

# LNG 运输船独立液罐焊接残余应力分析

黄逢昱<sup>1</sup>, 周勇<sup>2</sup>

(1. 武汉理工大学 能源与动力工程学院 湖北 武汉 430063; 2. 武汉船用电力推进装置研究所 湖北 武汉 430064)

摘要: LNG(液化天然气)运输船舶建造过程中,焊接残余应力不仅可能使 LNG 运输船独立液罐产生裂纹,还可能与外加载荷叠加后改变独立液罐的承载能力。因此要了解独立液罐焊接后的应力分布,就有必要对其焊接残余应力进行有限元分析。应用轴对称模型及单元生死技术研究了某 LNG 运输船舶独立液罐焊接残余应力的分布规律,参照现有国标对独立液罐坡口尺寸进行了对比研究,探讨了坡口尺寸与焊接残余应力之间的关系,以及热处理对焊接残余应力的影响。研究表明:在独立液罐坡口角度为最小建议值的情况下,焊接残余应力(等效应力)随坡口深度的增大呈先减小后增大的趋势,当坡口深度为 6 mm 时,其残余应力达到最小值;与 V 型坡口角度和 U 型坡口角度相比,坡口深度对焊接残余应力的影响更加显著;结合实际结构及工艺,为减少焊接残余应力,尽量选择较小的坡口深度和坡口角度;独立液罐焊后热处理可以降低其焊接残余 Mises 应力,降低幅度达到了 21%。研究结果为独立液罐焊接结构的设计、生产工艺的优化及降低焊接残余应力提供了理论依据。

关键词: LNG 储罐; 9Ni 钢; 残余应力; 焊缝坡口设计; 单元生死

中图分类号: TG404 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.08.016

## 引言

随着世界经济的飞速发展及能源需求量的增长, LNG 作为“低污染、高收益”的能源受到越来越多的青睐。作为运输 LNG 的专用船舶, LNG 运输船被誉为“海上超级冷冻车”,是一种高技术、高难度、高附加值的船舶<sup>[1-2]</sup>。

独立液罐(LNG 储罐)是 LNG 运输船舶的关键设备,其与船体分开建造,不构成船体的一部分,也不分担船体结构强度。独立液罐的应力来源主要有工作应力和焊接过程产生的残余应力。工作应力主要与船舶及 LNG 的存储状态有关<sup>[3-4]</sup>;而焊接残余应力则是在 LNG 储罐的焊接制造过程中产生。与

工作应力相比,焊接残余应力是无外力作用时的内力<sup>[5]</sup>。焊接残余应力的峰值往往达到或超过基体材料的屈服点应力<sup>[6]</sup>。如果 LNG 储罐所受工作应力叠加于焊接残余应力之上,造成局部应力超过屈服强度时,将致 LNG 储罐产生二次塑性变形和焊接残余应力的重新分布<sup>[5]</sup>,从而降低 LNG 储罐的整体刚性和尺寸稳定性<sup>[6]</sup>。同时焊接残余应力起到加速裂纹形成和扩张的作用,大大降低了 LNG 储罐的疲劳强度<sup>[5]</sup>,故残余应力是影响 LNG 储罐强度的一个关键因素, LNG 储罐的性能和寿命直接决定 LNG 运输船舶的性能和寿命。

但是,由于焊接残余应力的实测技术繁杂并且带有一定的破坏性,因此从数值分析的角度来研究 LNG 运输船独立液罐焊接残余应力的分布规律,从而进行焊接结构和焊接工艺的设计,对于提高独立液罐焊缝质量、承载能力及延长使用寿命具有重要的理论指导意义与实际工程意义。

## 1 焊接坡口

独立液罐一般焊接而成,除环缝焊接采用埋弧焊以外,纵缝以及角缝的焊接全部为焊条电弧焊。窄间隙埋弧焊是一种高效的焊接技术,在中厚板焊接方面应用很广。参考国家标准 GB/T 985.2-2008《埋弧焊的推荐坡口》,焊接坡口形式及尺寸如图 1 表 1 所示。

表 1 焊接坡口尺寸(mm)

Tab. 1 Dimensions of welding groove(mm)

坡口角 $\alpha$	坡口角 $\beta$	圆弧半径 $R$	钝边 $c$	坡口深度 $h$
$85^\circ \leq \alpha \leq 95^\circ$	$1^\circ \leq \beta \leq 1.5^\circ$	10	$c \approx 2$	$4 \leq h \leq 10$

收稿日期: 2016-05-09; 修订日期: 2016-06-14

作者简介: 黄逢昱(1994-),男,河南新野人,武汉理工大学学生。

通讯作者: 周勇(1982-),男,武汉船用电力推进装置研究所综合电力事业部高级工程师。

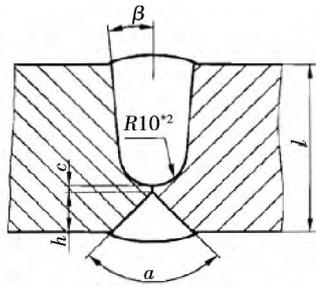


图 1 焊接坡口形式示意图(mm)

Fig. 1 Schematic diagram of welding groove(mm)

度 将焊缝区域网格进行精细划分 其余区域以非常稀疏的网格反映<sup>[9]</sup> 如图 3 所示。

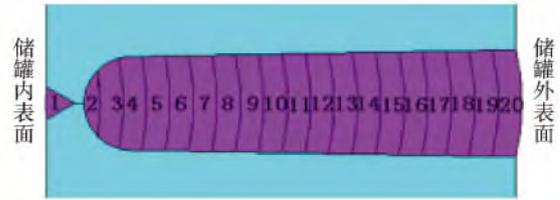


图 2 储罐焊道定义图

Fig. 2 Weld on LNG tank

## 2 有限元模型

### 2.1 基本假定

为简化分析计算,作如下假设<sup>[7]</sup>: (1) 忽略熔池流体的流动作用,不考虑熔池内部的化学变化及对流,仅考虑熔池热传导;(2) 仅考虑因温度分布不均匀而造成的热应力,而忽略因局部快速加热和冷却引起的组织应力;(3) 焊接熔池的温度设为焊喉初始温度,设为 1 500 °C;(4) 假设独立液罐与空气的对流换热系数为恒定值,取为 30 W/(m<sup>2</sup>·k)<sup>[8]</sup>,不考虑热辐射系数;(5) 忽略焊缝和独立液罐材料物性参数的一致性,采用各向同性且随温度变化的热物性参数;(6) 焊接过程中焊接参数(焊接速度、焊接电流等)为常数。

### 2.2 模型简化及网格剖分

LNG 储罐结构尺寸较大,考虑到现有硬件条件,对其焊接过程进行三维有限元分析是不现实的。此外,由于 LNG 储罐刚度较大且结构上呈轴对称,因此采用轴对称模型来进行分析计算。同时为简化计算,选取 LNG 储罐内壁两块厚板的对接作为分析对象,同时采用轴对称模型来研究 LNG 储罐的焊接残余应力。

鉴于此,对于壁厚达到 30 mm 的 LNG 储罐而言,在其内表面开出 V 型坡口,外表面开出窄间隙埋弧焊 U 型坡口,焊道共设计为 20 层,如图 2 所示。初定储罐焊接工艺为:首先在内侧采用焊条电弧焊将内侧 V 型坡口焊满;其次在外侧采用窄间隙埋弧焊进行焊接。

在仿真分析过程中,由于焊缝区域存在耦合效应,温度梯度和应力应变梯度较大。为保证计算精

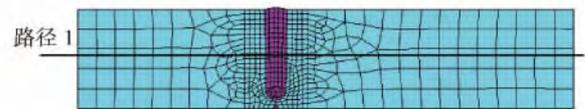


图 3 有限元分析模型

Fig. 3 FEA model of LNG tank

### 2.3 定义材料属性

9Ni 钢以其耐低温、强度高、易于加工以及焊接性能优异等优势,通常作为 LNG 储罐的制造材料<sup>[10]</sup>。由前述基本假定,将焊缝与储罐母材定义为同种材料,其热、力学性能随温度变化曲线如图 4 所示<sup>[11]</sup>,对于那些未知温度处的参数可以通过插值法或外推法确定<sup>[12]</sup>。

### 2.4 相变过程的处理

在焊接分析过程中,存在着熔化、凝固等相变过程。在 ANSYS 中,一般通过定义材料随温度变化的焓来考虑潜热。焓值为密度、比热以及温度的函数,它们之间存在着如下关系式:

$$\Delta h = \int \rho(T) c(T) dT \tag{1}$$

式中:  $\Delta h$ —焓值;  $\rho(T)$ —随温度变化的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $c(T)$ —随温度变化的比热, J/kg·°C。

### 2.5 时间步长

在 LNG 储罐焊接分析过程中,时间步长控制在 0.2 左右,在焊后冷却过程中,步长适当加大。ITS (初始时间步长) 估算公式如下<sup>[13]</sup>:

$$ITS = \delta^2 / 4\alpha \tag{2}$$

式中:  $\delta$ —沿热流密度方向热梯度最大处的单元长度, m;  $\alpha$ —热扩散率, m<sup>2</sup>/s, 其中:  $\alpha = \lambda / \rho c$ 。

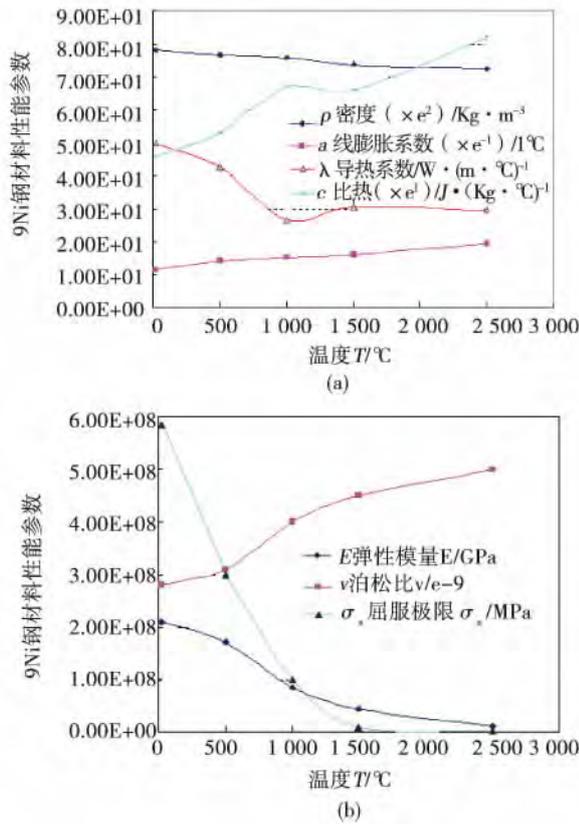


图 4 9Ni 钢材料性能与温度关系  
Fig. 4 Material properties of 9Ni Steel

由图 5 可知: 在  $\alpha$  及  $\beta$  不变的情况下, 当坡口深度  $h=6 \text{ mm}$  时, 其残余 Mises 应力(等效应力)达到最小值 611 MPa, 超过材料屈服极限(590 MPa)。当  $4 \text{ mm} \leq h \leq 6 \text{ mm}$  时, 随着  $h$  的增大, LNG 储罐整体填入焊料呈递减趋势, 致使储罐整体输入热量呈递减趋势, 故降低了储罐的残余 Mises 应力, 应力值由 623 MPa 降至 611 MPa; 当  $6 \text{ mm} \leq h \leq 10 \text{ mm}$  时, 由于 U 型坡口角原小于 V 型坡口角, 随着  $h$  的增大, 储罐整体填入焊料呈递增趋势, 故残余 Mises 应力随坡口深度  $h$  的增大而增大, 应力值由 611 MPa 增至 692 MPa, 残余应力增量达 80 MPa。

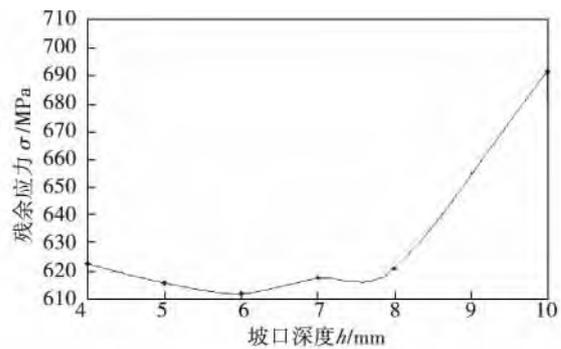


图 5 坡口深度对残余 Mises 应力的影响  
Fig. 5 Groove depth effect on residual Mises stress

### 3 结果与讨论

应用 ANSYS 参数化设计语言<sup>[14]</sup>、单元生死技术以及直接耦合的方法对 LNG 储罐进行焊接残余应力分析。

#### 3.1 主要焊接坡口尺寸对焊接残余应力影响

由前述, 已知壁厚下的坡口尺寸主要有 3 个变量: V 型坡口角度  $\alpha$ 、U 型坡口角度  $\beta$  以及坡口深度  $h$ 。本节分别对这 3 个变量尺寸进行对比研究, 以期找到对焊接残余 Mises 应力影响最大的参数, 为后续焊接结构的设计提供理论支持。

##### 3.1.1 坡口深度对焊接残余应力影响

参考表 1, 坡口深度  $h$  的取值为  $4 \text{ mm} \leq h \leq 10 \text{ mm}$ , 此时假定 V 型坡口角度  $\alpha$  为  $85^\circ$ , U 型坡口角度  $\beta$  为  $1^\circ$ , LNG 储罐初始温度为常温  $20 \text{ °C}$  (不考虑预热及热处理), 得到分析结果如图 5 ~ 图 7 所示, 其中路径 1 的定义如图 3 所示。

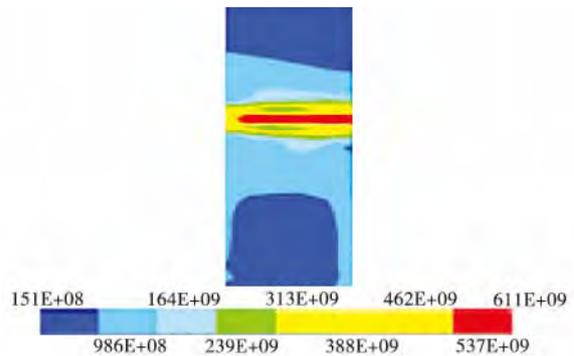


图 6 坡口深度  $h=6$  时的残余应力云图  
Fig. 6 Residual stress contour at groove depth  $h=6$

由图 6 可知: 当坡口深度  $h=6 \text{ mm}$  时, 储罐最大残余 Mises 应力出现在焊缝区域, 远离焊缝区的应力几乎为零; 而由图 7 可知: 焊缝区呈现拉伸残余应力, 周围区域则承受压缩残余应力。这是因为在焊接过程中, 焊接区域被急剧加热, 并迅速溶化以及膨胀, 但受到周围较冷区域的约束, 产生热应力; 另

一方面材料屈服极限随温度的升高而降低,当产生的热应力超过屈服极限时,形成塑性压缩。当储罐整体冷却后,焊缝区域比周围区域相对缩短、变窄或减小,因此该区域就产生拉伸残余应力,周围区域则为压缩残余应力<sup>[5]</sup>。

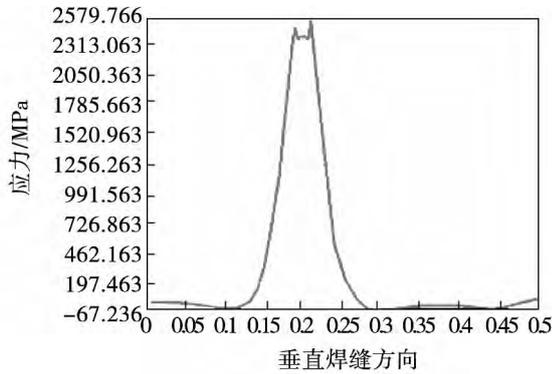


图 7 Mises 应力沿路径 1 变化曲线  
Fig. 7 Mises stress along the path 1

### 3.1.2 U 型坡口角度对焊接残余应力影响

由前述可知,坡口深度  $h = 6 \text{ mm}$  时,其残余 Mises 应力达到最小值,此时假定坡口深度  $h = 6 \text{ mm}$ 。参考表 1, V 型坡口角度  $\alpha$  的取值为  $85^\circ \leq \alpha \leq 95^\circ$ , 假定 U 型坡口角度  $\beta$  的取值为  $1.5^\circ$ 。LNG 储罐初始温度为常温  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  (不考虑预热及热处理),得到分析结果如图 8 所示。由图 8 可知,当  $h = 6 \text{ mm}$   $\beta = 1.5^\circ$  时, LNG 储罐焊接残余 Mises 应力随着 V 型坡口角度  $\alpha$  角度的增大而增大。这是因为随着角度的增大,储罐整体填入焊料呈递增趋势,故残余 Mises 应力随之增大。其残余 Mises 应力值由  $643 \text{ MPa}$  增大至  $675 \text{ MPa}$ , 应力增量达  $30 \text{ MPa}$ 。

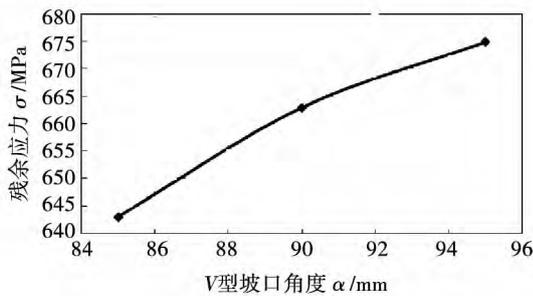


图 8 V 型坡口角度对残余应力的影响  
Fig. 8 V-type groove angle effect on residual stress

### 3.1.3 U 型坡口角度对焊接残余应力影响

参考表 1, U 型坡口角度  $\beta$  的取值为  $1^\circ \leq \beta \leq 1.5^\circ$ , 假定 V 型坡口角度  $\alpha$  的取值为  $85^\circ$ , 同时仍假定坡口深度  $h = 6 \text{ mm}$ 。LNG 储罐初始温度为常温  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  (不考虑预热及热处理),得到分析结果如图 9 所示。由图 9 可知,当  $h = 6 \text{ mm}$   $\alpha = 85^\circ$  时, LNG 储罐焊接残余 Mises 应力随着 U 型坡口角度  $\beta$  角度的增大而增大,这是因为随着角度的增大,储罐整体填入焊料呈递增趋势,故残余 Mises 应力随之增大,其残余 Mises 应力值由  $611 \text{ MPa}$  增大至  $643 \text{ MPa}$ , 应力增量达  $30 \text{ MPa}$ 。

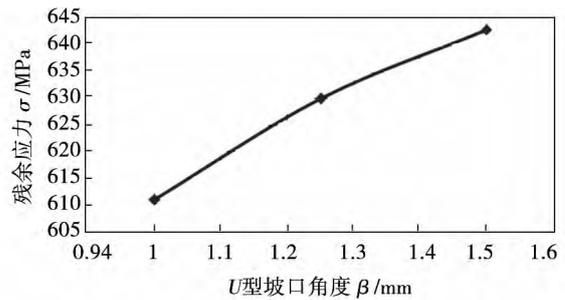


图 9 U 型坡口角度对残余 Mises 应力的影响  
Fig. 9 U-type groove angle effect on residual stress

### 3.1.4 小 结

通过前述 3 个变量尺寸对焊接残余应力影响研究,得到如下结论及建议:(1) 焊接残余 Mises 应力随坡口深度的增大呈先减小后增大的趋势;(2) 焊接残余应力随 V 型坡口角度和 U 型坡口角度的增大而增大;(3) 坡口深度对焊接残余 Mises 应力的影响(应力增量为  $80 \text{ MPa}$ )要高于坡口角度对焊接残余 Mises 应力的影响(应力增量为  $30 \text{ MPa}$ );(4) 结合实际结构及工艺,尽量选择较小的坡口深度和坡口角度。

### 3.2 热处理对焊接残余应力影响

由前述可知:采用合适的坡口深度和坡口角度可以在一定程度上对焊接残余应力起到消减的作用,但所起效果并不明显, LNG 储罐冷却到室温下的残余应力仍然接近屈服极限甚至超过屈服极限,这对于承受各种复杂和变化应力的储罐而言,无疑是相当危险的。因此,需要在焊后对储罐进行各种

处理,以改善储罐残余应力分布<sup>[15]</sup>。焊后残余应力的消除有热作用方法和机械作用方法,本文采用热作用方法来模拟  $\alpha = 85^\circ$   $\beta = 1^\circ$   $h = 6$  mm 的储罐残余应力的消减,退火温度取为  $580^\circ\text{C}$ 。图 10 为某节点温度载荷随时间变化曲线,图 11 为储罐整体退火后的残余应力云图。

由图 10 ~ 图 11 可知: 约在 22 000 s 时,储罐整体冷却至室温,其残余 Mises 应力达到最大值 611 MPa(参考图 6),超过材料屈服极限;退火开始后,储罐整体温度开始匀速缓慢上升,此时残余应力分布开始发生变化,可以看到焊后残余 Mises 应力由退火前的 611 MPa 降低至 485 MPa,

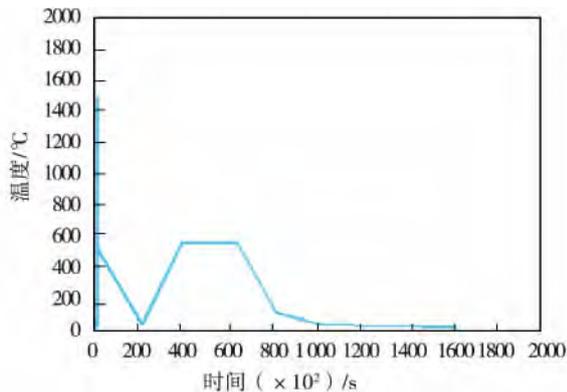


图 10 某节点温度随时间变化曲线

Fig. 10 The node temperature with time

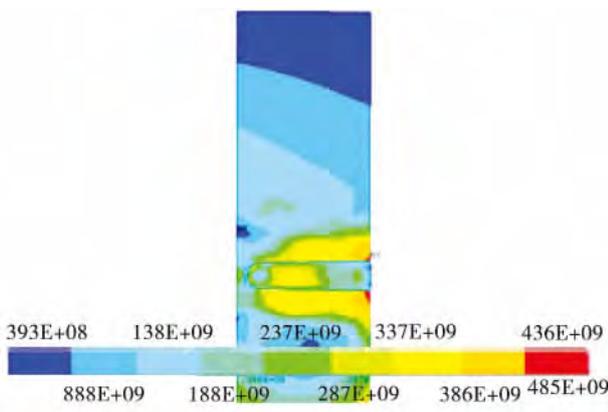


图 11 储罐退火后残余应力云图

Fig. 11 Residual stress after heat treatment

降低幅度达到了 21%。这是因为在高温下,材料内力超过其屈服极限后,弹性应变逐渐向塑性应

变转化,残余应力值随温度升高而相应降低。可见通过热处理来降低残余拉应力,其效果是非常明显的,同时如果考虑材料的蠕变特性,其残余应力在退火保温阶段也将进一步降低。

同时可以看出,在焊缝处伴随着温度改变,其残余应力也处于上升和下降的往复变化之中。同时因为没有过渡圆弧降低焊缝处剧烈变化的几何形状,这也导致了在焊缝区内的应力集中。因此,储罐最大残余应力必然发生在焊缝及其附近区域,远离焊缝处的区域残余应力变化很小,退火后其值大约在 39.3 MPa 左右,如图 11 所示。

#### 4 结 论

本文应用 ANSYS 有限元分析软件,采用轴对称模型及单元生死技术,研究了 LNG 储罐焊接残余应力分布,并参考现有国标对储罐坡口尺寸进行了对比研究,同时探讨了热处理对焊接残余应力的影响,为焊接结构设计及工艺优化,降低残余应力提供了理论依据,具体结论如下:

- (1) 在坡口角度为最小建议值的情况下,焊接残余应力随坡口深度的增大呈先减小后增大的趋势。当坡口深度为 6 时,其残余应力达到最小值;
- (2) 与 V 型坡口角度和 U 型坡口角度相比,坡口深度对焊接残余应力的影响更加显著;
- (3) 结合实际结构及工艺,为减少焊接残余应力,尽量选择较小的坡口深度和坡口角度;
- (4) 对于  $\alpha = 85^\circ$   $\beta = 1^\circ$   $h = 6$  mm 的 LNG 储罐,当其退火结束(冷却至室温)时,残余应力峰值由退火前的 611 MPa 降低至 485 MPa,降低幅度达到了 21%,焊后热处理有效降低了焊接残余应力。

#### 参考文献:

- [1] 由维岩. 采用 B 型液货舱的中小型 LNG 船设计关键技术研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014.  
YOU Wei-yan. Design technology research on type-B independent liquefied tank of the small and medium LNG carriers [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [2] 吴 穷, 王建丰, 等. LNG 运输船的主动动力装置 [J]. 热能动力

- 工程 2009 24(1):7-11.
- WU Qiong ,WANG Chong ,et al. Main propulsion plants for LNG (liquidified natural gas) tankers [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power 2009 24(1):7-11.
- [3] 中国船级社. 散装运输液化气体船舶构造与设备规范[S]. 人民交通出版 2008.
- China Classification Society. Bulk Liquefied gas tanker for ship construction and equipment specification [S]. People Traffic Press 2008.
- [4] 李 敏. 中小型 LNG 船 C 型独立液货舱温度场及应力场分析 [D] 广州: 华南理工大学 2013.
- LI Min. Analysis of temperature field and stress for independent C-type tank of the small and medium LNG carriers [D] ,Guangzhou: South China University of Technology 2013.
- [5] D. 拉达伊(德)著 熊第京等译. 焊接热效应 - 温度场、残余应力、变形[M]. 北京: 机械工业出版社 1997.
- RADAJD. Heat effects of welding: temperature field ,residual stress ,distortion [M]. Translated by XIONG Di-jing. Beijing: Machinery Industry Press 1997.
- [6] 孙文婷 ,万正权. 对接焊残余应力的有限元分析[J]. 船舶力学 2007 ,11(1):94-101.
- SUN Wen-ting ,WAN Zheng-quan. Finite element analysis of butt-welding residual stresses[J]. Journal of Ship Mechanics 2007 ,11(1):94-101.
- [7] 周 勇 ,谢 峰 ,等. 高温超导电机磁体支撑结构焊接残余应力分析及影响研究[J]. 武汉理工大学学报 2012 ,34(2):121-124.
- ZHOU Yong ,XIE Feng ,et al. Welding residual stress analysis and influence research of magnet supporting structure used in HTS motor[J]. Journal of Wuhan University of Technology 2012 ,34(2):121-124.
- [8] 上田幸雄 村川英一 麻宁绪(日)著 罗宇 ,王江超译. 焊接变形和残余应力的数值计算方法与程序[M]. 成都: 四川大学出版社 2008 28-30.
- YUKIO U ,et al. Numerical calculation method and procedure of welding deformation and residual stress [M]. Translated by LUO Yu ,WANG Jiang-chao. Chengdu: Sichuan University Press , 2008 28-30.
- [9] 鹿安理 史清宇 赵海燕 ,等. 焊接过程仿真领域的若干关键技术问题及其初步研究[J]. 中国机械工程 2000(2):201-205.
- LU An-li ,SHI Qing-yu ,ZHAO Hai-yan ,et al. Key techniques and some tentative research of welding process simulation [J]. China Mechanical Engineering 2000(2):201-205.
- [10] 丁 玲. 中小型 LNG 船 C 型独立液罐设计关键技术研究 [D]. 大连: 大连理工大学 2009.
- DING Ling. Design technology research on separated C-type liquefied tank of the small and medium LNG carriers [D]. Dalian: Dalian University of Technology 2009.
- [11] 李午申 ,白世武 ,等. 9Ni 钢焊接温度场的数值模拟[J]. 电焊机 2009(1):1-4.
- LI Wu-shen ,BAI Shi-wu ,et al. Numerical simulation of temperature field for 9Ni alloy steel welding [J]. Electric Welding Machine 2009(1):1-4.
- [12] 徐 琳. 角焊缝角变形数值预测方法研究 [D] ,武汉: 武汉理工大学 2007.
- XU Lin. Study on numerical prediction method for fillet weld' s angular distortion [D] ,Wuhan: Wuhan University of Technology , 2007.
- [13] 华一品. T 型接头焊接残余应力数值模拟及强度分析 [D] ,大连: 大连理工大学 2009.
- HUA Yi-pin. Numerical simulation of T-welding residual stress and strength analysis [D] ,Dalian: Dalian University of Technology 2009.
- [14] 龚曙光 ,谢桂兰. ANSYS 操作命令与参数化编程 [M]. 北京: 机械工业出版社 2004.
- GONG Su-guang ,XIE Gui-lan. ANSYS operation command and parametric programming [M]. Beijing: Machinery Industry Press 2004.
- [15] 宋天民. 焊接残余应力的产生与消除 [M]. 北京: 中国石化出版社 2004.
- SONG Tian-min. Generation and elimination of welding residual stress [M]. Beijing: Sinopec Press 2004.

( 单丽华 编辑)

A three-dimensional SCR reactor model of 660 MW coal fired unit was established by using Fluent coupled detailed reaction kinetics. The effects of different ammonia injection methods and the specific surface area of catalyst on the De-NO<sub>x</sub> reaction were studied by the model. The results show that when the catalyst is newly put into operation ,De-NO<sub>x</sub> reaction is mainly accomplished in the first layer catalyst ,while the second layer catalyst mainly plays a role in the absorption of ammonia. The De-NO<sub>x</sub> effectiveness is the same for both 30 and 10 area ammonia injection method. After the catalyst is operated for a period of time ,the De-NO<sub>x</sub> efficiency is reduced and the escape of ammonia is increased as the first catalyst suffers from clogging and wear. At this point ,the De-NO<sub>x</sub> effectiveness of the 30 area ammonia injection method is slightly better than that of 10 area ammonia injection method. **Key words:** selective catalytic reduction ,detailed reaction kinetics ,specific surface area ,ammonia injection method

基于机器视觉的锅炉蒸汽管道宏观位移在线测量方法 = **An Indirect Online Measuring Method for Boiler Steam Pipe Deformations based on Machine Vision** [刊 ,汉] LI Wen-sheng ( Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co. ,Ltd. ,Guangzhou ,China ,Post Code: 510080) ,SONG Ji-xiang ,FAN Shao-sheng ( Changsha University of Science and Technology ,Changsha ,China ,Post Code: 410004) ,WANG Wei ( Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co. ,Ltd. ,Guangzhou ,China ,Post Code: 510080) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31( 8) . -87 ~92

As a vital component of the steam-water piping system ,the steam pipes of the boiler usually work in an extreme environment of high temperature and pressure ,which can result in deformation and affect the safe operation of the thermal power unit. Additionally ,the spring hanger used to hang the pipe can also generate deformations. In this paper ,an indirect method of measuring the deformations of the main steam pipes was proposed based on the binocular stereo vision measurement theory. By selecting two representative points from the second part of the spring hanger and setting the midline of the steam pipe as the Y-axis ,a world coordinate system was created firstly. Then two high-definition cameras arranged in parallel were used for the real-time image acquisition. According to the theory of binocular stereo vision measurement ,the world coordinates of the two marked points can be obtained ,thus a straight line joining these two marked points can be made. Solving the system of equations consisting of pipe contour surface and the straight line yields the intersection point. Then the displacement of the pipe in all X ,Y and Z direction can be calculated by real-time monitoring the world coordinate of the intersection point. The results show that the macroscopic displacement of the boiler pipe can be accurately measured by this method and the device for realizing this method is also easy to be installed. **Key words:** binocular vision ,3D coordinates calculation ,boiler pipe ,macroscopic displacement

LNG 运输船独立液罐焊接残余应力分析 = **Welding Residual Stresses Analysis of LNG Tanks Used in LNG Carrier** [刊 ,汉] HUANG Feng-yu ( School of Energy and Power Engineering ,Wuhan University of Technology ,Wuhan ,Hubei ,China ,Post Code: 430063) ,Zhou Yong ( Wuhan Institute of Marine Electric Propulsion ,Wuhan ,Hubei ,China ,Post Code: 430064) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31( 8) . -93 ~98

In the process of building LNG ship ,the welding residual stress not only can induce the cracks of LNG Tanks ,but also can change the loading capacity of LNG Tanks when superimposed upon applied pressure. In order to obtaining mechanical behavior of welding process ,it is necessary to analyze the welding residual stresses of LNG Tanks with finite element method. Using axisymmetric model and Live-dead Element ,this study aims to investigate the distributions of the welding residual stresses in a LNG Tanks Used in LNG Carrier. According to the national standard ,the effect of the LNG tank groove size on residual stress distribution was studied ,and the effect of heat treatment to welding residual Mises stress was also discussed. The results indicate that with the increase of the groove depth ,the welding residual Mises stress first decreases and then increases ,and reaches the minimum when the groove depth is 6mm. Compared to the V and U type groove angles ,groove depth has more significant influence on welding residual Mises stress. In order to reduce the welding residual Mises stress ,it is suggested to choose a small groove depth and groove angle according to the actual structure and technology. The heat treatment can also reduce the residual Mises stress by 21% . These results provide a theoretical reference regarding the control of the welding residual stresses in the LNG tanks. **Key words:** LNG Tanks ,9Ni Steel ,Residual Stress ,Design of Weld Grooves ,Live-dead Element

太阳能辅助供热电站变工况特性研究 = **Off-design Performance of Solar Hybrid Heating Power Plant** [刊 , 汉] LI Shao-hua ,WANG Di ,CHE De-yong ,GAO Long ( Northeast Dianli University ,Jilin ,China ,Post Code: 132012) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(8) . -99 ~ 105

Upgrading the heating power plant by using of a complementary way of solar and coal can solve urban heating shortage and other issues caused by eliminating small units. Based on the design prototype of 12MW coal fired units ,the coal and solar complementary system model was established by using numerical simulation. The influence of solar radiation intensity and heat conduction oil temperature on the performance of the system was analyzed. A new solar energy complementary way was put forward ,and compared to the typical complementary way of replacing high pressure heater. The results showed that these two complementary ways can both increase generating capacity and heat supply quantity of units with the increase of the intensity of radiation. In the case of constant heat supply ,the total thermal efficiency gap of these two complementary ways can reach 10% . When the heat conduction oil temperature is higher than 350 °C ,the thermal efficiency of the solar energy direct heating system is higher. **Key words:** solar and coal complementary heating power plant ,radiation intensity ,heat conduction oil temperature ,coal saving rate , total thermal efficiency

基于氟塑料换热器的新型烟气余热深度回收技术研究 = **A New Technology for Deeply Flue Gas Heat Recovery based on the Fluorine Plastic Heat Exchanger** [刊 ,汉] HU Qing ,SUN Shao-peng ,JIANG Wen ,ZHU Wen-zhong ( Hangzhou Huadian Energy Engineering Institute ,Hangzhou ,Zhejiang ,China ,Post Code: 310030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(8) . -106 ~ 109

This article introduced a new technology for deeply flue gas heat recovery based on the fluorine plastic heat exchanger ,elaborated the principle and main characteristics of this technology ,and analyzed the economic performance