Energy Technology, Qujing 655000, China)

**Abstract:** The relationships between TRB pipe parameters and S-shaped, V-shaped and U-shaped bellows parameters were established by theoretical design to establish the hydraulic bulging bellows without feeding material for the first time, and the finite element models of TRB pipe hydraulic bulging S-shaped, V-shaped and U-shaped bellows were established to verify the feasibility of hydraulic bulging without feeding material. The finite element simulation results show that the maximum wall thickness difference of S-shaped bellow is 8% of the designed wall thickness, and most of the wall thickness difference is 0%~2.25% of the designed wall thickness. The maximum wall thickness difference of V-shaped bellow is 9.33% of the designed wall thickness, most of the wall thickness difference is 0%~4.17% of the designed wall thickness, and the wall thickness is evenly distributed. The forming limit diagram shows that the forming stress states of S-shaped and V-shaped bellows are all within the safety zone, but U-shaped bellows break during the forming process. Therefore, TRB pipes can form S-shaped and V-shaped bellows with uniform wall thickness. But TRB pipes cannot form U-shaped bellows with uniform wall thickness. The simulation is basically consistent with the theoretical design.

**Key words:** TRB pipe; hydraulic bulging; uniform wall thickness; bellows; S-shaped; V-shaped; U-shaped

薄壁金属波纹管同时具有密封、柔性补偿、吸能、抗冲击等特性, 广泛应用于核工业、石油化工、汽车、航空、建筑等领域<sup>[1-4]</sup>, 当前, 薄壁金属波纹管的制造广泛采用液压胀形成形方法<sup>[5-8]</sup>, 液压胀形成形技术对于成形复杂形状的薄壁管件具有精度高、轻量化、成本低等优势<sup>[9]</sup>, 现有的波纹管液压胀形成形研究多针对等厚管坯<sup>[6-8]</sup>, 在

成形过程中需要轴向加载, 将进给与内压进行匹配得到理想加载路径, 加载设计较为复杂。无进给成形将极大简化加载路径, 但是, 无进给、变壁厚原始管坯成形波纹管的研究尚未见报道。轧制差厚板 (Tailor-Rolled Blank, TRB) 是一种壁厚连续变化的轻量化板材, 研究人员对 TRB 板进行了盒形件、筒形件拉深的成形研究<sup>[10-12]</sup>, 也将 TRB 板制成壁厚连续变化的管坯 (TRB 管), 并进行液压胀形成形研究, 其中, TRB 管无补料成形的阶梯管具有较好的壁厚分布均匀性<sup>[13]</sup>。本文以波纹管成形的壁厚均匀性为评价标准, 提出应用壁厚连续变化的 TRB 管通过无轴向补料、一次性液压胀形成形含多个波长且壁厚均匀的波纹管,

收稿日期: 2023-02-21; 修订日期: 2023-03-25

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金项目 (2022J1601)

作者简介: 何 滔 (1977-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: 728720332@qq.com

通信作者: 顾 栩 (1991-), 男, 硕士研究生, 助教

E-mail: 2472183685@qq.com

并进行理论分析及数模模拟验证。

## 1 理论设计

波纹管根据其波形分为 S 型、V 型和 U 型, 现对过渡区为直线型的 TRB 管无轴向补料一次成形 3 种

波纹管进行理论设计, 建立 TRB 管参数与波纹管结构参数的关系, 相关参数如表 1 所示, 其中“薄管”、“厚管”分别表示 TRB 管的薄侧和厚侧, “管”表示成形后的波纹管, “单波”表示一个波长。图 1 为 TRB 管成形 S 型波纹管成形前后示意图, 成形前后管坯与波纹管参数的关系如式 (1)~式 (8) 所示。

表 1 TRB 管成形 S 型、V 型、U 型波纹管参数

Table 1 Parameters of S-shaped, V-shaped and U-shaped bellows formed by TRB pipe blank

波 形	TRB 管 外半径	波纹曲 率半径	薄管/管设 计壁厚	厚管 壁厚	波 长	波 高	TRB 管 截面积	单波管坯 材料体积	单波管截 面长度	单波管截 面积	单波管材 料体积	波峰/波谷 圆心角	直边水 平夹角	直边 长度	直管 高度
S	$R_s$	$r_s$	$t_s$	$T_s$	$W_s$	$H_s$	$S_{s前}$	$V_{s前}$	$L_s$	$S_{s后}$	$V_{s后}$	$2\theta_s$	—	—	—
V	$R_v$	$r_v$	$t_v$	$T_v$	$W_v$	$H_v$	$S_{v前}$	$V_{v前}$	$L_v$	$S_{v后}$	$V_{v后}$	—	$\theta_v$	$L_0$	—
U	$R_u$	$r_u$	$t_u$	$T_u$	$W_u$	$H_u$	$S_{u前}$	$V_{u前}$	$L_u$	$S_{u后}$	$V_{u后}$	—	—	—	$h_u$

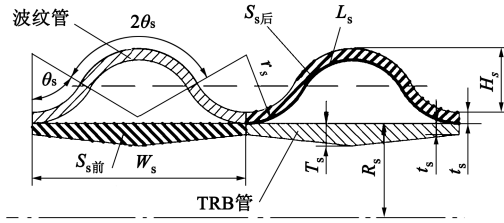


图 1 TRB 管成形 S 型波纹管示意图

Fig. 1 Schematic diagram of S-shaped bellows formed by TRB pipe

波长、波高、单波管截面长度参数关系为:

$$W_s = 4r_s \sin \theta_s \quad (1)$$

$$H_s = 2r_s (1 - \cos \theta_s) \quad (2)$$

$$L_s = \theta_s \pi r_s / 45 \quad (3)$$

截面积参数关系为:

$$S_{s前} = (t_s + T_s) W_s / 2 \quad (4)$$

$$S_{s后} = L_s + t_s \quad (5)$$

材料体积参数关系为:

$$V_{s前} = S_{s前} \times \pi \times 2R_s \quad (6)$$

$$V_{s后} = S_{s后} \times \pi \times 2[R_s + r_s(1 - \cos \theta_s)] \quad (7)$$

成形前后材料的体积相等, 整理式 (6) 和式 (7) 得出薄管与厚管壁厚关系式 (8) 为:

$$T_s = \theta_s \times \pi \times t_s [R_s + r_s(1 - \cos \theta_s)] / (90 \times R_s \sin \theta_s) - t_s \quad (8)$$

图 2 为 TRB 管成形 V 型波纹管成形前后的示意图, 成形前后管坯与波纹管参数的关系如式 (9)~式 (16) 所示。

波长、波高、单波管截面长度的参数关系为:

$$W_v = 4r_v \times \sin \theta_v + 2L_0 \cos \theta_v \quad (9)$$

$$H_v = L_0 \times \sin \theta_v + 2r_v (1 - \cos \theta_v) \quad (10)$$

$$L_v = (\theta_v \pi r_v / 45) + 2L_0 \quad (11)$$

截面积参数关系为:

$$S_{v前} = (t_v + T_v) W_v / 2 \quad (12)$$

$$S_{v后} = L_v + t_v \quad (13)$$

材料体积参数关系为:

$$V_{v前} = S_{v前} \times \pi \times 2R_v \quad (14)$$

$$V_{v后} = S_{v后} \times \pi \times 2[R_v + r_v(1 - \cos \theta_v) + L_0 \sin \theta_v / 2] \quad (15)$$

成形前后的材料体积相等, 整理式 (14) 和式 (15) 得出薄管与厚管壁厚关系式:

$$T_v = \{t_v [2R_v + 2r_v(1 - \cos \theta_v) + L_0 \sin \theta_v] (\pi r_v + 90L_0) / 90R_v (L_0 \cos \theta_v + 2r_v \sin \theta_v)\} - t_v \quad (16)$$

图 3 为 TRB 管成形 U 型波纹管成形前后示意图, 成形前后管坯与波纹管参数的关系如式 (17)~式 (24) 所示。

波长、波高、单波管截面长度的参数关系为:

$$W_u = 4r_u \quad (17)$$

$$H_u = 2r_u + h_u \quad (18)$$

$$L_u = 2\pi r_u + 2h_u \quad (19)$$

截面积参数关系为:

$$S_{u前} = (t_u + T_u) W_u / 2 \quad (20)$$

$$S_{u后} = L_u + t_u \quad (21)$$

材料体积参数关系为:

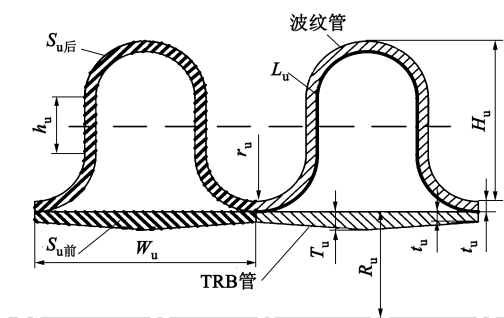


图3 TRB管成形U型波纹管示意图

Fig. 3 Schematic diagram of U-shaped bellows formed by TRB pipe

$$V_{u前} = S_{u前} \times \pi \times 2R_u \quad (22)$$

$$V_{u后} = S_{u后} \times \pi \times 2[R_u + r_u + h_u/2] \quad (23)$$

成形前后的材料体积相等, 整理式 (22) 和式 (23) 得出薄管与厚管的壁厚关系式为:

$$T_u = [t_u(2\pi r_u + 2h_u)(2R_u + r_u + h_u)/4R_u r_u] - t_u \quad (24)$$

由图1、图2和图3可知, 各型波纹管存在相互联系: 当V型波纹管直壁长度 \$L\_0=0\$ 时, V型波纹管变为S型波纹管; 当S型波纹管 \$\theta\_s=90^\circ\$ 时, S型波纹管变为直管高度 \$h\_u=0\$ 的U型波纹管。

## 2 建模及模拟方案

采用 ANSYS/LS-DYNA 进行数值建模仿真, 管坯材料参数为: 密度为 \$7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}\$、弹性模量为 \$200 \text{ GPa}\$、泊松比为 \$0.27\$、屈服应力为 \$300 \text{ MPa}\$、切变模量为 \$760 \text{ MPa}\$。TRB管建模时使用双线性各向同性硬化模型, 该材料模型的应力、应变行为与应变速率无关, 由弹性模量和切变模量两个参数来确定材料的应力应变曲线; 模具设为刚体, 管坯有限元单元采用壳单元, 管坯与模具间的动、静摩擦因数均设置为 \$0.2\$。过渡区的离散建模方法如图4所示, 以管坯过渡区薄侧端为坐标原点建立 \$XOY\$ 平面坐标系, 其中 \$T\_{厚}\$、\$t\_{薄}\$ 分别表示 TRB 管厚管厚度和薄管厚

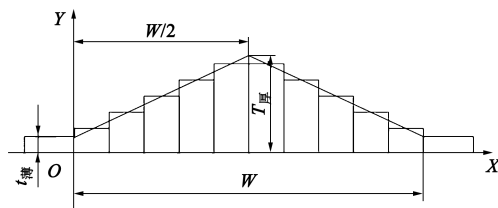


图4 过渡区离散示意图

Fig. 4 Discrete schematic diagram of transition zone

度, \$W\$ 为波纹管一个波长的长度, 过渡区曲线方程式 (25) 和式 (26) 所示, 各离散单元的横坐标为 \$W/20\$、\$3W/20\$、\$5W/20\$、\$7W/20\$、\$9W/20\$、\$11W/20\$、\$13W/20\$、\$15W/20\$、\$17W/20\$、\$19W/20\$，将横坐标分别代入曲线离散方程得到每个离散区的壁厚。

$$Y = [2(T_{厚} - t_{薄})X/W] - t_{薄}, \quad 0 < X < W/2 \quad (25)$$

$$Y = T_{厚} - 2(T_{厚} - t_{薄})(X - W/2)/W, \quad W/2 < X < W \quad (26)$$

在进行有限元验证时, 以管坯外径和波纹管壁厚相同、波高尽量相近来选取其他原始参数, S型、V型、U型波纹管管坯的厚管壁厚分别由式 (8)、式 (16)、式 (24) 计算, 波长分别由式 (1)、式 (9)、式 (17) 计算, 波高分别由式 (2)、式 (10)、式 (18) 计算。其中, 对U型波纹管参数进行设置时, 对式 (24) 进行分析, 分子中 \$r\_u\$ 最高次为二次, 分母为一次, \$h\_u\$ 只存在于分子中, 故 \$r\_u\$、\$h\_u\$ 取值越大, 则 \$T\_{厚}\$ 越大, 原始管坯厚管薄管壁厚比 \$T\_{厚}:t\_{薄}\$ 越大, 则差厚管成形性越差, 与 TRB 管相似的拼焊管在壁厚比大于 \$2.25\$ 时成形性能较差<sup>[14]</sup>, 以拼焊管的壁厚比为参照, TRB 管的壁厚比应尽量小, 因此, 选取较小的 \$r\_u\$、\$h\_u\$ 进行建模验证, 但选取极小的值如 \$r\_u=1 \text{ mm}\$、\$h\_u=1 \text{ mm}\$, 厚管薄管壁厚比依旧达 \$2.52\$, 且已无实际工程意义, 因此, 本文选择 \$r\_u=5 \text{ mm}\$、\$h\_u=1 \text{ mm}\$ 进行验证。有限元建模参数设置结果如表2所示。

表2 有限元建模参数设置

Table 2 Setting of finite element modeling parameters

波形	管坯外半径/ mm	波纹管率 半径/mm	薄管/管设 计壁厚/mm	厚管壁厚/ mm	波长/mm	波高/mm	波峰/波谷 圆心角/(°)	直边水平 夹角/(°)	直边长度/ mm	直管高度/ mm
S	\$R_s=50\$	\$r_s=40\$	\$t_s=1.2\$	\$T_s=1.583\$	\$W_s=80.000\$	\$H_s=10.71\$	\$2\theta_s=60\$	—	—	—
V	\$R_v=50\$	\$r_v=20\$	\$t_v=1.2\$	\$T_v=1.639\$	\$W_v=83.734\$	\$H_v=12.66\$	—	\$\theta_v=20\$	\$L_0=20\$	—
U	\$R_u=50\$	\$r_u=5\$	\$t_u=1.2\$	\$T_u=3.251\$	\$W_u=20.000\$	\$H_u=11\$	—	—	—	\$h_u=1\$

由于波纹管的周期性, 为了节约计算资源, 本文通过建立两个波长的波纹管来模拟无补料成形多个波长波纹管的情况, 结合实际制造情况, 管端需

要进行密封及固定, 建模时管坯两端进行了 \$3 \sim 5 \text{ mm}\$ 水平延伸。S型、V型、U型波纹管半个波长的有限元模型示意图如图5、图6和图7所示。

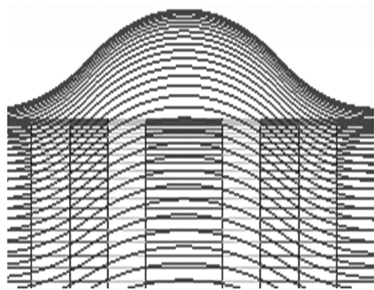


图 5 S 型波纹管有限元模型  
Fig. 5 Finite element model of S-shaped bellows

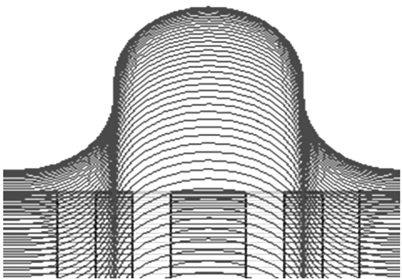


图 7 U 型波纹管有限元模型  
Fig. 7 Finite element model of U-shaped bellows

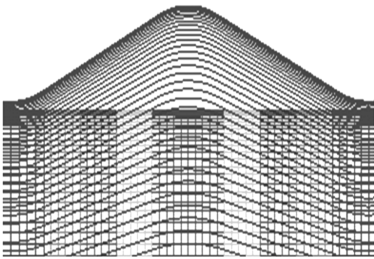


图 6 V 型波纹管有限元模型  
Fig. 6 Finite element model of V-shaped bellows

### 3 模拟结果及分析

#### 3.1 S 型波纹管成形分析

S 型波纹管的成形过程如图 8 所示，根据离散模型，离散后管坯过渡区最薄处为 1.240 mm，最厚处为 1.550 mm。成形初始阶段，波谷端迅速胀形贴模，波峰大胀形区逐步胀形，从波谷至波峰逐渐贴模，最后波峰贴模成形完毕。

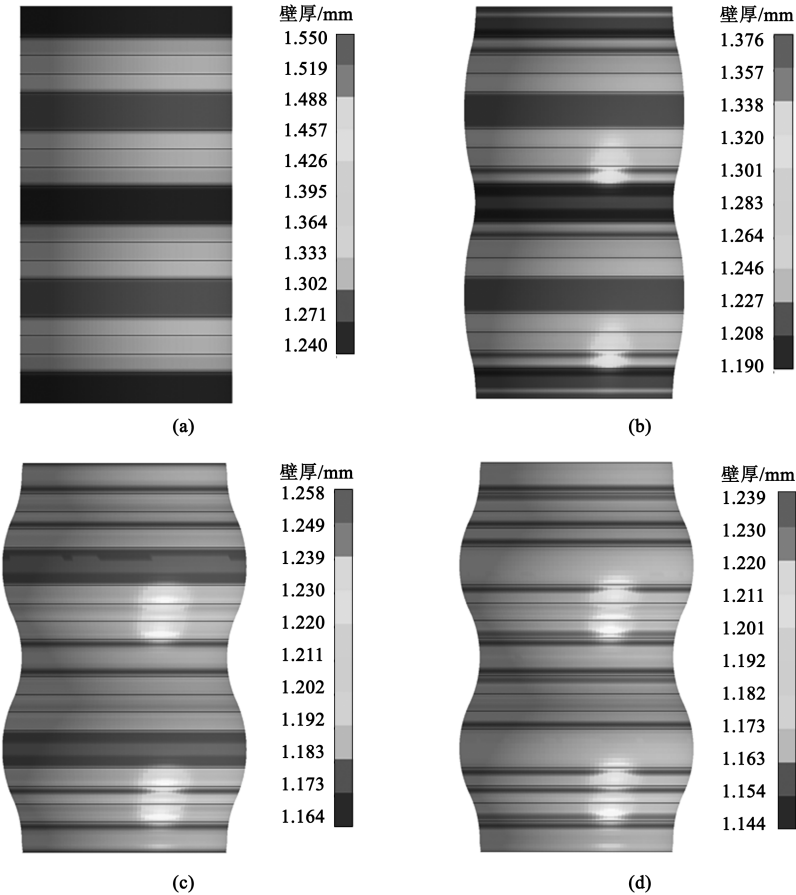


图 8 S 型波纹管液压胀形过程  
(a) 开始时刻 (b) 0.035 s (c) 0.085 s (d) 结束时刻  
Fig. 8 Hydraulic bulging process of S-shaped bellows  
(a) Beginning moment (b) 0.035 s (c) 0.085 s (d) End moment



波纹管最大壁厚为 1.239 mm, 与设计壁厚的差值(壁厚差)为 0.039 mm, 为设计管厚的 3.25%。最小壁厚为 1.144 mm, 壁厚差为 0.096 mm, 为设计管厚的 8%。S 型波纹管的成形极限图如图 9 所示, 成形后的应变均在安全区内, 成形性好, 根据文献[13]中对壁厚均匀性的描述, 认为 TRB 管在无轴向加载的情况下, 成形的 S 型波纹管壁厚均匀, 且管坯最小壁厚、最大壁厚所占区域极小。图 10 为 S 型波纹管一个波长的壁厚轴向分布图, 波纹管绝大部分区域壁厚在 1.173~1.220 mm 之间, 即壁厚差为设计壁厚的 0%~2.25%, 数值模拟结果与理论设计基本吻合。

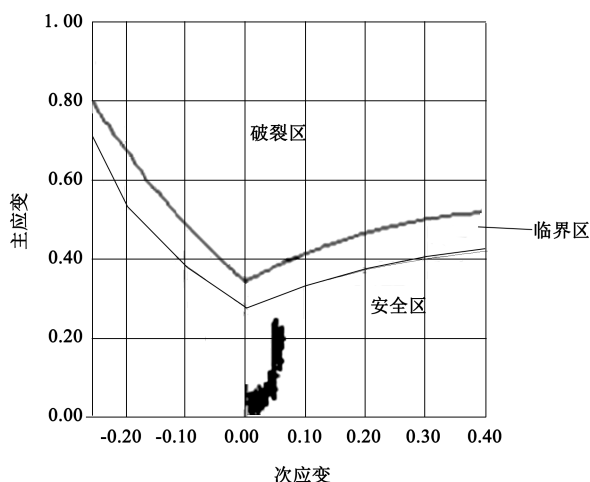


图9 S型波纹管成形极限图

Fig. 9 Forming limit diagram of S-shaped bellows

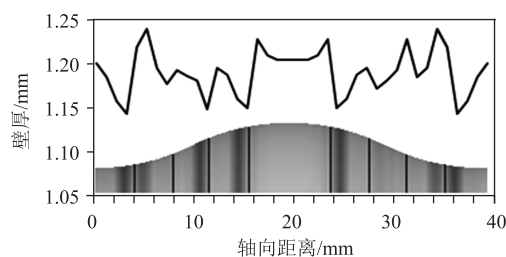


图10 S型波纹管壁厚轴向分布

Fig. 10 Axial distribution of wall thickness for S-shaped bellows

另外, 最小壁厚分布在各离散区靠近波峰侧, 最大壁厚分布在离散区靠近波谷侧, 因成形过程中波谷侧先贴模, 在摩擦力的限制下, 后续成形过程中不会过度拉伸, 且在离散处理过程中, 波谷侧管厚本就比理论管厚值大, 导致形成最大壁厚分布区。波谷侧贴模后, 在后续胀形过程中, 波峰侧未贴模时被过度拉伸, 导致形成最小壁厚分布区。

### 3.2 V型波纹管成形分析

V型波纹管的胀形过程与S型波纹管类似, 液压胀形结果如图11所示。最大壁厚为 1.244 mm,

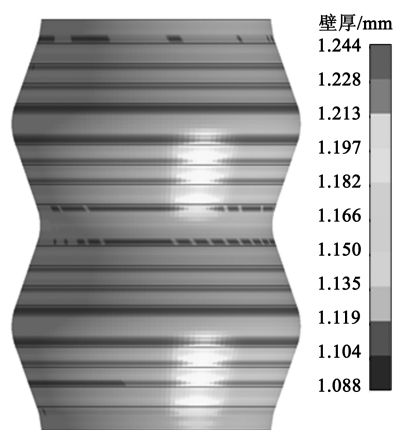


图11 V型波纹管液压胀形结果

Fig. 11 Hydraulic bulging results of V-shaped bellows

壁厚差为 0.044 mm, 为设计壁厚的 3.67%; 最小壁厚为 1.088 mm, 壁厚差为 0.112 mm, 为设计壁厚的 9.33%, 也认为壁厚均匀。另外, 管坯最小壁厚、最大壁厚所占区域较小, 图12为V型波纹管一个波长的壁厚轴向分布图, 波纹管绝大部分区域壁厚在 1.150~1.228 mm 之间, 即壁厚差为设计壁厚的 0%~4.17%。同时, V型波纹管的成形极限图如图13所示, 成形完毕后, 管坯应变在成形极限安全区内, 成形性较好。

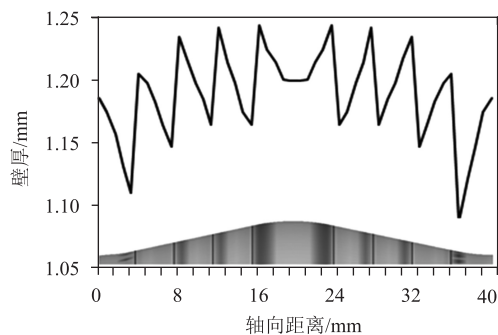


图12 V型波纹管壁厚轴向分布

Fig. 12 Axial distribution of wall thickness for V-shaped bellows

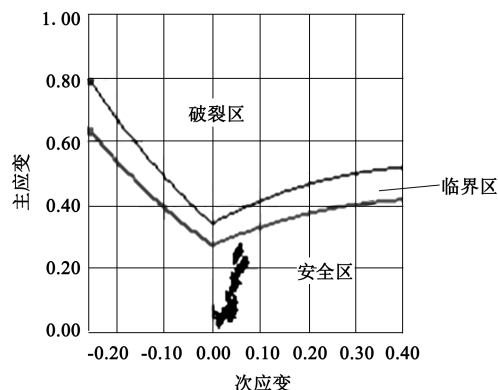


图13 V型波纹管成形极限图

Fig. 13 Forming limit diagram of V-shaped bellows

### 3.3 U 型波纹管成形分析

U 型波纹管建模离散后的最小壁厚为 1.425 mm, 最大壁厚为 3.046 mm, 液压胀形初期过程与 S 型和 V 型波纹管类似。成形过程到 0.181 s 时的成形极限图如图 14 所示, 由图 14 可知管坯已经破裂。

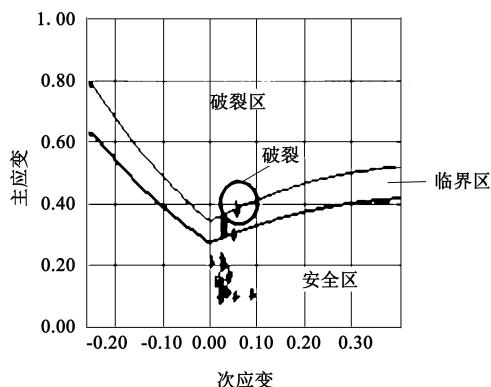


图 14 U 型波纹管 0.181 s 时的成形极限图

Fig. 14 Forming limit diagram of U-shaped bellows at 0.181 s

图 15 为 0.181 s 时的液压胀形结果, U 型波纹管尚未成形完毕, 最小壁厚与设计壁厚的壁厚差为 0.2 mm, 为设计壁厚的 16.67%, 已不符合壁厚均匀性要求。

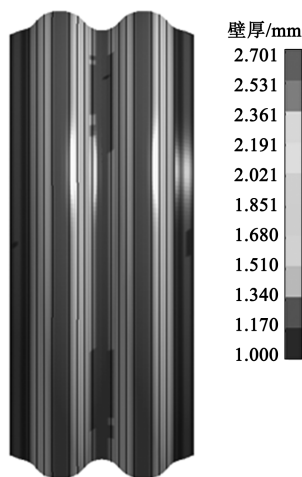


图 15 U 型波纹管 0.181 s 时的液压胀形结果

Fig. 15 Hydraulic bulging results of U-shaped bellows at 0.181 s

由于竖直管壁的存在, 当两波谷区贴模完毕后, 波峰大胀形区成形时, 竖直管壁贴模困难, 导致直壁管过渡处过度拉伸而破裂, 根据理论设计, 成形均匀壁厚的 U 型波纹管, 厚管需减薄 1.621 mm, 波峰区减薄率达 53.22%, 成形过程中需要较大胀形力, 也会导致贴模与未贴模交界区过度拉伸。因此, 认为均匀壁厚的 U 型波纹管不能应用 TRB 管无补料一次成形。

## 4 结论

(1) 有限元模拟结果显示, S 型波纹管最大壁厚差为设计壁厚的 8%、V 型波纹管最大壁厚差为设计壁厚的 9.33%, 壁厚均匀, TRB 管无补料液压胀形能很好地成形 S 型、V 型波纹管。

(2) 有限模元拟结果显示, U 型波纹管在未成形完毕即发生破裂, TRB 管不宜用于无补料液压胀形 U 型波纹管的成形中。

(3) S 型波纹管的成形壁厚差值大部分区域为设计壁厚的 0%~2.25%, V 型波纹管的成形壁厚差大部分区域为设计壁厚的 0%~4.17%, 均匀性较好, 模拟结果与理论设计基本吻合。

### 参考文献:

- [1] 杨婧, 张欢, 由世俊, 等. 不锈钢波纹管地板辐射采暖热工性能研究 [J]. 太阳能学报, 2018, 39 (5): 1220-1226.  
Yang J, Zhang H, You S J, et al. Thermal performance study on radiant floor heating system with stainless steel bellows [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39 (5): 1220-1226.
- [2] 宋超, 陈力生, 宋梅村, 等. 船用核动力蒸汽系统波纹管腐蚀分析与寿命预测研究 [J]. 原子能科学技术, 2012, 46 (S1): 347-350.  
Song C, Chen L S, Song M C. Corruption analysis and life span forecast research on sylphon bellows of nuclear-powered steam system of ship [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46 (S1): 347-350.
- [3] 涂玉林, 杨红歧, 胡彦峰, 等. 膨胀波纹管在小井眼的安全应用工况模拟试验研究 [J]. 石油钻探技术, 2018, 46 (2): 69-74.  
Tu Y L, Yang H Q, Hu Y F, et al. Simulation and experimental study on the safe application condition of expandable profile liner in slim holes [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46 (2): 69-74.
- [4] 刘蕾, 周金朝, 郭远东, 等. 某型号汽车波纹管液压胀形工艺参数优化研究 [J]. 精密成形工程, 2022, 14 (2): 14-21.  
Liu L, Zhou J Z, Guo Y D, et al. Optimization of hydraulic bulging process parameters of a certain type of automobile bellows [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14 (2): 14-21.
- [5] Hu S H, Elaty A A, Cheng C, et al. The Influence of the MRE forming medium and axial feeding on the forming quality of thin-walled inconel 718 bellow manufactured by a bulging process: Finite element simulation and experimentation [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112 (1/2): 387-400.
- [6] 杨程, 李斯棠, 孙磊, 等. 大型薄壁 U 形波纹管轴向低压力

- 形的形状精度 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (10): 145-153.
- Yang C, Li S T, Sun L, et al. Shape accuracy for large thin-wall U-shaped bellows under axial low pressure hydroforming [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (10): 145-153.
- [7] 简翰鸣, 赵淘, 卜星, 等. 薄壁多层不锈钢波纹管整体成形工艺 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (4): 81-88, 111.
- Jian H M, Zhao T, Bu X, et al. Integral forming technology of thin-walled multiply stainless steel bellows [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (4): 81-88, 111.
- [8] 王彪, 孙磊, 林才渊, 等. 铝合金  $\Omega$  形波纹管轴向低压压形工艺 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (4): 56-63.
- Wang B, Sun L, Lin C Y, et al. Axial low pressure forming process for aluminum alloy  $\Omega$ -shaped bellows [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (4): 56-63.
- [9] 岳峰丽, 段铁群, 徐勇, 等. 大截面变化率汽车排气管的多工步液力成形工艺 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (10): 141-149.
- Yue F L, Duan Y Q, Xu Y, et al. Multi-step hydro-mechanical forming process for automobile exhaust pipe with large changing rate of cross section [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (10): 141-149.
- [10] 张华伟, 王永喆, 吴佳璐, 等. 轧制差厚板盒形件充液拉深成形缺陷的正交试验分析与神经网络预测 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (10): 96-102.
- Zhang H W, Wang Y Z, Wu J L, et al. Orthogonal test analysis and neural network prediction on forming defects in hydroforming for tailor rolled blank box part [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (10): 96-102.
- [11] 张思佳, 胡贤磊, 刘相华. 轧制差厚板方盒件拉深成形的实验与数值模拟 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2022, 43 (6): 801-808.
- Zhang S J, Hu X L, Liu X H. Experimental and simulation study on deep drawing of square box made from tailor rolled blank [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2022, 43 (6): 801-808.
- [12] 张华伟, 李渊, 吴佳璐, 等. 预胀压力对轧制差厚板筒形件充液拉深成形的影响 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (10): 83-87.
- Zhang H W, Li Y, Wu J L, et al. Influence of pre-bulging pressure on hydraulic deep drawing for cylindrical part of tailor rolled blank [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (10): 83-87.
- [13] 张渝, 顾树. 使用 TRB 管无补料的液压胀形形成阶梯管的研究 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (23): 168-172.
- Zhang Y, Gu X. Study on hydraulic bulging of TRB tube for stepped pipe with unfilled material [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (23): 168-172.
- [14] Liu G, Yuan S J, Chu G N. FEA on deformation behavior of tailor-welded tube in hydro-forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187-188: 287-291.

# AFDEX

INTELLIGENT METAL FORMING SIMULATOR

智能化金属成形模拟软件

◆**易用**: 简单、友好, 且在不断优化的操作界面, 大量的学习向导以及应用实例, 使工程师不但上手轻松, 更不会在使用中气馁, AFDEX 可以帮助您轻松分析锻造工艺。

◆**准确**: 超过 500 个实际生产应用案例, 包含复杂的冷温热多工位锻造、闭塞锻造、径向锻造、辊锻、辗环等几乎所有锻压成形工艺的模拟。AFDEX 的准确性和能力, 已经在全球百余家制造企业的生产中得到了验证。

◆**各种结果同时展示**: AFDEX 的后处理平台, 可以在运算的同时, 实时显示各种结果: 变形形状、节点的速度、应变、应变率、应力、金属流线、某点流动、边界节点应力、界面应力、温度分布、损伤、磨损、体积变化、载荷等。

◆**自动分析多工步工艺, 轻松进行模具分析**: AFDEX 可以自动对多工位的锻造工艺进行模拟, 无需用户的干预。模具分析与优化是工程师的重要工作, 在 AFDEX 中, 您只需要点击两下鼠标, 即可以对模具进行模拟分析, 结果实时展示给用户。

◆**丰富的材料库与设备模型**: AFDEX 中提供了丰富的开放式材料数据库, 包括美日德标的各种黑色金属、轻合金以及模具钢等两百余种材料数据。用户也可根据自己的需要定制材料库。另外, AFDEX 集成了实际生产中常用的设备模型, 包括液压机、机

械压力机、螺旋压力机、锻锤等。可以满足用户各种成形条件下模拟的需要。

◆**适合多种人群使用**: AFDEX 不强迫锻造工程师了解软件执行的相關理论和有限元方法, 在 AFDEX 的开发理念中, 即使是新手也能轻松的学习和使用它。同时 AFDEX 提供了多国语言界面的支持。

◆**卓越的成本效益**: AFDEX 更了解中国, 专为中国用户而制定的低成本运作政策, 显著降低了用户的采购及使用成本, 具有卓越的成本效益。

◆**我们能够提供的不仅是软件**: AFDEX 一直坚持的开发商与服务商一体化, 可以提供更好的本土化服务与定制服务。中韩技术团队, 为您提供终身的维护服务。在软件之外, 我们更可以为您提供工艺技术开发与制造服务, 协助您进行工艺开发、优化设计、学术研究、装备与生产线建设。

**BRIMET 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司**

地址: 北京市海淀区学清路 18 号 2 层 邮编: 100083

电话: 010-82415037, 82415024

传真: 010-62943911

E-mail: info@afdex.com.cn, afdexcn@gmail.com

HTTP://WWW.AFDEX.COM.CN

(以上数据和资料由中国机械总院集团北京机电研究所有限公司提供)