

管翅式散热器液压胀接回弹行为的研究

陈 凯¹, 何玉林¹, 马建平^{1,2}, 韩海媚¹, 杨连发¹

(1. 桂林电子科技大学 机电工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 桂林电子科技大学 广西制造系统与先进制造技术重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 回弹对管翅式散热器液压胀接的成形质量有重要影响。采用材料幂强化理论模型, 分析了换热管发生塑性变形、翅片发生弹性变形时管翅式散热器液压胀接卸载阶段的回弹行为, 并利用 ABAQUS 有限元仿真软件建立了管翅式散热器液压胀接的有限元模型, 提出了胀接液压力选取范围的确定方法以及换热管与翅片无约束回弹差值的获得方法, 分析了胀接液压力对管翅式散热器卸载后的整体回弹量和回弹差值的影响规律, 初步探索了整体回弹量对残余接触压力的影响规律。结果表明: 基于材料幂强化本构关系的回弹模型能够直观地反映回弹对残余接触压力的影响; 胀接液压力选取范围的确定方法是准确的, 与理论结果相符; 胀接时应在胀接液压力选取范围内增加胀接液压力以增加回弹量, 从而增加残余接触压力, 改善成形质量。

关键词: 管翅式散热器; 液压胀接; 回弹; 残余接触压力; 胀接液压力

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.05.020

中图分类号: TG394

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 05-0147-08

Study on springback behavior for tube-fin radiator hydroforming

Chen Kai¹, He Yulin¹, Ma Jianping^{1,2}, Han Haimei¹, Yang Lianfa¹

(1. Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Manufacturing System & Advanced Manufacturing Technology, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The springback has an important influence on the forming quality of tube-fin radiator hydroforming. Therefore, the springback behavior of tube-fin radiator during the unloading stage of hydroforming when the radiator tube has plastic deformation and the fin has elastic deformation was analyzed by using the material power strengthening theory model, and the finite element model of the tube-fin radiator hydroforming was established by finite element software ABAQUS. Furthermore, the determination method of selecting the hydroforming pressure range and the method of obtaining the unconstrained springback difference between radiator tube and fin were proposed, and the influence laws of the hydroforming pressure on the overall springback amount and the springback difference of tube-fin radiator after unloading were analyzed. Finally, the influence law of the overall springback on the residual contact pressure was preliminarily explored. The results show that the springback model based on the material power strengthening constitutive relation can directly reflect the effect of springback on the residual contact pressure. The determination method for selecting the hydroforming pressure range is accurate and consistent with the theoretical results. Thus, during hydroforming, the hydroforming pressure should be increased within the hydroforming pressure range to increase the springback amount, and the residual contact pressure is increased to improve the forming quality.

Key words: tube-fin radiator; hydroforming; springback; residual contact pressure; hydroforming pressure

空调行业在政策环境以及经济水平的不断改善下, 近几年发展非常迅速, 2021 年行业总体实现 2

位数增长, 全年呈现前高后低、恢复性高增长的运行态势^[1]。管翅式散热器作为空调的核心部件, 在空调行业具有广阔的应用前景。管翅式散热器由换热铜管和亲水铝翅片组成, 其中换热管与翅片液压胀接完成后的残余接触压力为衡量散热器胀接成形质量的重要指标。残余接触压力产生的原因是换热管与翅片的材料属性不同, 使得卸载后翅片的回弹量大于换热管的回弹量^[2], 从而使得两者实现过盈配合。国内外学者针对管材液压胀接取得了许多成果。

Krips H 和 Podhorsky M^[3] 基于理想弹塑性本构模型, 利用 Lamé 公式对换热管的胀接液压力进行

收稿日期: 2023-03-01; 修订日期: 2023-05-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52065014); 广西自然科学基金资助项目 (2017GXNSFAA198133); 广西制造系统与先进制造技术重点实验室主任基金项目 (22-35-4-S013); 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目 (2023KY0220)

作者简介: 陈 凯 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: chen kai1997430725@163.com

通信作者: 何玉林 (1980-), 女, 硕士, 高级实验师

E-mail: hyl_2005@126.com

了理论分析。陈刚等^[4]在 Krips H 和 Podhorsky M 提出的公式的基础上,引入了系数 β ,使计算结果更加接近实际。张阁^[5]引入当量屈服强度,对双层复合管液压胀接成形机理进行了分析。但是,采用理想弹塑性材料本构模型进行理论分析,会忽略管材胀接过程中的应变强化,导致理论结果和实际结果相差增大。因此,一些学者对材料本构模型进行了优化。洪瑛等^[6-7]提出了材料双线性简化模型,并给出胀接过程中残余接触压力与胀接液压力的关系式。Huang X P 等^[8]应用其在 2005 年提出的材料一般强化模型^[9]来描述换热管胀接过程中的应变强化,对换热管的胀接过程进行了理论分析。王海峰等^[10]采用材料幂强化本构模型描述了胀接过程中的力学行为。Bouid A H 等^[11-12]采用材料幂强化本构模型对管材胀接过程中的反向屈服现象进行了理论研究。同时,许多学者也采用有限元仿真方法对管材液压胀接成形理论进行了分析。于强等^[13]采用数值模拟和实验验证的方式,对双层管液压胀接过程中变形参数的变化规律进行了研究。张闯闯等^[14]通过有限元仿真得到了凸轮端面斜度、镶块斜面长度、成形温度、内压和单侧效果轴向补料量对组合式凸轮轴成形质量的影响规律。姚兴安等^[15]通过有限元仿真对 TA2 换热管与 TA2-Q345R 管板的连接接头进行了胀焊模拟,得到了 4 种胀焊接头接触面的残余接触压力分布。谭丁森等^[16]利用三维有限元仿真对复杂载荷下带环形焊缝的双层管的屈曲失效机理进行了研究。马建平^[17-18]针对装配式凸轮轴,通过有限元仿真分析了不同胀接液压力和轴向进给量对芯轴弹性回复量的影响规律。袁林等^[19]探究了基管和衬管间初始间隙、基管屈服应力和轴端压力对双层管液压胀接的影响。

目前,针对管材液压胀接模型的理论 and 有限元仿真研究主要集中在对卸载后的残余接触压力的分析,缺乏对残余接触压力产生原因的研究,即缺乏对液压胀接回弹行为的研究。本文采用双层管胀接理论详细地分析了管翅式散热器液压胀接的回弹模型,利用有限元仿真对管翅式散热器液压胀接的回弹行为进行了分析,并对胀接完成后的残余接触压力进行了初步分析。

1 管翅式散热器液压胀接回弹模型

1.1 材料本构模型

在理论分析中,首先考虑的是材料本构关系,

目前,常用于理论研究的材料本构模型主要有理想弹塑性材料本构模型、线性弹塑性材料本构模型和幂强化弹塑性材料本构模型 3 种,如图 1 所示。

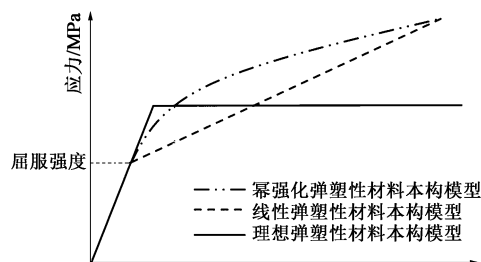


图 1 材料本构模型

Fig. 1 Material constitutive model

3 种材料本构模型中,理想弹塑性材料本构模型与材料的实际属性相差最大,而幂强化弹塑性材料本构模型与材料的实际属性最接近。换热管采用幂强化弹塑性材料本构模型时,最终结果与实际情况更接近,能够更好地对后文的数值模拟结果进行印证。幂强化弹塑性材料本构模型为:

$$\begin{cases} \sigma_{Cu} = E_1 \varepsilon_{Cu} & (\sigma_{Cu} \leq R_{eL}) \\ \sigma_{Cu} = A_1 + A_2 \varepsilon_{Cu}^n & (\sigma_{Cu} > R_{eL}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_{Cu} 为换热管材料的等效力,MPa; ε_{Cu} 为换热管材料的等效应变; A_1 、 A_2 为换热管材料的幂强化系数; n 为换热管材料的强化指数; E_1 为换热管材料的弹性模量,GPa; R_{eL} 为换热管材料的屈服强度,MPa。

1.2 液压胀接过程分析

根据管翅式散热器液压胀接过程中换热管与翅片的力-周向应变曲线示意图(图 2^[20]),可以将整个液压胀接过程分为初始间隙清除、换热管与翅片共同加载、卸载 3 个阶段,本文重点分析卸载阶段的回弹行为。图 2 中, P_i 为胀接液压力, Q_c 为胀接过程中的接触压力, $\varepsilon_{Cu,\theta}$ 和 $\varepsilon_{Al,\theta}$ 分别为换热管和翅片在胀接过程中的周向应变, $\varepsilon_{Cu,\theta}^*$ 和 $\varepsilon_{Al,\theta}^*$ 分别为换热管和翅片在卸载过程中的残余应变。

(1) 初始间隙消除阶段(0 → 1 → 2)。在该阶段,换热管与翅片未接触,仅存在换热管的加载变形。随着胀接液压力从 0 开始增加,换热管发生弹性变形,直至换热管材料达到屈服极限,即图 2 中点 1 处。胀接液压力继续增加,初始间隙继续减小,直至换热管与翅片接触,即图 2 中点 2 处。

(2) 换热管与翅片共同加载阶段(2 → 3 或 0' → 6)。在该阶段,胀接液压力继续增加,换热管与翅片共同加载,换热管发生塑性变形,翅片发生弹性变形,并在两者接触界面处产生接触压力 Q_c 。

(3) 卸载阶段(3 → 4 → 5 或 6 → 7)。在该阶

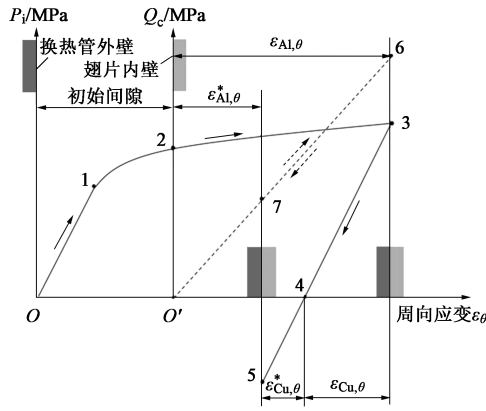


图2 换热管与翅片液压胀接过程中的力-周向应变曲线

Fig. 2 Force-circumferential strain curves during radiator tube and fin hydroforming process

段, 换热管内壁的胀接液压力的最大值 P_{imax} 卸载至 0, 外壁的接触压力的最大值 Q_{cmax} 卸载至 Q_c^* , Q_c^* 即为卸载后换热管与翅片间的残余接触压力。由于换热管与翅片之间存在接触压力, 使得两者无法在无约束情况下自由回弹, 仅存在两者的整体回弹: 以换热管外壁为对象得到的整体回弹量 $\Delta u_r(r_o)$ 和以翅片内壁为对象得到的整体回弹量 $\Delta U_R(R_i)$ 。并且,

卸载过程中应满足换热管与翅片接触面处的径向位移相等, 即^[12]:

$$\Delta u_r(r_o) = \Delta U_R(R_i) \quad (2)$$

$$\Delta u_r(r_o) = \frac{3r_o}{2E_1(k_{Cu}^2 - 1)} [(P_{imax} - Q_{cmax}) + Q_c^*] \quad (3)$$

$$\Delta U_R(R_i) = \frac{3k_{Al}^2 R_i}{2E_2(k_{Al}^2 - 1)} (Q_{cmax} - Q_c^*) \quad (4)$$

式中: r_o 为换热管外壁半径, mm; k_{Cu} 为换热管外壁半径与内壁半径之比; R_i 为翅片内壁半径, mm; k_{Al} 为翅片外壁半径与内壁半径之比; E_2 为翅片材料的弹性模量, GPa。

上述分析中, 由于换热管与翅片间存在约束, 仅对管翅式散热器液压胀接的整体回弹进行分析。在以往学者的研究中, 通过 $\Delta u_r(r_o) = \Delta U_R(R_i)$ 这一变形协调条件便可以进行后续残余接触压力或者包辛格效应等的分析。但是, 在回弹行为的研究中, 还需根据变形协调条件和卸载回弹示意图 (图 3), 对管翅式散热器液压胀接卸载过程中的 4 个具体位移量进行展开分析。

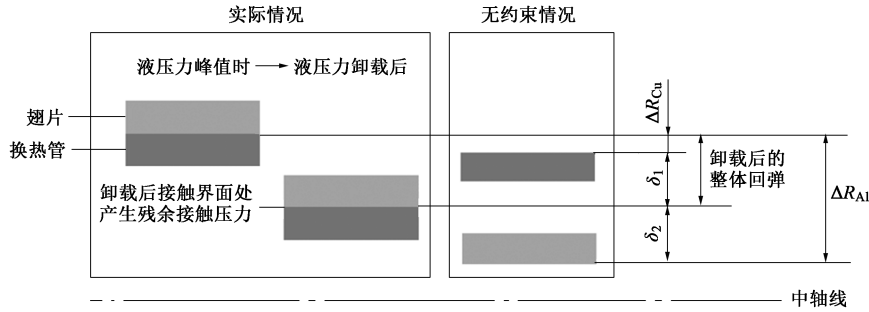


图3 卸载过程中换热管与翅片的回弹示意图

Fig. 3 Schematic diagram of springback for radiator tube and fin during unloading process

图 3 中对卸载过程中换热管与翅片的实际情况和无约束情况进行了分析, 以此得到 4 个重要位移量: (1) ΔR_{Cu} 为换热管无约束自由回弹量; (2) δ_1 为换热管在残余接触压力 Q_c^* 作用下所产生的位移量; (3) ΔR_{Al} 为翅片无约束自由回弹量; (4) δ_2 为翅片在残余接触压力 Q_c^* 作用下所产生的位移量。关于回弹行为的详细分析, 在文献 [21] 中, 忽略了换热管塑性变形后的回弹量, 即 $\Delta R_{Cu} = 0$, 这使变形协调条件关系式 $\Delta R_{Al} - \delta_2 = \Delta R_{Cu} + \delta_1$ 减少了 1 个位移量, 即 $\Delta R_{Al} - \delta_2 = \delta_1$ 。而在本文分析中并未忽略 ΔR_{Cu} 对结果的影响。

以图 3 中换热管外壁为研究对象, 根据式 (3) 可以得到:

$$\Delta u_r(r_o) = \Delta R_{Cu} + \delta_1 \quad (5)$$

$$\Delta R_{Cu} = \frac{3r_o}{2E_1(k_{Cu}^2 - 1)} (P_{imax} - Q_{cmax}) \quad (6)$$

$$\delta_1 = \frac{3r_o}{2E_1(k_{Cu}^2 - 1)} Q_c^* \quad (7)$$

以图 3 中翅片内壁为研究对象, 并根据式 (4) 可以得到:

$$\Delta U_R(R_i) = \Delta R_{Al} - \delta_2 \quad (8)$$

$$\Delta R_{Al} = \frac{3k_{Al}^2 R_i}{2E_2(k_{Al}^2 - 1)} Q_{cmax} \quad (9)$$

$$\delta_2 = \frac{3k_{Al}^2 R_i}{2E_2(k_{Al}^2 - 1)} Q_c^* \quad (10)$$

上述式 (5) 和式 (8) 即为管翅式散热器液压胀接的回弹模型, 该模型将回弹量与胀接液压力、

接触压力和残余接触压力三者联系起来。可以看出, 换热管与翅片接触界面处卸载后的残余接触压力与回弹量有直接联系, 两者呈正比关系。因此, 对管翅式散热器液压胀接卸载过程的回弹行为进行研究有利于分析管翅式散热器胀接完成后的残余接触压力。

并且, 根据式 (2)~式 (4) 可以推导出残余接触压力与胀接液压力之间的关系表达式^[12]:

$$Q_c^* = -\lambda P_{\max} + Q_{\max} \quad (11)$$

$$\text{式中: } \lambda = \frac{\frac{3r_o}{2E_1(k_{\text{Cu}}^2 - 1)}}{\frac{3r_o}{2E_1(k_{\text{Cu}}^2 - 1)} + \frac{3k_{\text{Al}}^2 R_i}{2E_2(k_{\text{Al}}^2 - 1)}}$$

2 管翅式散热器液压胀接有限元仿真

2.1 材料属性

本文所用的管翅式散热器由换热铜管和亲水铝翅片组成: 换热管材料为 TP2 铜, 翅片材料为 8006 铝; 换热管内半径与外半径分别为 3.2 和 3.5 mm, 翅片孔内半径与外半径分别为 3.65 和 3.75 mm。换热管与翅片的材料属性如表 1 所示。

表 1 换热管与翅片的材料属性

Table 1 Material properties of radiator tube and fin

材料	密度 $\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模量 E/GPa	屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_{m}/MPa	泊松 比 ν
TP2 铜换热管	8.916	127	66	205.8	0.33
8006 铝翅片	2.78	68	132	136.9	0.33

基于换热管的单向拉伸实验数据, 并根据式 (1) 对材料进行幂强化拟合, 得到的换热管材料的幂强化弹塑性材料本构关系为:

$$\begin{cases} \sigma_{\text{Cu}} = 12700 \varepsilon_{\text{Cu}} & (\sigma_{\text{Cu}} \leq R_{\text{eL}}) \\ \sigma_{\text{Cu}} = 66 + 472.88987 \varepsilon_{\text{Cu}}^{0.65617} & (\sigma_{\text{Cu}} > R_{\text{eL}}) \end{cases} \quad (12)$$

表 2 不同胀接液压力下的接触压力和残余接触压力 (MPa)

Table 2 Contact pressures and residual contact pressures under different hydroforming pressures (MPa)

P_i	16.0	16.5	17.0	17.5	18.0	18.5	19.0
Q_c	1.859252	2.336769	2.814322	3.291908	3.769528	4.247183	4.724871
Q_c^*	-0.076556	0.340467	0.757526	1.174618	1.591744	2.008905	2.426099

从表 2 可以看出, 胀接液压力为 16.0 MPa 时, 残余接触压力为负值, 这意味着胀接卸载后换热管与翅片间未接触, 未达到胀接的效果。胀接完成的标志为残余接触压力大于 0, 因此, 得到最小胀接

2.2 有限元仿真模型

为了对管翅式散热器液压胀接过程中的回弹行为进行具体分析并与理论模型进行对比, 本文应用 ABAQUS 软件对管翅式散热器液压胀接过程进行有限元模拟, 建立二维轴对称模型, 如图 4 所示。其中, r_i 为换热管内壁半径, R_o 为翅片外壁半径。

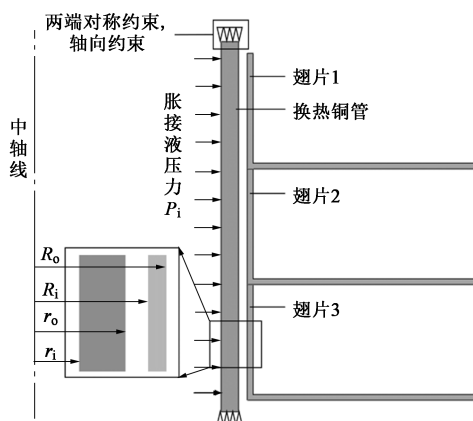


图 4 管翅式散热器液压胀接有限元仿真模型

Fig. 4 Finite element simulation model for tube-fin radiator hydroforming

载荷施加分为 3 个阶段: (1) 加载阶段, 胀接液压力由 0 增加至 P_{\max} ; (2) 保压阶段, 胀接液压力保持 P_{\max} 不变; (3) 卸载阶段, 胀接液压力由 P_{\max} 卸载至 0。有限元分析过程中, 为了排除管翅式散热器两端翅片对研究结果的影响, 选择翅片 2 为研究对象。

2.3 胀接液压力选取范围

本文研究中翅片仅发生弹性变形, 并且忽略换热管材料的各向异性和包辛格效应。在胀接液压力选取范围分析中, 需保证胀接液压力最小满足残余接触压力大于 0、最大不应使翅片发生塑性变形。根据理论分析, 得到不同胀接液压力下的接触压力和残余接触压力, 如表 2 所示。

液压力为 16.5 MPa, 并根据理论得到最大胀接液压力为 18.25 MPa。

有限元仿真分析中, 胀接液压力为 16.0 MPa 时, 换热管与翅片接触处的残余接触压力为 0; 胀

接液压力为 16.5 MPa 时,其残余接触压力为 0.48 MPa。为了保证胀接完成后换热管与翅片间存在一定的残余接触压力,有限元仿真过程中要求最小胀接液压力为 16.5 MPa。胀接液压力为 18.5 MPa 时,翅片内壁的等效应力分布如图 5 所示。翅片材料的屈服强度为 132 MPa,由图 5 可以看出,翅片内壁的等效应力在其屈服强度上下波动。为了保证翅片不发生塑性变形,有限元仿真中胀接液压力所允许的最大值为 18.5 MPa。

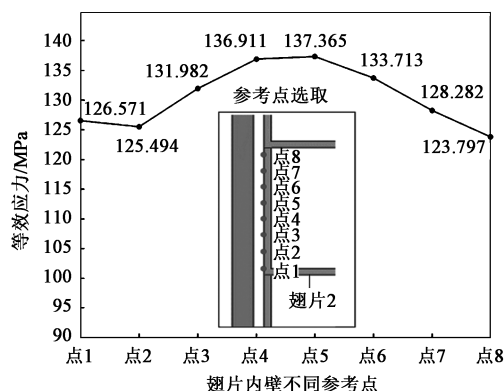


图5 胀接液压力为 18.5 MPa 时翅片内壁不同参考点下的等效应力
Fig. 5 Equivalent stresses at different reference points of fin inner wall with hydroforming pressure of 18.5 MPa

本文利用残余接触压力得到最小胀接液压力、利用等效应力得到最大胀接液压力,最终得到胀接液压力的选取范围为 $16.5 \text{ MPa} < P_i < 18.5 \text{ MPa}$,这与理论推导出的结果相符合,从而证明了本文所建立的有限元模型的准确性。

3 管翅式散热器液压胀接卸载回弹分析

3.1 整体回弹分析

通过有限元仿真获得液压胀接过程中翅片内壁位移量的变化,如图 6 所示,对比了胀接液压力选取范围内不同胀接液压力下,翅片内壁在胀接过程中的位移量。

从图 6 可以看出,翅片内壁在卸载后有明显的回弹,但并未回弹至初始位置,这是由于翅片与换热管接触界面处在卸载后存在残余接触压力。对图 6 所示的卸载阶段进行分析,可以得到不同胀接液压力峰值下、卸载后的翅片内壁位移量和整体回弹量,如图 7 所示。图 7 中胀接液压力达到峰值时的翅片内壁半径即为翅片无约束自由回弹量(位移量) ΔR_{Al} ;胀接液压力卸载后翅片内壁半径即为翅

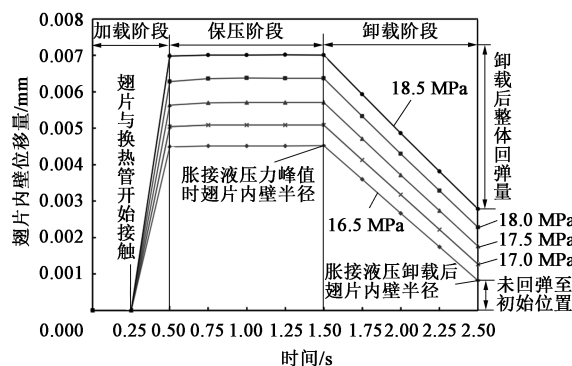


图6 液压胀接过程中翅片内壁位移量
Fig. 6 Displacement of fin inner wall during hydroforming process

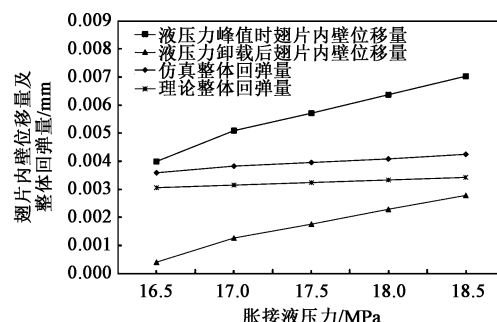


图7 不同胀接液压力峰值下、卸载后的翅片内壁位移量和整体回弹量

Fig. 7 Displacement of fin inner wall under different peak values of hydroforming pressure and after unloading and overall springback amount

片在残余接触压力的作用下所产生的位移量 δ_2 。

从图 7 中可以看出,随着胀接液压力的增加,翅片无约束自由回弹量和翅片在残余接触压力 Q_c^* 的作用下所产生的位移量均在增加,这一趋势与式 (11) 和式 (12) 相符合,且整体回弹量的理论趋势与仿真趋势一致、理论值与仿真值相近。

3.2 回弹差值分析

液压胀接卸载过程中,由于换热管与翅片间接触压力的影响,无法获得两者无约束回弹量,仅能够得到两者的整体回弹。为了获得换热管与翅片卸载后的回弹差值,本文进行了以下研究:由于翅片发生弹性变形,翅片无约束自由回弹量为翅片内壁在胀接液压力峰值时的位移量;利用刚体替换模型获得换热管的无约束自由回弹量,如图 8 所示。其中, R_{imax} 为替换前胀接液压力峰值时翅片内壁半径, r_{omax} 为替换后胀接液压力峰值时换热管外壁半径, r_{omin} 为替换并胀接卸载后换热管外壁半径,且满足 $R_{imax} = r_{omax}$ 。

替换前通过仿真软件获得翅片内壁在胀接液压力峰值时的半径即 R_{imax} ,用内半径为 R_{imax} 的刚体替

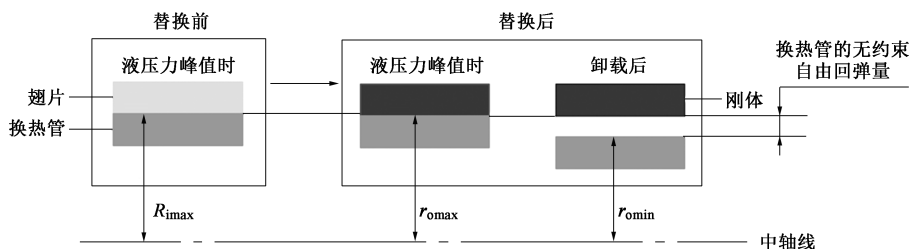


图 8 刚体替换模型

Fig. 8 Rigid body replacement model

换翅片并进行胀接，卸载后换热管与刚体之间的间隙 ($r_{omax} - r_{omin}$) 可认为是换热管的无约束自由回弹量。不同胀接液压力下换热管与翅片的无约束自由回弹量以及两者的回弹差值如图 9 所示。

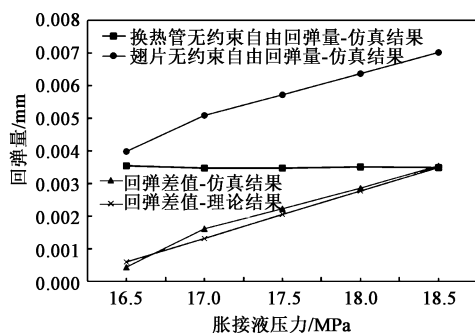


图 9 不同胀接液压力下换热管与翅片的无约束自由回弹量以及两者的回弹差值

Fig. 9 Unconstrained free springback amounts and springback difference values between heat exchange tube and fin under different hydroforming pressures

从图 9 可以看出：翅片由于发生弹性变形，其无约束自由回弹量随着胀接液压力的增加而增加；换热管由于完全发生塑性变形，且换热管材料为铜，其塑性好，因此，换热管的无约束自由回弹量随着胀接液压力的增加无明显变化，即换热管在胀接液压力选取范围内无明显的应变强化现象。两者的回弹差值随着胀接液压力的增加而增加，并且仿真结果与理论结果基本一致。回弹差值越大表示卸载后换热管与翅片间的过盈量越大、两者间的残余接触压力越大。

4 残余接触压力分析

为了进一步研究管翅式散热器液压胀接过程中回弹与残余接触压力的关系，本文对卸载后的残余接触压力进行了探索性研究。胀接过程中翅片内壁的位移量与接触压力如图 10 所示，在 17.0 和 17.5 MPa 两种胀接液压力下比较了翅片内壁的位移

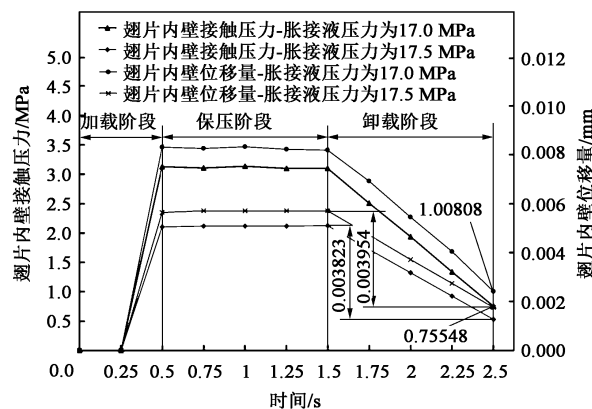


图 10 液压胀接过程中翅片内壁位移量与接触压力

Fig. 10 Displacement and contact pressure of fin inner wall during hydroforming process

量和接触压力的变化情况。从图 10 中可以看出，胀接过程中翅片内壁的接触压力与位移量的变化趋势一致。对卸载阶段进行分析，可以看到整体回弹量越大，卸载后的残余接触压力越大。

根据理论和仿真中卸载后的翅片内壁整体回弹量和残余接触压力，对图 10 中的卸载阶段进行分析，得到残余接触压力和整体回弹量与胀接液压力之间的关系，如图 11 所示。由于换热管与翅片的尺寸和材料属性的影响，残余接触压力和整体回弹量的变化量

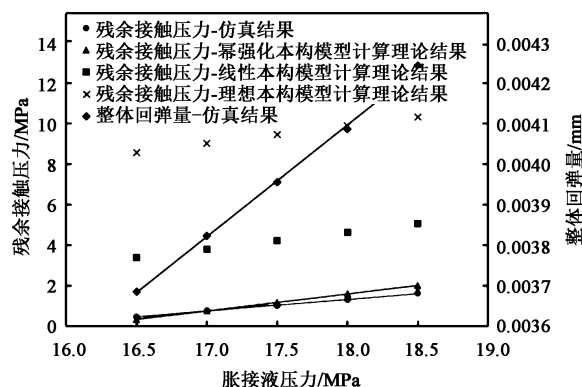


图 11 卸载后不同胀接液压力下的残余接触压力和整体回弹量

Fig. 11 Residual contact pressure and overall springback amount under different hydroforming pressures after unloading

很小,非线性关系不明显,因此,图11中对材料幂强化理论和仿真数据点进行了线性拟合,并对两者进行了对比。

从图11可以看出,本文仿真结果与所采用的幂强化弹塑性材料本构模型所得到的结果更接近,其原因为:幂强化弹塑性材料本构模型与材料的实际属性最相近,这也进一步印证了本文有限元模型的准确性。在本文研究中,残余接触压力和整体回弹量随着胀接液压力的变化趋势一致,并呈现线性关系。胀接完成后换热管与翅片间的残余接触压力越大,说明换热管与翅片的连接强度越大,因此,在胀接过程中应尽量采用更大的胀接液压力,以增加回弹量,从而增加残余接触压力,这一规律也可以由表2直观看出。

5 结论

(1) 通过有限元仿真分析得到了本文所研究的换热管塑性变形和翅片弹性变形,并且在换热管材料无明显的各向异性和包辛格效应的情况下,胀接液压力的选取范围为16.5~18.5 MPa。在实际生产中,可以根据不同的材料属性和材料尺寸来获得合理的胀接液压力范围。

(2) 通过有限元仿真,分析了液压胀接卸载过程中换热管外壁与翅片内壁的整体回弹量和换热管与翅片无约束情况下的回弹差值。结果表明:仿真结果与理论结果相吻合,证明本文中的回弹分析是准确的,在管翅式散热器液压胀接过程中对回弹行为进行研究有利于从残余接触压力产生的机理上对胀接过程进行研究。

(3) 管翅式散热器液压胀接卸载过程中,其回弹量与胀接液压力成正比,并且回弹量直接关系着残余接触压力的大小。在液压胀接过程中应在合理范围内尽量增加胀接液压力。

参考文献:

- [1] 张枫,张丽娜,白俊文. 2021年我国制冷空调行业市场分析[J]. 制冷与空调, 2022, 22(8): 1-6, 12.
Zhang F, Zhang L N, Bai J W. 2021 market analysis of refrigeration and air-conditioning industry in China [J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2022, 22(8): 1-6, 12.
- [2] 晁利宁,鲜林云,余晗,等. 双金属复合管液压成型的有限元模拟及残余接触压力计算[J]. 焊管, 2016, 39(7): 1-6, 10.
Chao L N, Xian L Y, Yu H, et al. Finite element simulation and

- residual contact pressure calculation for bimetal composite pipe hydraulic forming [J]. Welded Pipe and Tube, 2016, 39(7): 1-6, 10.
- [3] Krips H, Podhorsky M. Hydraulic expansion-A new procedure for fastening tubes [J]. VGB Kraftswerkstech, 1976, 56(7): 456-464.
- [4] 陈刚,李伟,王秀丽. 用于管板连接的液压胀管的研究与应用[J]. 氯碱业, 2001, (3): 40-41, 45.
Chen G, Li W, Wang X L. Study and application of hydraulic expansion tube for the joint of tubeplate [J]. Chlor-alkali Industry, 2001, (3): 40-41, 45.
- [5] 张阁. 双金属复合管液压成形弹塑性力学分析及有限元模拟研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2019.
Zhang G. Mechanical Analysis and Finite Element Simulation Study on Hydro-bulging Process of Bimetallic Clad Pipe [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2019.
- [6] 洪瑛,王学生,陈琴珠,等. 液压胀管理论计算中材料模型的双线性简化[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(1): 199-202.
Hong Y, Wang X S, Chen Q Z, et al. Bilinear simplification of material model in theoretical calculation of hydraulic expansion [J]. Machine Design & Research, 2018, 34(1): 199-202.
- [7] 洪瑛,王学生. 基于材料双线性模型的液压胀管理论计算[J]. 化工设备与管道, 2019, 56(3): 20-25.
Hong Y, Wang X S. Theoretical calculation for hydraulically expanded tube joint based on bilinear material model [J]. Process Equipment & Piping, 2019, 56(3): 20-25.
- [8] Huang X P, Xie T. Modeling hydraulically expanded tube-to-tubesheet joint based on general stress-strain curves of tube and tubesheet materials [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2011, 133(3): 031205.
- [9] Huang X P. A general autofrettage model of a thick-walled cylinder based on tensile-compressive stress-strain curve of a material [J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2005, 40(6): 599-607.
- [10] 王海峰,桑芝富. 幂强化材料的液压胀管残余接触压力理论解[J]. 石油机械, 2007, 35(11): 24-28.
Wang H F, Sang Z F. Theoretical solution of residual contact pressure of hydraulic expansion pipe with power strengthened material [J]. China Petroleum Machinery, 2007, 35(11): 24-28.
- [11] Bouzid A H, Kazemina M. Effect of reverse yielding on the residual contact stresses of tube-to-tubesheet joints subjected to hydraulic expansion [A]. Proceedings of ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference [C]. Boston, 2015.
- [12] Bouzid A H, Mourad A H I, El Domiaty A. Influence of Bauschinger effect on the residual contact pressure of hydraulically expanded tube-to-tubesheet joints [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2016, (146): 1-10.
- [13] 于强,杨连发,巢鹏飞,等. 薄壁管液压胀形过程的数值模拟[J]. 模具工业, 2005, (11): 3-6.
Yu Q, Yang L F, Chao P F, et al. Numerical simulation of hydraulic bulging process of thin-walled tube [J]. Die &

- Mould Industry, 2005, (11): 3-6.
- [14] 张闯闯, 李航, 初冠南. 组合式凸轮轴热胀锻成形工艺 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (4): 223-228.
Zhang C C, Li H, Chu G N. Hot gas hydro-forging process of combined camshaft [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (4): 223-228.
- [15] 姚兴安, 王海峰. 钛热交换器胀焊接头胀接残余接触压力模拟计算 [J]. 石油化工设备, 2017, 46 (1): 12-19.
Yao X A, Wang H F. Study on residual contact stress for titanium-made heat-exchanger joint made by expansion and welding [J]. Petro-Chemical Equipment, 2017, 46 (1): 12-19.
- [16] 谭丁森, 张建勋, 秦庆华. 带环形焊缝双金属复合管屈曲失效研究 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (2): 154-161.
Tan D S, Zhang J X, Qin Q H. Research on buckling failure of bi-material metal pipes with girth weld [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (2): 154-161.
- [17] Ma J P, Yang L F, Huang J J, et al. Residual contact pressure and elastic recovery of an assembled camshaft using tube hydro-forming [J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2021, (32): 287-298.
- [18] Ma J P, Yang L F, Liu J, et al. Evaluating the quality of assembled camshafts under pulsating hydroforming [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, (61): 69-82.
- [19] 袁林, 刘浩伟, 余志兵. 双金属复合管液压成形 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (1): 26-34.
Yuan L, Liu H W, Yu Z B. Hydroforming of bimetallic composite pipes [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (1): 26-34.
- [20] 王珍珠. 双金属复合管界面结合与强化的数值模拟 [D]. 南京: 东南大学, 2019.
Wang Z Z. Numerical Simulation of Interfacial Bonding and Strengthening of Bimetal Clad Pipe [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [21] 李文成. 换热管胀接的理论分析及胀接力的合理选择 [J]. 石油化工设备技术, 1986, (2): 10-17.
Li W C. Theoretical analysis of expansion joint of heat exchanger tubes and choice of expansion force [J]. Petrochemical Equipment Technology, 1986, (2): 10-17.

中国机械工程学会塑性工程分会关于举办“全国锻压技术与装备高级研修班”的通知 [可申请“材料锻压工程师（见习、中级和高级）工程能力水平评价证书”]

为了进一步提高企业技术人员的综合素质、强化其专业技术能力与水平, 促进锻压行业的技术进步, 提高锻压产品的质量水平, 增强企业的竞争实力, 为制造业的发展做出更大的贡献; 同时, 为我国锻压专业的青年教师、在校学生的培养创造条件, 中国机械工程学会塑性工程分会拟于 2023 年 6 月 10-13 日在上海举办“全国锻压技术与装备高级研修班”, 请各有意向单位提前做好培训计划, 现将有关事宜通知如下:

一、基本信息

主办单位: 中国机械工程学会塑性工程分会

承办单位: 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司、湖北三环锻造有限公司

培训时间: 2023 年 6 月 11-13 日 (10 日报到)

培训地点: 上海 (具体地点待定)

培训对象: 锻压行业企业技术骨干、高校青年教师、在校学生等相关人员。

二、培训内容

● 锻压技术与装备高质量发展论坛 (参观 2023 上海锻压技术与装备展, 暂定)

● 模锻工序分析及模锻工艺设计、模锻案例和新技术进展

● 塑性近净成形及锻造智能化技术的研究与应用

● 面向零件轻量化的精冲及板料锻造成形技术

● 锻压设备与应用

三、授课教师

李亚军: 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司总

工程师、精密成形国家工程研究中心副主任、研究员级高级工程师、博士研究生导师。

张运军: 湖北三环锻造有限公司党委书记、董事长、总经理, 正高级工程师。

王雷刚: 江苏大学教授、博士生导师、材料加工与成形所副所长。

庄新村: 上海交通大学教授, 博士, 博士生导师。

四、考试与证书

1. 培训结束后, 学员将获得由中国机械工程学会塑性工程分会颁发的结业证书。

2. 符合“材料锻压工程师工程能力水平评价 (含见习、中级和高级)”申报资格的学员, 需参加在线考试, 考试通过后且符合对应职称要求, 可获得由中国机械工程学会颁发的对应工程师工程能力水平评价证书。详细申报条件请浏览中国机械工程学会塑性工程分会官方网站 www.cstp-cmes.org.cn。

3. 凡获得“材料锻压工程师工程能力水平评价”证书的学员, 将自动成为中国机械工程学会塑性工程分会个人会员 (有效期 3 年)。

五、联系方式

联系人: 李佳盈、秦思晓、周林

电 话: 010-82415079, 15711032068,

15201461873, 13811919643

E-mail: sxgxb_ljy@126.com;

duanya@cmes.org



培训
报名

中国机械工程学会塑性工程分会