

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.06.004

降温过程中 LNG 板翅结构应力耦合模拟

麻宏强¹, 陈杰², 蔡伟华³, 郑文科¹, 姚杨¹, 姜益强¹

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境与工程学院, 150090 哈尔滨; 2. 中国石油气电集团有限责任公司, 100027 北京;

3. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 150001 哈尔滨)

摘要: 为保证大型 LNG 冷箱降温过程中板翅式换热器结构安全可靠, 建立了板翅结构应力耦合分析模型, 采用热-结构直接耦合模拟方法, 分析了降温过程对板翅结构应力的影响规律. 结果表明: 翅片和隔板钎焊接头处为结构最易破坏区; 温差对板翅结构应力影响较为明显, 并随温差增大而增大; 当温差小于 10 K 时, 对流换热性能对板翅结构应力影响较小; 当温差相等时, 降温速率对板翅结构应力影响较小.

关键词: LNG; 板翅结构; 直接耦合; 有限元方法

中图分类号: TE64

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)06-0021-06

Numerical investigation on stress of plate-fin structures during cool-down of LNG heat exchanger

MA Hongqiang¹, CHEN Jie², CAI Weihua³, ZHENG Wenke¹, YAO Yang¹, JIANG Yiqiang¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;

2. CNOOC Gas and Power Group, 100027 Beijing, China;

3. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

Abstract: In order to ensure the structural safety of plate-fin heat exchanger, a model was proposed to simulate the stress of plate-fin structures in the cool-down process. The stress of plate-fin structures was investigated in the cool-down process based on directly coupled Finite Element Method. The results showed that the most easily damaged area happened in the brazed joint between fin and plate in the cool-down process. At the same time, the stress was obviously influenced by the temperature difference between natural gas (NG) and mixture refrigerant (MR) and increased with increasing temperature difference. The heat transfer performance had little influence on the stress of plate-fin structures when the temperature difference between NG and MR was less than 10 K. The stress of plate-fin structures was also slightly impacted by the temperature drop rate as the temperature drop rate of NG was the same as that of MR in the cool-down process.

Keywords: LNG; plate-fin structures; direct coupling; finite element method

板翅式换热器作为大型 LNG 冷箱的关键设备, 其关键部件—板翅结构, 在降温过程中的应力集中严重影响冷箱安全、可靠运行^[1-2]. 目前, 国内外学者对板翅结构应力进行了大量研究, 但主要集中在高温钎焊过程中产生的残余应力以及其对蠕

变行为的影响方面^[3-5]. 对于大型 LNG 冷箱降温过程中, 板翅结构应力变化规律的研究目前还未见相关报道. 因此, 本文建立了 LNG 板翅结构应力耦合分析模型, 采用热-结构直接耦合有限元方法, 模拟分析了大型 LNG 冷箱降温过程对板翅结构应力的影响规律, 并通过板翅换热器低温性能试验对其模拟结果进行了验证.

1 有限元模型分析

1.1 模型简化

文中以 260 万吨/年大型 LNG 冷箱内液化换

收稿日期: 2014-09-03.

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2013AA09A216).

作者简介: 麻宏强(1984—), 男, 博士研究生;

姚杨(1963—), 女, 教授, 博士生导师;

姜益强(1973—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 姜益强, jyq7245@sina.com.

热器(天然气(NG)和混合冷剂(MR)侧运行压力分别为 71 bar 和 4 bar)的板翅结构为研究对象,模拟分析降温过程对其应力的影响规律.该板翅结构主要由翅片、隔板通过不同叠积和适当排列钎焊而成^[6-7],见图 1.由于板翅结构的周期性、重复性以及其结构复杂性,文中对其做了相应简化:1)忽略层数对板翅结构应力的影响;2)板翅结构内部 NG 和 MR 交替流动,并进行逆流换热;3)板翅结构整体材料与钎料均为各向同性材料.基于上述简化可取四层流道组成的板翅结构进行分析.由于板翅结构的周期性、对称性以及其在很短长度 L 内沿流道长度方向温度变化较小,本文将在长度 L 方向取很小一段,在与长度垂直截面取一个周期(图 1 虚线部分)进行分析,其简化模型和局部结构分别如图 2、3 所示,模型结构参数见表 1.

1.2 材料属性

以 AL3003 为翅片、隔板材料,AL4004 为钎料材料对板翅结构进行应力耦合模拟.由于 AL3003 和 AL4004 材料的弹性模量、膨胀系数随温度变化明显,因此模拟中考虑了温度对弹性模量和膨胀系数的影响,忽略了对密度、导热系数以及比热容的影响,其材料参数见表 2.

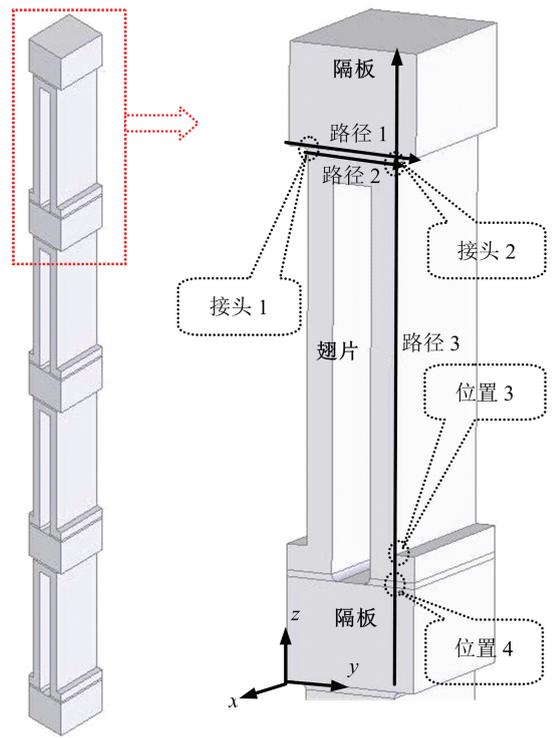
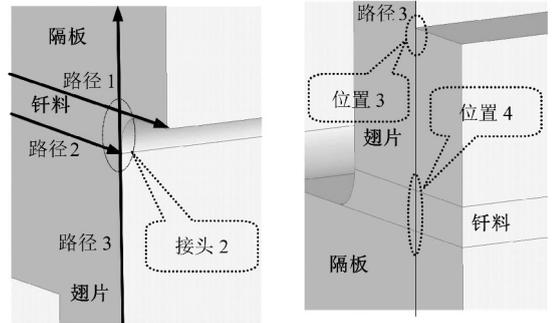


图 2 板翅结构简化模型



(a) 接头 2 局部结构 (b) 位置 3 和 4 的局部结构

图 3 简化模型的局部结构

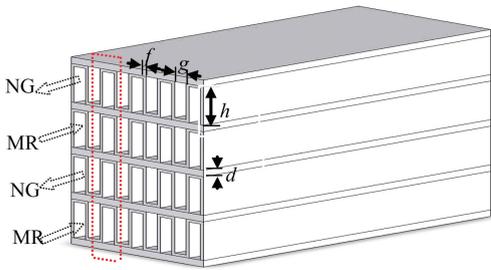


图 1 板翅式换热器结构示意图

表 1 模型结构参数(层数从下向上一次递增)

层数	隔板厚度 d /mm	翅数	翅片厚度 f /mm	翅片高度 h /mm	翅片内距 g /mm	翅片有效长度 L /mm	钎料厚度/mm
第一层	1.6	100	0.4	6	0.6	5	0.1
第二层	1.6	100	0.4	6	0.6	5	0.1
第三层	1.6	100	0.4	6	0.6	5	0.1
第四层	1.6	100	0.4	6	0.6	5	0.1
第五层	1.6	—	—	—	—	—	—

表 2 材料力学性能参数^[16-17]

材料名称	温度/K	弹性模量/GPa	CET/(10 ⁻⁶)/K ⁻¹	泊松比	比热/(J·(kg·K) ⁻¹)	密度/(kg·m ⁻³)	导热系数/(J·(m·K) ⁻¹)
AL3003	305	68.9	22.4	0.33	962	2 740	159
	250	70.6	19.7				
	195	72.4	16.9				
	175	73.2	15.9				
	145	74.5	14.4				
AL4004	305	94.6	15.1	0.35	864	2 710	155
	250	96.4	14.9				
	195	98.2	14.7				
	175	98.8	14.6				
	145	99.6	14.5				

1.3 有限元分析方法

本文采用热-结构直接耦合有限元方法^[8-9],利用 ANSYS 软件对降温过程中 LNG 板翅结构的应力进行模拟.首先对图 2 模型进行了网格划分,通过网格无关性验证最终确定 14.1 万节点数网格为计算网格.在热分析中,MR、NG 与板翅结构内壁面之间采用对流换热边界,模拟 NG 和 MR 通过板翅结构内壁面的热量交换.在应力分析中,在图 2 模型的左右两端施加周期性对称边界,模拟板翅结构的周期性和对称性;在板翅结构内壁面施加 NG 和 MR 的运行压力,模拟 NG 和 MR 压力对板翅结构的作用;同时,由于板翅结构可以在支撑结构上自由滑移,忽略了外载荷对板翅结构的作用;在板翅结构的底面沿竖直方向采用固定约束边界.在网格划分以及上述边界条件下,采用 Solid5 单元,模拟分析了液化换热器天然气出口端板翅结构的应力变化规律.

2 模拟结果分析

2.1 LNG 板翅式换热器冷箱降温过程分析

依据文献[10]冷箱降温过程是 NG 和 MR 温度降低、压力逐渐升高的过程.实际 LNG 冷箱降温过程中,NG 和 MR 具有不同的降温速率,这将导致 NG 和 MR 之间的温差随降温时间不同.为便于分析降温过程中 NG 和 MR 之间温差以及其降温速率对板翅结构应力的影响规律,对其做简化:1)在冷箱降温过程中,当 NG 和 MR 之间温差相等时,通过改变降温时间,模拟分析 NG 和 MR 的降温速率对板翅结构应力的影响;2)在降温过程中,当 NG 和 MR 的降温速率相同并保持恒定

时,通过改变 NG 和 MR 之间温差,模拟分析温差对板翅结构应力的影响.

2.2 降温过程中板翅结构应力分布规律

在天然气侧对流换热系数 (h_{NG}) 为 $1.5 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、混合冷剂侧对流换热系数 (h_{MR}) 为 $1.0 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、天然气压力 (P_{NG}) 为 71 bar、混合冷剂压力 (P_{MR}) 为 4 bar、NG 和 MR 之间温差 (ΔT) 为 5 K、降温速率为 $2.5 \text{ K}/\text{min}$ 时,对典型路径(见图 2)的应力分布规律进行分析.其中路径 1 位于钎料和隔板的交界面处,路径 2 位于钎料和翅片的交界面处.

图 4 是不同时刻路径 1 的应力分布规律,结果表明在降温过程中,路径 1 的最大正应力、最大剪应力和等效应力(第四强度理论)在翅片和隔板之间的钎焊接头 1 和 2 处达到峰值.引起该结果的主要原因在于:一方面翅片和隔板之间的钎焊接头 1 和 2 处发生了结构突变,产生了应力集中;另一方面钎料的热膨胀系数与翅片、隔板的不匹配,导致钎焊接头 1 和 2 处钎料变形受到约束.图 4 也表明在整个降温过程中,沿路径 1 的最大剪应力始终大于最大正应力;也就是说,最大剪应力是导致钎焊接头 1 和 2 靠近隔板侧出现裂纹,引起结构破坏的主要原因.图 5 是路径 2 的应力分布规律,结果也表明在翅片和隔板之间的钎焊接头 1 和 2 处应力集中和热膨胀系数不匹配,最大正应力、最大剪应力和等效应力也达到了峰值;沿路径 2 的最大剪应力大于最大正应力,但是在路径 2 的两端(钎焊接头 1 和 2)最大正应力大于最大剪应力.也就是说,在钎焊节点靠近翅片侧,最大正应力是引起钎焊节点靠近翅片侧出现裂纹,并导致破坏的主要原因.

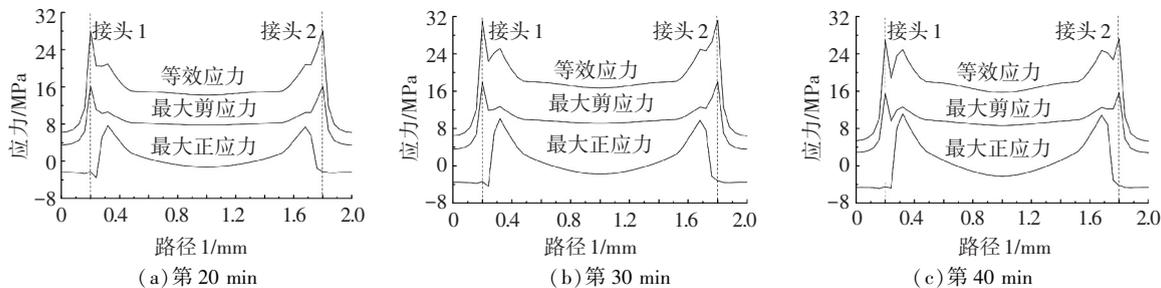


图 4 不同时刻路径 1 应力分布

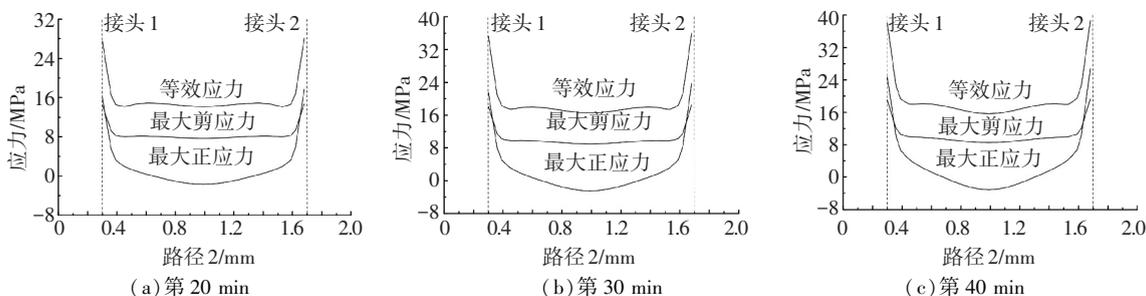


图 5 不同时刻路径 2 应力分布

为进一步分析钎焊接头处应力分布规律,本节也对钎焊接头 2 处沿路径 3 的应力分布进行分析.图 6 是不同时刻钎焊接头 2 处沿路径 3 的应力分布,结果表明在钎焊接头靠近翅片侧的应力始终大于靠近隔板侧的应力;在靠近隔板侧最大剪应力大

于最大正应力,而在靠近翅片侧则反之,该结论与图 4、5 结论保持一致.同时,图 7 给出了不同时刻路径 3 的应力分布规律,结果表明尽管在钎焊接头 2、位置 3 和 4 处应力均达到了峰值,但在钎焊接头 2 的应力始终大于位置 3 和 4 的.

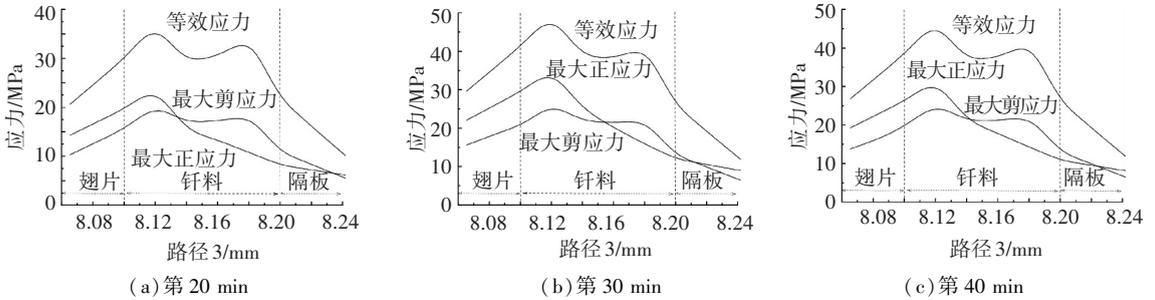


图 6 不同时刻钎焊接头 2 应力分布

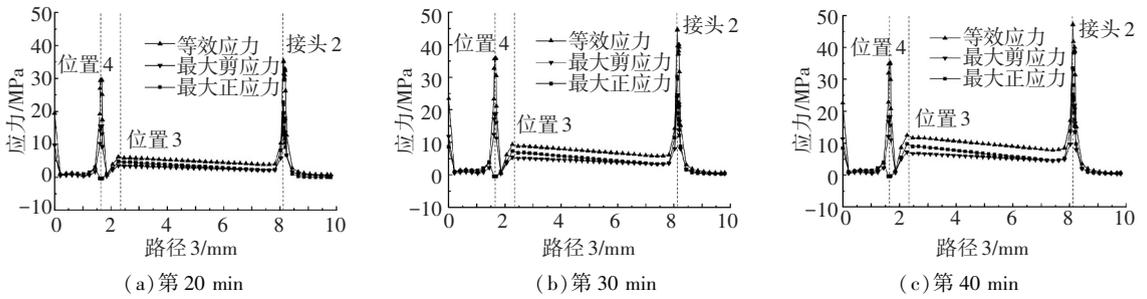


图 7 不同时刻路径 3 应力分布

2.3 降温过程中板翅结构应力变化规律

通过 2.2 节分析可以得出,在板翅结构钎焊接头靠近翅片侧应力达到最大值,该位置为结构薄弱处,本节将模拟分析降温过程对该薄弱处最大等效应力的影响规律.图 8 是降温速率为 2.5 K/min、NG 和 MR 侧运行压力分别为 71 bar 和 4 bar、不同 NG 和 MR 侧换热系数时,NG 和 MR 之间温差对板翅结构最大等效应力的影响规律,结果表明当 NG 和 MR 侧换热系数不变时,NG 与 MR 之间温差越大,板翅结构最大等效应力越大;当 NG 和 MR 之间温差小于 10 K 时,NG 和 MR 侧换热系数对板翅结构最大等效应力的影响较小.这是因为 NG 和 MR 之间温差越大,板翅结构内部温度梯度越大,从而导致其应力越大;当温差较小时,由于板翅结构优越的换热性能,使换热系数对板翅结构内部温度梯度的影响较小.

启动时,MR 侧对流换热性能的增强将导致板翅结构最大等效应力增大.图 10 是降温速率为 2.5 K/min、MR 侧对流换热系数 1.3 kW/(m²·K)、NG 和 MR 侧运行压力分别为 71 bar 和 4 bar 时,NG 侧对流换热系数对板翅结构最大等效应力的影响规律.结果表明当温差为 5 K 和 10 K 时,NG 侧对流换热系数对板翅结构最大等效应力影响较小;当温差为 15 K 和 25 K 时,板翅结构最大等效应力随 NG 侧对流换热系数增大而增大,但是 NG 侧对流换热系数越大其增幅越小.这是因为在大温差降温过程中,NG 和 MR 侧对流换热性能将对板翅结构内部温度梯度产生影响,但随着对流换热性能的增强,其对板翅结构内部温度梯度的影响减小.

图 9 是降温速率为 2.5 K/min、NG 侧对流换热系数为 1.5 kW/(m²·K)、NG 和 MR 侧运行压力分别为 71 bar 和 4 bar 时,MR 侧对流换热系数对板翅结构最大等效应力的影响规律.结果表明在温差为 5 K 和 10 K 时,MR 侧对流换热系数对板翅结构最大等效应力的影响较小;当温差为 15 K 和 25 K 时,MR 侧对流换热系数越大,板翅结构的最大等效应力越大.也就是说,当 LNG 冷箱内板翅式换热器大温差

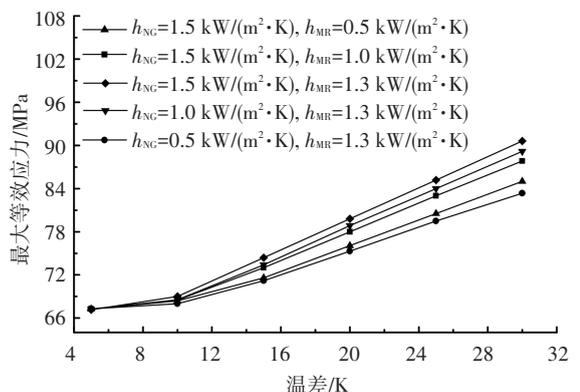


图 8 NG 和 MR 之间温差对应力的影响

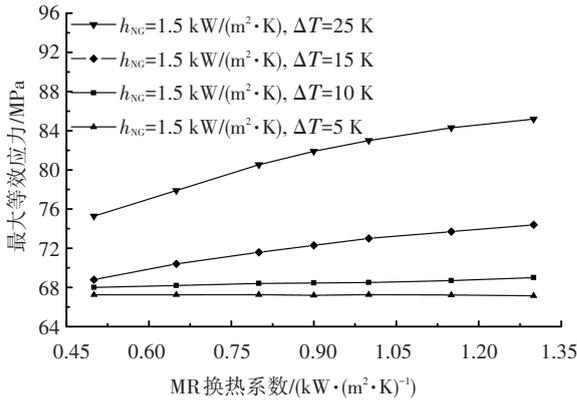


图 9 MR 换热系数对应力的影响

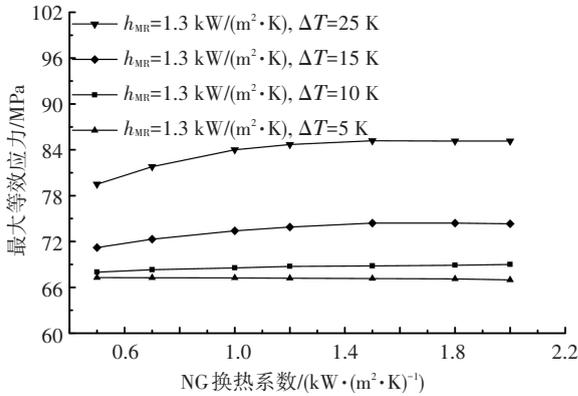


图 10 NG 换热系数对应力的影响

降温速率也是影响降温过程板翅结构应力的主要参数之一,因此本节也分析了降温速率对板翅结构最大等效应力的影响规律.图 11 是 NG 和 MR 侧运行压力分别为 71 bar 和 4 bar,NG 和 MR 之间温度为 15 K、不同 NG 或 MR 换热系数时,降

温速率对板翅结构最大等效应力的影响规律模拟结果.当温差保持不变时,降温速率越大板翅结构的最大等效应力越大,但是降温速率对其影响较小.这是因为当 NG 和 MR 温差相等时,降温速率越大板翅结构的温度分布越不均匀,从而引起其温度梯度越大;但是,由于板翅结构优越的导热性能,在温差相等时,降温速率对板翅结构内部温度分布不均的影响较小,从而对其最大等效应力的影响较小.

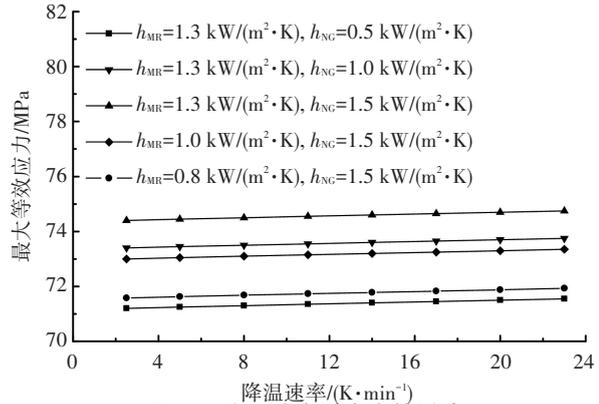


图 11 降温速率对应力的影响

为验证上述模拟结果的可靠性,将模拟结果与以液氮为低温工质时实际板翅式换热器降温试验结果进行对比,试验结果见表 3.当局部最大降温速率为 265 K/min 和 26 K/min 时,板翅结构焊缝处无可见裂纹,强度以及气密性合格,这充分说明降温速率对板翅结构最大等效应力影响较小,可见模拟结果在定性上与试验结论一致.

表 3 板翅式换热器降温试验结果

序号	全程降温时间/min	局部最大降温速率/ (K·min ⁻¹)	全程平均降温速率/ (K·min ⁻¹)	性能检验结果
第一次	167	26	1.0	板束无变形、(钎)焊缝无可见裂纹,
第二次	21	265	9.7	外观无异常,强度合格.

注:1.全程降温时间指从液氮开始注入到换热器顶部铂电阻达到液氮温度所用时间;

2.全程平均降温速度为全程降温时间除液氮温度和常温的温差.

在实际大型 LNG 冷箱降温过程中,并不能保证 NG 和 MR 之间温差相等,当 MR 侧降温过快(图 12),MR 温度随时间按 T_{MRP} 变化(T_{NG} 、 T_{MRI} 分别为温差保持相等时 NG 和 MR 的理想降温曲线)时,由于板翅式换热器的热惰性,NG 侧温度并不能跟随 MR 侧温度同步地变化,从而导致 NG 和 MR 之间温差从理想工况 ΔT_i 增大到 ΔT_p ,并引起板翅结构应力破坏.也就是说,MR 侧流体降温速率过快引起板翅结构应力破坏的主要原因是由于 NG 和 MR 之间温差增大,导致板翅结构内部温度梯度增大.

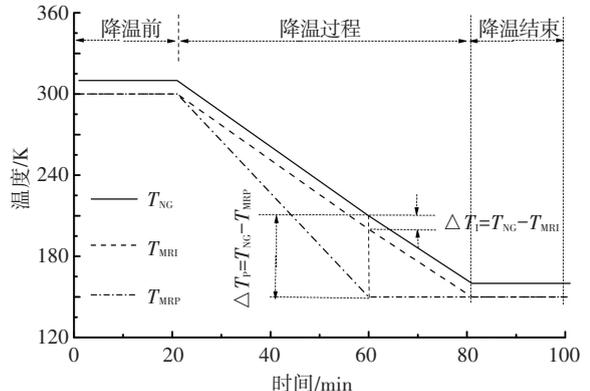


图 12 降温速率过快引起温差变化示意

3 结 论

1) 在 LNG 冷箱降温过程中, 钎焊接头处为板翅结构的最易破坏区, 该处靠近翅片侧应力达到最大值; 在钎焊接头靠近隔板侧最大剪应力是导致其发生裂纹破坏的主要原因, 在钎焊节点靠近翅片侧最大正应力是其发生结构破坏的主要原因。

2) 大型 LNG 冷箱降温过程中, NG 和 MR 之间温差对板翅结构应力影响较大, 并随温差增大而增大; 当温差超过 10 K 时, NG 和 MR 侧换热性能对板翅结构应力影响较为明显。为减小对流换热性能对板翅结构应力的影响, 保证 LNG 冷箱安全可靠降温, 建议控制 NG 和 MR 之间温差在 10 K 以内。

3) 当 NG 和 MR 之间温差保持恒定时, 降温速率对板翅结构最大等效应力影响较小; 实际降温过程中, 对 MR 降温速率的控制实际上是对 NG 和 MR 之间温差的控制。

参 考 文 献

- [1] PICARD F, AVEROUS D, JOULIA X, et al. Modelling and dynamic simulation of thermal stresses in brazed plate-fin heat exchanger [J]. Computer Aided Chemical Engineering, 2006, 21: 659-664.
- [2] MIZOKAMI Y, IGARI T, KAWASHIMA F, et al. Development of structural design procedure of plate-fin heat exchanger for HTGR [J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, 255: 248-262.
- [3] AIYANGAR A, NEUBERGER B, OBERSON P, et al. The effects of stress level and grain size on the ambient

temperature creep deformation behavior of an alpha Ti-1.6 wt pct V alloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions a-Physical Metallurgy and Materials Science, 2005, 36(3): 637-644.

- [4] GALLI M, BOTSIS J, JANCZAK-RUSCH J. Relief of the residual stresses in ceramic-metal joints by a layered braze structure [J]. Advanced Engineering Materials, 2006, 8(3): 197-201.
- [5] JIANG W, GONG J, CHEN H, et al. Finite element analysis of the effect of brazed residual stress on creep for stainless steel plate-fin structure [J]. Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the Asme, 2008, 130(4): 041203.
- [6] JIANG W, GONG J, CHEN H, et al. Finite element analysis of creep of stainless steel plate-fin structure [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007, 43(5): 539-545.
- [7] XIE Q Y, LING X A. Numerical Analysis of residual stress for copper base brazed stainless steel plate-fin structure [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2010, 19(5): 611-615.
- [8] MA H, CAI W, ZHENG W, et al. Stress characteristics of plate-fin structures in the cool-down process of LNG heat exchanger [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 21: 1113-1126.
- [9] ZHAO N, YANG Y, HAN M, et al. Finite element analysis of pressure on 2024 aluminum alloy created during restricting expansion-deformation heat-treatment [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(9): 2226-2232.
- [10] 孙恒, 余霆, 舒丹. LNG 液化装置冷箱降温过程的动态模拟 [J]. 低温与超导, 2009(7): 14-15.

(编辑 赵丽莹)

封面图片说明

封面图片是沈阳市沈北新区市民中心 80 m 直径螺栓球节点单层短程线网壳结构有限元模型在均布极限荷载作用下的杆件弯矩云图, 该工程也是中国目前已经建成的最大跨度单层螺栓球节点网壳结构, 打破了螺栓球节点只能按照铰接节点考虑, 无法应用于单层网壳结构中的传统概念。图片结果显示当网壳结构合拢后, 最大杆件弯矩出现在壳体下部, 但整球合拢阶段的极限荷载仍小于 1/4~1/2 球体施工阶段, 壳体的整体作用突显。网壳全部杆件都可以承担一部分弯矩, 表明半刚性节点简化分析方法可以充分考虑节点域的抗弯刚度, 提高材料利用率, 为新型半刚性节点空间结构的设计与应用奠定了坚实的理论基础。

(图文提供: 曹正罡, 陈哲明, 万宗帅, 马会环, 武岳. 哈尔滨工业大学土木工程学院)