

DOI: 10.3901/JME.2009.09.291

机械应力消除法对焊接残余应力的影响

徐济进 陈立功 倪纯珍

(上海交通大学材料科学与工程学院 上海 200240)

摘要: 大直径全焊接阀体球阀制造的最后一道工序是焊接, 由于采用橡胶圈密封, 为防止密封圈损坏, 导致密封性能降低, 焊后不能采用焊后热处理消除焊接残余应力。为了控制阀体焊接残余应力, 选择机械应力消除法, 建立阀体机械应力消除法的加载压力与时间的关系曲线, 采用有限元分析和试验相结合的方法, 研究机械应力消除法对焊接残余应力的影响。机械应力消除法前后采用盲孔法测量阀体外表面的残余应力。结果表明, 采用二维轴对称有限元法可以模拟机械应力消除法过程, 机械应力消除法可以降低阀体外表面轴向应力和环向应力的峰值, 使残余应力分布更加均匀, 可以作为焊后热处理的替代工艺。

关键词: 机械应力消除法 焊接残余应力 有限元法 全焊接阀体球阀

中图分类号: TG404

Effect of Mechanical Stress Relieving Method on Welding Residual Stress

XU Jijin CHEN Ligong NI Chunzhen

(School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: For big diameter full welded body ball valve, welding is the last process. Because it is sealed with rubber grommet, in order to prevent the grommet from damaging and assure the tightness, post-weld heat treatment (PWHT) method cannot be used to relieve the residual stress. Therefore, mechanical stress relieving method (MSR) is selected to control the welding residual stress of valve body and the relationship between load and time is established. The effect of mechanical stress relieving method on the welding residual stress is researched through both finite element method (FEM) and test. The residual stresses on the outer surface of valve body are measured using the blind hole drilling method before and after welding. The results show that the mechanical stress relieving method can be simulated by 2-D axisymmetric finite element method. MSR treatment can decrease the peak value of axial residual stresses and hoop residual stresses on the outer surface and make the residual stresses distribution more uniform. MSR treatment can replace the PWHT method to relieve the residual stress.

Key words: Mechanical stress relieving method Welding residual stresses Finite element method Full welded-body ball valve

0 前言

焊接残余应力和变形, 一直是国内外焊接学者们关注的焦点问题。自从出现焊接技术以来, 人们就已经注意到在焊接结构的生产、制造过程中不可避免的产生焊接残余应力和变形^[1]。焊接残余应力和变形不但可能引起焊接工艺缺陷, 而且在一定条件下将影响结构的承载能力: 诸如强度, 刚度和受压稳定性; 除此以外还影响到结构的加工精度和尺

寸稳定性。因此, 一直以来, 焊接学者们不断的探索对焊接残余应力和变形的控制、调整和减小的工艺方法和措施。

根据 ASME 压力管道规范 B31^[2]和我国钢制压力容器焊接规程^[3]的要求, 当材料厚度大于 38 mm 时, 需对其进行焊后热处理(Post weld heat treatment, PWHT), 其目的是去氢、消除焊接残余应力和恢复材料塑性。和其他方法相比, 焊后热处理消除焊接残余应力被认为是最有效的^[4]。图 1 是全焊接阀体球阀的装配图, 从图 1 中可以看出, 全焊接阀体球阀的制造是将阀心、阀体、连接体和密封圈等部件装配完之后, 采用焊接的方法将阀体和连接体连成

一体。由于焊接是最后一道工序,为了保证焊接变形不得影响阀心的转动和阀门的密封,必须采取措施控制焊接变形和残余应力,保证焊接结构尺寸的稳定性,提高焊接结构使用安全性。根据文献[5],阀体最大残余拉应力分布在阀体外表面,而内表面呈现出压应力,为了确保结构的承载能力以及抗腐蚀性能,主要降低阀体外表面的残余拉应力。可是由于全焊接阀体球阀采用橡胶密封圈密封,因此为了防止密封圈的损坏,导致密封性能降低,焊后不能采用热处理进行消应力。

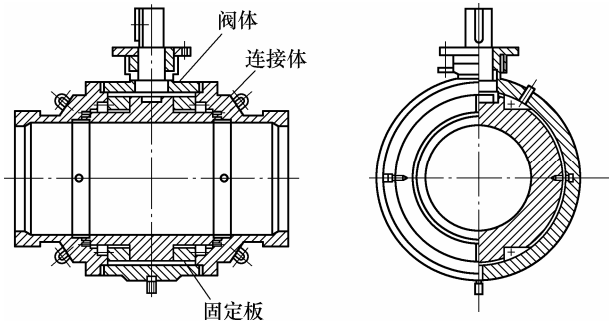


图 1 焊接阀体球阀装配图

在大的压力容器和管道焊接中,机械应力消除法(Mechanical stress relieving, MSR)经常被认为是一种更方便更经济的应力消除法^[6-7]。根据 ASTM A 105/A 105M-01 标准^[8]规定,对于焊接阀体阀门,焊后必须进行工作压力下的水压试验,检验焊接阀门的密封性。本文在水压试验的基础上,建立了阀体机械应力消除法试验加载压力与加载时间的关系,采用有限元模拟和试验测量相结合的方法研究机械应力消除法对阀体焊接残余应力的影响。

1 机械应力消除法

1.1 消应力原理

机械应力消除法是在焊接结构中施加外部压力,焊接残余应力和外部压力叠加,由于较高残余应力的地方不能再承受任何外部压力而产生塑性变形,当外部压力去除之后,导致焊接残余应力减小^[4]。

图 2 是拉伸应力区机械消除应力过程中的应力应变关系。假设某点的焊接残余应力在图 2 中所对应的点为 $(\varepsilon_0, \sigma_0)$,在机械应力消除过程中,外加压力与残余应力叠加,当应力超过材料的屈服点 σ_s ,到达 σ_p 时,导致塑性变形;加载过程是弹塑性变形,而卸载只是弹性过程,因此当外部载荷去除之后,塑性变形恢复到原始应变状态,到达点 $(\varepsilon_0, \sigma_r)$ 。因此,施加机械拉力可以使残余应力从 σ_0 降低到 σ_r 。

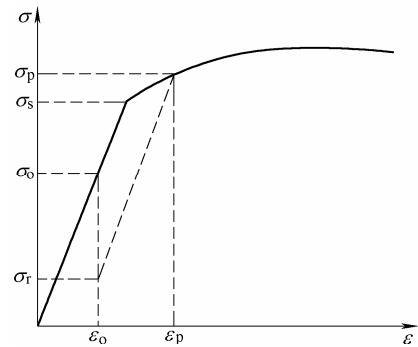


图 2 机械消除应力过程中的应力应变关系

1.2 加载压力与时间的关系

全焊接阀体球阀的工作压力为 10 MPa,机械应力消除法的外加压力为工作压力的 1.5 倍,即 15 MPa。根据阀体结构的尺寸和日本《载油舱机械应力消除法及水压试验》^[9]说明,设计了阀体机械应力消除试验加载压力与时间的曲线图,如图 3 所示。从图 3 中可以看出,机械应力消除法试验需要进行四步。

(1) 首先以一定的加载速率将水压加载到设计压力,然后保持 10 min 左右,接着继续以该加载速率将水压加到试验压力,然后将压力以一定的卸载速率逐渐降低到 0 MPa。

(2) 再将水压以一定的加载速率加到试验压力,随后以一定的卸载速率逐渐降低到 0 MPa。

(3) 以一定的加载速率增加水压到应力释放压力,在加压过程中分别在 3 MPa、设计压力和密封试验压力三个地方各保持 10 min,加到应力释放压力后,保持 30 min,然后将压力以一定的卸载速率逐渐降低到 0 MPa。

(4) 以一定的加载速率将水压加载到设计压力,保持 10 min 之后,以一定的卸载速率逐渐 0 MPa。

第一步和第二步是为了确保试验过程各部分受力均匀,第三步加载到应力释放压力降低焊接残余应力,第四部加载到试验压力保存 10 min,检查阀体的密封性能。

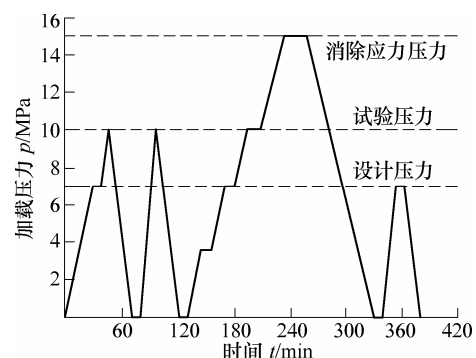


图 3 加载压力与时间的关系

1.3 加载方式

机械应力消除试验压力加载方式通常有三种。

- (1) 在筒体内表面加载一个径向压力。
- (2) 在筒体外表面加载一个径向压力。
- (3) 在筒体端部加载一个轴向拉力。

研究^[4, 10]表明：在筒体内表面加载一个径向压力对残余应力降低效果最好。因此，根据加载压力与时间的关系，在阀体内表面加载一个径向压力，采用有限元计算和试验测量的方法分别研究了阀体的机械应力消除试验对外表面焊接残余应力的影响。

2 机械应力消除法的有限元模拟

机械应力消除法尽管是一种比较有效的应力消除方法，但是关于该方法的研究一直比较少。对于机械应力消除法有限元模拟，需要进行三步计算。

(1) 采用非线性瞬态热分析计算焊接温度场分布。

(2) 根据焊接温度场分布的结果，采用非线性结构分析计算焊接残余应力分布。

(3) 在焊接残余应力计算结果的基础上，采用弹塑性有限元法进行二次计算，分析加载后的残余应力分布。

为了减少计算的时间，采用了二维轴对称模型进行计算，阀体焊接结构及焊道顺序见图4，计算模型见图5。选用高斯分布的热源模型，热流分布见公式(1)。

$$q(r) = q_m \exp\left(-3\frac{r^2}{\bar{r}^2}\right) \quad (1)$$

式中 r 为离开热源中心的距离； \bar{r} 为电弧有效加热半径； q_m 为最大比热流。

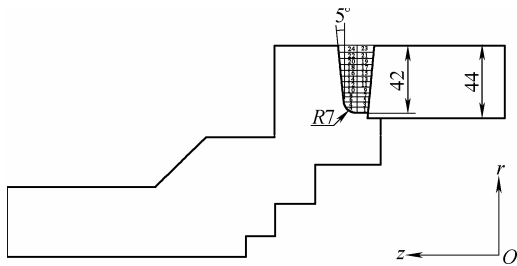


图4 阀体结构及焊道顺序

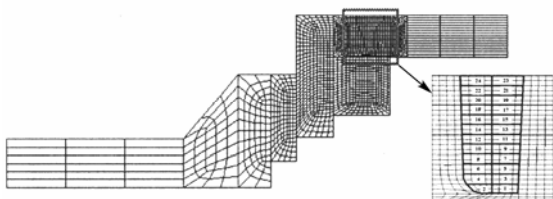


图5 阀体有限元计算模型

因边界换热而损失的热能可表示为

$$q_s = \alpha_h (T - T_a) \quad (2)$$

式中 T_a 为周围介质温度； α_h 为换热系数。

焊接弹塑性应力应变本构关系为：材料的屈服服从 Von-Mises 屈服准则，塑性区内的行为服从流变法则并显示出应变硬化，应力应变在微小的时间增量内呈线性变化。应力应变间的本构方程为

$$d\sigma = D_{k1}(d\varepsilon_{k1} - d\varepsilon_{k1}^p - d\varepsilon_{k1}^c - d\varepsilon_{k1}^T) \quad (3)$$

式中 D_{k1} 为弹性本构张量系数， $d\varepsilon_{k1}$ 、 $d\varepsilon_{k1}^p$ 、 $d\varepsilon_{k1}^c$ 和 $d\varepsilon_{k1}^T$ 分别为总应变、塑性应变、蠕变应变和热应变。由于采用二维轴对称模型，其边界条件只须在模型的右侧端施加轴向约束(z 方向)，而径向(r 方向)不须施加约束。

阀体选择的材料是 A105 锻钢，其与温度相关的热物理参数见图 6^[11]。

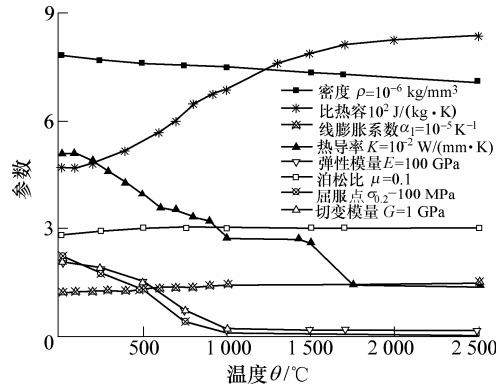


图6 A105 钢的热物理参数

对于多层多道焊的有限元计算采用生死单元技术实现填充材料的逐步填充。在开始计算前，将焊缝中所有单元杀死，相当于焊前的装配状态。在计算过程中，按顺序将被“杀死”的单元“激活”，模拟焊缝金属的填充。同时，给激活的单元施加生热率，热载荷的作用时间等于实际焊接时间。在有限元计算中，“杀死”有限元模型中的单元并不是将该单元从模型中删除，只是将其热传导矩阵乘以一个很小的因子，死单元的热载荷、质量和比热容设为零。同理，单元的“出生”也不是将它加入到模型中，而是重新激活它，使单元的比热容、热传导和质量等恢复到原始状态。

3 阀体机械应力消除法试验

根据图 3 加载压力与时间的关系，进行了焊后阀体的机械应力消除试验。试验前，采用盲孔法测量阀体外表面焊缝的残余应力；采用橡胶圈将阀体的两头密封，然后用水压试验装置将阀体两头压住，

使用水压控制装置控制水压增长速率和阀体内部的压力。图 7 为阀体的机械应力消除试验装置图。机械应力消除试验结束后,采用盲孔法再次测量阀体外表面两条焊缝处的残余应力。图 8 为残余应力测量图。



图 7 阀体水压试验装置

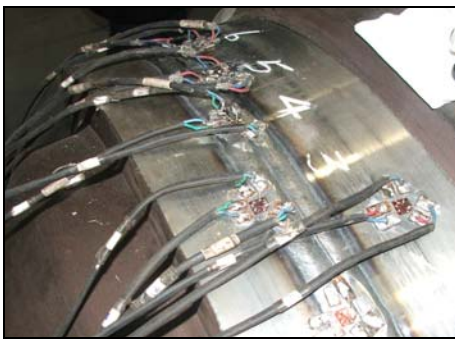


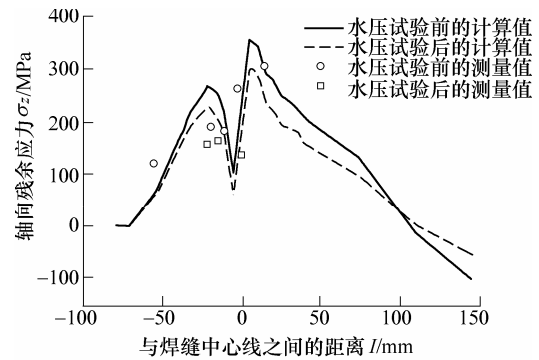
图 8 残余应力测量

4 结果及讨论

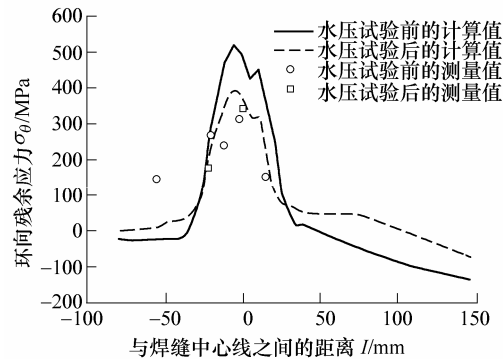
图 9 为机械应力消除法前后筒体外表面轴向应力和环向应力的比较图。从图 9 中可以得出以下两点结论。

(1) 有限元计算值和试验测量值比较吻合,轴向应力和环向应力基本表现为拉应力,远离焊缝中心的地方出现了数值较小的压应力。同时从图 9 中可以看出,轴向残余应力和环向残余应力分别有两个应力峰值,这是因为每层焊接两道焊缝,从而造成两个焊缝中心所引起的。

(2) 机械应力消除法降低了焊缝及附近区域的轴向和径向拉应力,对于远离焊缝中心的区域,轴向和径向压应力也减小。焊接残余应力的分布总是处于拉应力和压应力的平衡状态,焊缝中心及其附近区域存在高的拉应力,而远离焊缝区域存在压应力。焊接时,焊缝金属受热膨胀,由于受到外围固态金属的约束而表现为压应力,当冷却时,焊缝金属收缩,由于受到外围固态金属的约束,焊缝及其附件区域表现为拉应力。为了达到内部应力的自平



(a) 轴向残余应力



(b) 环向残余应力

图 9 机械应力消除法前后的残余应力比较

衡,压应力区域将向焊缝中心外移动。由于焊缝及附近区域焊接产生的热应力较大,当叠加一个工作应力后,应力值超过材料的屈服点,材料发生局部塑性变形,卸载后,塑性变形要恢复到原始应变位置,从而降低轴向和径向拉应力,为了达到内部应力的自平衡,远离焊缝中心区域的轴向和径向压应力也减小。因此,机械应力消除法明显地可以降低阀体外表面焊接残余应力峰值,使残余应力分布更加均匀,可以作为焊后热处理的替代工艺。

5 结论

(1) 建立了阀体机械应力消除法试验加载压力与时间的关系图,采用有限元计算及试验测量研究了机械应力消除法对阀体焊接残余应力的影响。

(2) 采用二维轴对称有限元法可以模拟机械应力消除法过程。

(3) 机械应力消除法可以降低焊接残余应力峰值,使焊接残余应力分布更加均匀,可以作为焊后热处理的替代方法用于控制焊接残余应力。

参 考 文 献

- [1] 董俊慧. 管道环焊缝接头焊接应力应变数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2000.

DONG Junhui. Finite element analysis of welding

- stress-strain in a girth-butt welded pipe[D]. Tianjin: Tianjin University, 2000.
- [2] ASME B31.1-2001 ASME code for pressure piping—Power piping[S]. The American Society of Mechanical Engineers, 2001.
- [3] JB/T 4709-2000 钢制压力容器焊接规程[S]. 国家机械工业局, 2000.
- JB/T 4709-2000 Welding specification for steel pressure vessels[S]. State Bureau of Machine Building Industry, 2000.
- [4] YANG Y S, LEE S H. A study on the mechanical stress relieving in a butt-welded-pipe[J]. International Journal of Pressure Vessel and Piping, 1997, 73: 175-182.
- [5] 徐济进. 全焊接阀体球阀焊接温度、变形及残余应力的预测及控制[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- XU Jijin. Prediction and control of temperature, distortion and residual stress of full welded-body ball valve[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [6] ODA I, SAKAMOTO H. Effects of mechanical stress relieving on deformation fields near cracks in weldments[J]. Welding International, 1993, 3: 195-199.
- [7] MERCHANT H C. Productive application of mechanical vibrations[R]. In proceeding of Winter Annual Meeting of American Society of Mechanical Engineers. Phoenix, Arizona. 1982.
- [8] ASTM A 105/A 105M-01 Standard specification for carbon steel forgings for piping application[S]. 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA19428-2959, United States, 2001.
- [9] Cargo tank-mechanical stress relieving and hydrostatic testing[S]. Tractebel Gas Engineer. Sanoyas Hishino Meisho CO., Japan. 2005.
- [10] MUHAMMAD S, MUHAMMAD A. Numerical simulation of mechanical stress relieving in a multi-pass GTA girth welded pipe-flange joint to reduce IGSCC[J]. Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2005, 13: 1 383-1 402.
- [11] XU J J, ZHU Z Q, CHEN L G, et al. Study of temperature distribution and residual stresses during multipass welding of thick plates with narrow gap [J]. Materials Science and Technology, 2006, 22(2): 232-236.
-
- 作者简介: 徐济进, 男, 1979年出生, 博士, 助理研究员。主要从事焊接变形及残余应力的预测及控制, 发表论文20余篇。
- E-mail: xujijin_1979@sjtu.edu.cn