

# 基于 SYSWELD 的 CTB&SBB 真空壳体的焊接仿真分析

王开松<sup>1</sup>, 朱瑞<sup>1</sup>, 刘素梅<sup>2</sup>, 宋云涛<sup>2</sup>

(1.安徽理工大学机械工程学院,安徽淮南 232001;2.中国科学院等离子体物理研究所,安徽合肥 230031)

**摘要:**国际热核实验反应堆 ITER 计划是研究可控核聚变的一个大型国际研究合作项目。线圈终端盒(CTB)和 S 弯盒(SBB)是保证 ITER 装置可靠运行的关键部件之一,作用是为磁系统与其他系统相联接提供接口和屏蔽保护。其外壳则要为 CTB 和 SBB 的内部部件提供真空环境。因此壳体的焊接品质直接影响着装置的安全稳定运行。本文利用双椭球热源模型,采用有限元分析软件 SYSWELD,对 CTB&SBB 外壳原型件的 MIG 焊接工艺进行了仿真数值模拟,得到其变形及残余应力值。分析结果表明,此 MIG 焊接工艺适合 CTB&SBB 真空壳体的焊接。

**关键词:**国际热核实验反应堆;热源模型;有限元分析;数值模拟

中图分类号:TH123.4;TG404

文献标识码:A

文章编号:1001-3814(2013)13-0183-03

## Welding Simulation Analysis on CTB&SBB Vacuum Shell Based on SYSWELD

WANG Kaisong<sup>1</sup>, ZHU Rui<sup>1</sup>, LIU Sumei<sup>2</sup>, SONG Yuntao<sup>2</sup>

(1. Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

**Abstract:** International thermonuclear experimental reactor (ITER) plan is the study of controlled nuclear fusion in a large international research cooperation projects. Coil terminal box (CTB) and S-bend box (SBB) are the key components to ensure the reliable operation of ITER, and their function is to provide the interface and the shielding protection for the magnet system connected to other system smoothly. The shell of CTB&SBB is to provide a vacuum environment for the internal components. Therefore, the welding quality of the shell affects the security and stability of the running device directly. The numerical simulation for MIG welding process of CTB&SBB prototype shell is fulfilled by double-ellipsoid heat source modeling based on the finite element analysis software SYSWELD, then, the welding deformation and residual stress is obtained. The results show that the MIG process is adapted to the vacuum shell welding.

**Key words:** ITER; heat source model; finite element method; numerical simulation

国际热核实验反应堆 ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) 计划是研究可控核聚变的一个大型国际研究合作项目。线圈终端盒 CTB (Coil Terminal Box) 和 S 弯段 SBB(S-Bend Box) 是 ITER 超导托卡马克装置中超导馈线系统(Feeder)的重要组成部分,其位于杜瓦和生物屏蔽层的外侧,为磁体馈线系统中的管、缆、线分别与低温车间、电源大厅以及数据收集系统的相联接提供接口和屏蔽保护,并容纳超导母线的 S 弯结构,为超

导母线在装置降温运行时的收缩位移提供保护。CTB&SBB 壳体最外部为 300 K 室温的壳体,内设 80~100 K 冷屏,壳体内部工作区域为真空、4 K 低温环境<sup>[1]</sup>。壳体内部采用独立的真空空间,真空状态是通过插板阀处连接的真空泵抽真空获得的。正常工作时,CTB&SBB 壳体内的真空度可达  $10^{-6} \sim 10^{-7}$  Pa,故障态时的内外压力差为  $6 \times 10^4$  Pa。而 CTB&SBB 真空壳体原型件的尺寸约为 8000 mm×1500 mm×1300 mm,由 40 mm 厚的 304L 不锈钢板焊接而成。

在焊接真空壳体时,控制其焊接变形是尤为重要的。整个壳体需在四角处进行焊接,总长度接近 8 m。通过使用 SYSWELD 有限元分析软件,得到所需焊接位置的变形及应力值的数值分析结果,此结果将为相应的焊接工艺是否能够达到要求提供依据。

收稿日期:2013-01-06

基金项目:国家 973 计划项目(2008CB717900);ITER 计划专项支持项目(2008GB102000)

作者简介:王开松(1969-),男,安徽合肥人,教授,硕士研究生导师,博士,主要从事机械设计及理论的科研和教学工作;

电话:0554-6633019;E-mail:6668978wks@163.com

## 1 焊接工艺

CTB&SBB 真空壳体的原型件由 4 块不锈钢板在对角线处焊接而成,如图 1。因其内部为真空环境,有较高的安全等级,故整个壳体为全焊接结构。此焊接对于整个壳体的对角线变形有较高要求;对角线方向变形不超过 $\pm 5$  mm。考虑到近 8 m 长度的钢板的平面度,应该将对角线处的焊接变形控制在 $\pm 3$  mm 以内。

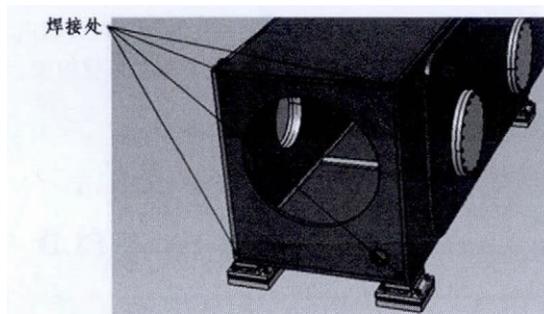


图 1 真空壳体的焊接位置  
Fig.1 Welding position of vacuum shell

根据产品需求及实际的工艺试验,焊接采用自动熔化极惰性气体保护电弧焊(MIG 焊)工艺,焊接处开 U 型带钝边的坡口(如图 2 所示)。由于材料较厚、坡口较大,因此需进行多道焊接。初步设计包括打底焊在内每处 22 道焊,焊接顺序如图 3。该焊接工作将由机器人完成。真空壳体的材料为奥氏体不锈钢 304L,它广泛用于制作综合性能(耐腐蚀和成型性)良好的设备和机件,其具体的化学组成如表 1。

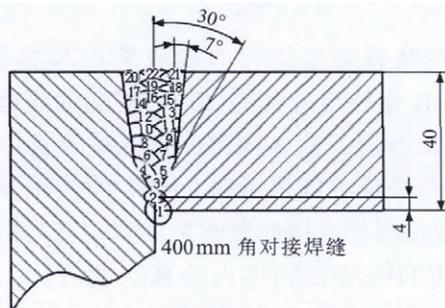


图 2 坡口处的设计及多道焊接的焊接顺序  
Fig.2 Design of groove and welding sequence of multi-pass welding

表 1 304L 的化学成分(质量分数,%)  
Tab.1 Chemical composition of 304L (wt%)

Cr	Ni	C	Si	Mn	N	P	S	Co	Nb
20	10	0.03	0.75	2	0.1	0.04	0.03	0.1	0.05

其他具体的工艺参数,参照实际生产所需的焊接工艺规程,如表 2 所示。焊接过程中不使用夹具,焊件放置于工作台上进行焊接;焊道间温度不超过

表 2 焊接工艺参数

Tab.2 Welding process parameters

电流 /A	电压 /V	焊接速度 /((mm·s <sup>-1</sup> ))
220	20	8

60℃。

## 2 焊接工艺仿真

### 2.1 单道焊接的热源模型

焊接热源模式包括高斯函数分布热源、双椭圆分布热源、半椭球体分布热源及双椭球体分布热源等。SYSWELD 软件提供了上述多种类型热源模型。建立焊接热源物理模型必须考虑:①热源作用在焊件上的有效热能;②作用于焊件上的热量分布情况<sup>[2]</sup>。本次焊接采用 MIG 工艺,其实际热流分布情况非常接近双椭球热源模型<sup>[3]</sup>,因此单道焊接选用的热源模型为双椭球热源,同时使用热源校核模块调试热源参数,达到要求后保留此热源模型并导出温度曲线。

### 2.2 多道焊的 2D 仿真

根据多道焊的实际情况建立 2D 有限元模型,如图 3。由于焊道较多,使用移动热源会使计算量过大以至于无法计算。为了得到较为准确的结果,此处可导入单道焊接的温度曲线以代替移动热源,这样不仅大大减少了计算所需的时间,同时又可以得到较为准确的结果。所导入的温度曲线如图 4 所示。

由图 4 可知,焊件在 650 s 左右时温度降低至

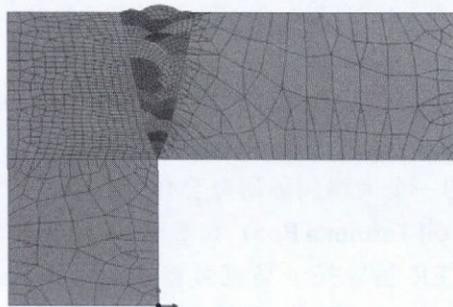


图 3 2D 多道焊有限元模型  
Fig.3 2D FEM of multi-pass welding

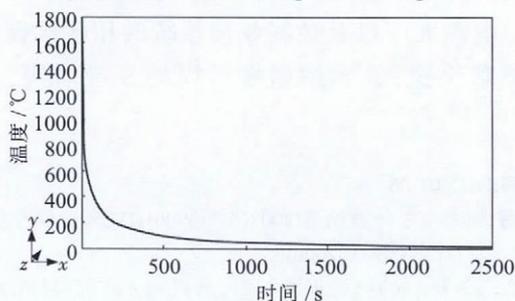


图 4 热源的温度曲线  
Fig.4 Temperature curve of heat source

60℃, 因此下一道焊接在上一道焊接的 650s 之后施焊, 其后未焊接的多道焊熔池模型的材料属性则暂时定义为热空气。

焊后变形的最大变形处为焊道处, 且集中在  $y$  方向。而不锈钢板  $xy$  平面内的最大变形在拐角处, 为 0.2571 mm(如图 5 显示), 远低于相关要求, 因此需要进行整模分析, 查看整模的 3D 结果。

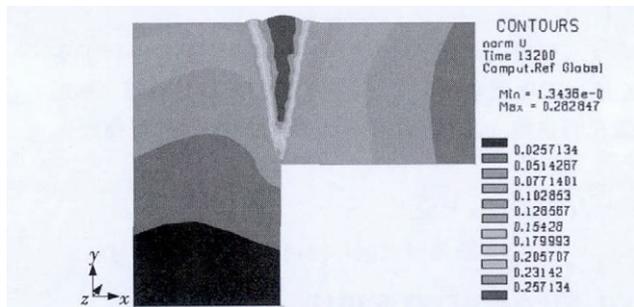


图 5 多道焊缝的仿真结果(mm)  
Fig.5 Simulation results of multi-pass welding(mm)

### 2.3 多道焊焊接热源的简化

对于此焊接的整模分析, 实际的焊接过程需焊接为 22 道。对于该结构模型, 单元和节点数都很多。而热弹塑性有限元分析是非线性的迭代过程, 且需要跟踪整个焊接及冷却过程, 对计算机计算能力和容量要求都很高。受目前计算机计算能力、容量和时间的限制, 不可能在整模计算中进行每一道焊缝的计算分析。本文主要着眼于焊接变形的预测。经验表明<sup>[4]</sup>, 根据等热效应, 在保证其在焊接区域内单位体积的能量与组合前不变的前提下, 可以通过多道焊道的组合来减少焊道数, 一次输入组合焊道的焊接能量, 从而简化焊接模拟分析过程。为了更好的阐明简化的过程及效果, 将某热源进行简化, 对短样进行分析, 得到如图 6 的结果。

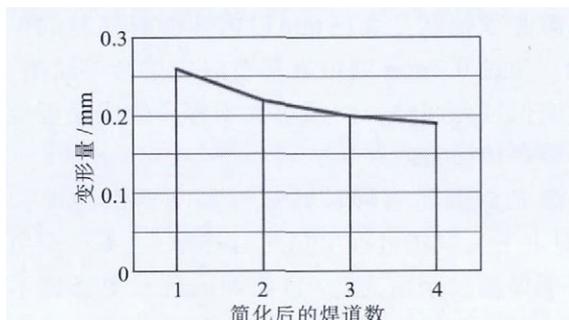


图 6 简化成不同焊道的短样的分析结果  
Fig.6 Simulation results of welding process with different welding layers

由图 6 可知, 在满足前述条件的情况下焊道数越多, 变形量和残余应力就越小, 结果就越接近真实

值。考虑到 2D 多道焊缝的分析结果距离要求余量较大, 而一道焊缝时变形又最大, 如果 1 道焊缝的结果可满足要求, 则多道焊缝更能够满足要求。且由于整模模型较大, 接近 8m。综合考虑, 为了快速得到分析结果, 整模分析使用一道焊缝。因此将 22 道焊简化为一道组合焊缝进行总能量输入, 且模拟坡口熔池形状所得的热源模型如图 7。

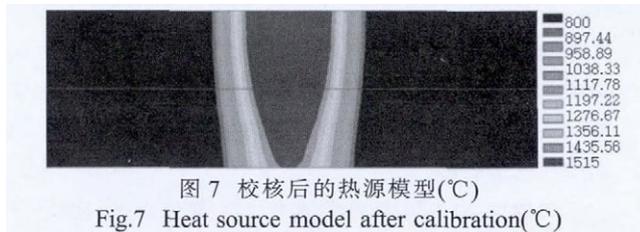


图 7 校核后的热源模型(°C)  
Fig.7 Heat source model after calibration(°C)

### 2.4 整模分析

建立整模的有限元模型如图 8, 在对角线处细化网格。其 3D 网格为 21840 个, 用于作为温度扩散面的表面 2D 网格为 17762 个, 节点数为 30256 个。边界条件设定为最小装夹, 防止模型的刚性位移。

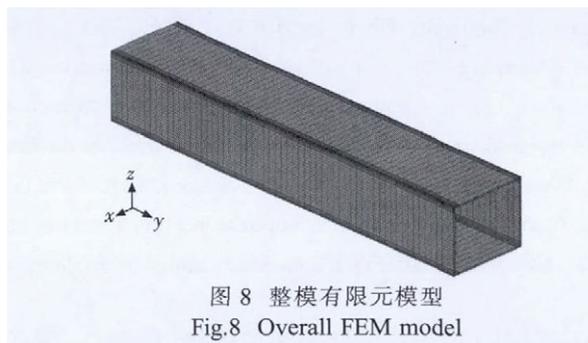


图 8 整模有限元模型  
Fig.8 Overall FEM model

### 2.5 整模分析结果及讨论

经过分析计算, 得到焊接变形结果如图 9, 残余应力结果如图 10。图 9 的结果显示最大变形处位于壳体的尾部拐角处, 且以  $z$  方向的位移较大, 最大处总位移为 1.25 mm, 而其相应对角线上的位移为 1.11 mm。即使这两个变形刚好方向相反, 其对角线上的总变形量也仅为 2.36 mm, 低于要求的 3 mm,

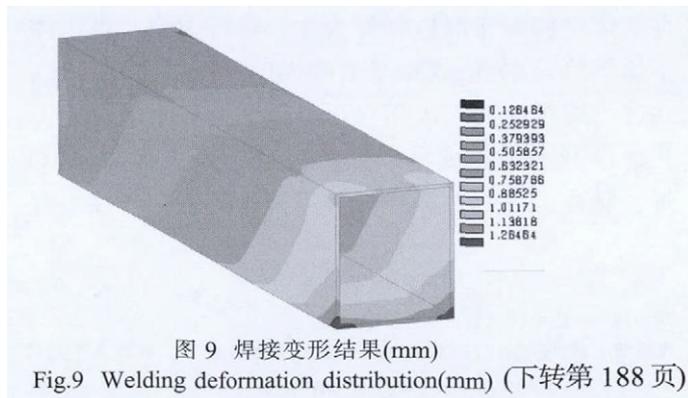


图 9 焊接变形结果(mm)  
Fig.9 Welding deformation distribution(mm) (下转第 188 页)

力的决定性因素。热输入是通过材料因素、制造因素和结构因素所构成的内拘束度和外拘束度而影响热源周围的金属运动,最终形成了焊接残余应力。不管是激光焊还是 MAG 焊,焊接时均会对不锈钢材料产生不均匀的局部热输入,冷却后在焊件中残留有塑性压缩应变而导致焊接残余应力的产生<sup>[7]</sup>,因为都是对接焊,且所经历的热循环过程相似,所以激光焊和 MAG 焊接头残余应力分布趋势相同。但是在前述的测试结果中发现,激光焊接头的残余应力峰值要小于 MAG 焊接头残余应力峰值,这可能是由于奥氏体不锈钢导热系数小、线膨胀系数大,MAG 焊时热输入量大,焊缝高温停留时间长,使得母材的塑性压缩效应高,焊后产生较大的焊接应力;而激光焊能量集中,加热时间短,焊接热较少,加热区域窄,对母材热影响较小,母材的塑性压缩效应低,从而使激光焊焊接接头的残余应力峰值较低<sup>[8]</sup>。

### 3 结论

(1) 激光焊和 MAG 焊接头焊缝区、熔合区、近焊缝热影响区都存在着高值拉伸应力,残余应力峰值出现在焊趾上。

(2) 激光焊接头残余应力分布趋势与 MAG 焊

接头残余应力分布趋势相同,均随着远离焊缝,残余应力逐渐减小。

(3) 激光焊接头残余应力峰值要小于 MAG 焊接头残余应力峰值,这是由于激光焊热输入较小,对母材热影响较小,母材塑性压缩效应低造成的。

#### 参考文献:

- [1] 李刚卿,韩晓辉. 不锈钢车体的焊接工艺及发展[J]. 机车车辆工艺,2004, (1): 1-4.
- [2] Cam G,Kocak M,Santos J F Dos,et al. Developments in laser welding of metallic materials and characterization of the joints [J]. Welding in the World, 1999, (2): 13-16.
- [3] 苏柯,谢红兵,岳译新. SUS301L 系列不锈钢在轻量化城轨车辆车体上的应用 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2010, 33(6): 23-25.
- [4] 彭章祝,吴志明. 城轨不锈钢车体制造焊接工艺研究[J]. 现代机械, 2012, (3): 5-7.
- [5] 李红芝,王文先,司恩,等. 0Cr18Ni9 不锈钢脉冲 Nd:YAG 固体激光焊和 TIG 焊焊缝耐腐蚀性能对比研究 [J]. 热加工工艺, 2012, 41(15): 164-167.
- [6] 村田隆行. 不锈钢车辆车体的激光焊接技术 [J]. 国外机车车辆工艺, 2007, (5): 4-5.
- [7] 方洪渊. 焊接结构学[M]. 北京:机械工业出版社, 2008.
- [8] 游敏,郑小玲,王德福,等. CO<sub>2</sub> 激光焊残余应力测试与分析[J]. 焊接技术, 2002, 31(3):17-18. 

(上接第 185 页)符合要求。而图 10 显示的结果表明多数的残余应力位于焊接区域,因此可以进行焊后的去应力处理,以减少应力集中<sup>[5]</sup>。

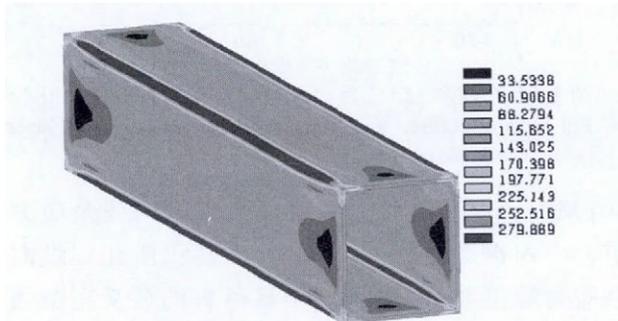


图 10 焊接残余应力结果(MPa)

Fig.10 Welding residual stress distribution(MPa)

### 3 结论

根据本次分析过程可知,在等热效应前提下,组合热源可进行有效的简化计算。而多道焊可以减少应变量和残余应力,在某些情况下可以使用这种方

法来简化计算。而为 CTB&SBB 真空壳体所设计的带 U 型坡口的多道 MIG 焊接工艺,经过模拟仿真后,变形和应力均在允许范围内,可以符合焊接要求。此模拟分析可以为大型复杂模型的焊接有限元分析提供参考依据。

#### 参考文献:

- [1] Engineering Description. ITER Design Description Document 11 Magnet [R]. France ITER Organization, 2011.
- [2] 康惠,凌泽民,齐喜岑. 基于 SYSWELD 对低合金钢焊接接头的数值模拟及实验分析 [J]. 热加工工艺, 2010,39(23): 200-202.
- [3] 袁洁,朱华,姚进. 小孔型层流电弧等离子体焊接温度场数值模拟 [J]. 热加工工艺, 2011,40(5):133-136.
- [4] D. 拉达伊. 焊接热效应 [M]. 北京:机械工业出版社, 1997.
- [5] 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,2005. 