

RAFMs 中厚板 TIG 焊下的温度场和应力场研究

姚金健¹, 刘素梅^{*1,2}, 鲁明宣², 雷明准², 裴坤²

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要:应用 ANSYS 软件对低活化马氏体/铁素体钢(RAFMs)中厚板多道焊接过程进行三维有限元模拟, 将得到的温度场和应力场分别与实验对比, 对焊缝区和热影响区宽度进行预测, 并通过焊接实验进行验证, 同时对焊后的试件进行了金相分析和硬度测试。结果表明: 温度场和应力场模拟结果和实测结果基本一致, 焊缝区以及热影响区宽度的模拟结果和实测结果基本吻合; 采用 316L 焊丝填充的焊缝, 焊缝与母材熔合较好, 焊缝没有明显缺陷; 硬度检测呈现: 焊缝的硬度大大高于热影响区和母材。

关键词:中国低活化马氏体钢; 焊接; 温度场; 应力场; 模拟与实验

中图分类号: TG404

文献标识码: A

1 引言

2003 年中国参与了 ITER^[1]的国际合作项目。由于低活化马氏/铁素体钢(RAFMs^[2])被普遍认为是未来聚变堆包层的首选结构材料, 一些国家都有自己特有的低活化马氏/铁素体钢, 近年来我国对 RAFMs 研究取得了较大的进展。在 ITER 试验包层模块(TBM^[3]模块)的研究中, RAFMs 也被认为是首选的结构材料, RAFMs 的焊接工艺和焊接技术是 RAFMs 走向实际应用的关键技术之一。因此, 对 RAFMs 的焊接性能进行数值模拟及实验研究具有重要理论意义和实际应用价值。

我国已经开展了 RAFMs 各种焊接技术的初步研究。为了适应中国聚变堆(CFETR)包层的发展需求, 拟对中厚板 RAFMs 板块 TIG 焊进行数值模拟及实验研究, 为 CFETR 包层结构设计以及包层模块焊接工艺提供参考依据。

2 数值模拟

2.1 几何模型及材料参数

选用 ANSYS 软件对 RAFMs 焊接进行数值模拟, 建立三维有限元模型, 模型尺寸为 150mm×100mm×30mm, 焊接坡口设计为 J 型坡口, 为了提高计算精度, 划分网格时, 焊缝和热影响区单元尺寸设为 2mm, 远离焊缝的单元尺寸适当增大, 如图 1a 所示。RAFM 作为一种新型钢材, 它的物理性能材料参数参见文献[3~5], RAFMs 的部分物理性能参数见图 1b 所示, 模拟中认为其各向同性且均匀, 密度恒为 7.78g·cm⁻³, 材料熔点 1420℃左右。

2.2 热分析及边界参数

热分析选用单元类型是 SOLID70, 初始温度为工件预热温度, 也是环境温度, 环境温度设为 25℃。模拟选用双椭球热源模型^[6], 如图 2 所示, 作用于焊件上的热源分成前、后两部分, z 为焊接方向, y 为厚度方向, 热源移动速度为 10mm·s⁻¹, 前后半球热源分布为:

收稿日期: 2015-09-28; 修订日期: 2016-05-09

基金项目: 国家磁约束核聚变能发展研究专项(2013GB113002)

作者简介: 姚金健(1989-), 男, 安徽桐城人, 硕士, 从事机械设计与理论研究。

*通讯作者: 刘素梅(1967-), 女, 河南滑县人, 博士, 教授, 从事机械 CAD/CAE 研究。

$$q_i(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(f_i Q)}{abc\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c_i^2}\right) \quad (i=f, r) \quad (1)$$

式中, $Q=UI\eta$ (U 、 I 、 η 分别为电弧电压、焊接电流和热效率); a 、 b 分别为 x 、 y 方向半轴长; c_1 、 c_2 分别为前后半球长; f_i 为能量分配系数。文中设定 $a=5\text{mm}$, $b=7\text{mm}$, $c_1=6\text{mm}$, $c_2=12\text{mm}$, $f_f=0.6$, $f_r=1.4$, $U=14\text{V}$, $I=120\text{A}$, $\eta=0.6$ 。

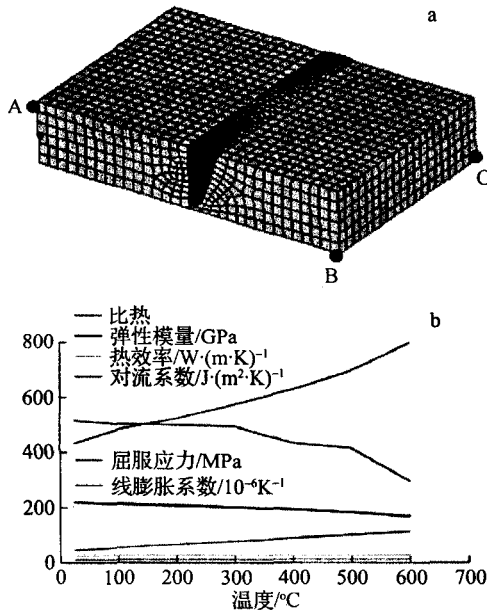


图 1 计算模型

a——网格划分; b——RAFM 的性能参数。

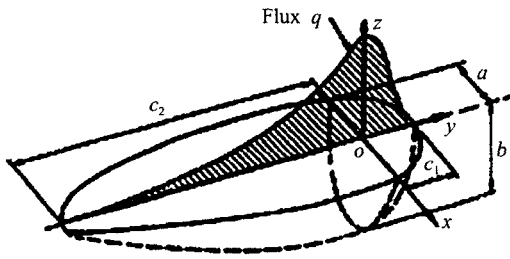


图 2 热源模型

采用 ANSYS 单元生死技术和 APDL 语言编程相结合, 首先选取焊缝单元将其全部杀死, 然后建立局部坐标系, 利用 APDL 中的循环语句控制局部坐标系位置逐渐变换, 达到热源也随之移动的效

果, 以生热率作为载荷施加于单元上, 从而实现焊接热源移动加载。

2.3 应力分析参数及约束

残余应力主要是由于焊接中的不均匀塑性变形造成的, 因此研究应力场主要应用弹塑性有限元法进行计算, 在热弹塑性分析时假定:

(1) 材料服从米塞斯(Von Mises)屈服准则, Mises 屈服条件为 $f=\sigma=0$, 其中 J 为一定的变形条件下, 受力物体内一点的应力偏张力的第二不变量; σ 为材料屈服极限; f 为屈服函数。

(2) 弹性应变、塑性应变与温度应变是不可分的。

(3) 与温度有关力学性能、应力应变在为微小的时间增量中呈线性变化。

应力分析直接将热分析单元 SOLID70 转换为 SOLID45 单元, 打开大应变效应, 为防止有限元计算过程中产生刚体位移, 需要对焊件施加位移边界条件, 如图 1a 所示, 采用三点固定法^[7], 对 A 点施加 x 、 y 方向自由度, 对 B 点施加 y 方向自由度, 对 C 点施加 x 、 y 、 z 方向自由度。

3 焊接实验

3.1 焊接方法

根据焊接手册^[8], 实验材料采用低活化马氏体钢板(RAFMs), 厚度为 30mm, 在实验中将板材切割成两块尺寸为 155mm×100mm×30mm 钢板, 在其中一块钢板上开 J 形坡口, 坡口角度为 20°, 底部弧形半径为 8mm, 所带顿边厚度为 3mm, 选择十道焊层焊接, 每道焊完冷却 100s, 保证层间温度在 200℃ 以下, 直至焊完冷却至室温, 最后将焊后的工件进行热处理。焊缝采用焊丝填充, 由于 RAFMs 作为新型材料, 没有专用焊丝, 故选用机械性能和金属元素含量等各方面都接近的 316L 焊丝作为焊缝填充材料, 焊丝直径选用 2mm, 选用氩气作为保护气体, 具体焊接参数列于表 1 中。

3.2 温度测量

此次温度测量实验采用型号 XSL/A-16ES1VQT 型温控寻检测仪测量温度, 它有 16 个接

线柱,可同时测量 8 个点,每隔 8s 数据测量一次。测试位于焊缝垂直方向上表面的点,一共测试 4 个点,距离焊缝中心的距离分别为 10、20、40、60mm 处。

表 1 TIG 焊接工艺参数

焊接方式	TIG 焊
焊条类型	AWSA5.9ER316L
焊接点面积/mm ³	5
焊条直径/mm	2
电源极性	直反
电流/A	110/140
电压/V	12/16
焊接速度/mm·s ⁻¹	10
焊接层数	10
Ar 流量/L·min ⁻¹	12~14

3.3 盲孔法测量应力

此处采用盲孔法测试残余应力值,其中需要先确定 A 、 B 应变释放系数^[9],然后再求得残余应力值。 A 、 B 与应变片、钻孔孔径有关、孔深大小以及被检测的母材的弹性模量 E 、泊松比 μ 有关,通过理论计算可以求出 A 、 B 。此实验根据 ASTM(美国材料实验协会)标准^[10], $a=0.111$, $b=0.297$, A 、 B 释放系数可由下面公式求出:

$$A = -[(1 + \mu) / 2E]a = -0.352 \times 10^{-6} \mu\epsilon \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (2)$$

$$B = -(1 / 2E)b = -0.743 \times 10^{-6} \mu\epsilon \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (3)$$

盲孔法测量点位于垂直于焊缝方向的上表面,具体测量点的应变化所在位置如图 3 所示。

4 模拟预测与实验结果对比

4.1 热循环曲线对比

模拟与实测的热循环曲线对比如图 4 所示。从结果来看,节点从室温升到 100℃的过程较为缓慢,需要 300s,这是因为试件厚度过厚,焊接是从焊缝最底部开始的,而测试点为试件上表面,热量主要通过内部的热传递,需要相当的时间才能达到测试部位。1 点和 2 点距离焊缝比较近,可以明显得看出温度起伏变化,整体呈波浪型逐渐上升趋势,这是由于采用的是 TIG 焊逐层填充的方式导致的,每焊一层冷却一段时间,然后再焊另一层,1、2 两点

完全符合此焊接方式的规律。3 点和 4 点距离焊缝比较远,温度起伏不明显,一直处于上升状态,这是由于焊缝中心温度向工件四周扩散导致的。通过比较模拟值和实测值发现,各点的模拟值和实测值基本变化趋势是一致的,但两者之间有一定的温度差,这主要是由于 ANSYS 模拟过程中本身的一些理想假设和实际测量误差导致的。峰值温度超过 100℃的节点曲线的各项结果列于表 2 中。

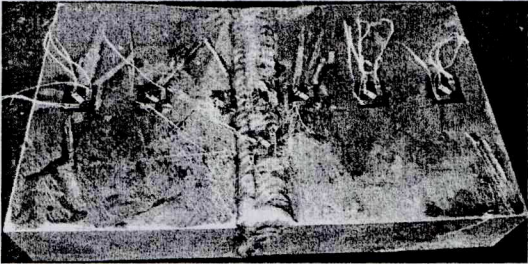


图 3 焊接残余应力取样路径

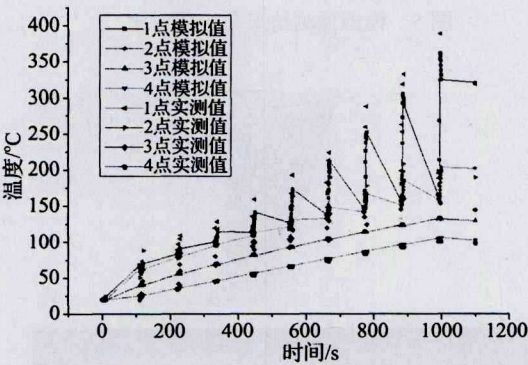


图 4 热循环曲线对比

表 2 模拟热循环曲线数据

	实验值	模拟值
距离 d/mm	10, 25, 55	10, 25, 55
升温速率 $v/^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$	76, 11, 1.5	67, 9, 1.4
峰值温度 $T/^\circ\text{C}$	388, 215, 145	362, 203, 132
峰值时间 t/s	996.5, 1000, 991.5	990, 994.5, 899

由表 2 可以看出,对于升温速率,模拟计算与实测结果相当,最大升温速率为 76℃,随着焊缝中心距离的增加,升温速率减小,当距离焊缝中心 10mm 时,模拟峰值温度为 362℃,实测峰值温度

为 388°C , 误差仅约 7%, 且其峰值到达时间基本一致, 而且误差更低, 因此, 可认为模拟热循环曲线与实测值较为吻合。

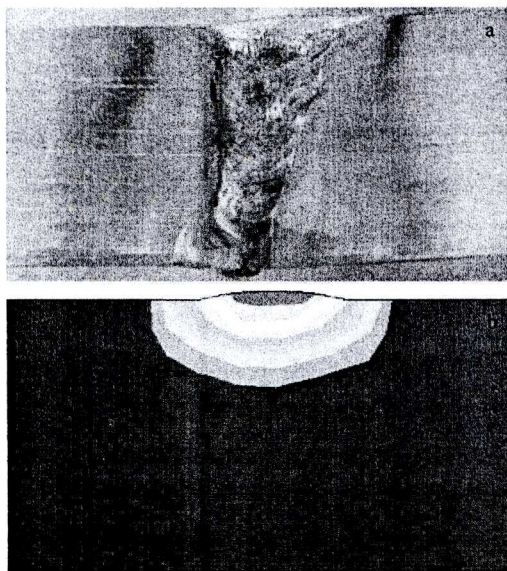


图5 模拟预测结果与接头对比

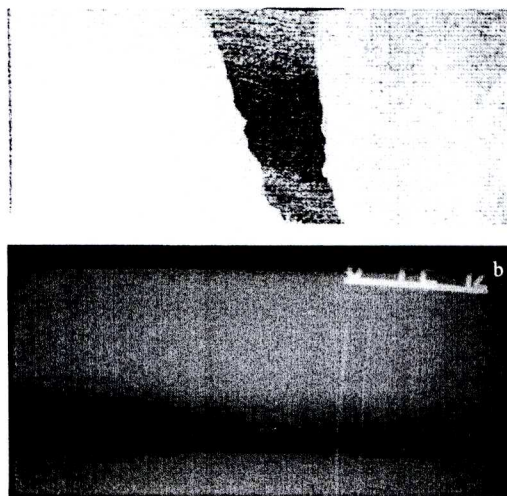


图6 焊缝缺陷检测

a——金相分析(10 $\times$); b——无损探伤。

4.2 热影响区宽度的预测与验证

最后一道焊时模拟预测结果和实验对比如图 5 所示。根据预测结果, 焊缝区宽度为 15.9mm, 热影响区宽度为 8.5mm, 而实际焊接测量焊缝区宽

度 17mm, 热影响区宽度为 9mm, 两者数据来看很接近。通过温度场宏观对比图发现, 实验接头最后一层可以看到很明显的下凹弧形熔池(图 5a 虚线区域), 模拟结果等温线黄色区域刚好与之对应, 面积和形状很相似, 对应良好。另外, 实验焊条选用 316L 焊条进行焊接试验, 焊后对焊缝进行低倍金相分析。根据分析报告显示, 焊缝与母材熔合较好, 焊缝内部基本没有气泡, 采用 X 射线探伤机进行无损检测, 发现焊缝处未发现焊接缺陷, 焊缝为 I 级焊缝如图 6 所示。焊件硬度分布如图 7 所示, 其中 -5mm~5mm 范围为焊缝区, -10mm~-5mm 和 5mm~10mm 处为热影响区, -20mm 和 20mm 两端为母材区。通过对比发现, 焊缝区硬度明显比另外两区硬度高, 最高达到 282HV, 主要因为 RAFMs 具有很好的淬透性, 对其进行 TIG 焊时温度很高, 焊接完成后迅速冷却, 相当于进行了一次淬火处理。热影响区温度硬度变化不大, 略低于母材, 主要是在焊接时, 此区域温度比焊缝区低的多, 焊接时该区域相当于进行了一次回火, 使本区域晶粒粗大化, 降低了硬度。

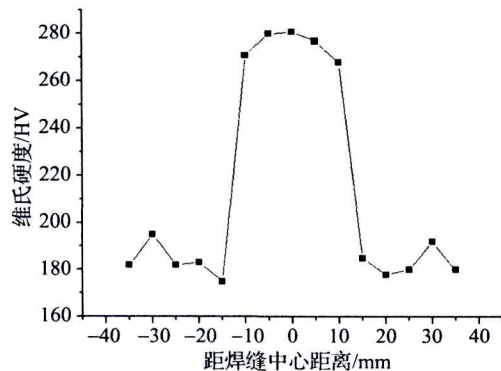


图7 焊件试样硬度分布

4.3 模拟与实测残余应力对比

TIG 焊纵向焊残余应力模拟值和实测值对比如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 在与远离焊缝区的焊件两端, 残余应力基本没有变化, 这是由于焊接热对此处影响很小导致; 逐渐靠近熔合线的热影响区时, 出现较小的压应力, 这是焊缝热影响区受热

膨胀, 挤压产生的, 在热影响区时, 压应力迅速变为拉应力, 并且在焊缝中心($x=0\text{mm}$ 处)的右侧达到拉应力的峰值, 主要是由于选用的是 J 型坡口, 右侧受热比较大, 所以焊件的两端残余应力也呈现不对称状态, 焊缝中心出现拉应力是由于焊缝区受热熔化, 而后冷却凝固收缩引起了拉应力。

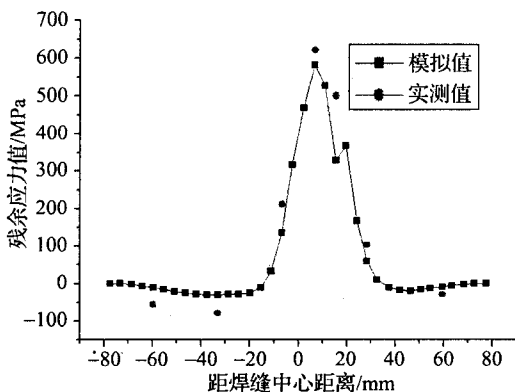


图8 TIG 焊纵向残余应力

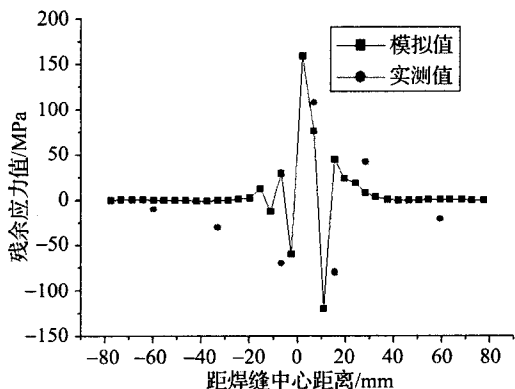


图9 TIG 焊横向残余应力

TIG 焊横向残余应力模拟与实测值对比如图 9 所示。从图 9 中可见, TIG 焊的横向残余应力在焊缝区以及远离焊缝区均为拉应力, 且在试件两端横向残余应力接近于零, 同时横向残余应力也呈现不对称状态, 主要是因为 TIG 焊选用的是 J 形坡口, 焊接时两侧受热不均匀, 冷却时散热面积也不同, 导致焊后形成的横向残余应力也不对称, 完全符合实际情况。

通过对图 8 和图 9 中残余应力的实测值和模拟值对比发现, 采用有限元模型计算得到的数值结果与实测的纵向和横向残余应力结果, 其分布规律基本一致, 但是由应变计算出来的纵向残余应力在焊缝及近缝区的残余应力值明显偏大(实测值最大纵向残余应力为 622MPa, 模拟值最大纵向残余应力值为 582MPa), 这主要是因为盲孔法测量时, 需要进行钻孔, 钻孔产生了附加应变, 这些附加应变导致实测值偏高; 另一个原因是焊接工艺条件以及焊接工艺参数不够成熟, 致使 TIG 焊试件产生应力集中。因而测量结果存在较大误差导致。通过观察 RAFMa TIG 焊的整体残余应力分布和大小发现, 中厚板焊件的残余应力分布范围不大, 主要集中在热影响区附近 $-20\text{mm}\sim 20\text{mm}$ 处, 主要是 RAFMs 本身的热导率和表面换热系数较高, 能迅速的将焊缝中心热量散出去, 导致远离焊缝中心的母材所受热影响很小。

5 结论

(1) 应用双椭球体积移动热源模型, 利用单元生死技术模拟焊缝的生成, 满足了焊接模拟的计算精度, 温度和残余应力模拟值与实测值吻合良好, 得出了中厚板 RAFM 钢对接焊的温度分布和残余应力分布情况。

(2) 通过温度场模拟, 预测的 RAFMs 焊缝宽度为 15.9mm、热影响区宽度为 8.5mm, 相对于实测焊缝宽度 17mm、热影响区宽度 9mm 来说, 相当吻合。说明可以通过 ANSYS 模拟可以得出正确的焊缝和热影响区宽度。

(3) 采用 316L 焊丝填充 RAFMs 焊缝, 发现焊缝与母材熔合良好, 在用厚度达 30mm 的 J 型坡口钢板对接焊时, 焊缝能完全焊透。进行金相分析发现, 焊缝无缺陷。

(4) 中厚板 RAFMs TIG 焊残余应力分布范围不大, 主要集中在焊缝中心附近, 对远离焊缝区域热影响较小, 说明 RAFMs 导热率较高。但最大残余应力大峰值超过了材料屈服极限($\sigma_s=512\text{MPa}$), 不适合进行多道 TIG 焊。

(5) RAFMs 经过 TIG 焊接后, 焊缝区的硬度值存在明显过高, 热影响区和母材区影响有限, 说明 TIG 对焊缝区影响硬度值影响最大。

参考文献:

- [1] 冯开明. ITER 实验包层计划综述 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2006, 3: 162–168.
- [2] 范晓萌, 匡帅. 低活化铁素体/马氏体钢焊接性研究现状 [J]. 现代焊接, 2013, 6: 31–33.
- [3] Li Yanfen, Huang Qunying, Wu Yican. Effects of addition of yttrium on properties and microstructure for China low activation martensitic (CLAM) steel [J]. Fusion Engineering and Design, 2007, 82: 2683–2688.
- [4] 伊莎, 雷玉成, 邵奇栋, 等. CLAM 钢焊接残余应力与变形的三维数值模拟 [J]. 焊接技术, 2010, 39(1): 13–16.
- [5] Nogami S, TaKahashi M, Hasegawa A. Effect of helium on fatigue crack growth and life of reduced activation ferritic/martensitic steel [J]. J. Nucl. Mater., 2013, 442(1): 43–47.
- [6] 李瑞英, 赵明, 吴春梅. 基于 SYSWELD 的双椭圆热源模型参数的确定 [J]. 焊接学报, 2014, 10: 35.
- [7] 雷玉成, 张玲, 顾康家, 等. 中国低活化马氏体钢 TIG 焊温度场接头组织分析 [J]. 江苏大学学报, 2009, 30(1): 480–482.
- [8] 吕德齐, 白钢, 赵晓峰. 焊接手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [9] 李华. 盲孔法测量非均匀残余应力时释放系数的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [10] ASTM Standard E837. Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain gage method [S].

Temperature and stress fields in TIG welding for medium thickness plate of RAFMs

YAO Jin-jian¹, LIU Su-mei^{1, 2}, LU Min-xuan², LEI Ming-zhun², PEI Kun²

(1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036;

2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract: Some simulations and experiments about welding processes of the reduced activation martensitic/ferritic steel (RAFM) were done respectively in this paper. The multi-welding processes for medium thickness plate of RAFM steel were simulated in three-dimensional finite element models by ANSYS software. The temperature fields and stress fields from simulation were contrasted with that from experiments respectively, and the heat affected zones of welding were calculated and checked. Meanwhile, the metallic texture graphic analysis and hardness tests for welded zones were performed. The results from both are very similar, and the fused metal welding zones are very well without obvious defects by used 316L welding padding. The hardness on welding zone is much higher than the heat-affected zone, also base materials.

Key words: RAFMs; Welding; Numerical simulation; Experiment