

CLAM 钢 TIG 焊有限元模拟

雷玉成¹, 张 玲¹, 顾康家¹, 巨 新²

(1. 江苏大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 北京科技大学 物理系, 北京 100083)

摘要: 以我国自主研发的中国低活化马氏体钢-CLAM 钢为研究对象, 应用 ANSYS 有限元分析软件建立单面双道焊三维有限元数学模型, 并运用 APDL 参数化语言及“生死单元”技术实现了模拟过程中焊接热源的移动及焊缝金属的逐步填充, 模拟了 CLAM 钢 TIG 焊预热情况下瞬态温度场, 定量分析了焊件不同位置的温度分布, 并通过红外测温验证了温度场模拟结果, 同时对比分析了不同的焊接速度对焊接熔池的影响。

关键词: 中国低活化马氏体钢; 有限元; 瞬态温度场; 焊接熔池

中图分类号: TG404

文献标志码: B

CLAM 钢是我国具有自主知识产权的低活化马氏体钢, 在我国一系列 ITER (国际热核实验堆) 试验包层模块的设计研究中 CLAM 钢是首选结构材料。而 CLAM 钢的焊接技术和工艺关系到 TBM 最终能否成功制造, 是 CLAM 钢走向实际应用的关键技术之一^[1-2]。国外对低活化马氏体钢热等静压扩散焊接技术进行了比较全面的研究, 我国也已经开展了对 CLAM 钢热等静压扩散焊接技术的研究, 其他焊接工艺如电子束焊接、氩弧焊以及焊接的热模拟分析等焊接技术正在计划之中。为了适应中国聚变堆包层及 TBM 模块制造的发展需求, 对 CLAM 钢焊接的进一步研究工作尤为重要和紧迫^[3-4]。目前我国对 CLAM 钢焊接的相关报道还比较少, 几乎没有多少经验可以借鉴。而借助建模与仿真技术对焊接过程进行模拟预测, 可以大大减少试验工作, 缩短产品研究周期, 并可以对试验中无法观察或定量分析的焊接过程进行研究, 从而可以更全面、深入地分析 CLAM 钢的焊接行为。

本文应用 ANSYS 有限元分析软件, 建立 CLAM 钢 TIG 焊单面双层焊三维有限元模型, 模拟焊件在焊接过程中的瞬态温度分布情况和不同焊速下熔池变化情况, 并通过红外测温验证模拟结果, 考察模型的有效性, 为 CLAM 钢有限元模拟及焊接的研究提供参考。

1 有限元模型与材料性能参数

本次试验材料采用了炉次为 HEAT-0603A 的轧

制 CLAM 钢板, 板厚为 12 mm。在试验中将板材线切割为 30 mm×40 mm×4 mm 的 CLAM 钢板, 焊件接头形式为 2 块平板对接, 焊件尺寸及有限元网格如图 1 所示。焊接方法采用 TIG 焊, 样件进行单面双道对接焊, 第 1 层为打底焊, 第 2 层为盖面焊, 直流正接, 焊件背面氩气保护, 焊前预热温度为 150 ℃, 层温控制为 250 ℃, 坡口形式为单边 60°V 形坡口, 焊缝采用原料填充, 焊丝 (在同一母材经线切割后打磨而成) 直径为 2.5 mm。

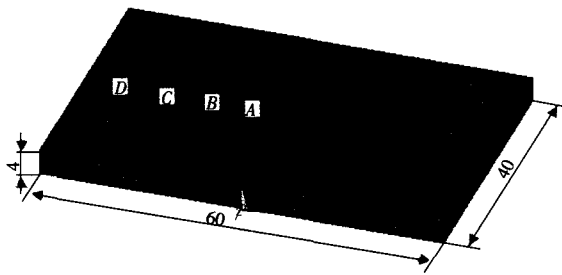


图 1 焊件尺寸及有限元网格示意图

在焊接过程有限元计算时要定义材料的热物理参数, 这些参数均与焊接热循环过程相关, 一般都是温度的非线性函数, 如比热容、热导率、弹性模量、屈服应力等都随温度的变化而变化, 这些参数选取的合理与否将直接影响到计算的准确性。CLAM 钢的一些物理参数在相关文献中难以查到或试验测得, 尤其高温参数特别是接近熔化状态时的物理性能参数很难测得, 导致材料属性 (热物理性能参数) 并不完整。本文在计算中对材料性能参数的处理: 一是参考国内外相关文献^[5-7]; 二是借助 ANSYS 对于未知温度处

的参数在一定范围内采用线性插值法进行处理；三是借鉴其他物理性能与之相似材料（T/P91 钢，T/P92 钢）的参数值^[8]；四是通过已知参数根据推导公式计算出其他相关参数值，如某一温度下的剪切模量可以通过该温度下的弹性模量和泊松比计算得到。在模拟中认为材料各向同性且均匀，密度恒为 7.78 g/cm^3 ，材料熔点 1420°C 左右。CLAM 钢的成分^{[6][9]}和性能参数分别见表 1 及图 2。

表 1 CLAM 钢的主要成分（质量分数）（%）

Fe	Cr	W	C	V	Ta	
Bal	9.0±0.1	1.5±0.1	0.10±0.02	0.20±0.02	0.15±0.05	
Mn	Si	N	S	P	Ti	Co
0.45±0.05	<0.01	<0.02	<0.003	<0.002	<0.006	<0.005

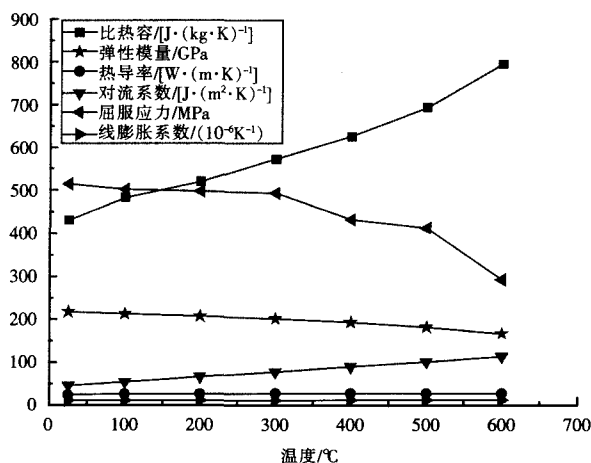


图 2 CLAM 钢的性能参数

2 热源移动加载及焊缝金属逐步填充

多层焊通常选用体热源形式加载，所以热模拟时选用了双椭球热源模型。本文结合了 ANSYS 中的“生死单元”技术和 APDL 语言编程来实现在焊接过程中焊接热源的移动加载和焊丝逐步填充到焊道中的动态过程。首先选取焊缝单元将其全部“杀死”，然后建立局部坐标系，热源中心位置与局部坐标原点一致，用 APDL 中的循环语句控制局部坐标位置逐步变换，这样热源中心也随之逐步移动，从而实现焊接热源的移动加载。在焊接热源移动的同时，沿着焊接方向，热源前部的单元依然为“死单元”不参与计算，热源经过的部分及热源后部的单元被“激活”，参与计算，就相当于这部分材料被逐步填充到焊道中，从而实现了整个焊接过程的动态模拟。

3 模拟结果分析与试验验证

3.1 温度场模拟结果分析

图 3, 4 为焊接至第 11 s 热源在第 1 层焊缝时和焊接至第 84 s 热源在第 2 层焊缝时整个焊件及沿焊缝方向中截面的温度分布云图。由图可知，在规定的焊接参数下 2 道焊缝均处于熔透状态，加热区域为双半椭球体，前后半椭球体形状不同，电弧前方的加热区域比电弧后方的加热区域小，且热源中心前面温度梯度较大，而椭球后半部分温度梯度分布较缓，这与实际焊接温度分布情况相符。说明合理地调整双椭球热源形状参数在 CLAM 钢 TIG 焊模拟中可以得到较满意的熔池效果。

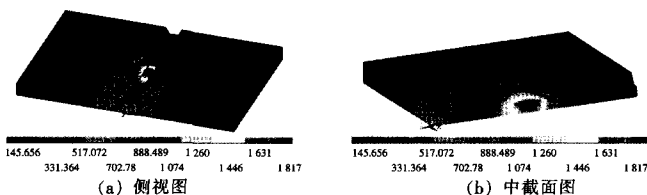


图 3 第 11 s 打底焊温度分布

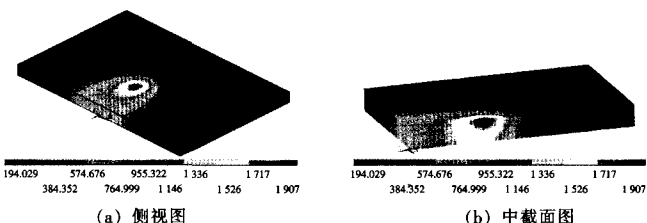


图 4 第 84 s 盖面焊温度分布

图 5 为节点 A, B, C, D 在前 300 s 时间内的焊接热循环曲线（在不影响分析情况下图中截去了第 2 道焊冗长的冷却时间），A, B, C, D 点均位于垂直于焊缝的中截面处焊件上表面，距焊缝中心距离依次为 5, 17.1, 9.5, 3.15 mm。由于第 2 道焊缝焊接热输入比第 1 道焊缝略高，加上层温控制，第 2 道起焊温度比第 1 道焊缝的温度高，所以每点的第 2 个峰值温度均比第 1 个峰值温度高。在焊接过程中 CLAM 钢升温速度很快，只是随着节点与焊缝距离的增加，受热源作用逐渐减弱，峰值温度依次降低，达到峰值的时间也有所滞后，在焊件边缘，温度变化最小。冷却过程开始时降温速度很快，降到 300°C 左右时，冷却速度趋于一致并且变缓。

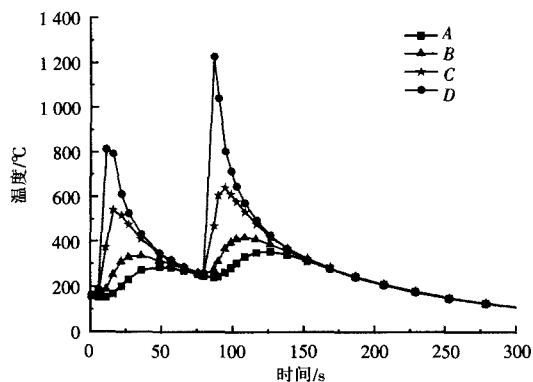
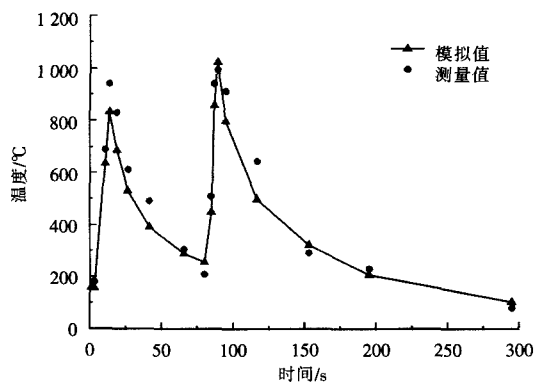


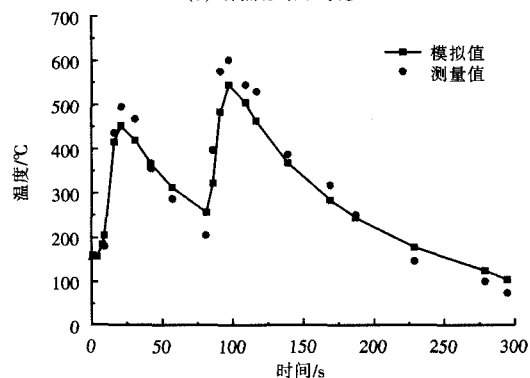
图5 A, B, C, D点的热循环曲线

3.2 红外测温与模拟结果对比

对 CLAM 钢 TIG 焊温度场进行红外测量, 并对模拟结果进行验证。试验采用 SAT-HY6800 型红外热像仪对采样点进行测温, 将测得的试验值与计算值进行对比, 结果如图 6 所示。



(a) 样点 A 结果对比



(b) 样点 B 结果对比

图6 模拟结果与测量结果对比

由图 6 可知, 模拟结果与测量结果有些点值的结果相差较大, 一方面是由于测量仪器本身产生的结果误差; 另一方面由于模拟过程不能把焊接过程的所有影响因素考虑在内, 存在一定假设条件以及模拟过程中高温参数是借鉴其他相近钢种或通过线性插值得到

的, 使模拟结果产生误差。但温度场总体趋势基本一致, 且多数点值基本吻合, 表明数值模型的有效性, 也说明了材料性能参数的处理比较合理, 为进一步的数值分析打下了基础。

3.3 焊接速度对 CLAM 钢焊接温度场的影响

图 7 为不同焊接速度下第 2 道焊过程中热源移动到焊缝中心位置时, 焊件上表面温度等值线图, 从图 7a~c 可以观察到熔池形状及熔宽随焊接速度的变化情况。

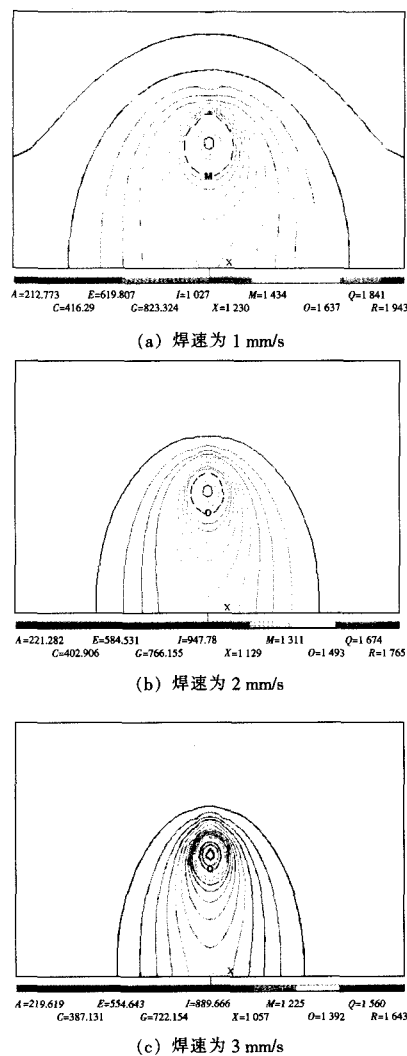


图7 焊件表面温度等值线图

图 8 为沿焊缝方向焊件纵截面图。图中虚线及标字母的线为熔合线。在图 8 中由于计算中采用逐步“激活”, 所以热源前方为“死单元”, 不传热, 而热源走过的地方均为“活单元”, 因此在图 8 中熔池前端等值线出现了类似波浪的曲折线, 并可观察熔深形状随焊接速度的变化情况。

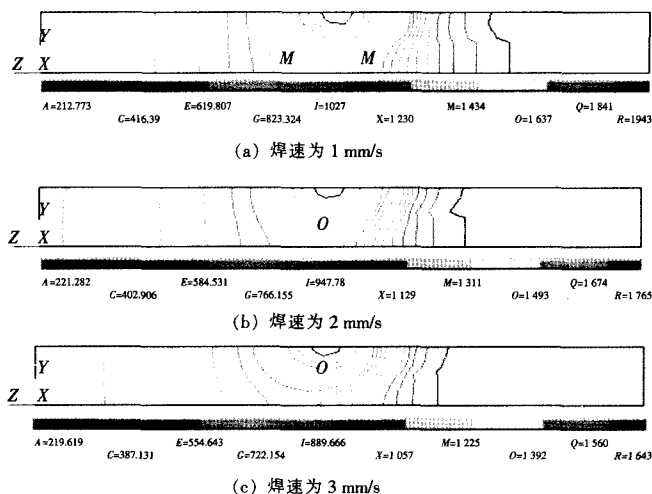


图8 焊件纵截面温度等值线图

由图7, 8可知, 当其他工艺参数不变时, 随着焊接速度的增大, 焊件温度峰值也明显降低, 熔池体积、焊缝熔宽和熔深以及热影响区范围也随之减小。当焊速为1 mm/s时, 焊接熔池很大, 在焊第2层过程中第1层焊缝全部重熔, 焊速过小, 引起局部过热; 焊速为3 mm/s时, 焊接熔池很小, 第2层焊道出现未焊透现象, 焊速过大, 不利于焊缝成形。本次试验焊速为2 mm/s, 通过模拟可知, 此时焊缝熔宽和熔深均较合理, 与实际焊接情况符合较好, 也验证了试验选取参数的合理性。可见, 在CLAM钢焊接过程中焊速的较小变化对CLAM钢TIG焊熔池形成会有较大影响, 从而改变整个焊件的温度梯度和温度分布, 因此焊接速度选取的适当与否对CLAM钢的焊接质量有重要影响。

4 结论

(1) 虽然在部分材料性能参数难以查证的情况下借鉴了相似材料的一些相关参数, 但通过红外测温技术测得的温度值与模拟的温度值吻合较好, 说明参数处理得较为合理, 验证了模型的有效性和可行性。

(2) 通常熔深较大时选用双椭球热源, 但基于双层焊应选用体热源加载比较合理, 虽然焊件较薄, 熔深较浅, 本文也选用了双椭球热源, 经热模拟验证当形状参数选择合理的情况下, 双椭球热源模型可以得到较满意的熔池形状。

(3) 通过模拟可知, 焊接速度的变化, 对CLAM钢熔池的形成影响较大, 因此选择合适的焊接速度对CLAM钢的焊接质量有重要的影响。

参考文献:

- [1] 黄群英, 郁金南, 万发荣, 等. 聚变堆低活化马氏体钢的进展[J]. 核科学与工程, 2004, 24(1): 56-64.
- [2] 黄群英, 李春京, 李艳芬, 等. 中国低活化马氏体钢CLAM研究进展[J]. 核科学与工程, 2007, 27(1): 41-50.
- [3] Cardella A, Rigal E, Bedel L, et al. The manufacturing technologies of the european breeding blankets[J]. J. Nucl. Mater., 2004, 329-333: 133-140.
- [4] 李春京, 黄群英, 吴宜灿, 等. 中国低活化马氏体钢CLAM钢热等静压扩散焊接初步研究[J]. 核科学与工程, 2007, 27(1): 55-58.
- [5] Yu J, Huang Q and Wan F. Research and development on the China low activation martensitic steel (CLAM)[J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, 367-370, 97-101.
- [6] Huang Q, Li Q, Li Y, et al. Progress in development of China low activation martensitic steel for fusion application [J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, 367-370: 142-146.
- [7] 李艳芬, 黄群英, 吴宜灿. CLAM钢冲击和拉伸性能测试与研究[J]. 原子核物理评论, 2006, 23(2): 151-154.
- [8] Yaghi A H, Hyde T H, Becker A A, et al. Residual stress simulation in welded sections of P91 pipes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167: 480-487.
- [9] 李强. 低活化马氏体钢和钨在HT-7托马克中的等离子体辐照实验研究[D]. 安徽 合肥: 合肥工业大学, 2004.

作者简介: 雷玉成 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事焊接工艺及设备、焊接过程控制及模拟、先进连接技术等方面的研究。

《焊接技术》变更启事

《焊接技术》的相关变更内容如下:

1. 自2008年11月1日起, 本刊通信地址变更为天津市河北区南口路40号; 邮政编码变更为300232。
2. 自2009年1月1日起, 刊期变更为月刊。

《焊接技术》编辑部
2008年10月