

波节形状对波节管结构稳定性和传热特性的影响

张伟玮¹, 韩聪¹, 韩怀志², 苑世剑¹, 李炳熙²

(1. 哈尔滨工业大学 金属精密热加工国防科技重点实验室, 150090 哈尔滨;

2. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 150090 哈尔滨)

摘要: 针对不同形状的波节管的成形精度、结构稳定性以及传热特性差异较大. 通过实验研究、理论校核和数值模拟相结合的方法, 重点研究不同的波节形状(波谷圆角半径 R 和波节高度 H) 对波节管成形精度、轴向补偿能力、平面抗失稳能力以及传热特性的影响规律. 研究表明: 内高压成形波节管的成形精度随着波谷圆角半径 R 的增大而提高; 波节管的轴向位移补偿能力随波节高度 H 的增加而增大; 抗平面失稳能力和抗疲劳能力随波节高度 H 的增加而降低; 综合传热因子 η 随着波谷圆角半径 R 增大和波节高度 H 的增加均是先增大后减小. 综合考虑上述各个因素, 对于所研究的内高压成形波节管, 当波节高度 H 为 2.5 mm, 波谷圆角半径 R 为 30 mm 时, 波节管具备良好的综合特性.

关键词: 波节管; 内高压成形; 成形精度; 结构稳定性; 综合传热因子

中图分类号: TG394

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)07-0057-06

Effect of shape on structural stability and heat transfer characteristics of corrugated tubes

ZHANG Weiwei¹, HAN Cong¹, HAN Huaizhi², YUAN Shijian¹, LI Bingxi²

(1. National Key Laboratory of Precision Hot Processing of Metals, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. School of Energy Science and Engineering, Harbin 150001, China)

Abstract: The effect of convolution height and corner located on transition zone on forming precision, axial compensation capacity, anti-instability capacity, and heat transfer characteristics are analyzed one by one in this paper by experiments, theory checking and simulation. The results show that, for hydroformed corrugated tube, with the increase of corner radius there will be a better forming precision; with the increase of convolution height, there will be a good performance on axial compensation capacity and bad performance on anti-instability capacity and anti-fatigue capacity; with the increase of corner radius and convolution height, the comprehensive heat transfer friction are first increase and then decrease. When the convolution height is 2.5 mm and the corner radius is 30 mm, the hydroformed corrugated tubes have better comprehensive performance.

Key words: corrugated tubes; hydroforming; forming precision; structural stability capacity; comprehensive heat transfer friction

随着经济的高速发展, 能源短缺的问题日趋严重, 对高性能、高参数换热设备提出了更高标准

的要求. 换热设备的结构稳定性和传热性能对产品质量、能量利用率以及系统的经济性和可靠性都起着决定性的作用. 波节管作为一种良好的变形补偿元件, 不仅仅在复杂应力场下能产生轴向、周向及其组合位移, 同时具备耐高压、耐大温差、耐冲击等显著特点^[1-3]. 由于波节管在能源化工行业有着广泛的需求量, 波节管的成形工艺也向着轻量化、一体化发展. 内高压成形工艺具有模具

收稿日期: 2012-12-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075097);
国家科技支撑计划资助项目(2011BAG03B03);
黑龙江省自然科学基金资助项目(E201218).

作者简介: 张伟玮(1985—), 男, 博士研究生;
苑世剑(1963—), 男, 教授, 博士生导师;
李炳熙(1962—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 韩聪, congshan@hit.edu.cn.

简单,成形精度高,可同时成形多个波节管等优点^[4-6],已经广泛应用于波节管的生产。

通过内高压成形,可以得到不同波节形状的波节管,由于成形过程不存在轴向补料,全部依靠局部区域胀形获得,过度减薄和成形精度低等问题不可避免,这直接影响到波节管的承载能力、抗疲劳特性以及平面稳定性。决定波节形状的参数主要有波谷圆角半径 R 和波节高度 H ,对于不同形状的波节管,内高压成形后,成形精度差别很大。成形精度的差别既会影响到波节高度 H ,也会影响到波节当量壁厚,从而影响到波节管使用过程的耐压强度、轴向刚度、最大位移补偿量、平面稳定性、疲劳寿命等,且这些影响因素之间并非相互独立而是相互制约^[7-8]。在传热过程中,不同的波节形状对流体的努塞尔数 Nu 、摩擦阻力系数 f 、综合传热因子 η 产生重要的影响^[9-10]。因此研究波节形状对最终成形精度、结构稳定性和传热特性是非常必要的,也是评价内高压成形波节管综合使用性能的重要参考依据。

本文首先通过内高压成形方法得到波节管,针对这一特殊形状的波节管,重点分析流体上游方向波谷圆角半径 R 对波节管成形精度影响规律;其次通过应力校核分析的方法考察不同波节高度 H 对波节结构稳定性的影响规律;然后分析波节高度 H 和流体上游方向波谷圆角半径 R 对波节传热特性的影响规律;最后综合考虑各个影响因素,确定合适的波节形状。

1 试件形状及研究方法

本文研究的波节管的几何模型如图1所示。该波节管是由外径(d_0)为25 mm,壁厚为 $t_0 = 2$ mm的管材通过内高压成形获得,如图2所示,为轴对称图形,波节管宽度为 $w = 5$ mm。波节管的材料为工业用奥氏体不锈钢,材料室温屈服强度为390 MPa,材料硬化指数为0.148,材料各项异性系数为0.83,材料弹性模量为207 GPa,泊松比为0.28。

波节管高度 H 和流体上游方向波谷圆角半径 R 是本文重点研究的工艺尺寸,流体下游方向的波谷圆角半径固定为 $r = 5$ mm 不变。本文研究的波节管高度 H 和波谷圆角半径 R 变化范围分别为 $2 \text{ mm} \leq H \leq 4 \text{ mm}$, $5 \text{ mm} \leq R \leq 30 \text{ mm}$,不同 H 和 R 的组合,对波节管内高压成形精度、结构稳定性、传热特性都会有不同的影响。通过实验分析、数值模拟、理论校核等方法,采取单一变量原则,即固定一个工艺参数不变,重点分析另一个参数

的变化规律,来得到一合理的设计尺寸。

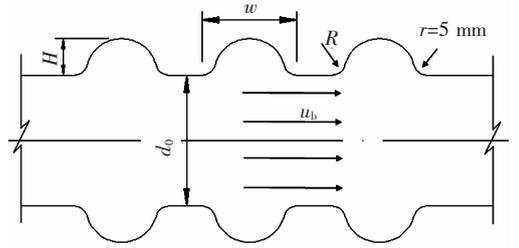


图1 试件形状及参数设计

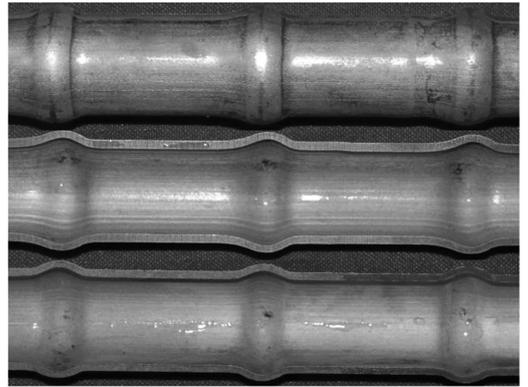


图2 内高压成形后波节管

2 波节管内高压成形研究

波节管成形实验在哈尔滨工业大学的10 000 kN内高压成形机上进行。数值模拟采用通用有限元分析软件 ABAQUS6.10,动态显式求解器(Dynamic Explicit)对同一波节管高度(取 $H = 2.5$ mm),不同波谷圆角半径 R 的波节管内高压成形过程进行有限元分析。

图3所示为同一波节高度 H ,不同波谷圆角半径 R 时,管坯内高压成形后等效应变分布情况,考虑到成形过程是一步成形,不存在多步成形的变形积累过程,也没有增厚情况,等效应变较大的区域也是壁厚减薄严重的区域。从图3中可以看出,随着波谷圆角半径 R 的增大,内高压成形过程中参与变形的区域也在逐渐变大,更多的金属被带动流向波节区域,同时变形分布更加均匀。

通过对不同形状波节管壁厚测量分析可知,在一定范围内增大波谷圆角半径 R ,可以有效降低成形后波节区域的最大减薄率,但随着圆角半径 R 继续增大,最大减薄率变化很小并趋于定值,如图4所示。这一点与图3中随着波谷圆角半径 R 的增大,最大等效应变值基本不再变化的情况相吻合。

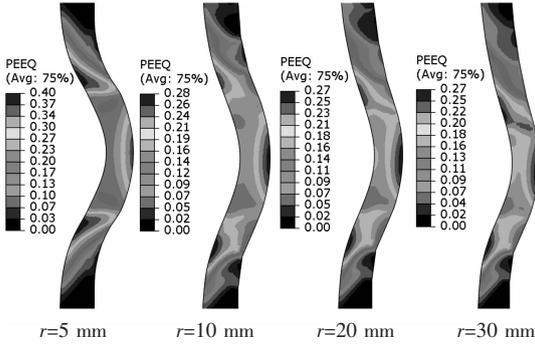


图3 同一波节管高度 ($H = 2.5 \text{ mm}$), 不同波谷圆角半径 R , 内高压成形后等效应变分布情况

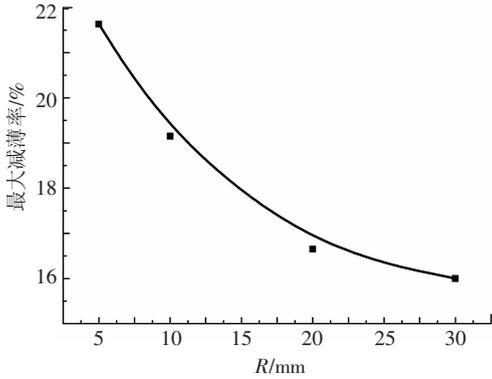


图4 同一波节管高度 ($H = 2.5 \text{ mm}$), 不同波谷圆角半径 R , 壁厚最大减薄率变化情况

通过增大波谷圆角半径 R 来降低波节的最大减薄率, 从而有利于金属流动, 其目的是提高成形后波节高度方向成形精度. 图5所示为实验过程中同一波节高度 H , 不同波谷圆角半径 R 时, 成形后波节尺寸精度偏差以及对应的整形压力分布情况. 从图5中可以看出, 随着波谷圆角半径 R 从 5 mm 增大到 30 mm , 波节高度方向尺寸偏差从 11% 下降到 7.1% , 成形精度在提高; 所需整形压力从 310 MPa 下降到 270 MPa , 即在较低的整形压力下即可实现最终的贴模.

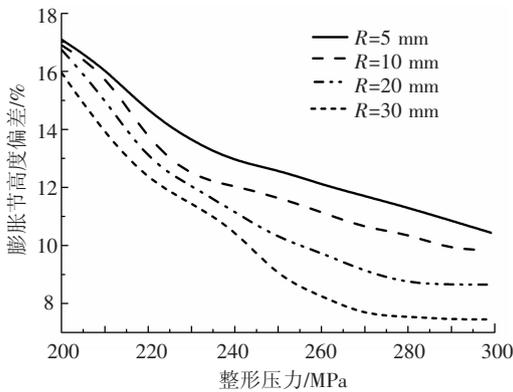


图5 不同波谷圆角半径 R 时波节管成形精度

3 波节管结构稳定性研究

波节管在使用过程, 受内压力和轴向压力联合作用, 其承载能力、位移补偿能力、平面稳定性

能力以及抗疲劳能力都是波节形状在设计过程中不可忽视的问题. 本文研究波节管使用条件: 在 630 K 温度下, 承受 $5 \sim 10 \text{ MPa}$ 内压力. 已知材料奥氏体不锈钢在 630 K 时, 屈服强度 $\sigma'_s = 231 \text{ MPa}$, 许用应力 $[\sigma] = 125 \text{ MPa}$, 弹性模量为 $E'_b = 170 \text{ GPa}$, 为保持内压力, 根据文献[5]计算方法, 通过计算需要施加轴向力为 $F = 5 \text{ kN}$. 根据文献[7-8]中关于波节管的设计校核方法, 结合本文研究的波节管的实际使用情况, 重点分析波节管高度 H 对波节管结构稳定性的影响规律.

由内压力引起的波节管的环向应力 σ_1 、轴向应力 σ_2 以及轴向弯曲应力 σ_3 为

$$\sigma_1 = \frac{pd_m}{2t_p} \left[\frac{1}{0.571 + \frac{2H}{w}} \right] \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \frac{pH}{2t_p} \quad (2)$$

$$\sigma_3 = \frac{p}{2} \left(\frac{H}{t_p} \right)^2 C_p \quad (3)$$

式中: t_p 为平均壁厚, $t_p = t_0 \sqrt{\frac{d_0}{d_m}}$; t_0 为初始壁厚; $d_m = d_0 + 2H$; 取系数 $C_p = 0.95$.

由轴向位移引起的轴向应力 σ_4 和轴向弯曲应力 σ_5 为

$$\sigma_4 = \frac{E_b(t_p + C_2)^2 e_1}{2H^3 C_f}$$

$$\sigma_5 = \frac{5E_b(t_p + C_2) e_1}{3H^2 C_d}$$

式中: e_1 为单个波节的位移量; E_b 为室温材料弹性模量; $C_f = 1$; $C_d = 1$; $C_2 = 0$.

组合应力 σ_R 为

$$\sigma_R = 0.7(\sigma_2 + \sigma_3) + (\sigma_4 + \sigma_5) \quad (4)$$

以上条件需要满足式(1)、(2)不大于材料所在温度的许用应力 $[\sigma]$, 如果式(4)不大于 $2\sigma'_s$, 不需要校核疲劳强度, 反之需要进行疲劳校核. 波节管许用循环次数 $[N]$ 为

$$[N] = \frac{\left(\frac{12820}{T_f \sigma_R - 370} \right)^{3.4}}{n_f}$$

式中: $T_f = 1$; $n_f \geq 15$.

单个波节的轴向弹性刚度 K 为

$$K = \frac{1.7d_m E'_b}{C_f} \left(\frac{t_p + C_2}{H} \right)^3$$

给定轴向力时, 单个波节的轴向位移量 e_1 为

$$e_1 = \frac{F}{K} \quad (5)$$

波节管的平面失稳压力 p_s 为

$$p_s = \frac{1.4t_p^2 \sigma_s'}{H^2 C_p} \quad (6)$$

通过上述分析可知,波节管的最大位移补偿能力、抗疲劳能力和抗平面失稳能力之间是相互制约的,不是独立变量.根据式(5)~(6),本文所研究的波节管的轴向补偿量 e_1 和平面失稳压力 p_s 随波节高度 H 的变化关系如图6所示.随着波节高度 H 的增加,波节管的轴向刚度下降,柔性增大,能够产生更大的轴向位移补偿量,但是平面抗失稳能力越差,当抗平面失稳压力值越接近承载内压,对波节管的承载安全是极为不利的.

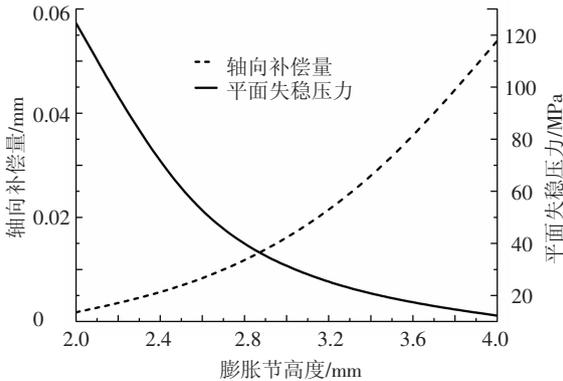


图6 轴向补偿量与平面失稳压力随波节管高度变化关系

本文研究的波节管,当波节高度 H 从2 mm增加到4 mm时,单波节轴向位移补偿量从0.002 mm提高到0.054 mm,平面失稳压力则从125 MPa下降到12 MPa,疲劳寿命从无限长下降到13 269个循环.所以波节高度 H 的设计既要兼顾波节管的轴向位移补偿特性,还要考虑它的抗失稳能力和疲劳寿命.

4 波节管传热特性研究

波节管的传热性能主要由换热性能和阻力性能来综合表述.其中换热性能由努塞尔数 Nu 来表示为

$$Nu = \alpha \cdot l / \lambda \quad (7)$$

式中: α 为对流换热系数; l 为特征长度; λ 为导热系数.

阻力性能主要由摩擦阻力系数 f 来表示为

$$f = \frac{2D\Delta P}{\rho u_b^2 L} \quad (8)$$

式中: ΔP 为压力降; u_b 为平均速度; ρ 为密度; D 为管径; L 为管长.

为了深入研究各种因素对强化换热效果的影响,引入综合传热因子 η ,不同形状的波节管的传热特性由式(7)、(8)和(9)来综合表征.

$$\eta = \left(\frac{Nu}{Nu_s} \right)^3 / (f/f_s) \quad (9)$$

式中: Nu_s 为光管努塞尔数; f_s 为光管摩擦阻力系数.在分析波节管综合传热特性时,可以认为与之对比的光管的 Nu_s 和 f_s 为常数.

采用通用有限元分析软件 ANSYS12.0 分别分析波谷圆角半径 R 和波节高度 H 对传热特性的影响规律.

图7描述了同一波节高度 $H(H = 2.5 \text{ mm})$ 时温度场随波谷半径 R 变化时的分布规律.由图7可知,流体进入波节上游区域时,由于管壁面突然远离流体,发生边界层分离现象,这使得波节上游区域的温度梯度变小.流体直接冲刷作用使得波节下游区域的热边界层重新发展,温度梯度很大.所以热边界层的破坏主要集中在波节下游区域.随着波谷圆角半径 R 的增加,通过热边界层变化情况并结合式(7)可知,波节管努塞尔数 Nu 随波谷圆角半径 R 的增大而减小,波节管换热效率明显降低.

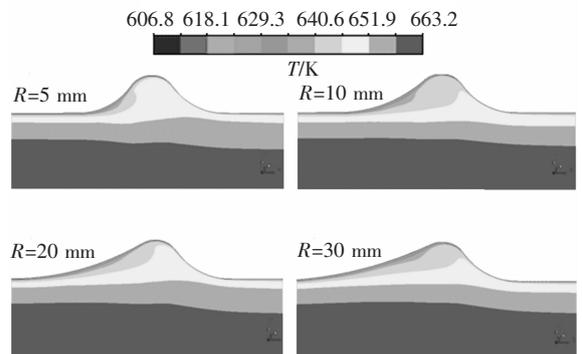


图7 同一波节管高度 H ,管内温度场分布

图8描述了同一波节高度 $H(H = 2.5 \text{ mm})$ 时速度场随波谷圆角半径 R 变化的分布规律.由图8可知,当流体从直管段进入弯管段时,边界层发生脱离现象,此时边界层分成两部分,分别为自由边界层和壁面边界层.流体自由边界层最后封闭涡旋,并与流体下游区域的再次接触附着.随着波谷圆角半径 R 的增加,壁面边界层厚的区域逐渐增加,流体更加顺畅的流入波节内,使得封闭区域减小,抑制了漩涡强度,压降 ΔP 减小,结合式(8)可知,波节管的摩擦阻力系数 f 随波谷圆角半径 R 的增加而减小.

通过数值模拟结果分析并结合式(9)即可得到同一波节高度 H ,不同波谷圆角半径 R 下,相对努塞尔数 Nu/Nu_s 、相对摩擦阻力系数 f/f_s 和综合传热因子 η 随波谷圆角半径 R 的变化规律,如图9所示.当波谷圆角半径 R 从5 mm增大到20 mm时,波节管的综合传热特性显著升高,当

波谷圆角半径 R 从 20 mm 增大到 30 mm 时, 综合传热特性先升高再降低, 但是 $R = 30$ mm 时综合传热特性要略好于 $R = 20$ mm 时。

H 的增加先增大后减小, 当 H 位于 2.0 mm 和 2.5 mm 之间时, 综合传热特性最好。

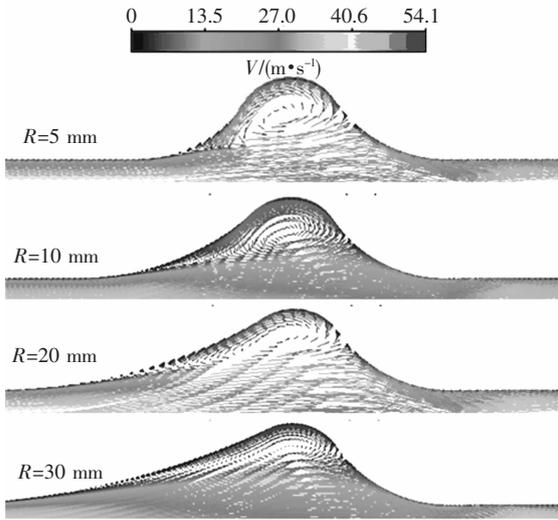


图8 同一波节管高度 H , 管内速度场分布

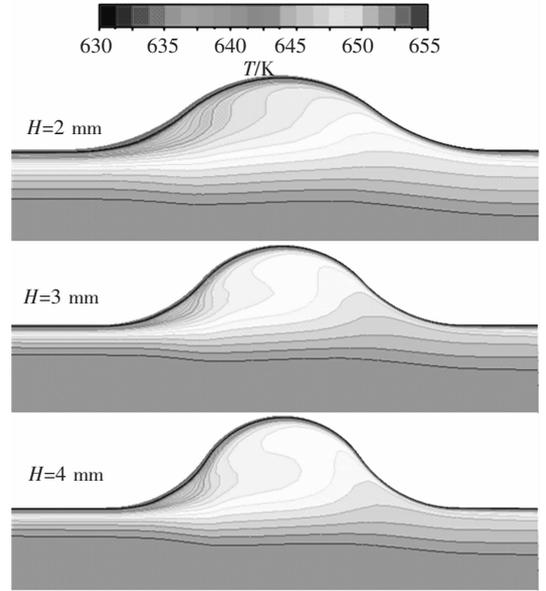


图10 同一波谷圆角半径 R , 管内温度场分布

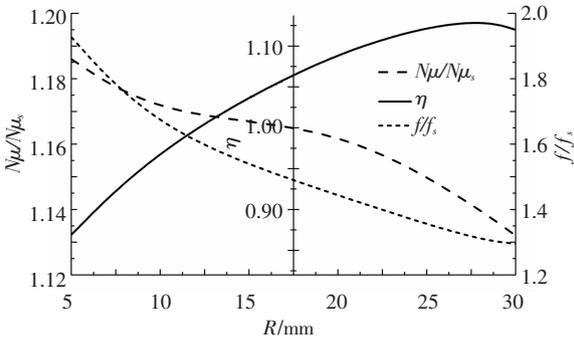


图9 综合传热因子 η 随波谷圆角半径 R 变化规律

图 10 所示为相同波谷圆角半径 R ($R = 5$ mm), 不同波节高度 H 时, 波节管内温度分布图. 分析过程与图 7 相同, 当波节管高度 H 从 2 mm 增大到 4 mm 时, 上游边界层厚度在一定区域内有所减小, 换热效率提高, 结合式 (7) 可知, 波节管努塞尔数 Nu 增大。

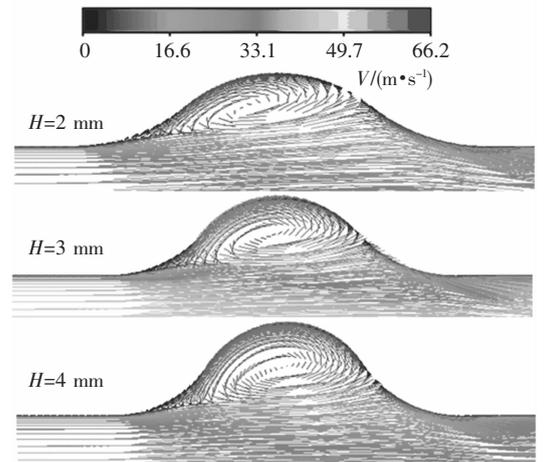


图11 同一波谷圆角半径 R , 管内速度场分布

图 11 所示为相同波谷圆角半径 R ($R = 5$ mm), 不同波节管高度 H , 波节管内速度场分布图, 分析过程与图 8 相同, 当波节管高度 H 从 2 mm 增大到 4 mm 时, 涡旋强度增强, 流动阻力增大, 压力降 ΔP 增大, 结合式 (8) 可知, 波节管摩擦阻力系数 f 增大。

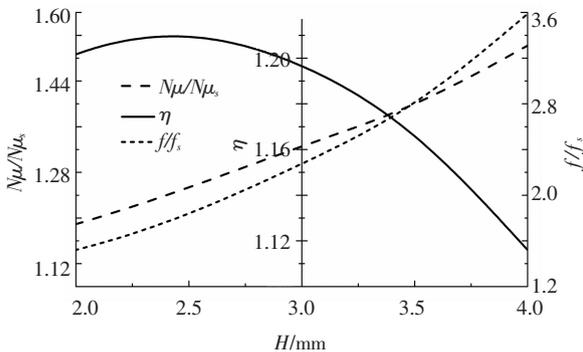


图12 综合传热因子 η 随波节高度 H 变化规律

通过数值模拟结果分析并结合式 (9) 即可得到同一波谷圆角半径 R , 不同波节高度 H 时, 综合传热因子 η 随波节高度 H 的变化规律, 如图 12 所示. 当 H 从 2 mm 增大到 4 mm 时, 综合传热特性随

5 结 论

1) 通过实验研究可知, 波谷圆角半径 R 的增大, 有利于金属流动, 有效控制减薄, 显著提高了成形精度. 当 $R = 30 \text{ mm}$ 时, 波节高度偏差仅为 7.1%; 所需整形压力仅为 270 MPa.

2) 通过理论校核可知, 随着波节高度 H 的增大, 波节管轴向位移补偿量显著增大, 但平面抗失稳能力和抗疲劳能力均显著下降. 为了兼顾二者, 当波节高度 H 位于 2.5 mm 和 3.0 mm 之间时, 结构稳定性较好.

3) 通过数值模拟研究可知, 随着流体上游方向波谷圆角半径 R 的增大, 波节管的综合传热因子 η 先增大后减小, 极值点 R 位于 20 mm 和 30 mm 之间, 且 $R = 30 \text{ mm}$ 时波节管综合传热特性略好于 $R = 20 \text{ mm}$ 时.

4) 通过数值模拟研究可知, 随着波节管高度 H 的增加, 波节管的综合传热因子 η 先增大后减小, 极值点 H 位于 2.0 mm 和 2.5 mm 之间, 且 $H = 2.5 \text{ mm}$ 时波节管综合传热特性略好于 $H = 2 \text{ mm}$ 时.

参考文献

[1] GARCIA A, SOLANO J P, VICENTE P G, *et al.* The influence of artificial roughness shape on heat transfer enhancement: corrugated tubes, dimpled tubes and wire coils [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 35: 196–201.

- [2] RAINIERI S, BOZZOLI F, PAGLIARINI G. Experimental investigation on the convective heat transfer in straight and coiled corrugated tubes for highly viscous fluids: preliminary results [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(1/3): 498–504.
- [3] EYVAZIAN A, HAKERI M, AHMOUDABADI M Z. Experimental study of corrugated tubes under lateral loading [J]. *Journal of Materials-Design And Applications*, 2012, 226(2): 109–118.
- [4] 苑世剑. 现在液压成形技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [5] 王仲仁, 张琦. 省力与近均匀成形——原理与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [6] 苑世剑, 何祝斌, 刘钢, 等. 内高压成形理论与技术新进展[J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(10): 2523–2533.
- [7] 丁伯民. ASME 压力容器规范分析与应用[M]. 北京: 化工出版社, 2009.
- [8] GB16749–1997. 压力容器波形膨胀节[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [9] 韩怀志, 李炳熙, 何玉荣. 波节管管内氦气流动与传热的计算与分析[J]. *华北电力大学学报*, 2012, 39(1): 59–63.
- [10] HAN H Z, LI B X, YU B Y, *et al.* Numerical study of flow and heat transfer characteristics in outward convex corrugated tubes[J]. *International Journal of heat and mass transfer*, 2012, 55(25/26): 7782–7802.

(编辑 张 红)