

引用格式:梁丽红,陈永康,庄俭.管子管板检测机器人爬行脚的吊装负载能力研究[J].北京化工大学学报(自然科学版),2019,46(1):110-116.

LIANG LiHong, CHEN YongKang, ZHUANG Jian. Study of the lifting load capacity of the crawling foot of a tube-tubesheet detecting robot[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2019,46(1):110-116.

管子管板检测机器人爬行脚的吊装负载能力研究

梁丽红¹ 陈永康² 庄俭^{2*}

(1. 中国特种设备检测研究院 无损检测技术中心, 北京 100029; 2. 北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

摘要:在爬行机器人携带无损检测(NDT)设备的情况下,为了保证其对立式换热器管子管板角焊缝检测过程的稳定性和可靠性,重点对立式换热器管子管板检测机器人的关键机构——爬行脚的负载能力进行了数值模拟分析和实验研究,应用 Hypermesh 和 ANSYS Workbench 联合仿真平台对爬行脚在充气 and 自锁工况下的结构强度和接触状态进行了仿真。模拟结果表明,在负载逐渐增加的过程中,两种工况下爬行脚与换热管内壁之间没有发生滑移失效,一直保持了良好的稳定性和可靠性。同时对爬行脚实验样机进行了开发和验证,并通过两种工况下的吊装负载实验,得到充气工况最大负载为 38 kg,自锁工况最大负载为 15 kg,验证了其良好的稳定性。

关键词:立式换热器;管子管板;爬行脚;吊装负载;样机验证

中图分类号: TH164; TH122 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2019.01.017

引言

立式换热器具有结构紧凑、占地面积小、传热效率高、系统压降小等优点^[1],广泛应用于石油化工行业^[2]。与普通换热器不同,立式换热器多为大型换热器,换热管数量较多,且其主体材料对焊接裂纹较敏感,由焊缝缺陷导致的泄露会造成十分严重的后果^[3-5],所以对其管子管板角焊缝缺陷的定期检测和监控尤为重要。

目前,管子管板角焊缝的常规检测大多数采用人工检测,耗时耗力,还会出现漏检、误检的情况^[6-8]。为了提高检测效率和质量,有必要采用爬行机器人携带无损检测设备,实现对管子管板角焊缝的自动化检测^[7],以提高检测效率,降低作业成本。目前爬行机器人已经广泛应用在核电站蒸汽发生器的检测中,如美国西屋公司的 Pegasys^[9]、捷特

公司的 ZR 系列^[10]、克罗地亚 INETEC 公司的 TSR^[11]和西班牙 TECNARTION 公司的 TESAR^[12]等。虽然蒸汽发生器管板结构与换热器管板结构相似,但是两者工况相差很大,而且检测设备的检测方式也不相同,因此需要结合蒸汽发生器爬行机器人和换热器工况对换热器管子管板检测机器人进行系统结构设计。

目前国内外对于这方面的研究甚少,因此本文提出一种换热器管子管板检测用爬行机器人结构方案,并对其关键部件的爬行脚进行强度和接触仿真,开发出实验样机并对其进行实验验证。

1 爬行脚结构

爬行机器人的整体结构如图 1 所示,其爬行脚包括主体脚和辅助脚。爬行机器人利用主体脚和辅助脚交替抓紧换热管内壁,吊装在管板上完成爬行动作,并携带无损检测设备完成对管子管板角焊缝的缺陷检测作业。爬行机器人主体以及检测设备能够吊装在管板上,主要依靠爬行脚与换热管内壁的摩擦力作用,因此爬行脚是爬行机器人的关键受力机构。爬行机器人最可能出现的失效形式为爬行脚与换热管内壁发生滑移,导致爬行机器人坠落,而最

收稿日期:2018-04-25

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ240803)

第一作者:女,1966年生,博士

*通信联系人

E-mail: vipzhuangjian@163.com

终不能顺利完成检测工作。

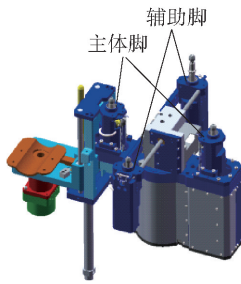


图 1 爬行机器人整体结构

Fig. 1 Structure of the crawling robot

爬行机器人通过直线和旋转运动完成在管板上的多方向移动,图 2 所示为爬行机器人运动轨迹简图。图中 A 和 B 为爬行机器人的主体脚,C 和 D 为辅助脚。 θ 为辅助脚臂和主体脚臂之间的角度,如被检测管板的管子为三角形排列,则 $\theta = 60^\circ$;如为正方形排列,则 $\theta = 45^\circ$ 。A1、B1、C1 和 D1 为爬行机器人的初始状态,主体脚从 A1、B1 直线运动到 A2、B2,辅助脚从 C1、D1 直线运动到 C2 和 D2,机器人通过直线爬行动作运动相应的距离;之后,主体脚从 A2、B2 旋转运动到 A3、B3,辅助脚从 C2、D2 旋转运动到 C3、D3(其中 B3 和 D2、A3 和 C2 相重合),从而完成机器人的转向,使其朝另一方向爬行。爬行机器人通过反复进行上述两种运动而使其覆盖整个管板。

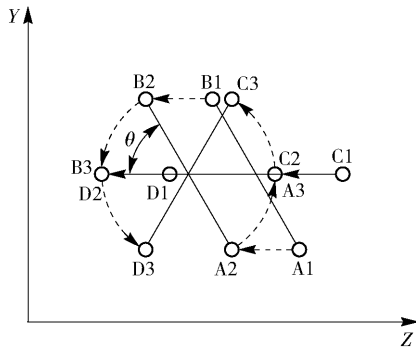
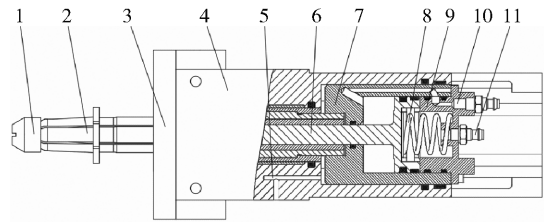


图 2 运动路径简图

Fig. 2 Schematic of the motion path

爬行脚的结构如图 3 所示,其主要完成 4 个运动动作:伸入换热管、机构卡紧、机构松开和退出换热管。这些运动动作主要依靠嵌套式两级气缸完成,由脚套 6 个涨开瓣涨开抓紧换热管内壁,并依靠脚套与换热管内壁产生的摩擦力吊装在管板上,脚套上的凸台主要起到定位作用,同时由于有弹簧 8 的存在可保证爬行脚在断气断电的情况下依然抓紧换热管内壁。



1—顶头;2—脚套;3—端盖;4—一级气缸;5—进气口 1;6—二级活塞;7—一级活塞;8—弹簧;9—一级活塞端盖;10—进气口 2;11—进气口 3。

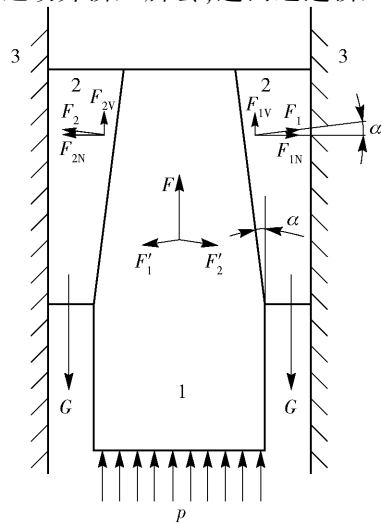
图 3 爬行脚结构

Fig. 3 Structure of the crawling foot

爬行脚在运动的过程中,首先由进气口 1 通入压缩空气,使一级活塞向后运动,完成机构退出换热管动作;之后进气口 1 卸荷,由于一级活塞端盖与端盖之间有弹簧连接,会使一级活塞自动复位,完成机构插入换热管动作;然后由进气口 3 通入压缩空气,二级活塞向前运动,带动脚套内的钢珠做径向运动,钢珠挤压脚套涨开瓣使其涨开,完成机构卡紧换热管动作;最后,进气口 3 卸荷,同时进气口 2 通入压缩空气,二级活塞向后运动,完成机构松开换热管的动作。

2 爬行脚吊装力理论计算

爬行脚主要依靠脚套涨开抓紧换热管内壁吊装在管板上,根据结构分析可将这一部分简化成一个斜楔结构,如图 4 所示。二级活塞受气动压力 p 的作用向前运动并挤压脚套,进而通过挤压脚套与换



1—二级活塞;2—脚套;3—换热管; F_{1N} 、 F_{2N} — F_1 、 F_2 水平方向分力; F_{1V} 、 F_{2V} — F_1 、 F_2 竖直方向分力; G —爬行脚重力。

图 4 受力分析图

Fig. 4 Diagram of the force distribution

热管内壁产生摩擦力 f ,爬行机器人依靠摩擦力 f 吊装在管板上。依据平面受力平衡关系以及图4中的受力分析,取其中一个涨开瓣列出以下方程

$$F = F'_1 \sin \alpha + F'_2 \sin \alpha = 2F'_1 \sin \alpha \quad (1)$$

$$f = \mu F_{1N} = \mu F_1 \cos \alpha = \mu F'_1 \cos \alpha \quad (2)$$

$$F = \frac{1}{3} p S \quad (3)$$

式中, F 为气动推力, F_1 为脚套涨紧力, F'_1 、 F'_2 为气动推力产生的分力, F_{1N} 为 F_1 水平方向分力, μ 为摩擦系数, α 为斜楔倾角, p 为气动压力, S 为二级活塞截面积。

结合式(3)可得

$$f = \mu \frac{1}{6} \frac{p S}{\sin \alpha} \cos \alpha \quad (4)$$

式中, $\alpha = 7^\circ$, $S = 781.79 \text{ mm}^2$,依据机械设计手册取 $\mu = 0.15$,充气时根据气缸结构设计以及运动要求取 $p = 0.5 \text{ MPa}$,不充气自锁情况下弹簧可提供的自锁力 $F' = 151 \text{ N}$ 。

充气情况下 $f = 79.5 \text{ N}$,可得到爬行脚负载 $M =$

$$\frac{6f}{g} = 48.6 \text{ kg}; \text{自锁情况下 } f = 26.7 \text{ N}, \text{可得到爬行脚}$$

$$\text{负载 } M' = \frac{6f}{g} = 16.35 \text{ kg}.$$

由于爬行机器人以及无损检测设备总重量为 25 kg ,由理论计算可得,爬行脚的斜楔结构在自锁和充气两种情况下都能保证爬行机器人在管板上的稳定性。

3 结构强度及接触仿真

对爬行脚主要进行充气 and 自锁两种情况下的仿真;辅助脚受力在爬行脚一侧,相对于主体脚多一个偏心力矩,所以对辅助脚也进行仿真。

3.1 实体模型的简化和网格划分

利用 Solidworks 软件建立爬行脚三维模型。为了提高网格划分质量、提高计算效率,在不影响所要求分析精度的前提下,对爬行脚三维模型进行合理的简化,将模型的细小倒角、圆角和不承受载荷的圆孔忽略,简化后的模型如图5所示。

由于爬行脚中零件较多,大多零件形状不规则,为了得到质量较高的网格单元,选用有限元分析前处理软件 Hypermesh 进行网格划分。对于承受力的零件选用六面体单元进行划分,对于不承受力的零件选用四面体单元进行划分,整体划分结果如图6所示。之后将划分好的网格实体导入 ANSYS Work-

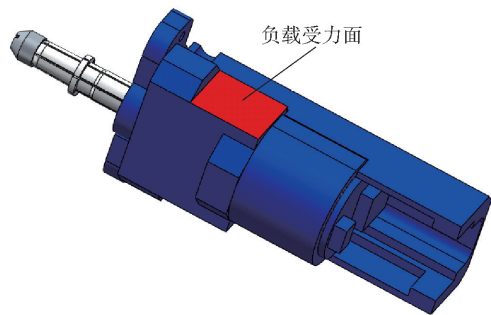


图5 简化后的爬行脚模型

Fig. 5 Simplified crawling foot model

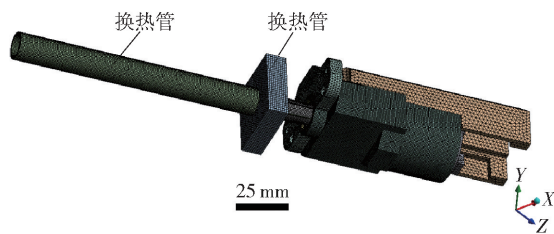


图6 爬行脚的网格图

Fig. 6 Meshes of the crawling foot

bench 中进行边界条件设置以及求解。

3.2 载荷及接触条件设置

爬行脚承受的载荷主要有3个:①爬行脚自身重力 G ;②二级活塞承受的 0.5 MPa 气动压力 p (自锁情况下承受 151 N 的弹簧自锁力);③图4中负载受力面承受垂直向下的负载,即爬行机器人和无损检测设备的重量。由于爬行机器人重 15 kg ,无损检测设备最轻 5 kg 、最重 10 kg ,而且爬行机器人最少有两只脚同时工作,所以爬行脚负载最小为 10 kg ,最大为 12.5 kg 。充气工况下仿真负载从 10 kg 增加到 25 kg (取安全系数 $n = 2$),增量为 1 kg ;自锁工况下仿真负载从 10 kg 开始。

爬行机器人吊装在管板上主要依靠爬行脚与换热管之间的摩擦力作用,所以取两者之间的接触条件为摩擦接触,取摩擦系数 $\mu = 0.15$ 。

3.3 仿真及结果分析

3.3.1 充气工况

(1)结构强度 爬行脚材料采用马氏体时效钢,其抗拉强度 $\sigma = 1850 \text{ MPa}$,取安全系数 $n = 2.5$,爬行脚负载 25 kg 。图7为脚套的等效力云图,从图中可知,应力主要集中在脚套的前段涨开部分,在最前端应力最大值为 224.35 MPa ,低于材料的安全许用应力,即 $224.35 \text{ MPa} < \sigma/n = 740 \text{ MPa}$,脚套在最大负载下也能满足强度要求。因此从静力学的角度分析,爬行脚能够满足实际使用中的安全性。

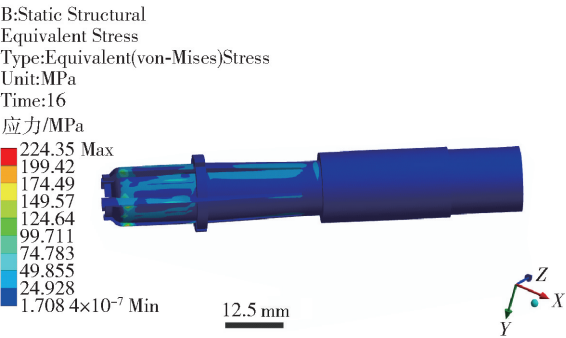


图 7 脚套等效应力云图

Fig. 7 The equivalent stress distribution of the heel

(2)结构接触 由于爬行脚的失效形式是其在换热管上发生滑移导致爬行机器人整体掉落,所以取爬行脚 Z 方向的位移进行分析,结果如图 8 所示。由图看出,脚套与换热管之间的相对位移很小,脚套能牢固卡紧换热管内壁,保持其良好的稳定性。负载作用在爬行脚的一侧,会导致爬行脚下部发生轻微的倾斜,图中最大倾斜位移为 0.096 mm,但并未影响爬行脚抓紧换热管内壁,所以爬行脚在工作过程中的稳定性保持良好。

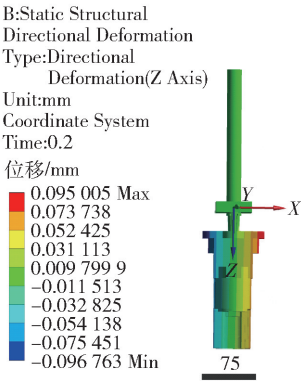
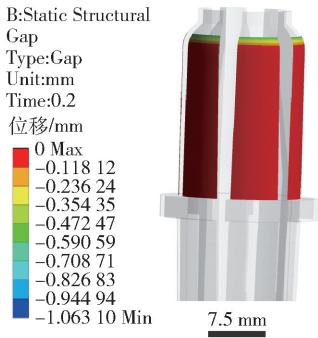


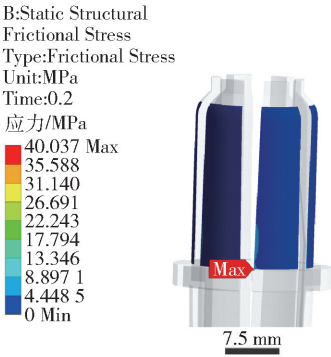
图 8 位移云图

Fig. 8 Displacement distribution

取爬行脚脚套与换热管的接触面进行仿真分析,结果如图 9 所示。由图 9(a)可以得出,脚套与换热管内壁的大部分接触间隙接近 0,表明爬行脚只在一侧受力的情况下,脚套涨开时一直抓紧换热管内壁,并未发生倾斜。图 9(b)显示,脚套只有小部分的接触面存在摩擦应力集中现象,这是由偏心力矩造成的,最大应力值为 40.04 MPa;由于脚套材料马氏体时效钢的弹性极限为 925 MPa,依据机械手册取安全系数 $n = 1.5$,计算可知脚套上的摩擦应力并不能对脚套表面造成局部的剥落破坏。



(a) 接触间隙



(b) 摩擦应力

图 9 接触面仿真结果

Fig. 9 Results of contact simulation

(3)位移与应力 根据各个负载下的仿真结果绘制变化曲线,如图 10 所示,其中最大滑移距离为脚套和换热管之间的相对位移量。可以看出,最大等效应力随着负载的增大基本保持不变,说明最大等效应力只与气动压力有关;最大滑移距离、最大倾斜位移和最大摩擦应力均随负载的增大而增大,但最大滑移距离和最大倾斜位移的值及增幅均非常小,不会影响爬行脚的稳定性;最大摩擦应力和最大等效应力均小于安全许用应力,满足强度要求。

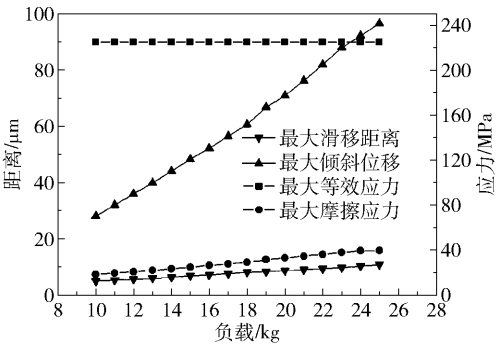


图 10 充气工况仿真结果

Fig. 10 Results of aeration condition

3.3.2 自锁工况

自锁工况下负载从 10 kg 开始,每次增加 1 kg,得到如图 11 所示变化曲线。由图可知,负载从 10 kg 增加到 15 kg 过程中,爬行脚一直保持良好的稳定性,其结构强度均满足使用要求;但是负载增加到 16 kg 时,由于模型发生刚性位移而无法得到仿真结果,说明此时爬行脚发生了坠落。所以仿真结果表明,爬行脚在自锁情况下最大负载能力为 15 kg,可保证爬行机器人在断电断电的情况下不发生坠落。

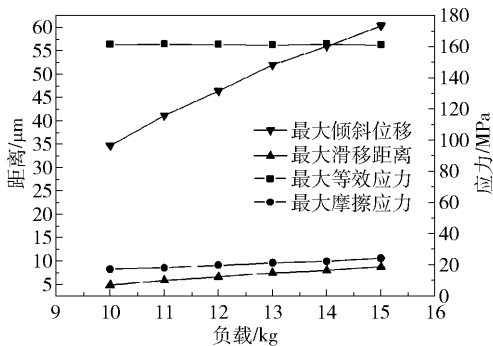


图 11 自锁工况仿真结果变化曲线

Fig. 11 Simulating curves of self-locking condition

4 实验验证

4.1 实验装置及实验方法

在爬行脚上安装滑轮来吊装负载,同时使爬行脚承受偏心负载力矩。为了提高加工效率、降低加工成本,样机爬行脚并未加工出脚套的定位凸台,单只爬行脚的重量约为 1.5 kg。爬行脚样机如图 12 所示。

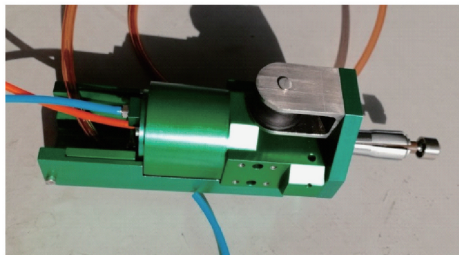


图 12 爬行脚样机

Fig. 12 Crawling foot

分别在充气和自锁两种情况下对爬行脚进行负载实验。实验中负载重物从 10 kg 开始间隔 1 kg 逐渐递增,并利用游标卡尺测量端盖与实验管板之间的最大距离,以判断爬行脚是否发生滑移;为了得到爬行脚最大负载能力,不断增加负载直至爬行脚出现失稳现象。实验装置的布置如图 13 所示。

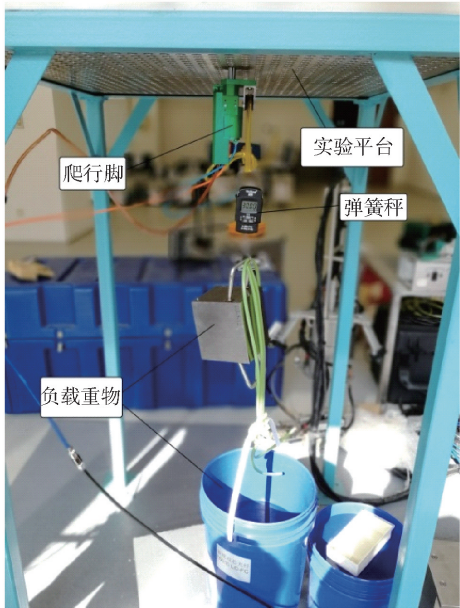


图 13 负载实验装置

Fig. 13 Experimental apparatus for load measurement

4.2 实验结果及分析

4.2.1 充气工况

爬行脚充气工况下气压 p 为 0.5 MPa,共进行 10 组实验,结果如图 14 所示。由于每组实验都是重新充气吊装,导致每次实验爬行脚端盖与管板之间的最大距离均不相同。

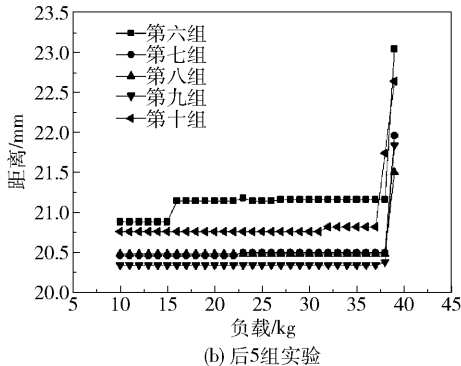
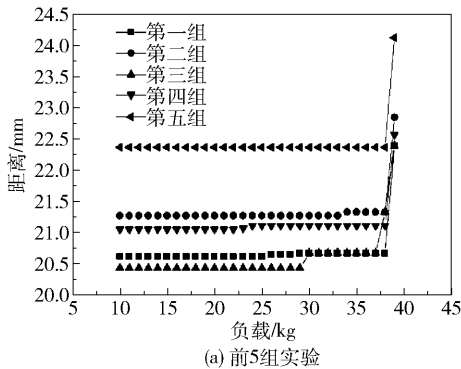


图 14 充气工况实验数据变化曲线

Fig. 14 Experimental curves of aeration condition

由图 14 可知,10 组实验中有 9 组在负载增加到 39 kg 时,端盖与管板之间的最大距离急剧增加,只有第 3 组在负载增加到 38 kg 时最大距离急剧增加,考虑其为实验偶然因素。在负载增加过程中,10 组实验基本保持平稳,虽然增加负载的过程导致负载发生摇晃而使其最大距离有所增大,但并未影响其稳定性,所以可以认定并未发生失稳现象。实验中爬行脚虽然滑移距离不大,只有 1~2 mm 左右,但是考虑到爬行机器人的工作环境较复杂,机器人在运动的过程中可能发生震动,所以为了更好地保证其稳定性,以爬行脚端盖与管板之间的距离发生突变作为失稳判断依据。综合实验数据可知,充气工况下爬行脚的最大负载能力为 38 kg。

根据理论分析,爬行脚负载一旦超过脚套与换热管内壁的摩擦力,爬行脚会立刻坠落,但在实验中爬行脚只是发生了滑移并没有坠落。结合仿真结果分析,由于爬行脚承受载荷在其一侧,导致其存在偏心力矩,使爬行脚整体发生轻微倾斜;同时偏心力矩会导致爬行脚与换热管之间的摩擦力有所增大,并发生轻微倾斜,所以导致爬行脚先滑移一段距离。

4.2.2 自锁工况

自锁工况下不充气,同样进行 10 组实验,结果如图 15 所示。可以看出,负载从 10 kg 开始,每次 1 kg

增加到 16 kg 时,爬行脚发生坠落,且负载在 16 kg 之前均保持良好的稳定性,没有发生滑移,表明爬行脚在自锁工况下的最大负载能力为 15 kg。

5 结论

(1)对爬行脚在充气和自锁工况下的吊装负载能力的理论计算表明,爬行脚结构可以保证爬行机器人工作过程中的稳定性。

(2)基于 Hypermesh 和 ANSYS Workbench 联合仿真平台对爬行脚的吊装负载能力进行的结构力学和接触仿真结果表明,爬行脚在负载为 25 kg 时仍能保持良好的稳定性,不会发生与换热管内壁滑移的失效形式。

(3)对本文开发的爬行脚实验样机进行稳定性验证实验得出,爬行脚的负载能力在充气工况下为 38 kg,在自锁工况下为 15 kg。且无论在充气工作状态下还是在断气断电的自锁状态下,爬行脚均能保证爬行机器人稳定地吊装在换热器管板之上。

参考文献:

- [1] 支浩, 汤慧萍, 朱纪磊. 换热器的研究发展现状[J]. 化工进展, 2009, 28: 338-342.
ZHI H, TANG H P, ZHU J L. Research and development of heat exchanger[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2009, 28: 338-342. (in Chinese)
- [2] ZEMLYAKOVA E V, BABKINA K D, KLIMAOVAA O G. Remotely controlled laser welding of tube-to-tube plate joints in the manufacture of heat exchangers[J]. Welding International, 2016, 30(6): 479-483.
- [3] 陈永东, 陈学东. 我国大型换热器的技术进展[J]. 机械工程学, 2013, 49(10): 135-143.
CHEN Y D, CHEN X D. Technology development of large-scale heat exchanger in China[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(10): 135-143. (in Chinese)
- [4] 宋文明, 杨贵荣, 郭志军, 等. 固定管板换热器管板泄露失效分析[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(12): 107-113.
SONG W M, YANG G R, GUO Z J, et al. Failure analysis of the leaking of fixed tube-sheet heat exchanger[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(12): 107-113. (in Chinese)
- [5] 张志波. 关于新型换热器管子管板焊接工艺的探讨[J]. 价值工程, 2012, 31(17): 18-19.
ZHANG Z B. Tube-tube sheet welding technology for new

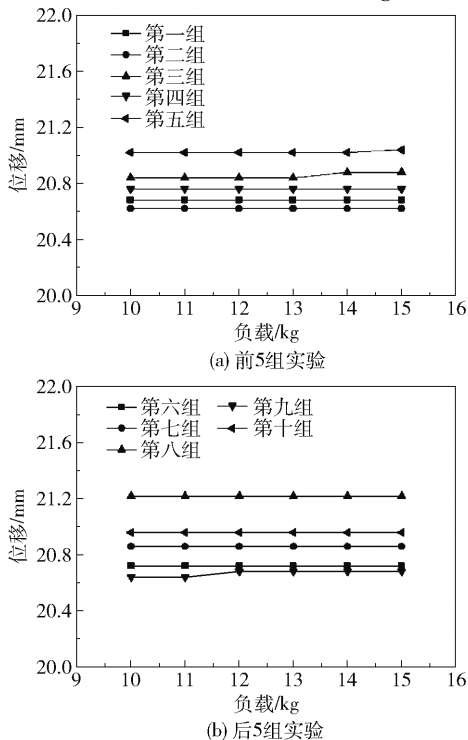


图 15 自锁工况实验数据变化曲线

Fig. 15 Experimental curves of self-locking condition

- heat exchanger[J]. Value Engineering, 2012, 31(17): 18–19. (in Chinese)
- [6] 吴杰. 固定管板式换热器的定期检验[J]. 化学工程与装备, 2015(4): 192–194.
- WU J. Periodic inspection of fixed tube plate heat exchangers[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2015(4): 192–194. (in Chinese)
- [7] 毛幼平, 郑兵虎, 王涛, 等. 列管式换热器的管子-管板角焊缝射线检测[J]. 无损检测, 2014, 36(12): 33–35.
- MAO Y P, ZHENG B H, WANG T, et al. X-ray detection of the fillet weld of tube-tube sheet in sheet and tube and tube heat exchanger[J]. Nondestructive Testing, 2014, 36(12): 33–35. (in Chinese)
- [8] 强天鹏, 龚成刚, 周齐明, 等. 管子-管板角焊缝射线照相技术的进展[J]. 无损检测, 2013, 35(10): 67–69, 73.
- QIANG T P, GONG C G, ZHOU Q M, et al. The progress of radiographic testing technology on tube to tube-sheet welds[J]. Nondestructive Testing, 2013, 35(10): 67–69, 73. (in Chinese)
- [9] 吴建荣, 林戈, 陈怀东, 等. 蒸汽发生器一次侧在役检查机器人技术发展概况[J]. 无损检测, 2011, 33(11): 63–65, 74.
- WU J R, LIN G, CHEN H D, et al. Development status of in-service inspection robot technology for steam generator primary side[J]. Nondestructive Testing, 2011, 33(11): 63–65, 74. (in Chinese)
- [10] OBRUTDKY L, RENAUD J, LAKHAN R. Steam generation inspections: faster, cheaper and better, are we there yet [C]//IV Conferential Panamricana de END. Buenos Aires, 2007: 1–17.
- [11] SERGIO G, MATIJA V, MARKO B. Tube sheet runner [C]//Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe. Bovec, 2011.
- [12] BOGUE R. Robots in the nuclear industry: a review of technologies and applications [J]. Industrial Robot, 2011, 38(2): 113–118.

Study of the lifting load capacity of the crawling foot of a tube-tubesheet detecting robot

LIANG LiHong¹ CHEN YongKang² ZHUANG Jian^{2*}

(1. NDT Technology Center, China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to ensure the stability and reliability of a crawling robot when it inspects the welds of a heat exchanger carrying nondestructive testing (NDT) equipment, the load capacity of the crawling foot, which is the key component, was studied by numerical simulation and experiment. The structural strength and contact state of the crawling foot were simulated under inflated and self-locking conditions using Hypermesh and ANSYS Workbench. The result showed that there was no slipping failure between the crawling foot and tube during a gradual increase of load under both conditions, and the stability was always maintained. The crawling foot was developed and verified and lifting load experiments were carried out under both conditions. The maximum load was 38 kg under inflated conditions and 15 kg under self-locking conditions. It was verified that the crawling foot had good stability.

Key words: vertical heat exchanger; tube-tubesheet; crawling foot; lifting load; prototype verification

(责任编辑:汪 琴)