

电渣焊接头温度场数值模拟

孙加民, 蔡建鹏, 叶延洪, 邓德安

(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘要:为了研究建筑钢结构箱型柱中腹板与隔板处电渣焊接头的温度场,以有限元软件 MSC. Marc 为平台,开发了用于电渣焊温度场的计算方法。在所开发的计算方法中,采用了半椭球等密度热源模型来模拟电渣焊的热输入,以生死单元技术考虑焊缝成形,并采用实测得到的低合金高强度钢 SM490A 材料的高温热物理性能参数模拟了箱型柱中的腹板与隔板电渣焊接头的温度场。同时采用试验方法实测了电渣焊接头典型位置的热循环曲线,并观察了接头的焊缝宏观截面形状。结果表明,计算得到的热循环曲线与实测结果十分吻合,计算得到的焊缝形状与试验结果也基本一致,验证了所开发的数值计算方法的有效性。

关键词:电渣焊; 等密度热源; 数值模拟; 焊接温度场

中图分类号: TG 404 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2015)07-0093-04

0 序言

在高层建筑钢结构中,箱型柱的腹板与隔板接头是一种常见的焊接接头,由于构件尺寸很大,为了提高生产效率、降低制造成本和控制变形,电渣焊被广泛应用于制造这类焊接接头^[1]。但是电渣焊的热输入要远远大于诸如 CO₂ 气体保护焊、焊条电弧焊等常规焊接方法^[2],而大热输入必然会显著影响材料的微观组织和材料的力学性能。一旦箱型柱的腹板与隔板电渣焊接头在承受诸如地震等自然灾害的冲击载荷后,必定会产生很大的应力和变形^[1],如果接头的韧性不足,就很容易发生脆性断裂。

焊接温度场的准确计算是焊接冶金分析、焊接应力和焊接变形分析以及焊接质量控制的前提。当前基于有限元方法的数值模拟技术已经被广泛运用于计算焊接温度场。在国内薛忠明等人^[3]对激光焊进行了温度场的数值模拟;黄瑞生等人^[4]对激光-TIG 焊接温度场进行了数值模拟;王志峰等人^[5]对埋弧焊进行了温度场的数值模拟;罗怡等人^[6]对真空电子束焊接温度场进行了数值模拟。但是目前很少有关于电渣焊温度场数值模拟的报道。然而通过对电渣焊温度场的数值模拟,可以预测到碳钢和低合金钢相变温度范围的 800~500 ℃ 冷却时间($\Delta t_{8/5}$),且通过对 $\Delta t_{8/5}$ 时间的分析,可以直接或间接推测到电渣焊接头的韧性,这对于避免材料脆性

断裂的发生和评价结构完整性是十分有用的,也是十分有必要的^[1]。也正是如此,国外一些学者在电渣焊的数值模拟方面也开始展开了研究^[2]。

文中基于 MSC. Marc 分析软件^[7],开发了一种电渣焊温度场的有限元计算方法。同时将计算结果与试验结果进行比较,验证了所提出的计算方法的有效性,此外文中还定量讨论了电渣焊温度场的特征。

1 试验方法

电渣焊是利用电流通过液体熔渣所产生的电阻热来加热、熔化金属,进而形成焊缝的一种焊接方法^[8]。图 1 为箱型柱腹板与隔板处的电渣焊接头位置及其焊接原理示意图。

为了用试验方法测量 SM490A 钢的箱型柱腹板与隔板丝极电渣焊接头的焊接温度场,制作了如图 2 所示的焊接试件。试件总长为 600 mm,腹板宽度为 500 mm,隔板高度为 300 mm,腹板和隔板的厚度分别为 25 和 50 mm,挡板的高度为 50 mm,宽度为 30 mm。电渣焊的焊接电流为 380 A,电弧电压为 47 V,焊接速度为 14.8 mm/min,焊接材料为 YGW18^[1]。

在焊接过程中采用镍铬-镍硅 K 型热电偶进行热循环曲线的温度测定。热电偶所在的位置分别为垂直焊缝中央截面的底部中心 A 点、离中心 50 mm 处的 B 点以及离挡板两端 5 mm 处的 C 点和 D 点,各点的具体位置如图 2b 所示。

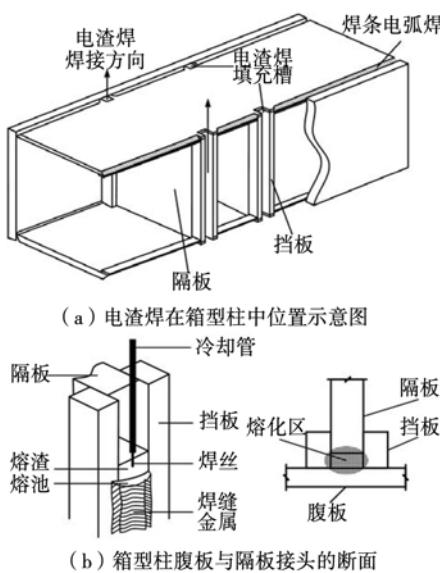


图1 电渣焊原理示意图

Fig. 1 Image of ESW process mechanism

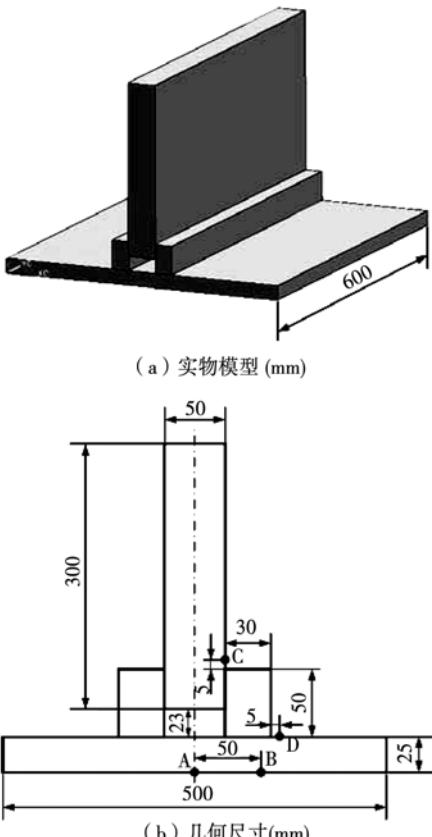


图2 实物模型及尺寸

Fig. 2 Shape and dimension of mock-up

2 有限元温度场计算方法

理论上电渣焊是利用电流通过液体熔渣所产生的电阻热进行焊接的熔焊方法,但文中仍然采用电弧加热和熔化金属方式进行模拟仿真^[1,2]。Deng等

人^[1]的研究表明,采用这种处理方式不仅可以简化数值模型,而且不致于计算精度的损失。在计算温度场时,考虑了材料的热物理性能随温度变化的特性。由于该模型在几何形状上为对称模型,所以采用了半模型进行计算。有限元计算模型和网格划分如图3所示。有限元模型中节点总数为38 613,单元总数为34 080。网格划分时为平衡考虑计算精度和计算时间的问题,在焊缝及其附近区域有限元网格划分得较密,而在远离焊接区域网格划分得相对较稀。

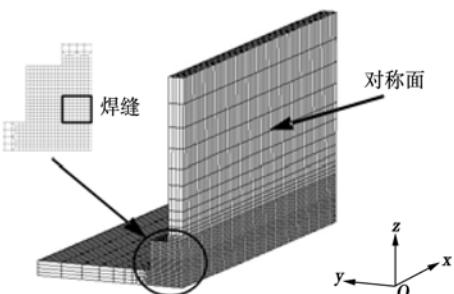


图3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

在焊接温度场的计算过程中,采用非线性传热方程来描述由焊接电弧产生的热在焊接工件内部传导过程^[1]。目前常用的高斯热源模型和双椭球热源模型采用的热流分布均是高斯分布,但是由于电渣焊的焊接速度相对很慢,熔池内部温度相对比较均匀,所以文中采用半椭球等密度体积移动热源^[9]来模拟电渣焊的热输入,并以生死单元技术来考虑焊缝成形,在焊接温度场的计算中,热源作用区域为

$$\frac{(x-vt)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{(z-z_0)^2}{c^2} \leq 1 \quad (1)$$

式中: v 为焊接速度; t 为焊接时间; z_0 为热源中心在 z 轴方向上的初始位置,取值为36.5 mm; a , b 和 c 为椭球形状参数,取值分别为18,25和39 mm。半椭球等密度热源的热流密度 q 及半椭球热源体积 V 的计算公式为

$$q = \eta U I / V \quad (2)$$

$$V = \frac{2}{3} \pi a b c \quad (3)$$

式中: η 为电弧效率,在有限元模拟计算中,假定其电渣焊的热效率为0.9^[1]; U 为电弧电压; I 为焊接电流。

由于焊缝金属与母材的热物理性能差别很小,文中假定整个有限元模型具有相同的随温度变化的热物理性能参数^[1]。在计算焊接温度场时,考虑了熔池的结晶潜热,同时利用牛顿法则和玻尔兹曼定

律分别考虑了工件与外部环境的对流和辐射^[9]. 在计算中设定环境温度为25℃.

3 温度场结果比较与讨论

图4a为点A和点B计算得到的热循环曲线与试验结果的比较. 从图4a中可以看到点A和点B的计算结果与试验结果很吻合. 点A计算得到的最高温度为1161℃, 实测得到的最高温度约为1120℃, 以实测值为基准, 误差为3.7%. 点B计算得到的最高温度为650℃, 实测得到的最高温度约为620℃, 误差为4.8%. 图4b为点C和点D的热循环曲线与试验结果的比较. 可以看到C,D两点计算结果与试验结果很吻合. 点C计算得到的最高温度为738℃, 实测得到的最高温度约为705℃, 误差为4.7%. 点D计算得到的最高温度为574℃, 实测得到的最高温度约为550℃, 误差为4.4%. 综合以上4个典型位置计算结果与试验结果的对比, 发现最大误差在5%以内, 计算结果与试验结果很吻合.

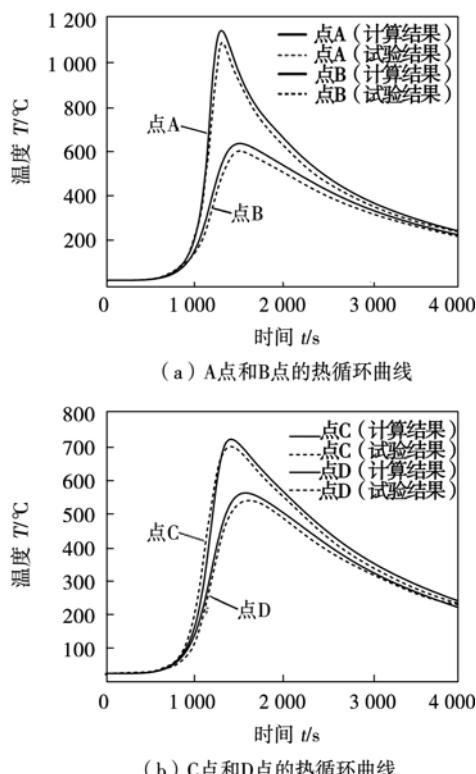


图4 测点热循环曲线

Fig. 4 Thermal cycles at measured locations

图5为垂直焊缝中央截面三个典型位置的热循环曲线. 点E位于焊缝中心, 点F和点G分别位于热影响区(HAZ)的粗晶区和细晶区, 点E、点F和点G的峰值温度分别达到了1737, 1360和918℃. 需

要注意的是点E的热循环曲线, 由于焊料填充采用的是生死单元法, 在焊接热源还没有到达之前, 该节点处于未激活状态, 将一直保持在初始温度, 在热源到达之后就快速达到了最高温度, 而点F和点G位于母材, 通过热传导其温度将逐步上升. 从图5中可以看到, 点E、点F和点G在相变温度800℃以上停留的时间 t_H 分别为557, 526和395 s, 与CO₂气体保护焊等常规的焊接方法相比, 电渣焊的焊缝和HAZ的高温停留时间明显过长, 因此焊缝和HAZ的晶粒长大倾向十分严重. 点E、点F和点G的 $\Delta t_{8/5}$ 时间分别为768, 770和800 s, 明显要高于CO₂气体保护焊等常规弧焊方法, 而过长的 $\Delta t_{8/5}$ 时间也会导致微观组织粗大, 从而使接头的韧性变差. 所以必须要澄清高温停留时间 t_H , $\Delta t_{8/5}$ 时间与接头冲击韧性之间的关系.

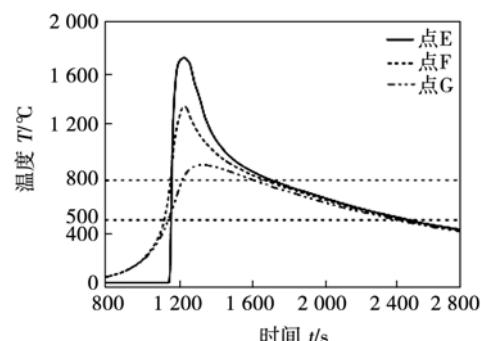


图5 典型位置的热循环曲线

Fig. 5 Thermal cycles at typical locations

图6为电渣焊在焊接过程中的温度场分布, 从图6中可以看到此时的焊接最高温度为1737℃, 这一数值处于Debory等人^[10]实测电渣焊的熔池温度1600~1900℃范围内. 图7为计算所得的熔池形态与实际焊缝形状的对比, 取峰值温度高于1450℃为熔池^[1]. 从图7中可以看到计算所得的熔池形态与实际焊缝形状较吻合. 由此可以看出, 半椭球

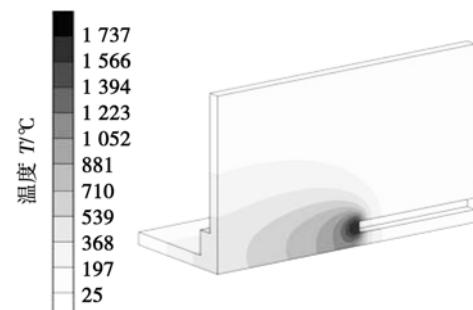


图6 焊接过程温度场

Fig. 6 Temperature distribution during welding process

等密度体积移动热源能很好地模拟电渣焊的焊缝特征。同时还可以观察到,热影响区(温度在750~1450℃范围内的区域)的宽度已经达到20 mm左右,明显大于焊条电弧焊(大约4 mm^[2])等常规焊接方法单道焊所产生的热影响区宽度。

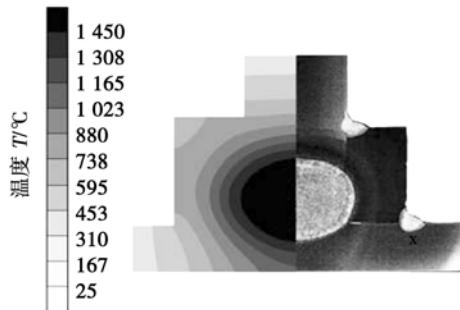


图7 焊接温度场模拟结果与实际焊缝对比

Fig. 7 Comparison of simulation result and real weld

4 结 论

(1) 采用半椭球等密度体积移动热源计算得到的电渣焊接头典型位置热循环曲线与试验结果十分吻合,同时数值模拟得到的焊缝形状与试验结果也基本一致。试验结果验证了所开发的有限元计算方法的有效性。

(2) 电渣焊接头中热影响区的 $\Delta t_{8/5}$ 时间已经达到了800 s,远远大于常规焊接方法的 $\Delta t_{8/5}$ 时间。同时焊缝在相变温度以上停留的时间 t_H 达到557 s,这也远远超过常规焊接方法的 t_H 时间。

(3) 计算结果表明,电渣焊热影响区宽度达到甚至已经超过了20 mm,这一值要远远大于常规焊接方法单道焊所产生的热影响区宽度。

(4) 文中所提出的计算方法为进一步研究和预测电渣焊接头中的焊接残余应力、焊接变形以及焊接接头组织与力学性能评价奠定了基础。

参考文献:

- [1] Dean D A, Shoichi K. Numerical simulation of welding temperature field, residual stress and deformation induced by electro slag welding[J]. Computational Materials Science, 2012, 62(9): 23–34.
- [2] Chen C C, Liang Y C. The effects of electro slag welding on material properties of box column plates [J]. International Steel Structures, 2011, 11(2): 171–189.
- [3] 薛忠明, 顾 兰, 张彦华. 激光焊接温度场数值模拟[J]. 焊接学报, 2003, 24(2): 79–82.
Xue Zhongming, Gu Lan, Zhang Yanhua. Numerical simulation on temperature field in laser welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(2): 79–82.
- [4] 黄瑞生, 刘黎明, 迟鸣声. 镁合金激光-TIG 焊接温度场的红外测量与数值模拟[J]. 焊接学报, 2006, 27(10): 89–92.
Huang Ruisheng, Liu Liming, Chi Mingsheng. Infrared measurement and numerical simulation of temperature[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(10): 89–92.
- [5] 王志峰, 陈佩寅, 吴 伟, 等. 厚板带极埋弧堆焊温度场的有限元模拟[J]. 焊接学报, 2009, 30(1): 89–92.
Wang Zhifeng, Chen Peiyin, Wu Wei, et al. Finite element simulation of temperature field for submerged arc strip overlaying on thick plate[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(1): 89–92.
- [6] 罗 怡, 刘金合, 叶 宏, 等. AZ61 镁合金真空电子束焊接温度场数值模拟[J]. 焊接学报, 2009, 30(3): 73–76.
Luo Yi, Liu Jinghe, Ye Hong, et al. Numerical simulation on temperature field of electron beam welding of AZ61 magnesium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(3): 73–76.
- [7] MSC. Marc Software Corporation. MSC. Marc introductory course [M]. USA: Arcadia Publication, 2005.
- [8] 王宗杰. 熔焊方法及设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [9] Deng D A, Zhou Y J, Bi T, et al. Experimental and numerical investigations of welding distortion induced by CO₂ gas arc welding in thin-plate bead-on joints[J]. Materials & Design, 2013, 53: 720–729.
- [10] Debroy T, Szekely J, Eager T. Heat generation patterns and temperature profiles in electro slag welding[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1980, 11(3): 593–605.

作者简介: 孙加民,男,1989年出生,硕士研究生。主要从事焊接数值模拟和金属材料焊接方面的研究。Email: jiaminsun@cqu.edu.cn

通讯作者: 邓德安,男,博士,教授,博士研究生导师。Email: deandeng@cqu.edu.cn