

# 强制冷却对电渣焊接头温度场影响的数值模拟

孙加民, 何 静, 邓德安

(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

**摘 要:** 为了研究强制冷却对箱型柱中腹板与隔板处电渣焊接头的热影响区宽度、高温停留时间和  $\Delta t_{8/5}$  时间的影响, 以 MSC. Marc 软件为平台, 开发了用于电渣焊接头温度场计算的有限元方法. 在该有限元模型中, 采用半椭球等密度移动热源模型和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, 计算了电渣焊接头在空冷、铜冷和水冷等 3 种冷却条件下的温度场. 同时, 采用试验方法实测了空冷条件下电渣焊接头典型位置的热循环曲线. 结果表明, 计算得到的热循环曲线与实测结果十分吻合, 验证了所开发的数值计算方法的妥当性. 通过对比 3 种冷却条件下的计算结果发现, 电渣焊接头在铜冷和水冷条件下, 热影响区的宽度较空冷条件下明显减小, 高温停留时间大幅缩短, 同时  $\Delta t_{8/5}$  时间也显著缩短了.

**关键词:** 电渣焊; 强制冷却; 等密度热源; 焊接温度场

**中图分类号:** TG 404 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)01-0063-04

## 0 序 言

钢结构由于具有自重轻、刚度大和强度高的特点而被广泛运用于高层建筑中, 其中箱型柱是最为常用的结构形式之一. 在箱型柱中, 腹板与隔板接头是一种常见的焊接接头. 为提高工作效率和降低制造成本, 常常采用电渣焊来制造这类焊接接头<sup>[1]</sup>. 但是, 电渣焊的热输入要远远大于  $\text{CO}_2$  气体保护焊等常规焊接方法<sup>[2]</sup>, 因而使得电渣焊接头在焊接热循环中高温停留时间明显过长, 同时也使得接头形成过宽的热影响区 (HAZ)<sup>[2,3]</sup>, 导致微观组织过于粗大, 从而大幅降低了电渣焊接头的韧性. 如果接头的韧性不足, 结构在服役过程中就很容易发生脆性断裂, 因此, 控制电渣焊接头韧性是十分关键的问题.

近年来, 为了提高箱型柱中电渣焊接头的韧性, 朱政强等人<sup>[4]</sup>在高炉用钢电渣焊过程中采用超声振动方法来改善焊接接头的综合力学性能; Kitani 等人<sup>[5]</sup>采用低碱性和含有一定量的 Ti-B 元素的焊丝, 使焊缝能完全形成针状铁素体组织, 从而大大提高了电渣焊接头的韧性; Kojima 等人<sup>[6]</sup>依据大量试验, 提出了可以预判电渣焊接头热影响区韧性的经验公式, 并通过该研究, 将碳钢和低合金钢热影响区的  $800 \sim 500^\circ\text{C}$  冷却时间 ( $\Delta t_{8/5}$ ) 合理控制在  $300 \sim 600\text{ s}$  之间. 但是到目前为止, 很少有关于采用强制冷却

方式来控制箱型柱电渣焊接头 HAZ 宽度和  $\Delta t_{8/5}$  时间的报道<sup>[7]</sup>. 然而, 从传热学理论上而言, 采用外部铜块通水冷却方式 (铜冷式) 或直接喷水冷却方式 (水冷式) 等强制冷却方式可以避免产生过宽的热影响区和过长的  $\Delta t_{8/5}$  时间, 从而有利于提高电渣焊接头的韧性.

基于 MSC. Marc 有限元软件<sup>[8]</sup>, 开发了用于模拟电渣焊接头温度场的计算方法. 并将空冷条件下的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妥当性. 同时采用数值模拟方法定量讨论了接头在铜冷和水冷等强制冷却条件下对热影响区宽度、高温停留时间和  $\Delta t_{8/5}$  时间的影响.

## 1 试验方法

图 1 为箱型柱腹板与隔板处焊接原理示意图. 为了用试验方法测量材料为 SM490A 钢<sup>[9]</sup>的箱型柱腹板与隔板电渣焊接头的焊接温度循环, 制作了如图 2 所示的焊接试件. 试件总长为  $600\text{ mm}$ , 腹板的宽度为  $500\text{ mm}$ , 隔板的高度为  $300\text{ mm}$ , 腹板和隔板的厚度分别为  $40\text{ mm}$  和  $60\text{ mm}$ , 挡板的高度为  $50\text{ mm}$ , 宽为  $30\text{ mm}$ . 电渣焊的焊接电流  $380\text{ A}$ , 焊接电压  $50\text{ V}$ , 焊接速度为  $13.7\text{ mm/min}$ , 焊接材料为 YGW18<sup>[3]</sup>.

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 点和离中心  $50$

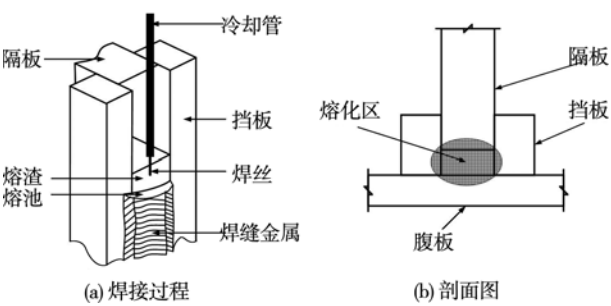


图 1 电渣焊原理示意图  
Fig. 1 Image of ESW process mechanism

mm 处的 B 点,具体位置如图 2 所示.

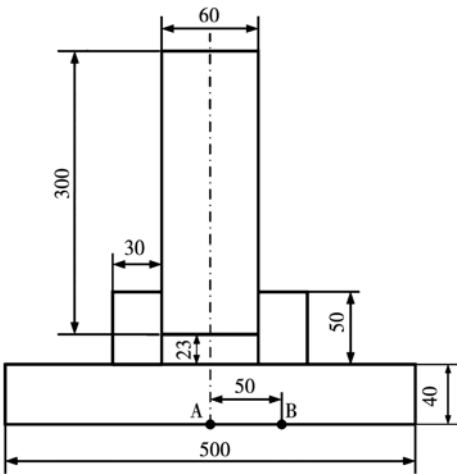


图 2 试件尺寸 (mm)  
Fig. 2 Dimension of mock-up

2 有限元温度场计算方法

虽然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,但是为了方便起见,文中采用电弧加热和熔化金属方式进行模拟仿真<sup>[1-3]</sup>. 由于该模型在几何形状上为对称模型,同时热源也有左右对称的特征,为了节省计算时间,采用了半模型进行计算. 网格划分时,为平衡考虑计算精度和计算时间问题,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. 有限元计算模型和网格划分如图 3 所示. 其中,节点总数为 35 953,单元总数为 32 720.

2.1 温度场计算

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被焊接工件内部传导过程为

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] + q_v$$

(1)

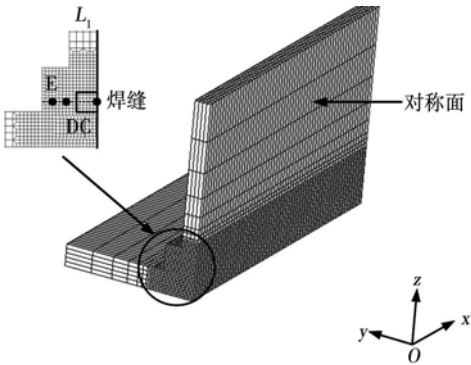


图 3 有限元模型  
Fig. 3 Finite element model

式中: $T$  为温度场; $\lambda_x, \lambda_y$  和  $\lambda_z$  为热传导系数在 3 个方向上的分量; $q_v$  为内部热源的发热率; $\rho$  为密度; $c$  为比热容.

文中采用半椭球等密度体积移动热源<sup>[7]</sup>来模拟电渣焊的焊接热输入,并以生死单元技术来考虑焊缝成形. 在有限元模拟计算中,假定其电渣焊的热效率为 0.9<sup>[3]</sup>.

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<sup>[9]</sup>. 在计算温度场时,考虑了熔池的结晶潜热,设定的潜热值为 300 J/g,固液相温度区间设定为 1 430 ℃ 和 1 480 ℃<sup>[7]</sup>. 在计算过程中,采用总的等效换热系数来考虑对流换热和辐射换热效应. 在计算中设定环境温度为 25 ℃.

2.2 计算方案

根据空冷、铜冷和水冷等 3 种冷却方式,设定了 3 个计算方案(表 1). 铜板与腹板底部的接触位置以及喷水冷却位置(面 1)如图 4 所示. 计算采用工件与空气的对流换热系数为 30 W/(m<sup>2</sup>·℃)<sup>[3]</sup>. 在工程运用中,为了方便起见,采用强对流换热系数<sup>[7]</sup>模拟铜冷和水冷的实际散热情形. 对于铜冷, Deng 等人<sup>[7]</sup>假定以对流方式代替实际腹板底部与通水铜板之间的接触传热,通过试验测得典型位置的热循环曲线,并与数值模拟结果进行比较,然后通过逆计算方法得到随温度变化的等价对流热交换系数<sup>[7]</sup>. 对于水冷,则采用试件在淬火热处理数值模拟中的对流换热系数<sup>[10]</sup>(图 5).

表 1 计算方案  
Table 1 Simulation cases

方案	面 1	其余面
方案一	空冷	空冷
方案二	铜冷	空冷
方案三	水冷	空冷

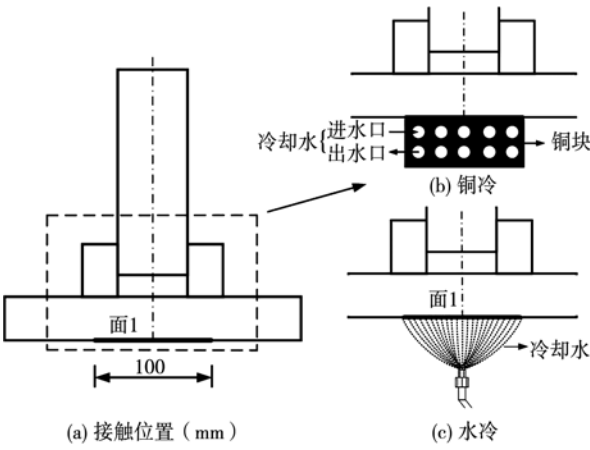


图 4 面 1 位置及冷却方式

Fig. 4 Location of surface 1 and cooling conditions

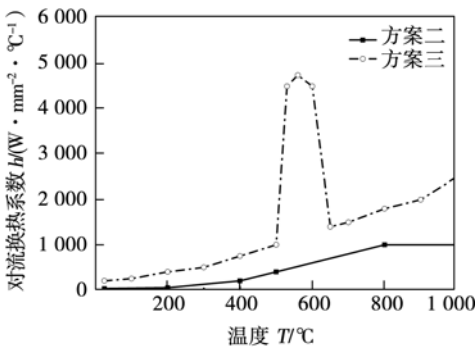


图 5 对流换热系数

Fig. 5 Heat transfer coefficient

3 温度场结果比较与讨论

图 6 显示的是方案一中点 A 和点 B 计算得到的热循环曲线与试验结果的比较. 从图 6 中可以看到点 A 和点 B 的计算结果与试验结果十分吻合. 点 A 计算得到的最高温度为 949 °C, 实测得到的最高温度约为 906 °C, 以实测值为基准, 误差为 4.7%. 点 B 计算得到的最高温度为 671 °C, 实测得到的最高

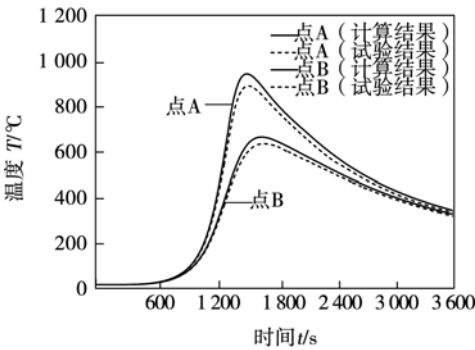
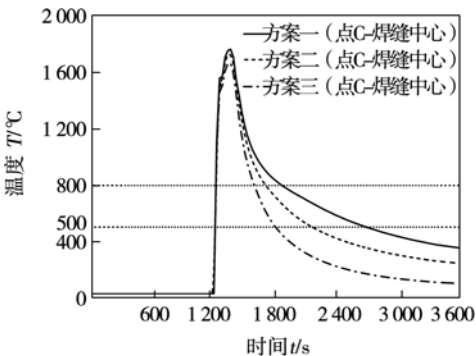


图 6 点 A 和点 B 位置的热循环曲线

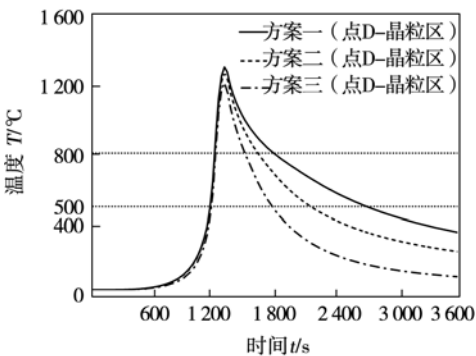
Fig. 6 Thermal cycles at A and B locations

温度约为 642 °C, 误差为 4.5%. 综合以上两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十分吻合.

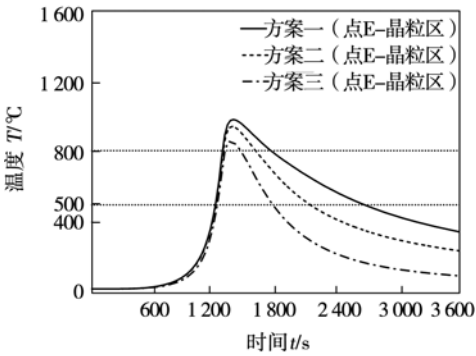
文中取垂直焊缝中央截面 3 个典型位置的热循环曲线作为研究对象, 其中点 C 位于焊缝区 (温度大于 1 450 °C), 点 D 和点 E 分别位于热影响区的粗晶区 (1 100 ~ 1 450 °C) 和细晶区 (850 ~ 1 100 °C). 点 D 距点 C 为 37.5 mm, 点 E 距点 C 为 48.8 mm, 具体位置参见图 3. 图 7a 为方案一、方案二和方案三位于点 C 的热循环曲线, 从图中可以看到方案一、方案二和方案三在相变温度 800 °C 以上停留的时间  $t_H$  分别为 644, 499 和 386 s, 以方案一为基准, 方案二和方案三较方案一的高温停留时间明显减少. 于此同时, 方案一、方案二和方案三的  $\Delta t_{8/5}$  时间分别为



(a)点C热循环曲线



(b)点D热循环曲线



(c)点E热循环曲线

图 7 C 和 D 及 E 位置的热循环曲线

Fig. 7 Thermal cycles at point C, D and E

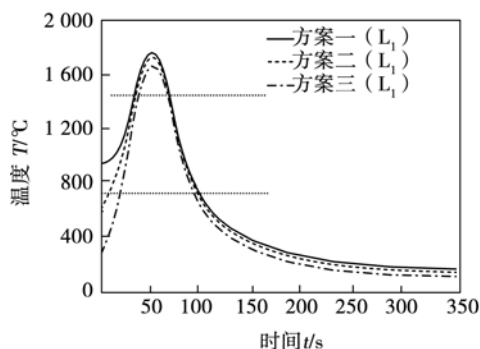
783, 450 和 200 s, 以方案一为基准, 方案二和方案三较方案一的  $\Delta t_{8/5}$  时间分别下降了 333 s 和 583 s, 其中方案三的  $\Delta t_{8/5}$  时间仅为方案一的 1/4 左右, 大大提高了冷却速度, 从而避免了微观组织过于粗大, 可以有效提高电渣焊接头的力学性能, 尤其是韧性. 图 7b 和图 7c 显示的是方案一、方案二和方案三位于点 D 和点 E 的热循环曲线, 从图中可以看到, 方案一、方案二和方案三的  $\Delta t_{8/5}$  和  $t_H$  时间呈现出与点 C 相同的规律, 具体如表 2 所示.

表 2 温度循环的对比

Table 2 Comparison of thermal cycles

位置	800 ~ 500 °C 时间 $\Delta t_{8/5}/s$			800 °C 以上的时间 $t_H/s$		
	方案一	方案二	方案三	方案一	方案二	方案三
点 C	783	450	200	644	499	386
点 D	810	480	250	540	410	280
点 E	825	520	300	450	310	150

图 8 描述了垂直焊缝中央截面  $L_1$  位置 (图 3) 各点的峰值温度分布情况. 从图 8 中可以看到, 方案一、方案二和方案三的熔池宽度分别为 35, 33 和 29 mm, 表明熔池的大小受冷却条件的影响较小. 方案一、方案二和方案三的热影响区 (温度在 750 ~ 1 450 °C 范围内区域<sup>[3]</sup>) 的宽度分别达到了 34, 26 和 18 mm (在  $z=0 \sim 40$  mm 区域). 很明显, 在采用铜冷和水冷等强制冷却条件下, 热影响区的宽度较空冷条件下显著减小, 其中以水冷的影响尤为突出, 从而可以大幅减少电渣焊的热影响范围, 并提高电渣焊接头的力学性能.

图 8  $L_1$  位置各点的峰值温度分布Fig. 8 Peak temperature distributions along  $L_1$ 

## 4 结 论

(1) 研究表明, 电渣焊接头典型位置计算所得的热循环曲线与试验结果非常吻合, 验证了所

开发的电渣焊温度场计算方法的有效性和准确性.

(2) 采用铜冷和水冷等强制冷却方式, 可以大幅缩短电渣焊接头的  $t_H$  以及  $\Delta t_{8/5}$  时间. 基于该温度场的计算结果, 可以推测采用强制冷却方式可以有效提高焊接接头的综合力学性能, 尤其是接头的韧性.

(3) 计算结果表明, 采用铜冷和水冷等强制冷却方式对熔池宽度的影响较小, 但是显著减少了热影响区的宽度.

## 参考文献:

- [1] Deng 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] 孙加民, 蔡建鹏, 叶延洪, 等. 电渣焊接头的温度场数值模拟[J]. 焊接学报, 2015, 36(7): 93-96.  
Sun Jiamin, Cai Jianpeng, Ye Yanhong, et al. Numerical simulation of welding temperature field induced by electro slag welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(7): 93-96.
- [4] 朱政强, 陈立功, 饶德林, 等. 振动调制工艺在高炉用钢电渣焊中的应用[J]. 焊接学报, 2005, 26(2): 73-76.  
Zhu Zhengqiang, Chen Ligong, Rao Delin, et al. Experimental study on electro slag weld of blast furnace steel using vibratory condition technology[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(2): 73-76.
- [5] Kitani Y, Ikeda R, Ono M, et al. Improve of welding metal toughness in high input electro slag welding of low carbon steel[J]. Welding in the world, 2009, 53(2): 63-66.
- [6] Kojima A, Yoshii K, Hada T, et al. Development of high HAZ toughness steel plates for box columns with high input welding[J]. Nippon Steel Technical Report, 2004, 38(2): 33-37.
- [7] Deng D A, Sun J M, Dai D P, et al. Influence of accelerated cooling condition on welding thermal cycle, residual stress, and deformation in SM490A steel ESW joint[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24(9): 3487-3501.
- [8] Marc Software Corporation. MSC. marc introductory course[M]. USA: Arcadia Publication, 2005.
- [9] 叶延洪, 孙加民, 蔡建鹏, 等. 焊缝屈服强度对 SM490A 钢焊缝残余应力预测精度的影响[J]. 焊接学报, 2015, 36(7): 17-20.  
Ye Yanhong, Sun Jiamin, Cai Jianpeng, et al. Influence of yield strength of weld metal on prediction accuracy of welding residual stress in SM490A steel joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(7): 17-20.
- [10] Hayato S. Construction of heat treatment database and enhancement of simulation technique[J]. Technical Paper, 2005, 155(51): 1-9.

**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. 发表论文 6 篇. Email: jiaminsun@cqu.edu.cn

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