

换热器管子与管板接头拉脱力的研究

段成红 钱才富

(北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

摘要: 通过试验和三维有限元分析研究了换热器中管子与管板连接的液压胀接、焊接以及胀焊结合接头(包括先焊后胀以及先胀后焊两种情况)的拉脱力大小和失效形式。有限元分析考虑了接头的几何非线性、材料非线性、接触非线性以及热固耦合,从而能模拟接头材料的弹塑性变形、热塑性以及先胀后焊过程中焊接热对胀接的影响。研究表明,焊接接头的拉脱力远大于液压胀接接头的拉脱力,并且略大于胀焊结合接头的拉脱力;对于先胀后焊或者先焊后胀接头,拉脱力并没有明显的变化;在拉力作用下,胀接接头的破坏主要是管子与管板接触面间的拉脱破坏,而焊接接头的破坏主要为焊缝的剪切破坏。

关键词: 拉脱力; 管子与管板接头; 胀接; 焊接; 胀焊结合

中图分类号: TQ051.5

引言

管壳式换热器广泛应用于化工、石油化工等各个行业,其中管子与管板连接接头是设备中最容易发生失效的地方。目前常用的接头连接方式有胀接(机械胀接、液压胀接、橡胶胀接和爆炸胀接等)、焊接以及胀焊结合。接头的性能表现在两个方面,即密封性能和拉脱强度(或拉脱力)。关于拉脱力的研究,文献中所报道的绝大多数都是针对胀接接头的,而对焊接、胀焊结合接头的拉脱力研究较少。Yokell S^[1]和匡良明^[2]基于不同力学假设给出了拉脱力的近似公式。对于在胀接拉脱力研究中起关键作用的摩擦系数,汪建华等人^[3]和 Allam^[4]利用试验反算出了某种材料组合下的摩擦系数。颜惠庚^[5]指出拉脱力小于压脱力。李磊等人^[6]、段红卫等人^[7]和王海峰等人^[8]试验研究了胀接接头是否开槽、开槽尺寸和位置等对拉脱力的影响,并进行了数值模拟。在有关焊接连接的研究中,大部分是关于接头焊接质量控制的研究,如朱日良^[9]和 Jawad 等人^[10]。

本文将通过试验和有限元数值计算方法对管子与管板液压胀接、焊接以及胀焊结合接头的拉脱力进行对比研究。

收稿日期: 2006-04-29

基金项目: 北京市自然科学基金(3002009)

第一作者: 女, 1963年生, 副教授

E-mail: duanch@mail.buct.edu.cn

1 接头拉脱力试验研究

1.1 试件

焊接和胀焊结合试件如图1所示。管板为16Mn低合金钢,管子为20#碳素钢,焊接为手工亚弧焊,焊丝H08Mn2Si。管板试样为矩形板,厚48mm。管孔三角形排列,管子每隔一孔进行胀接、焊接或胀焊结合的连接,每块管板上连接6根接管。焊接除填满管板上表面 $1.5 \times 45^\circ$ 的倒角外,高出部分经机加工成为 1.5×1.5 mm的等腰三角形,以保证焊缝尺寸的精确性。焊缝沿管子轴线总焊高为3mm。几何尺寸如图2所示。胀接接头没有坡口和焊缝。所有胀接采用液袋式胀接,胀接压力分别为160和180MPa。

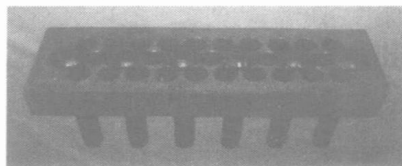


图1 管子与管板接头试件

Fig. 1 Specimen for testing tube-to-tubesheet joints

1.2 试验工况和试验结果

接头拉脱力试验研究考虑七种工况:(1)和(2)胀接,胀接压力分别为160和180MPa;(3)焊接;(4)和(5)先焊后胀,胀接压力分别为160和180MPa;(6)和(7)先胀后焊,胀接压力分别为160和180MPa。如表1所示。

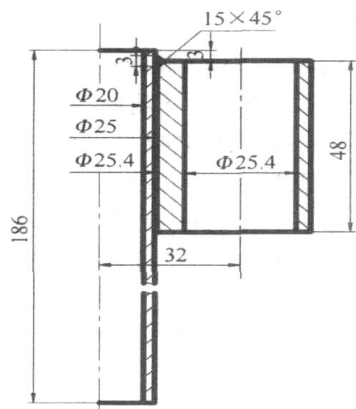


图 2 接头几何尺寸

Fig. 2 Geometry and dimension of a joint

试件在万能试验机上拉拔。从开始到接头破坏,试验机记录的最大拉力被视为接头拉脱力,结果

见表 1,其中有部分试件试验时管子断裂,没有得到有效数据。试验发现,焊接或胀焊接合接头的拉脱力明显高于只胀接的接头;所有经过焊接的接头其断裂面都是沿着管子轴线方向,并且紧贴管子外表面,如图 3 所示,三角形焊缝基本没有发生变化。由此可见,焊缝拉拔破坏主要是受到沿着管子外表面剪切力的作用。

2 接头三维弹塑性有限元分析

2.1 几何模型

(1) 模型范围 管子在管板上正三角形排列,与试件相同。由于模型的对称性,选取 360°/12 即 30° 的范围,如图 4 所示。

(2) 接头几何尺寸 管子、管板和焊缝的所有几何尺寸同试件。如图 2 所示。

表 1 试验工况和接头拉脱力

Table 1 Pull-out forces of joints under different conditions

工况	接头 连接方式	试验胀接压力/ MPa	试验拉脱力/kN						试验平均 拉脱力/kN	有限元计算 拉脱力/kN
			第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次		
1	胀接	160	8.2	8.4	10.7	4.3	11.1	—	8.54	9.68
2	胀接	180	16.0	10.0	8.2	6.4	11.1	—	10.34	10.70
3	焊接	0	66.5	66.0	—	—	—	—	66.25	58.19
4	先焊后胀	160	65.9	64.5	65.3	65.5	66.6	67.3	65.85	56.76
5	先焊后胀	180	64.3	64.5	64.6	64.6	64.3	—	64.46	56.77
6	先胀后焊	160	65.5	65.0	65.9	65.7	66.8	64.5	65.57	56.75
7	先胀后焊	180	67.5	65.7	67.3	64.3	—	—	66.20	56.83

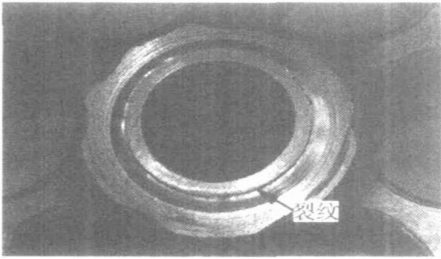


图 3 焊接接头的拉脱破坏

Fig. 3 Pull-out failure of welded joint

(3) 模型坐标系和网格疏密 分析采用柱坐标系,以被胀焊管孔轴线为 Z 轴,见图 5。焊缝区域是考察重点,网格划分较密。胀接后,在近管板上下表面的接触面上将出现两个高应力环带,该区域网格划分也较密,见图 5 中黑色区域。胀接模型与此类似,只是没有坡口和焊缝。

2.2 材料特性

分析所用材料同试件。常温下管子与管板材料的应力应变曲线由材料拉伸试验得到,其他温度下的弹性模量和屈服极限查有关材料手册得到,超过屈服极限的部分根据该温度下的屈服点将常温曲线作近似平移得到。对于 800℃ 以上的材料,假设其不发生应变强化,故用理想弹塑性曲线来代替材料的真实曲线。焊缝材料的性能与管板材料非常接近,采用管板材料的曲线。管子材料的应力应变曲线见图 6(需说明的是,由于作图比例的缘故,图中表征各温度下材料弹性模量的直线部分看上去重叠在一起了)。由于管板、焊缝材料的应力应变曲线形状与图 6 非常相似,这里省略。管子、管板和焊缝材料随温度变化的热性能参数见表 2。进行传热计算时,考虑空气的对流及热辐射。假定对流给热系数和法向辐射率都不随温度变化,其数值分别为

11.447 W/(m²·)和0.675。

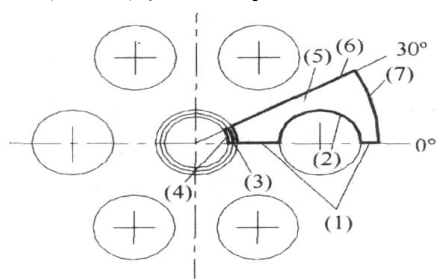


图4 有限元分析模型选取和边界编号

Fig. 4 Range of finite element analysis model and boundary numbers

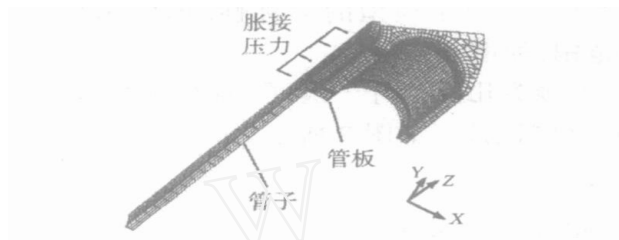


图5 接头坐标系和有限元模型

Fig. 5 Coordinate system for finite element analysis model

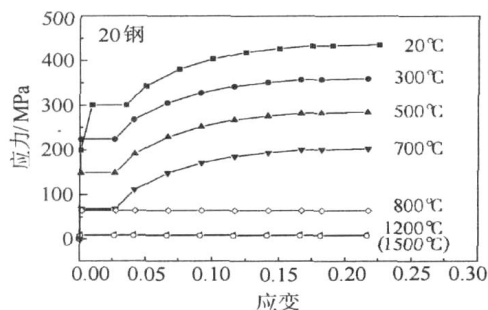


图6 不同温度下管子材料应力应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves for tube material at different temperatures

2.3 载荷和边界条件

2.3.1 接头力载荷 (1) 液压胀接头(工况1和2)。先胀接后拉拔。胀接时载荷为均匀的胀接压力,施加在管子伸入管板部分的内表面上,如图5所示。胀接压力从0逐渐加载到最大值160或180 MPa,再逐渐卸载回到0。拉拔时在管子下端施加位移,直到管子与管板分离。由于模型范围为360°/12,因此管子下端所有节点最大支反力之和的12倍就是接头的拉脱力。(2) 焊接接头(工况3)。直接生成焊缝单元,拉拔时在管子下端施加位移。本分析中,认为焊缝中Mises当量应力达到焊缝材料拉伸强度极限526 MPa时材料失效(失去承载能

力);因此,当焊缝中Mises当量应力达到526 MPa的区域扩展并构成完整屈服面时,认为焊缝已达到最大承载水平。此时管子下端所有节点最大支反力之和的12倍就是接头的拉脱力。(3) 先焊后胀接头(工况4和5)。直接生成焊缝单元,施加胀接压力到给定的数值并卸压,然后在管子下端施加位移载荷,得到接头的拉脱力。(4) 先胀后焊接头(工况6和7)。先假设没有焊缝单元,在管内施加胀接压力并卸压;然后假设有焊缝单元,在管子下端施加位移,得到接头的拉脱力。

表2 材料热性能参数

Table 2 Thermal parameters of material

温度/ W/(m·)	热传导系数 K / W/(m·)	比热 C_p / J/(kg·)	热膨胀系数 $\alpha \times 10^6$ / -1
20	51.55	478.6	11.71
100	50.83	486.7	11.72
200	48.11	499.8	12.28
300	44.00	516.5	12.86
400	42.49	536.4	13.38
500	38.93	557.0	13.90
600	35.24	588.3	14.47
700	31.33	620.5	14.81
800	25.72	691.2	14.81
900	26.13	695.3	14.81
1000	27.29	690.7	14.81
1100	28.39	691.6	14.81
1200	29.45	692.0	14.81
1300	30.99	692.0	14.81
1400	32.81	692.3	14.81
1500	71.48	693.1	14.81

当进行胀接或焊接时,假定周围各管孔仍处于未胀接或未焊接的状态。整个分析过程考虑接头的几何非线性、材料非线性和接触非线性。

2.3.2 位移边界条件 接头位移边界条件结合图4给出如下:(1)和(6)面为对称边界;(2)面为未胀或未焊管板孔表面,自由边界;(3)面为管子伸出管板的外表面,自由边界。(4)面为管子内表面,在与管板相对应的范围内躲开焊缝区施加胀接压力,如图5所示;(5)面为管子上下表面和管板上下表面,其中管子下表面施加轴向固定约束 $U_z = 0$,其他面为自由边界;(7)面为管板模型外侧圆柱表面施加轴向固定约束 $U_z = 0$,径向实际边界条件介于自由和

固定两种极限边界条件之间。有限元计算表明,分别采用固定和自由边界条件时,管板孔表面上点的径向位移相差约20%。采用实际边界条件与采用固定或者自由边界条件所得的结果相差会更小。本文采用自由边界条件近似模拟实际边界条件。

2.3.2 接头焊接热载荷和边界条件 考虑表1中先胀后焊(工况6和7)的焊接热载荷。胀接后,管子与管板间形成接触并存在残余接触压力,而后焊接所产生的热将使此压力发生变化。实际焊接是沿管子圆周逐步进行,热载荷应为沿圆周逐步加载,但由于焊接过程较快,本文忽略了沿圆周方向上温度不同的影响,而认为在圆周方向上焊缝单元同时加热到设定温度。本研究中温度载荷变化范围从室温20℃升至1500℃,再降到室温20℃,分31个载荷步完成。应该说明的是,焊接时,焊缝材料处于熔化状态,焊接过程伴有组织变化,但这里忽略这种变化,并将熔化的材料视为弹性模量和屈服极限都很小的固体材料。

按图4标号,工况6和7的焊接热分析边界条件如下:(1)和(6)面为对称绝热边界;(2)和(4)面近似地认为周边未焊接管孔在相同高度范围内温度相同,仅考虑对流,略去辐射影响;(3)面则考虑辐射和对流;(5)面认为管子下表面距离焊缝较远,为绝缘面;其他各面既考虑辐射又考虑对流;(7)面近似地认为是绝缘面。

2.4 有限元分析软件与单元选择

本分析采用ANSYS有限元分析软件。工况6和7用三维8节点热单元SOLID70进行建模和网格划分,并进行热分析;管子与管板之间的热传递用管子外表面与管板孔内表面胀接区域相对应的节点做温度耦合实现。结构分析时,采用与热分析单元相对应的结构单元SOLID185。管子外表面与管板孔内表面的接触采用CONTA173与TARGE170单元构成的接触对来模拟。其他工况采用结构单元建模。该模型的总节点数为12772个,热/结构单元为9984个,接触单元为252个。有限元模型如图5所示。

3 有限元分析过程和结果

3.1 液压胀接接头(工况1和2)

采用2.3.1节(1)中的过程。有限元计算表明^[11-12],胀接后,在管子与管板孔接触面间形成残余接触压力,并且,在近管板的上下表面区域,存在

两个高应力环带,此环带的数值大小将对接头紧密性起关键作用,而拉脱力的大小取决于整个接触面上的残余接触压力大小。受管子轴向力作用时,两个接触面相互滑动之前是粘合状态,界面上会有切应力产生,一旦此应力超过库仑摩擦模型定义的切应力临界值,两接触面开始滑动,进入滑动状态,利用该性质和ANSYS接触单元特性,可以模拟拉脱试验。计算时在管子下端施加位移,随着位移不断增大,接触面开始滑移,进而分离,直至管子从管板孔内被拉出^[12]。其拉脱力见表1。

此计算过程中的摩擦系数很关键,不同的文献推荐有不同的值,根据我们以前的液压胀接试验研究^[7],本分析取0.14。

3.2 焊接接头(工况3)

采用2.3.1节(2)中的过程。拉拔管子时,在靠近管子焊缝区下表面沿环向出现高应力区,并且此区域不断扩展。继续拉拔管子,在焊缝上表面也出现高应力区,这两个区域沿着管子轴线方向不断扩展,当Mises当量应力为526 MPa的两个区域相交时,认为破坏区域穿透焊缝,焊缝失效。其拉脱力见表1。比较图3和该应力云图可见,试验与有限元计算的失效位置基本相同,即焊缝都是沿着管子的外表面方向失效的。

3.3 先焊后胀接头(工况4和5)

采用2.3.1节(3)中的过程。发现随着管子下端位移加大,接触面开始逐渐由下向上分离,直至完全分开。继续增加管子下端的位移,载荷将由焊缝承担,出现了类似于工况3的情况,但不同的是相交的两个当量应力为526 MPa的区域是沿着焊缝与管板的上表面相交的,而不是沿着管子表面。若继续下拉管子,将会出现与工况3类似的第二个526 MPa的相交区域,即沿管子外表面失效,这种情况与试验吻合。具体数据见表1。

3.4 先胀后焊接头(工况6和7)

采用2.3.1节(4)和2.3.2节中的过程。先热分析,耦合管子外表面与管板孔内表面胀接区域相对应的节点;然后结构分析,使用CONTA173与TARGE170建立接触单元;再做结构与热的耦合分析;最后在管子下端施加位移,观察到与工况4和5类似的情况,同理得到管子的拉脱力,见表1。

4 结论

(1) 胀接接头的拉脱力远小于焊接接头的拉脱

力,约为 $1/6 \sim 1/5$ 。

(2) 焊接、先焊后胀以及先胀后焊这三类接头的拉脱力相差较小,且焊接接头的拉脱力还略大于后两种情况。这可能是由于胀接后管壁发生塑性变形、接头处存在残余应力所致。

(3) 焊接接头拉脱破坏时,其断裂面是沿着管子的轴线方向,并且紧贴着管子的外表面,为剪切破坏。

参考文献:

- [1] YO KELL S. Expanded, welded and expanded tube-to-tubesheet joints[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1992, 114: 157 - 165.
- [2] 匡良明. 静压胀管接头性能分析[J]. 石油化工设备, 1999, 28(2): 31 - 35.
- [3] 汪建华, 陆皓, 袁敏刚. 胀管接头的弹塑性有限元分析及其应用[J]. 压力容器, 1997, 14(5): 32 - 36.
- [4] ALLAM M, BAZERGUI A. Axial strength of tube-to-tubesheet joints: Finite element and experimental evaluations[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2002, 124: 22 - 31.
- [5] 颜惠庚, 李培宁. 换热器的液压胀管研究(4)——胀管接头的拉脱力和压脱力[J]. 压力容器, 1998, 15(5): 25 - 28.
- [6] 李磊, 王海峰, 桑芝富, 等. 管槽结构尺寸对换热器管子与管板胀接性能影响的试验研究[J]. 压力容器, 2001, 18(5): 10 - 12.
- [7] 段红卫, 段成红, 钱才富, 等. 管孔开槽对液压胀管接头强度影响的实验研究[C]. 教育部高等学校过程装备与控制工程专业教学指导分委员会. 第9届全国高等学校过程装备与控制工程专业教学改革与学科建设成果校际交流会议论文集. 北京: 化学工业出版社, 2004: 494 - 496.
- [8] 王海峰, 桑芝富, 石庭瑞. 液压胀管数值模拟[J]. 石油化工设备, 2001, 30(3): 10 - 13.
- [9] 朱日良. 管壳式换热器管板与换热管焊接常见质量问题的防止[J]. 化工设备与管道, 2005, 42(1): 62 - 63.
- [10] JAWAD M, CLARKIN E, SCHUESSLER R. Evaluation of tube-to-tubesheet junctions[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1987, 109: 19 - 26.
- [11] DUAN Chenghong, CAO Baogang, XU Hong. 3-D simulation of hydraulically expanded tube-to-tubesheet joint considering strain hardening effect, Bauschinger effect and temperature change effect[C]. ASME. Proceedings of ICPVT-9, Sydney: ASME, 2000: 339 - 352.
- [12] 钱才富, 段成红, 于洪杰, 等. 液压胀管可靠性研究[J]. 高技术通讯, 2004, 14(增刊): 162 - 167.

Pull-out force study of tube-to-tubesheet joints in heat exchangers

DUAN ChengHong QIAN CaiFu

(Collage of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The pull-out forces and failure forms of hydraulically expanded, welded, and expanded-and-welded (including expanding prior to welding and welding prior to expansion) tube-to-tubesheet joints in heat exchangers have been experimentally and numerically studied. Geometrical, material and contact nonlinearities, as well as coupling of heat and structure in the finite element analysis were considered in order to simulate the elastoplastic and thermoplastic behaviors of the joint materials and the influence of the welding heat on the expanded connections. The results show that the pull-out force of the welded joint is much larger than that of the hydraulically expanded joint and even slightly larger than that of the expanded-and-welded joint. There is no significant difference between the pull-out forces of the joint expanded prior to welding and that welded prior to expansion. Under tensile loadings, the failure of the expanded joint was found to involve the pull-off damage of the tube and tubesheet connection, while the failure of the welded joint involved mainly a shear break of the welding.

Key words: pull-out force; tube-to-tubesheet joint; expanded; welded; expanded-and-welded