

厚板焊接残余应力的试验研究

黄晶¹ 刘宇光² 张涛¹ 谢凡¹

1 华中科技大学 船舶与海洋工程学院, 湖北 武汉 430074

2 天津市滨海市政建设发展有限公司, 天津 300050

摘要: 通过盲孔法, 测定了不同焊接接头、不同板厚、不同焊接工艺下厚板的焊接残余应力, 在考虑了塑性影响的基础上, 得到了厚板焊接残余应力的分布规律。分析讨论了焊接接头、板厚、焊接工艺以及焊接坡口大小对焊接残余应力分布的影响及原因。结果表明, 采用自由焊工艺, 可以减小焊接残余应力。而调整焊接顺序, 则可以改变焊接残余应力的峰值位置。合理设计承载面的坡口大小, 可以有效降低焊接残余应力对结构强度的影响。

关键词: 厚板; 焊接工艺; 结构强度; 残余应力; 盲孔法

中图分类号: U671.83; TG404

文献标志码: A

文章编号: 1673-3185(2009)05-33-05

Experimental Study on Welding Residual Stress of Thick Plate

Huang Jing¹ Liu Yu-guang² Zhang Tao¹ Xie Fan¹

1 School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China

2 Binhai Municipal Construction & Development Co., Ltd., Tianjing 300050, China

Abstract: With blind-hole drilling method, the welding residual stress of thick plate was measured under different welded joint types, plate thickness, and welding processes. Considering the plasticity effect, the distribution of welding residual stress in thick plate was obtained. Then, the effects of joint types, plate thickness, welding process, and groove dimensions on the welding stress distributions were discussed. The results show that: unconstrained structure can reduce the residual stress, and welding sequences adjustment can change the position of residual stress peak values, and proper groove dimensions can effectively reduce the effects of welding residual stress on the structure strength.

Key words: thick plate; welding process; structure strength; residual stress; blind-hole method

1 引言

为了确保焊接结构的安全, 掌握焊接残余应力的测试方法, 弄清焊接残余应力的分布规律, 研究减小残余应力的方法具有十分重要的意义。目前, 工程界和学术界已有很多专著和论文介绍了这方面的研究^[1-3]。测定残余应力的方法大致可以分为两类: 机械法和物理法。机械法包括切槽应力释放法、套孔应力释放法、逐层应力释放法、盲孔应力释放法等, 它们都是通过机械的方法将

应力释放出来供测量。物理法包括超声波测定方法、X射线测定法、电磁测定法、硬度法、开裂法、光测法、中子衍射法等。对测试方法如何评用, 大致可按下列要求作为衡量: (1) 对测试对象有无破坏; (2) 是否便于现场测试和快速测试; (3) 是测表面内还是表面外的残余应力; (4) 测试精度。

随着近代工业的发展, 大厚度钢结构在冶金、桥梁、船舶、压力容器等行业中的应用日益广泛。在船舶行业中, 各种大型船舶的甲板钢材均为厚板, 大型军舰的甲板厚度一般在 50 mm 以上。人

收稿日期: 2009-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(10702022)

作者简介: 黄晶(1986-), 男, 硕士研究生。研究方向: 水下工程。E-mail: huangjing0405@126.com

张涛(1976-), 男, 副教授。研究方向: 水下工程。E-mail: zhangt7666@hust.edu.cn

们对薄板中焊接残余应力的研究较多,但对大厚度结构中不同焊接接头的残余应力的分布规律及影响因素的研究并不多。由于厚度越大,钢板在焊接时受到的约束就越多,故大厚度钢板中的焊接残余应力通常很大。大厚度结构承受的载荷较大,焊接质量对结构强度的影响较大,所以焊接残余应力研究对提高结构疲劳强度和降低结构应力腐蚀意义重大。本文利用盲孔法,对板厚为 40 mm、50 mm、60 mm、80 mm 和 100 mm 的钢板不同的焊接接头形式的残余应力分布进行了测量,并分析了影响焊接残余应力分布的因素。

2 试验原理

盲孔法测试残余应力是一种半无损的测量方法,它是通过在试件表面钻一定深度的孔,测定钻孔后的释放应力来计算钻孔前的残余应力。设测点的应力状态如图 1 所示。

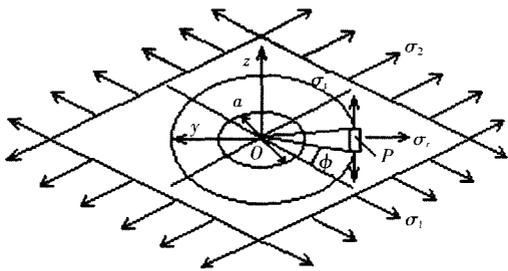


图 1 测点的应力状态

测点钻孔前和钻孔后的应力关系可用下式表示。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -\frac{a^2}{2r^2}(\sigma_1 + \sigma_2) + \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{a^4}{r^4} - \frac{2a^2}{r^2}\right)(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\phi \\ \sigma_t &= -\frac{a^2}{2r^2}(\sigma_1 + \sigma_2) - \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{a^4}{r^4} - \frac{2a^2}{r^2}\right)(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\phi \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, σ_1 和 σ_2 表示钻孔前测点的主应力; σ_r 和 σ_t 表示钻孔后测点的释放的径向应力和切向应力; a 为钻孔直径; r 为应变片至测点中心的距离。由应力应变关系,并考虑应变片的长度后,可得

$$\varepsilon_m = -\frac{1+\mu}{E} \cdot \frac{a^2}{2r_2r_1}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{2a^2}{Er_2r_1} \left[\frac{(1+\mu)a^2(r_1^2 + r_2r_1 + r_2^2)}{4r_1^2r_2^2} \right] (\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\phi \quad (2)$$

式中, r_1 、 r_2 为应变片前后两端到测点中心的距离; a 为钻孔直径。

$$\begin{aligned} \text{令 } A &= -\frac{(1+\mu)a^2}{2r_2r_1} \\ B &= \frac{2a^2}{r_2r_1} \left[\frac{(1+\mu)a^2(r_1^2 + r_2r_1 + r_2^2)}{4r_1^2r_2^2} - 1 \right] \end{aligned}$$

可简化为:

$$\varepsilon_m = \frac{A}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{B}{E}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\phi \quad (3)$$

数据处理时, A 、 B 值可以计算,也可以标定。

若用三向应变花,夹角分别为 0° 、 45° 、 90° ,则可求解得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{1,2} &= \frac{E}{4A}(\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}) \pm \frac{\sqrt{2}E}{4B} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{90} - \varepsilon_{45})^2} \\ \text{tg} 2\phi &= \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90} - 2\varepsilon_{45}}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

通常,将主应力换成垂直于焊缝方向的应力(横向应力,用 σ_y 表示)和平行于焊缝方向的应力(纵向应力,用 σ_x 表示)来进行研究,当应变片 0° 方向与焊缝垂直时,换算关系式为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos(2\phi) \\ \sigma_y &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos(2\phi) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

3 试验方案

3.1 试件和焊接工艺

试验中,所有的试件均由 $500 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times H$ 的钢板焊接而成, H 表示板厚,包括 40 mm、50 mm、60 mm、80 mm、100 mm 5 种。对每种板厚,均包括对接焊、角焊、T 型焊 3 种焊接接头形式。试件材料为 Q370qd,焊接材料为 H08Mn2E($\phi 5.0$) + SJ101q 采用 CO_2 气体保护焊进行焊接,电流 220 ~ 240 A,电压 24 ~ 26 V,焊速 240 ~ 260 mm/min,对焊材进行烘干处理,焊前使用火焰预热,预热温度 $130^\circ \sim 140^\circ$,焊后进行保温处理,层间温度 $140^\circ \sim 150^\circ$,背面用碳弧气刨清根。焊接时,坡口形式采用双面开坡口的不对称 X 形坡口。试验设备采用 HK-21B 型钻孔装置、DH-3818 静态应变测试仪和 BE120-2CA-K 应变花。

3.2 应变花贴片方案

从对薄板的现有研究成果可知,对于平板对接焊,残余应力在横向基本上是关于焊缝中心线对称分布的^[4]。在垂直于焊缝方向上,考虑到焊缝附近的残余应力的梯度变化较大,焊缝附近布片应较密。同时,残余应力值在焊缝中心线附近值都较大,故纵向沿焊缝布片。综合以上原因,从减小工作量出发,在焊缝一侧贴片,同时只在板宽中心线一侧贴片。而对角焊与 T 型焊,由于焊缝中心不易布片,只在垂直于焊缝方向布片,同时遵循离焊缝近处布片密集的原则。图 2 给出了各种焊接接

头的布片示意图。

图2中所有应变片均采用三向应变花,夹角分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 。其中 0° 应变片与焊缝中心线垂直, 90° 应变片为沿焊缝中心线。

图3为应变片按图2布片方案将应变花粘贴好,24 h后采用盲孔法测试应力,现场准备对试件进行钻孔。

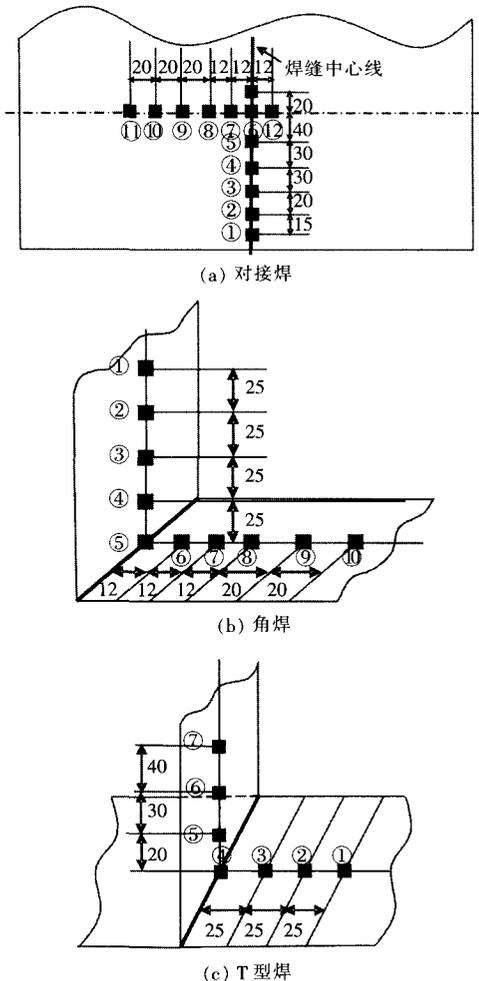


图2 贴片方案示意图



图3 准备钻孔

4 试验结果及讨论

按照用盲孔法测试残余应力的步骤进行试验,将测得的应变结果除去附加应变后按照式(4)

和式(5)转换为所需的应力结果。附加应变的研究在文献[5]中已有叙述,本次试验是对试件进行标定得到的。式(4)中的A、B值(A、B称为应变释放系数)也是由试验标定得到。由于钢板较厚,测得的残余应力值较大,所以需要考虑孔边塑性的影响。对孔边塑性的考虑,文献[6]~[9]分别从不同方面进行了分析和修正。本文按照文献[9]的方法,对结果进行了塑性修正,使盲孔法测量高残余应力的误差大大减小。同时为了减小钻孔时由于切削作用而产生的误差,在钻孔时采用了逐步扩孔的方法,可使试验误差由传统法的19.4%降到4.41%,大大提高了测试精度。另外,盲孔法只能测量试件表面的残余应力。对于薄板,可认为残余应力沿厚度线性分布,但对于厚板,残余应力沿试件厚度的分布并不均匀。文献[10]给出了厚板中残余应力沿厚度的分布规律,并提出了拟合公式。因此,试件表面的残余应力分布情况可以大致反映整个焊接接头的残余应力分布情况。

下面将就影响残余应力分布的因素进行讨论。以下各图中,横坐标 h 表示测点离焊缝中心线的距离,正负是为了区分左侧和右侧。

4.1 不同焊接接头中残余应力的分布

不同的焊接接头,由于受到自身的约束不同,残余应力的分布会有所不同。图4给出了40 mm板厚对接焊、角焊、T型焊3种焊接形式沿垂直于焊缝的残余应力分布。测点全部布在开了坡口的板上,并布在大坡口一侧。由图中可以看出,纵向应力基本上都是拉应力,在焊缝中心线附近有最大值,然后随离焊缝中心线的距离的增加而衰减至零附近;横向应力既有拉应力也有压应力,在焊缝中心附近取得最大值,然后随离焊缝中心线的距离的增加而衰减,并逐渐变为压应力。从应力水平上看,纵向应力要大于横向应力。同时,也可发现,对接焊的残余应力最小,角焊其次,T型焊最大。这可以从焊接时受到的自身约束来解释。对接焊时,由于焊接的两块钢板相同,因此,一块板对另一块板的约束几乎可以不考虑。对于角焊,由于两块板垂直,因此,会有一块板产生弯曲变形,相当于加大了对另一块板的约束。T型焊与角焊类似,但由于底板在立板的两侧而不是一侧都要产生弯曲变形,故其自身的约束更大。在焊缝区,残余应力值较高。这是由于焊材的强度要高于母材,且采用的是多层多道焊,使此区域的材料不断地加热、冷却,产生塑性变形,导致材料强化。对接焊在焊缝区残余应力值变化相对缓慢,而角焊与T

型焊在此区域变化很大。从图中还可以发现,残余应力的最大值并不正好在焊缝中心线上。这一方面与试验中不能准确确定焊缝中心线有关,另一方面,在熔合线处,两侧材料的强度不匹配,使残余应力值变大。由图4中角焊的残余应力的分布还可以发现,残余应力的最大值在熔合线处。由于焊缝区较小,布片不太方便,且受材料的强度匹配和塑性强化的影响,残余应力的分布非常复杂,残余应力值也较大。要完全弄清此区域的残余应力分布规律,需要做更深入的研究。

4.2 大坡口面与小坡口面残余应力的对比

对于厚板焊接,由于要达到焊透的要求,必须要开双面坡口。对于X型坡口,通常选用不对称坡口,即一面为大坡口,一面为小坡口。焊接时,一般先焊大坡口,再焊小坡口。图5给出的是80 mm自由对接焊的大坡口面和小坡口面沿垂直于焊缝的残余应力分布。可以很明显地发现,不论是纵向应力还是横向应力,相对于小坡口面而言,大坡口面的应力值总是要高,且残余应力影响范围要大。大坡口的纵向残余应力峰值超过了材料的屈服强度,而小坡口的纵向残余应力峰值在 $0.8\sigma_s$ 左右。残余应力的影响范围显然与坡口大小密切相关。文献[11]曾论述,在对称坡口的情况下,先焊面的残余应力峰值要小于后焊面的残余应力峰值。但

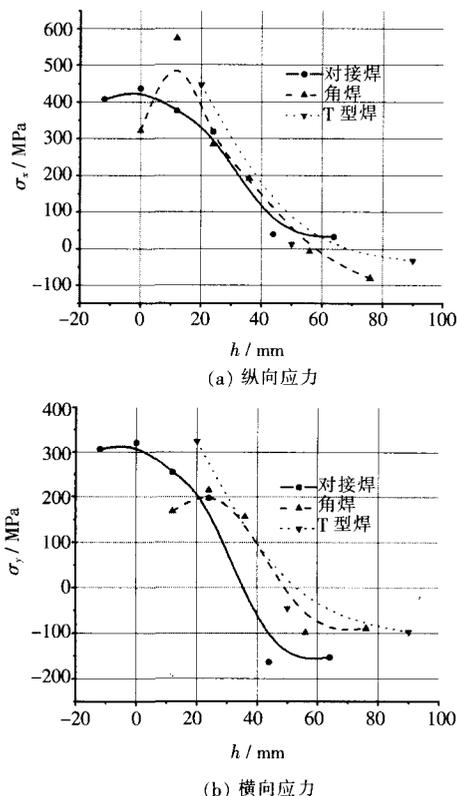


图4 3种焊接形式沿垂直于焊缝的残余应力分布

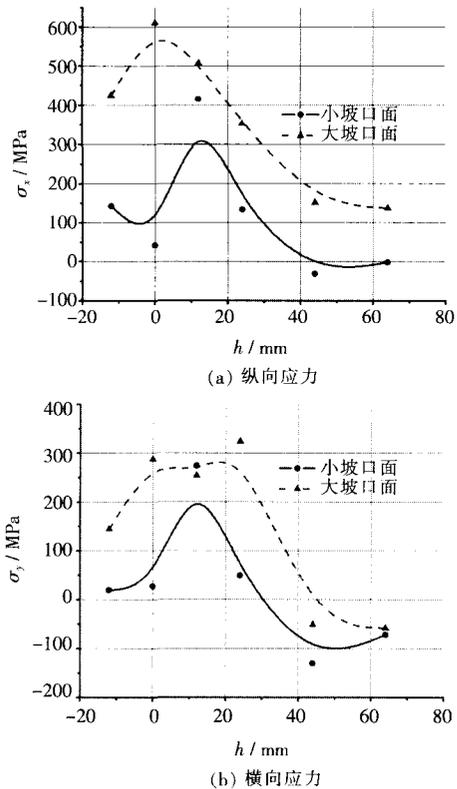


图5 大坡口面与小坡口面沿垂直于焊缝的残余应力分布

对于非对称坡口,图5表明,坡口的大小对残余应力有很大的影响。由于大坡口面填料多,输入的热量,受影响的范围也大,冷却时将会产生更大的收缩,因此导致大坡口面的残余应力要大于小坡口面。

4.3 自由焊与约束焊残余应力的对比

焊接时,为了保证两块钢板的相对位置不变,通常在焊前用马板将两块钢板固定,然后再对钢板进行焊接。若采用多道多层焊,则一般在焊完第一层后,两块钢板在焊接处已相连,相对位置已经固定。在接下来进行焊接时,有两种工艺措施:一是拿掉马板,再焊接,即无约束焊或自由焊;二是保留马板,继续焊,即约束焊。一般来说,由于约束焊增加了焊接过程中的约束,虽然使焊接变形有所减小,但会增加焊接残余应力。图6给出了80 mm板自由焊与约束焊沿垂直于焊缝的残余应力分布。从应力水平上看,图6能较好地说明约束焊残余应力大于自由焊残余应力。在焊缝区,自由焊的残余应力衰减很快,进入热影响区后纵向残余应力低于150 MPa(约为 $0.4\sigma_s$),而约束焊的残余应力在整个焊缝区都维持在较高的水平,接近材料的屈服强度,进入热影响区后才开始衰减。同时,无论哪种焊接措施,残余应力峰值均出现在焊缝熔合线处。图6(a)中峰值所在处一个在焊缝左

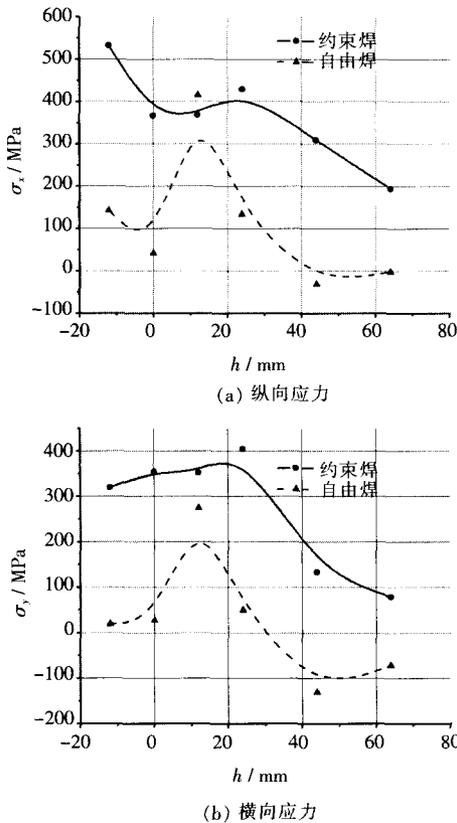


图 6 自由焊与约束焊沿垂直于焊缝的残余应力分布

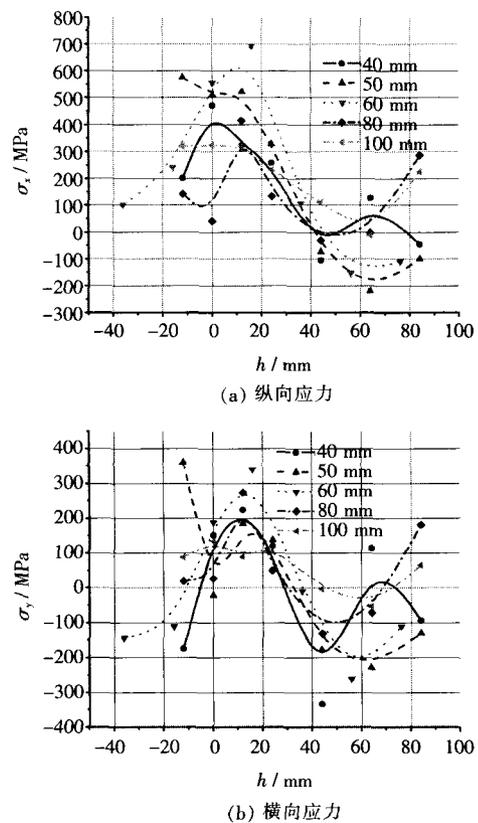


图 7 不同板厚对接焊沿垂直于焊缝的残余应力分布

侧,一个在焊缝右侧,说明焊接残余应力并不是沿焊缝中心线完全对称,会受到多层多道焊时焊接顺序的影响。由于先焊的一道焊会对后焊时产生约束,即后焊时的约束较大。因此,可以估计,焊接残余应力的峰值将会出现在后焊的焊缝熔合线处。

4.4 板厚对残余应力的影响

通常来说,焊接钢板越厚,焊接时受到的自身约束越多,焊接后的残余应力值就越大。但近来已有一些研究表明,焊接残余应力并不是完全随板厚的增加而增加。文献[11]作者认为,这是由于厚板采取了预热措施。事实上,现在对厚板进行焊接时,一般都会采取预热措施来减小焊接残余应力。图 7 给出的是平板对接自由焊不同板厚沿垂直于焊缝的残余应力分布。7 块板均采用了相同的工艺措施。整体上看,在板厚为 40 mm~60 mm 时,残余应力有随板厚的增加而增加的趋势,但 80 mm、100 mm 板反而较其他板残余应力小。从图 7 中各个板厚的残余应力的峰值来看,焊缝附近的残余应力基本上都接近或超过材料的屈服强度。并且,厚板中残余应力在厚度上的分布并不均匀。所以,如何有效地减小厚板中的焊接残余应力,值得做进一步的研究。

5 结 论

本文通过对厚板焊接残余应力的测试,讨论了影响焊接残余应力的几个因素,可以得到以下结论:

- 1) 大坡口面的焊接残余应力要大于小坡口面的焊接残余应力。因此,对于实际结构工程可以考虑将承受载荷较大的一面设计成小坡口;
- 2) 约束焊产生的残余应力要大于自由焊产生的残余应力。除非对焊接变形有很高的要求,否则,建议焊接时采用自由焊。

参考文献:

- [1] 周建新,徐宏,王俊胜,等. 薄板焊接残余应力尺寸效应[J]. 焊接学报,2006,27(3):96-100.
- [2] BAHADUR A,KUMAR B R,KUMAR A S,et al. Development and comparison of residual stress measurement on welds by various methods[J]. Materials Science and Technology,2004,20(2):261-269.
- [3] 赵怀谱,印兵胜,王晓洪. 机械法测残余应力的历史进展及盲孔法各种打孔方式简介[C]// 第十四届全国残余应力学术交流会论文,青岛,2007.
- [4] 王国凡. 钢结构焊接制造[M]. 北京:化学工业出版社,2004.

4 结论

1) 在计算机硬件和软件的支持下, 冷凝器管板分析与设计中采用有限元方法是非常可行且高效的办法, 与传统的规范设计方法相比, 不但可以真实地考虑法兰、螺栓等边界结构对管板的影响, 且可以充分地分析管板和换热管以及管板之间的相互作用。尤其可以实现对非对称布管方式管板的强度分析。这是传统方式不可能解决的问题。

2) 对复杂结构进行有限元模型建立时, 可采用强大的有限元前处理软件 HyperMesh 对网格进行划分, 充分运用有限元软件提供的各种模块, 不仅能大大地提高建模的效率, 而且可以对网格的质量进行严格的控制, 从而提高仿真计算精度。

3) 在对非对称布管方式的双管板进行有限元模拟时, 由于换热管数目众多, 可采用 shell 单元对换热管进行模拟, 这样不仅能大大减少网格数量, 从而节省计算时间, 也能在一定程度上提高计算精度。

4) 对非对称布管方式的双管板进行强度校核时, 不能像以往单管板校核时简单地选取典型考核路径, 应根据应力云图, 以响应较大的区域为重点, 在整个模型上布置考核路径, 综合分析, 这

样才能全面而准确地对非对称布管方式的双管板进行强度评估。

参考文献:

- [1] OSWEI F. 管板设计中的有效弹性常数概念的进展与综合[J]. 丛敬同, 宋伟业, 译. 化工设备设计, 1990, 27(2): 42-51.
- [2] 刘俊明, 陈绪. 高压厚管板的有限元分析计算[J]. 压力容器, 1997, 14(2): 25-29.
- [3] 刘海亮, 于洪杰, 徐鸿, 等. 高压给水加热器厚管板的有限元分析(一)——考虑管箱、壳体和换热管影响的管板有限元实体模型的建立及稳定温度场分析 [J]. 压力容器, 2004, 21(11): 19-22, 11.
- [4] 徐定耿, 叶维娟. 核电站蒸汽发生器管板三维有限元应力分析及其工程应用 [J]. 核科学与工程, 1990, 10(2): 160-168.
- [5] UKADGAONKER V G, KALE P A, AGNIHORTRIN A, et al. Review of Analysis of Tube Sheets [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1996, 67(3): 279-297.
- [6] 刘海亮, 于洪杰, 徐鸿, 等. 高压给水加热器厚管板的有限元分析(二)——考虑管箱、壳体和换热管影响的管板强度分析[J]. 压力容器, 2004, 21(12): 17-21, 28.
- [7] 季维英. 管壳式换热器管板应力的三维有限元分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [8] VANGI D, ERMINE M. Plasticity effects in residual stress measurement by the hole drilling method[J]. Strain, 2002, 36(2): 55-59.
- [9] 张小鹏, 王娜. 基于大型炉体焊接残余应力测试的盲孔法研究[J]. 力学与实践, 2007, 29(3): 45-49.
- [10] 葛森. 厚板焊接残余应力试验测量与计算[D]. 北京: 北京工业大学, 2002.
- [11] 谭伯聪, 谢德, 李荣锋, 等. 超厚钢板残余应力剖析[J]. 钢铁研究, 1993, (5): 35-38, 62.
- [5] 王世中, 欧阳宇平. 钻孔法测量残余应力过程中钻孔附加应变[J]. 实验力学, 1990, 5(3): 336-340.
- [6] 黄蓝林, 唐慕尧, 孟繁森. 焊接应力测量中 A、B 系数分级应用的研究 [C]//第六届全国焊接学术会议论文集, 第四集. 北京: 中国机械工程学会焊接学会, 1990.
- [7] ZHAO H Y, SHI Y W, PEI Y, et al. On the correction of plasticity effect at the hole edge when using the center hole method for measuring high welding residual stress[J]. Strain, 1996, 32(14): 125-129.

(上接第 37 页)