

文章编号 : 0258-0926(2015)06-0075-04 ; doi: 10.13832/j.jnpe.2015.06.0075

基于模拟件-产品件方法研究反应堆压力容器顶盖与多个 CRDM 管座焊接残余应力

杨 敏, 罗 英, 付 强, 李玉光

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计重点实验室, 成都, 610041

摘要: 提出模拟件-产品件有限元数值计算方法研究反应堆压力容器 (RPV) 顶盖与多个控制棒驱动机构 (CRDM) 管座焊接的残余应力分布。进行模型件制造和试验测试, 获得温度循环、残余应力等数据, 针对模拟件残余应力进行数值计算, 以试验数据标定模拟件模型和算法并进行优化, 最后将优化算法和模型应用于产品件的数值计算。将该方法用于包含 2 个非中心孔位置 J 型焊缝的 RPV 顶盖产品件焊接残余应力算。结果表明: 模拟件-产品件的研究方法可应用于核电大型焊接结构的残余应力高效数值分析, CRDM 管座焊缝之间的应力叠加效果不明显。

关键词: 焊接; 残余应力; 反应堆压力容器; J 型焊缝

中图分类号: TG404 **文献标志码:** A

Investigation of Welding Residual Stress in J-Weld between Reactor Pressure Vessel Head and Two Control Rod Drive Mechanism Nozzles Based on Mockup-to-Production Analysis Method

Yang Min, Luo Ying, Fu Qiang, Li Yuguang

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China

Abstract: A mockup-to-production method was proposed to investigate the welding residual stress induced by the welding of reactor pressure vessel (RPV) head and control rod drive mechanism (CRDM) nozzle. The mockup was built firstly, the welding temperature and residual stress were measured from the mockup; then the finite element simulation on the mockup was carried out and the simulated temperature and stress results were validated by the experimental data; based on the mockup, the simulation model and algorithms were further optimized and were finally used to simulate the residual stress of the product. The residual stress in the nuclear RPV head with two J-type welds at the locations of non-center hole were efficiently simulated with the proposed method. In addition, the superposition effect at the region between the two J-type welds were investigated. Results show that the mockup-to-production method is an efficient and effective method for the simulation of large nuclear welded structures; the superposition effect at the region between two J-type welds in RPV head is not significant.

Key words: Welding, Residual stress, Reactor pressure vessel, J-weld

0 前 言

反应堆压力容器 (RPV) 顶盖与控制棒驱动机构 (CRDM) 管座贯穿件 (以下简称贯穿件) J 型密封焊结构形式复杂, 焊接拘束度大, 焊后不经历消除应力热处理, 可能存在很大的焊接残余

拉伸应力。焊接残余拉伸应力是诱发 RPV 顶盖与贯穿件 J 型密封焊应力腐蚀裂纹 (SCC) 的关键因素^[1-2]。RPV 顶盖上 CRDM 管座数目多, 顶盖与 CRDM 管座 J 型密封焊缝间相隔很近, 各焊缝残余应力可能相互叠加, 使 RPV 顶盖的受力更加

复杂。此外,RPV 顶盖结构庞大,直接对产品件进行焊接应力分析效率低下甚至无法得到结果。因此,有必要采用行之有效的方法研究 RPV 顶盖与贯穿件 J 型密封焊缝的残余应力状态,为该类结构设计及力学分析提供参考,确保 RPV 承压边界的完整性。

本文提出从模拟件到产品件的研究方法,先进行模拟件制造和试验测试,然后基于模拟件探索 J 型焊缝高效有限元计算模型和计算过程,最后将其应用于包含 2 个 J 型密封焊缝的产品件应力数值计算,得到相邻 2 个 CRDM 管座与顶盖间 J 型密封焊缝焊接残余应力的分布特征。

1 模拟件-产品件研究方法

提出模拟件-产品件的数值研究方法,分为以下几步:

(1) 制造焊接模拟件,测试焊接过程热循环、电流电压参数和焊接顺序等信息;焊接结束后测试残余应力。这为后续数值计算提供热输入参数参考以及验证数值计算结果正确性的数据,为模型优化提供依据。

(2) 模拟件焊接应力数值计算,以模拟件建立三维有限元模型,以第(1)步测试得到的数据验证模型正确性,进一步优化数值计算模型方法。

(3) 以模拟件的优化模型为基础建立产品件模型,实现产品件多焊缝焊接残余应力数值计算,分析其应力分布状态。

2 模拟件制造及实验测试

用于模拟件制造的母材、焊接填充材料、坡口尺寸、装配间隙、冷装工艺、焊接工艺参数等均与实际产品一致。模拟件结构形式、尺寸和材料如图 1 所示,底板尺寸为 350 mm×400 mm。焊接方式为手工焊条电弧焊,每道焊接顺序为从下坡经侧坡焊至上坡,然后下坡经侧坡焊至上坡位置。焊接时测试下坡位置距坡口 16 mm 位置的温度循环(图 1 中 A 点),焊后采用小孔法测试管座外壁和试块焊缝下坡位置附近的残余应力。

3 模拟件计算和验证

3.1 有限元模型和计算过程

采用 ANSYS 有限元软件进行模型建立和计算。由于每道焊接都按照下坡到上坡的顺序焊接,

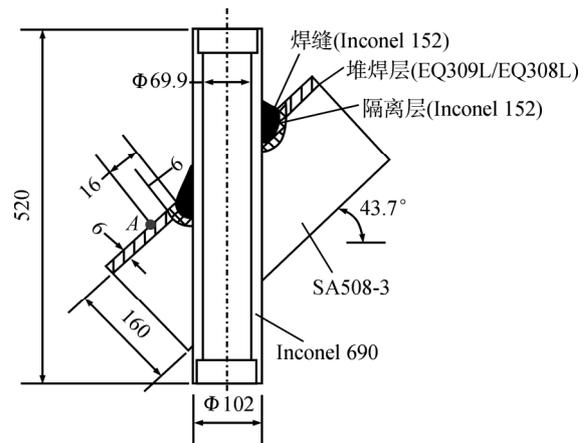


图 1 模拟件尺寸和材料

Fig. 1 Dimensions and Materials of Mockup

以模拟件一半建立有限元模型以减小计算规模。整个模型包含 23136 个单元,25875 个节点。焊缝区域单元尺寸约为 2 mm×2 mm×7 mm。

采用顺序耦合方法计算模拟件的焊接残余应力场,首先计算瞬态温度场,然后将温度场结果作为载荷加载在结构模型上进行静力学分析,最终获得焊接残余应力场。

计算时将 J 型坡口隔离层、焊缝金属和贯穿件材料视作相同的 Inconel 690 材料。随温度变化的材料性能来自文献[3~6]和试验测试。应力场计算时采用米塞斯屈服准则和双线性随动强化模型描述材料屈服后的力学行为。

结合给定温度热源方法^[7],采用带状移动温度热源^[8]计算焊接过程的温度场分布。试板和贯穿件的自由表面上施加对流边界条件(15 W·m⁻²·),对称面上采用绝热边界条件。应力场计算时,对称面施加对称边界条件,试板底部增加位移约束以保证计算过程中整个模型不发生刚性移动或转动。

3.2 模拟件计算结果验证

表 1 所示为下坡位置距坡口 16 mm 位置(图 1 中 A 点)测试和计算各道焊接温度峰值。

从表 1 中看出,试验测试结果和计算结果比较接近,两者峰值温度差距小于 62。测试点第 7 道焊接的计算和测试温度循环见图 2。

图 2 中看出,第 7 道焊接计算和测试的温度变化曲线非常接近,特别是升温 and 冷却阶段的温度变化梯度试验和计算结果符合较好。表 1 和图 2 结果说明本文计算得到的温度结果较准确。

表 1 各道测试温度峰值和计算结果比较
Table 1 Measured and Simulated Peak Temperature

焊道	计算峰值温度/	试验峰值温度/
4	91	55
5	91	153
6	50	59
7	214	209
8	53	87
9	225	191
10	55	69
11	174	192
12	88	60

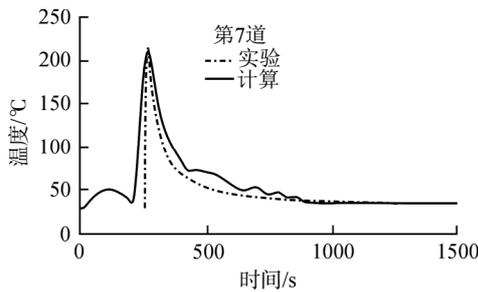


图 2 测试温度和计算比较

Fig. 2 Comparison of Measured and Simulated Temperature Curves

焊缝下坡位置管子外表面上计算的残余应力和试验测试结果见图 3。

从图 3 中看出，管子焊缝区域的轴向和环向应力为较大拉应力，远离焊缝区域残余应力迅速降低。计算的应力结果和实验测试结果符合较好。

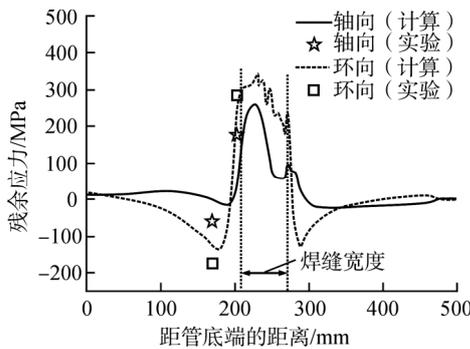


图 3 下坡位置管外表面残余应力分布
Fig. 3 Residual Stress Distribution on Tube Outer Surface at Downhill Location

3.3 模拟件计算模型优化

为了提高计算效率，实现产品件焊接应力计算，在模拟件计算结果经过验证基础上，对模拟件焊道简化方式进行优化。将 18 道焊接简化为 10 道和 5 道焊接，比较 3 种焊道模型的应力计算结果。

计算结果表明，简化为 5 道焊接计算的高于

200 MPa 的轴向和环向拉应力分布宽度比 18 道焊接和 10 道焊接模型计算应力分布宽度大，而简化 10 道焊接计算结果与 18 道焊接计算结果基本一致。可见过度简化焊道会造成计算的高拉应力分布区域增加。为保证产品件计算精度，将包含两管座焊接的产品件的每处 J 型焊缝简化为 10 道焊接进行计算。

4 产品件计算

4.1 计算模型

为进一步简化模型，选择 RPV 顶盖 1/8 部分建立产品件模型，顶盖包含最外沿位置和相邻位置的两 CRDM 管座焊接。整个模型包含 77670 个节点，69364 个单元。焊缝区域细化网格，最小单元尺寸约为 2 mm×2 mm×7 mm；两管座的长度分别为 924 mm 和 737 mm。

采用经验证的模拟件模型网格密度、带状移动温度热源、焊道分段和焊道简化方式，以模拟件相同的材料模型、边界条件，经热力顺序耦合有限元方法计算包含 2 个 CRDM 管座 J 型焊缝的焊接残余应力。

4.2 计算结果和分析

整个产品件的残余应力主要出现在焊缝及周围区域，且焊趾和堆焊层交界处出现较大拉应力；管内壁上坡和下坡位置对应于坡口区域的轴向应力为较大压应力，管座焊缝盖面区域呈现拉应力；顶盖焊缝周围的应力较小，特别是邻近坡口底部的区域出现较大的压应力。整个焊缝区域、顶盖堆焊层区域和对应焊接区域的管内外壁的等效应力幅值较高，分布在 300~450 MPa 之间。

为研究两管座焊缝之间残余应力叠加效果，给出两焊缝之间的残余应力分布（图 4）。

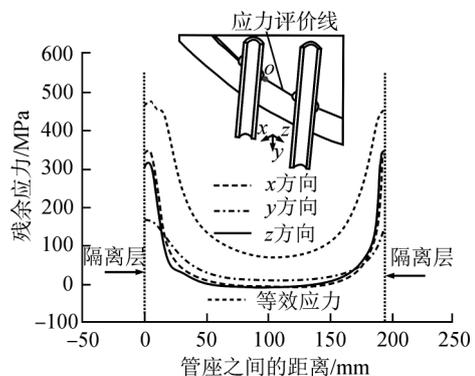


图 4 两管座焊缝之间区域的残余应力分布
Fig. 4 Residual Stress Distribution between Two Nozzle Welds

从图 4 看出, 两管座中间位置区域各方向残余应力很小, 等效应力值为 70 MPa 左右, 说明两管座焊接的残余应力叠加效应不明显。

5 结 论

(1) 采用模拟件-产品件研究方法, 可实现大型核电结构焊接残余应力的有限元数值预测。

(2) RPV 顶盖与 CRDM 管座焊接的整个焊缝区域、顶盖堆焊层区域和对应焊接区域的管内外壁的等效应力幅值分布在 300~450 MPa 之间。

(3) 相邻两 CRDM 管座 J 形密封焊缝之间的残余应力叠加效应不显著。

参考文献:

- [1] Rudland D, Chen Y, Zhang T, et al. Comparison of welding residual stress solutions for control rod drive mechanism nozzles[C]. Proceeding of PVP2007, 2007 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, San Antonio, Texas, USA, 2007.
- [2] Ogawa K, Deng D, Kiyoshima S, et al. Investigations on welding residual stresses in penetration nozzles by means of 3D thermal elastic plastic FEM and experiment[J]. Computational Materials Science, 2009, 45(4): 1031-1042.
- [3] Masahito M, Kunio E, Noriaki O, et al. Welding residual stresses at the intersection of a small diameter pipe penetrating a thick plate[J]. Nuclear Engineering and Design, 1993, 144(3): 439-447.
- [4] Deng D, Ogawa K, Kiyoshima S, et al. Prediction of residual stresses in a dissimilar metal welded pipe with considering cladding, buttering and post weld heat treatment[J]. Computational Materials Science, 2009, 47(2): 398-408.
- [5] Ure J, Chen H, Tipping D. Calculation of a lower bound ratchet limit part 2 Application to a pipe intersection with dissimilar material join[J]. European Journal of Mechanics A/Solids, 2013, 37: 369-378.
- [6] Muránsky O, Smith M C, Bendeich P J, et al. Validated numerical analysis of residual stresses in Safety Relief Valve (SRV) nozzle mock-ups[J]. Computational Materials Science 2011, 50 (7): 2203-2215.
- [7] Cho R, Lee B Y, Moon Y H, et al. Investigation of residual stress and post weld heat treatment of multi-pass welds by finite element method and experiments.[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155-156: 1690-1695.
- [8] 方臣富, 王海松, 刘川, 等. 缆式焊丝 CO₂ 气体保护焊接头残余应力高效数值计算和试验[J]. 焊接学报. 2012, 33(5): 17-20.

(责任编辑: 杨洁蕾)