

文章编号: 1005—8893 (2000) 04—0047—04

# 计算机在液压胀接残余接触压力图算中的应用<sup>\*</sup>

颜惠庚<sup>1</sup>, 王永伟<sup>2</sup>, 岳 巍<sup>2</sup>

(1. 江苏石油化工学院 机械工程系, 江苏 常州 213016)

摘要: 针对液压胀管残余接触压力图算法应用过程中 手工作图慢, 作图精度难以保证的问题, 提出了用计算机程序代替手工作图的新思路, 编写了液压胀管残余接触压力图算法程序, 用理论解析法对该程序进行了验证, 并用针对实际管材进行了残余接触压力的分析。

关键词: 换热器; 液压胀管; 残余接触压力; 图算法; 计算机应用

中图分类号: HT 4. 4

文献标识码: A

计算和研究换热管与管板液压胀接后残余接触压力的方法主要有两种, 一种是残余接触压力理论解析方法<sup>[1]</sup>, 这种方法适用于理想弹塑性材料。另一种是残余接触压力图算法<sup>[2]</sup>, 这种方法具有概念清楚易懂, 物理意义明确直观等特点, 既适用于理想弹塑性材料, 又适用于应变硬化材料, 便于工程实际应用。但是, 由于该方法需要作图, 手工作图所带来的累积误差直接影响到计算结果的精度。由于管子与管板的变形刚度较大, 作图时回弹直线的斜率很大, 当作图比例选择不当时, 这些直线斜率的微小误差都会对作图结果产生较大影响。

本文利用图算法的求解原理和方法编写了计算机程序, 使得复杂的手工作图方法计算机化, 使设计人员可以快速、准确的应用图算法来计算残余接触压力, 满足了工程实践的需要。

## 1 液压胀管残余接触压力的图算步骤

图算时将多孔管板简化为单孔模型。图算法将液压胀接过程分解成管子在接触管板前的弹塑性变形过程、接触后对管板模型加载、卸压后的弹性恢复等三个阶段。对于由卸压导致的弹性恢复变形, 管子的弹性恢复由内压卸除产生的外径收缩和接触

压力的减小导致的外径的增大这两个分量组成。管板的内表面则由于接触压力的减小产生向内的收缩。实际上, 这些弹性恢复是与胀接压力的卸除同时完成的。由于卸载为弹性过程, 可以采用迭加原理分步进行作图求解<sup>[3]</sup>。作图求解时利用管子外表面与管板孔内表面的弹性恢复位移以及管子外表面与管板孔内表面的接触压力相等的条件, 即保证管子与管板接触面的位移、应力的连续条件, 就可采用作图的方法求出残余接触压力。当已知管子在內压作用下外表面的径向位移曲线、管子与管板的材料、尺寸、管板全屈服前管板孔表面在接触压力  $P_c$  作用下的径向位移曲线后, 残余接触压力可由以下步骤求出, 如图 1 所示。

(1) 将管子在內压作用下, 外壁的径向位移  $P_i \sim \Delta r$  曲线  $OABE$  和管板孔内壁的  $P_c \sim \Delta r$  曲线  $O'FG$  的横轴重合, 两纵轴之间的距离为管子与管板之间的初始环形间隙  $\delta_0$  (半径差), 并作出  $O'FG$  关于横轴对称的曲线  $O'F''G''$ 。(2) 将具有同一横坐标下, 曲线  $OABE$  与  $O'FG$  相应点的纵坐标迭加, 得曲线  $BF'G'$ , 曲线  $OABF'G'$  就是管子插入管板孔中后, 管内胀接內压与其外表面的径向位移曲线。(3) 选定胀接压力  $P_i$ , 找出  $P_i$  与管子变形曲线  $OABFG$  上对应的点  $H$ , 以及曲线  $O'FG$ 、

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2000—09—02

作者简介: 颜惠庚 (1954—), 男, 江苏金坛人, 教授, 博士, 主要从事换热器液压胀管装备与技术方面的研究; 2—本院过程装备与控制过程专业 2000 届毕业生。



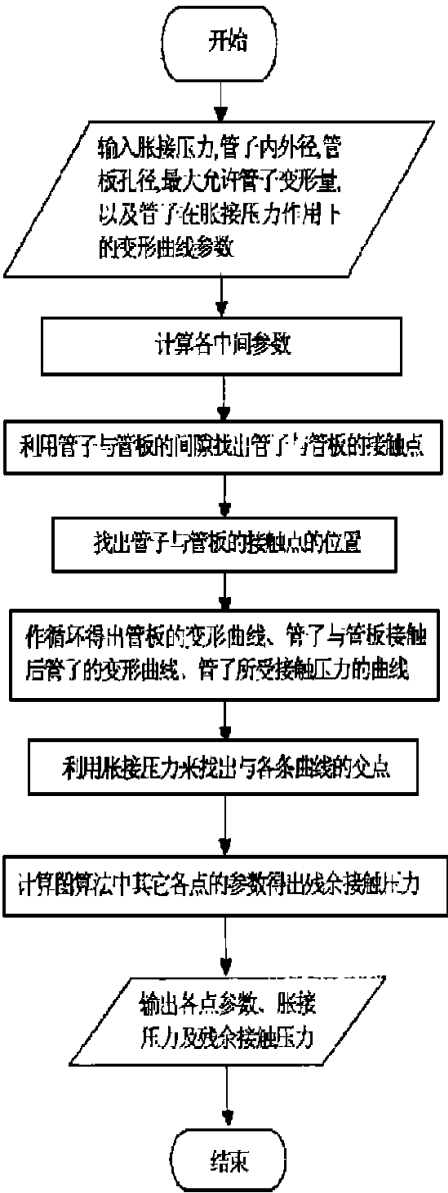


图3 液压胀接残余接触压力的图算法程序流程图

$P_i=150\text{ MPa}$ ,  $K_t=1.25$ ,  $K_s=1.52$ ,  $\mu_t=0.3$ ,  $\mu_s=0.3$

管板模型材料的屈服强度  $\sigma_{ss}=320\text{ MPa}$ 。管子与管板材料的弹性模量均为  $E=200\,000\text{ MPa}$ ，根据弹塑性理论，可以求出管子在胀接压力作用下，外表面的径向位移如图4所示。根据弹塑性理论，管子的全屈服压力为  $45.74\text{ MPa}$ ，其相应的径向变形为  $0.023\text{ mm}$ 。

有了管子在外压作用下外表面的径向位移曲线，就可以采用图算法计算程序分系胀接后的残余接触压力。选取不同的胀接压力，利用计算程序和解析法的公式对同样的参数进行计算，其计算公式为：

$$P_c^* = (1-2c) P_i - \sigma_{st} \ln K_t$$

其中

$$c = \left\{ K_t^2(1-\nu_t) + 1 + \nu_t + \frac{E_t(K_t^2-1)}{E_s(K_s-1)} [1-\nu_s + K_s^2(1+\nu_s)] \right\}^{-1}$$

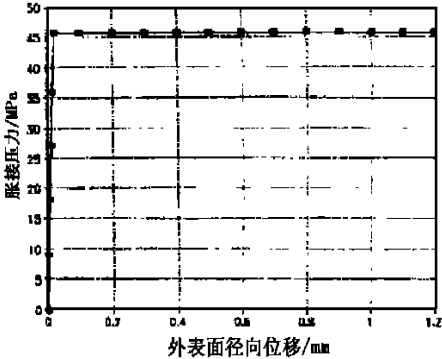


图4 理想弹性材料变形曲线

将各计算参数代入计算公式，计算结果见表1， $P_{c1}^*$ 、 $P_{c2}^*$ 分别为用计算程序和解析法计算所得的结果。

表1 两种方法计算结果的比较

$P_i$ / MPa	$P_{c1}^*$ / MPa	$P_{c2}^*$ / MPa	$P_{c1}^* - P_{c2}^*$ / MPa	相对误差/ %
125	15.40586	15.37861	0.02748300	0.17686980
130	17.85169	17.82353	0.02816103	0.15774990
140	22.74335	22.71337	0.02998267	0.1318305
150	27.63503	27.60321	0.03181003	0.11510760
160	32.52670	32.49306	0.03363739	0.10341470
170	37.41837	37.38290	0.03546475	0.09477898
180	42.31004	42.27274	0.03729210	0.08814009
185	44.75587	44.71767	0.03820578	0.08536486
190	47.20171	47.16259	0.03911946	0.08287723
195	49.64754	49.60759	0.04003314	0.08063469

由上表可以看出， $P_{c1}^*$ 与 $P_{c2}^*$ 的相对误差小于0.18%，由此可见，液压胀管图算法程序是正确可行的。

4 残余接触压力图算程序的实际应用

液压胀接残余接触压力与管子与管板之间的间隙，管子与管板之间的材料性能有关。在图算法程序应用之前，需要知道实际管材在内压作用下，外表面的径向位移曲线数据以及管子与管板的弹性模量、泊松比等性能，为了便于计算程序的应用，以一组实际材料为例，说明利用计算机程序求解残余接触压力的过程，其管子的实测变形曲线如图5所示。

管子规格： $\phi 25 \times 2.5$ ，材料为10钢，管板材料为20钢，管孔中心距为32 mm。

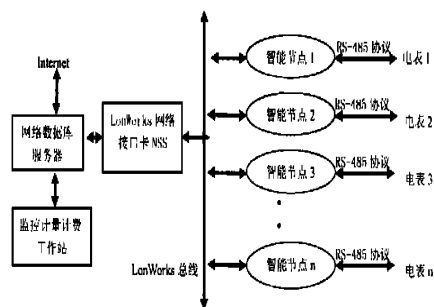


图 5 实际管子的变形曲线

管子与管板的计算参数如下:

$$d_o = 25 \text{ mm}, d_i = 20 \text{ mm}, D_i = 25.4 \text{ mm}, P_i$$

$$= 150 \text{ MPa}, K_i = 1.25$$

$$K_s = 1.52, \mu_t = 0.3, \mu_s = 0.3, \text{管子与管板}$$

材料的弹性模量  $E_t = E_s = 200\,000 \text{ MPa}$  从图 5 可以看出, 该管子约在  $70 \text{ MPa}$  左右才发生全屈服, 其屈服强度较高, 约为  $310 \text{ MPa}$  左右。在胀接压力一定时, 管子的屈服强度增大, 会降低胀接后管子与管板之间的残余接触压力, 影响胀接效果。如果将该管子退火, 降低其屈服强度, 则可以大大提高胀接质量。

将以上数据输入计算机程序, 运行该程序后, 输出结果为:

$$P^* = 3.640\,990 \text{ MPa}$$

应该指出, 管子与管板之间的间隙对胀接压力的计算结果有一定的影响, 但在常规的胀接压力和管子的公差范围内, 其残余接触压力误差绝对值在  $0.5 \text{ MPa}$  之内, 胀接压力越高, 其相对误差越小, 关与管子与管板之间的间隙对残余接触压力计算结果的影响将另文讨论。

## 5 结 论

根据液压胀接图算法原理、图算法基本作图过程编写的图算法计算机程序, 既可以用于理想弹塑性材料的计算, 也可用于实际应变硬化材料的计算, 当用于理想弹塑性材料时, 该程序与解析式的相对误差小于  $0.18\%$ , 该程序不但减轻了计算工作量, 还彻底消除了手工作图误差, 使用简单、方便, 可以用于工程实际计算。

符号说明:

- $E_t, E_s$  管子、管板材料的弹性模量, Pa  
 $\sigma_{st}$  管子材料的屈服应力, Pa  
 $\nu_t, \nu_s$  管子、管板材料的泊松比  
 $P_c^*$  管子与管板接触面处液压胀接后的残余接触压力, Pa  
 $P_i$  胀接压力, Pa  
 $K_t, K_s$  管子与管板模型的径比,  $K_t = r_o/r_i, K_s = R_{ed}/R_i$

参考文献:

- [1] 颜惠庚, 张炳生, 葛乐通. 换热器的液压胀接研究 (一) —— 胀接压力的确定 [J]. 压力容器, 1996, 13 (2): 126—130.
- [2] 颜惠庚. 换热器液压胀管的图算原理 [J]. 江苏石油化工学院学报, 1998, 10 (3): 23—27.
- [3] 颜惠庚. 换热管袋式液压胀接装备和技术 [D]. 上海: 华东理工大学, 1998.
- [4] 颜惠庚, 张炳生, 葛乐通. 换热器的液压胀接研究 (二) —— 残余接触压力与摩擦系数 [J]. 压力容器, 1996, 13 (4): 304—311.
- [5] GB151—89, 钢制管壳式换热器 [S].

## The Application of Computer in Graphic Method to Determine the Residual Interface Pressure of Tube-to-tubesheet Joints

YAN Hui-geng<sup>1</sup>, WANG Yong-wei<sup>2</sup>, YUE Wei<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Jiangsu Institute of Petrochemical Technology, Changzhou 213016, China)

**Abstract:** In the application of graphic method to determine the interface pressure of hydraulically expanded tube-to-tubesheet joints of heat exchangers, the manual process is not only of low efficiency but also less precise. To resolve the problem, a computer program is proposed, and the program is verified by the analytical formulas. An example showing how to use the program to calculate residual interface pressure is presented by use of real tube (strain hardening) material.

**Key words:** heat exchangers; residual contact pressure; graphic method; computer application