

通过温度场数值模拟分析窄间隙埋弧焊过热区组织演化

张 磊¹, 柳长青¹, 于静伟¹, 胡希海², 龚 凤², 金光日¹

(1. 机械科学研究院 哈尔滨焊接研究所, 哈尔滨 150028; 2. 抚顺机械设备制造有限公司, 抚顺 113006)

摘 要: 多层多道焊时, 后层焊道的热量会对前层焊道起到热处理的作用, 使前层焊道的热影响区组织尤其是过热区组织发生转变, 进而改变接头的力学性能。文中采用数值模拟技术, 从温度场与组织转变对应关系的角度分析特定焊接工艺下的单丝、双丝窄间隙埋弧焊坡口侧壁过热粗晶区的组织演化过程。模拟结果表明, 针对两种焊接形式, 焊道厚度为 4 mm 时, 单丝焊原过热区约有 50% 最终经历正火作用, 双丝焊约有 55% ~ 60%。针对双丝焊前后焊丝的不同作用, 改变焊接工艺, 适当降低前丝焊接电流, 可以获得更小的坡口侧壁过热粗晶区, 并且后层焊道对前层焊道的热处理效果更好。

关键词: 窄间隙埋弧焊; 坡口侧壁; 过热粗晶区; 组织演化; 数值分析

中图分类号: TG 444 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)04-0103-04

0 序 言

窄间隙埋弧焊是厚板结构产品制造的重要焊接方法。近年来国内厚板结构越来越多, 如加氢反应器、核容器、锅炉汽包、水压机等结构, 板厚都在 200 ~ 600 mm。进一步优化厚板结构焊接接头性能, 提高生产效率, 已到了非常需要的地步^[1]。

由于厚壁焊接技术均采用多层多道焊接的方式, 母材多次反复受热, 热影响区的性能, 特别是过热粗晶区的韧性成为影响厚板焊接接头性能的关键。然而多层多道焊后层焊道将会对前层焊道及其热影响区起到热处理作用, 使前层焊道的热影响区组织, 尤其是过热区组织发生转变, 进而改变接头的力学性能^[2]。

目前国内关于厚板窄间隙埋弧焊组织演化过程的研究相对较少, 对窄间隙埋弧焊焊接过程的数值模拟也多用于应力场分析。文中以当今常用的左右偏摆型单丝窄间隙埋弧焊(以下简称“单丝焊”)和前丝左右旋摆、后丝偏摆型双丝窄间隙埋弧焊(以下简称“双丝焊”)为研究对象, 采用数值模拟技术, 计算两种焊接形式坡口侧壁温度场, 通过温度区间与组织转变的对应关系, 探索两种焊接形式坡口侧壁过热粗晶区的组织演化过程。从组织演化的角度为优化焊接工艺, 充分利用后层焊道焊接时的热量对前层焊道的热影响区进行有效的热处理, 改善原过

热粗晶区的组织及性能提供理论指导。

1 模型建立

单丝焊与双丝焊在焊丝指向坡口侧壁的角度上存在差异: 单丝焊时, 焊丝中心线位于与坡口侧壁垂直的平面内; 双丝焊时, 前丝中心线位于与坡口侧壁呈 5° ~ 10° 的平面内。一层焊两道, 每道焊接过程中焊丝姿态以相应侧坡口侧壁为基准。图 1 为焊接过

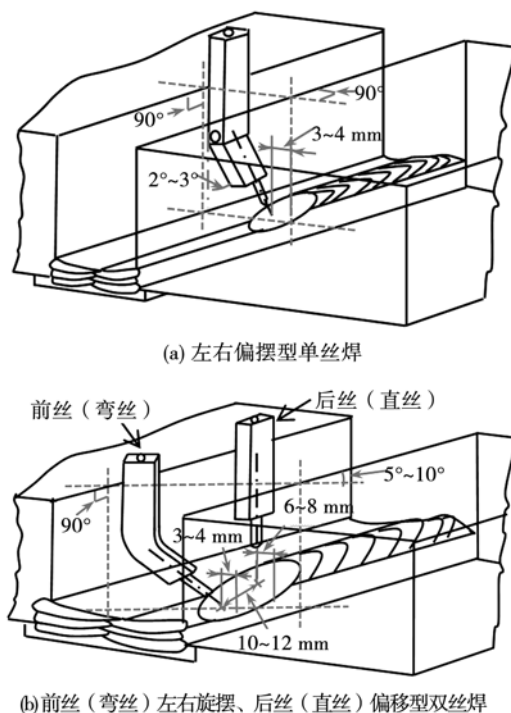


图 1 窄间隙埋弧焊焊接过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of narrow gap saw

程示意图^[3].

针对窄间隙埋弧焊焊丝姿态及电弧能量分布的特殊性,文中采用考虑电弧倾斜及坡口侧壁对电弧能量分配影响的热源模型进行温度场数值模拟^[4,5].应用 ABAQUS 有限元分析软件,建立近似窄间隙坡

口形式的三维角焊缝温度场分析模型,忽略填充金属的影响,考虑辐射及对流换热对热量散失的影响,模拟存在坡口侧壁时表 1 所示工艺参数下的单道焊温度分布.母材选用 Q345R,其热物理性能参数随温度变化而改变.

表 1 角焊缝模拟工艺参数
Table 1 Welding parameter

焊接形式	前丝电流 I_L/A	前丝电压 U_L/V	后丝电流 I_T/A	后丝电压 U_T/V	焊接速度 $v/(m \cdot h^{-1})$	热输入 $E/(kJ \cdot cm^{-1})$	试板温度 $T/^{\circ}C$	填充效率 $P/(kg \cdot h^{-1})$
单丝	500	32			21	27.4	120	约 5.5
双丝	500	32	500	32	32	36.0	120	约 11.0
双丝	450	32	550	32	32	36.0	120	约 11.0

2 确定热源方程参数

热源方程式如下,即

$$q_f(x,y,z) = \frac{6\sqrt{3}(f_f Q) \sin \alpha \sin \gamma}{a_f b c \cos \beta \pi \sqrt{\pi}} \exp(-\frac{3x^2}{(a_f/\sin \alpha)^2} - \frac{3y^2}{(b \cos \beta)^2} - \frac{3z^2}{(c/\sin \gamma)^2}), x \geq 0, z > L \quad (1)$$

$$q_r(x,y,z) = \frac{6\sqrt{3}(f_r Q) \sin \alpha \sin \gamma}{a_r b c \cos \beta \pi \sqrt{\pi}} \exp(-\frac{3x^2}{(a_r/\sin \alpha)^2} - \frac{3y^2}{(b \cos \beta)^2} - \frac{3z^2}{(c/\sin \gamma)^2}), x < 0, z > L \quad (2)$$

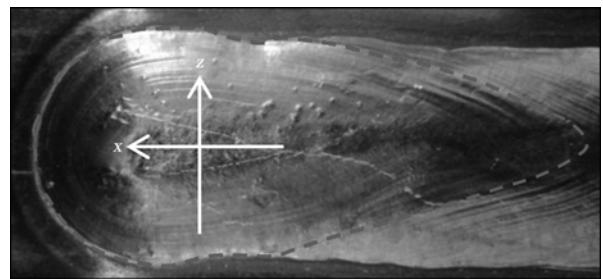
$$q_f(x,y,z) = \frac{6\sqrt{3}(f_f Q) \sin \alpha \sin \gamma}{a_f b c \cos \beta \pi \sqrt{\pi}} \exp(-\frac{3(z-L)^2}{(a_f/\sin \alpha)^2} - \frac{3y^2}{(b \cos \beta)^2} - \frac{3(x-L)^2}{(c/\sin \gamma)^2}), x \geq 0, z \leq L \quad (3)$$

$$q_r(x,y,z) = \frac{6\sqrt{3}(f_r Q) \sin \alpha \sin \gamma}{a_r b c \cos \beta \pi \sqrt{\pi}} \exp(-\frac{3(z-L)^2}{(a_r/\sin \alpha)^2} - \frac{3y^2}{(b \cos \beta)^2} - \frac{3(x-L)^2}{(c/\sin \gamma)^2}), x < 0, z \leq L \quad (4)$$

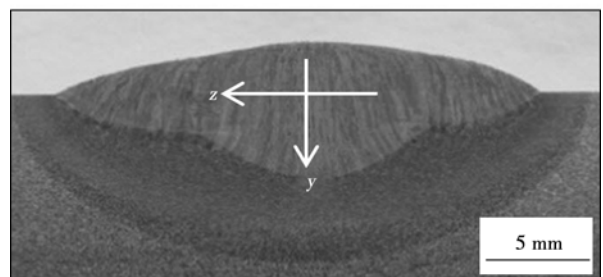
式中: x 为焊接方向; y 为高度方向; z 为熔宽方向; L 为坡口侧壁在 z 轴上的坐标; f_f, f_r 为热流密度分布系数, $f_f + f_r = 2$; Q 为热源总功率, $Q = \eta UI$, U 为电弧电压; I 为电弧电流; η 为电弧热效率; a_f, a_r, b, c 为电弧垂直于工件表面时在 x, y, z 三个方向能量密度衰减到电弧中心能量的 5% 时距电弧中心点的距离; α, β, γ 为电弧主轴与 x, y, z 三个方向构成的夹角.

热源方程式中, α, β, γ 和焊丝指向与 x, y, z 三个方向构成的夹角近似相同,可认为三个参数为已知; Q 是焊接工艺参数的已知函数,忽略焊接工艺参数的波动,则可认为该参数已知; f_f, f_r 是 a_f, a_r 的已知函数.因此只有 a_f, a_r, b, c 未知.

由于 a_f, a_r, b, c 与电弧指向及作用于几个平面无关,因此进行电弧轴线垂直于工件表面的平板焊接模拟及试验即可确定这四个参数的取值.试验所用工艺参数与表 1 中单丝焊参数相同;图 2 为焊接试验结果中的熔池形貌及焊缝截面;图 3 为修正热源模型参数后的模拟结果,结果中假定材料的固液相线为 1 500 $^{\circ}C$;图 4 为模拟结果与实测结果特征点温度对比.表 2 为特征位置的详细对比结果.



(a) 熔池形貌



(b) 焊缝截面

图 2 熔池形貌及焊缝截面

Fig. 2 Shape of welding pool and cross-section

通过试验结果与模拟结果的比对可知,采用修正后的热源模型参数进行温度场模拟的结果与试验

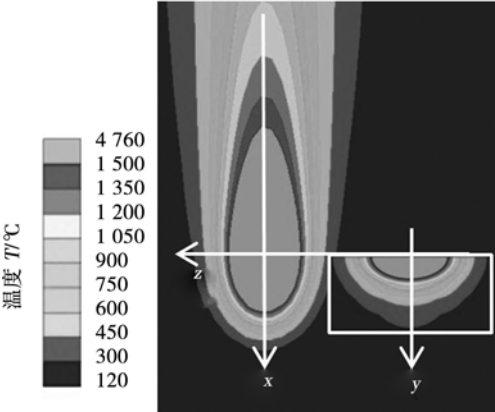


图3 平板焊接试验模拟结果

Fig. 3 Simulation results of flat welding

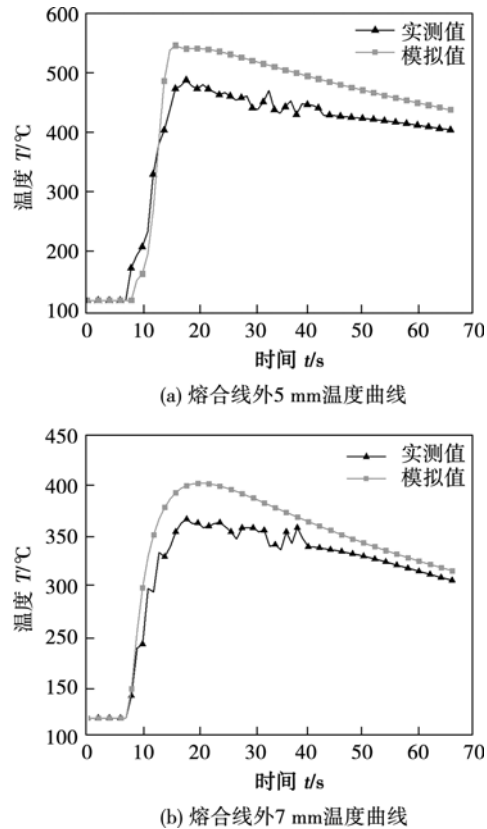


图4 模拟结果与实测结果特征点温度对比

Fig. 4 Comparison between simulation and experiment results of temperature

结果吻合良好. 为了进一步验证所选热源模型参数的正确性,又进行了多组平板焊接试验,并对这些试验过程进行温度场模拟. 在多组试验中,不论改变焊接电流、焊接电压、焊接速度还是焊丝倾斜角度,模拟结果与实测结果均吻合良好. 说明所选择的热源模型参数具有宽泛的焊接工艺适用范围,可用于窄间隙埋弧焊温度场数值模拟.

表2 平板焊接模拟结果与试验结果对比

Table 2 Comparison between simulation and experiment results

对比结果	熔池长度 l/mm	熔池宽度 w/mm	熔池深度 d/mm	熔合线外 5 mm 最高温度 $T_5/^\circ\text{C}$	熔合线外 7 mm 最高温度 $T_7/^\circ\text{C}$
实测	54.0	22.6	4.5	485	355
模拟	56.0	23.4	4.6	550	397
偏差值	+2.0	+0.8	+0.1	+65	+42
误差(%)	+3.7	+3.5	+2.2	+13.4	+11.8

3 模拟结果与分析

多层多道焊时,忽略前层焊道对后层焊道的影响、坡口收缩变形及焊缝平整度的影响,则每道焊缝具有完全相同的温度场. 以单道焊时坡口侧壁温度分布为基础,将模拟结果上移一个焊道厚度的距离,即可表征在上述假设条件下后层焊道的温度场. 该结果可用于分析理想条件下多层多道焊时后层焊道的热量对前层焊道坡口侧壁热影响区的热处理效果及对组织转变的影响.

文中忽略不完全正火及回火作用,仅分析坡口侧壁热影响区中过热粗晶区的组织演化过程,并做如下假设:液相线温度为 1 500 °C;过热粗晶区温度范围为 1 200 ~ 1 500 °C;正火细晶区温度范围为 900 ~ 1 200 °C;焊道厚度为 4 mm.

提取模拟结果中侧壁热影响区在 900, 1 200, 1 500 °C 的等温线,分析经过三层焊接后,第一层焊道过热粗晶区的组织转变情况. 图 5 为利用单道焊温度场制作的单丝、双丝窄间隙埋弧多层多道焊坡口侧壁热影响区等温图.

从图 5 可以看出,后层焊道,即 2 号和 3 号焊道均有部分过热区温度区间或正火区温度区间与前层焊道,即 1 号焊道的过热区温度区间重合,使 1 号焊道的过热粗晶区发生组织转变. 其中 b 区域在 2 号焊道的正火温度区间内,因此组织得到一定程度的细化;c,d,e 区域(双丝焊时没有 e 区域)在 2 号焊道的过热区温度区间内,该区域组织有进一步长大的倾向. d,e 区域(双丝焊时没有 e 区域)除了受 2 号焊道热量的影响外,还受 3 号焊道热量的影响. d 区域在 3 号焊道的正火温度区间内,相当于二次过热+一次正火区,组织得到一定程度的细化;e 区域在 3 号焊道的过热区温度区间内,变为三次过热区,组织进一步长大.

1 号焊道产生的原本连续的过热区 a,b,c,d,e,在 2 号和 3 号焊道的热量作用下,大部分区域经历了正火作用,组织得到一定程度的细化,使得原本连

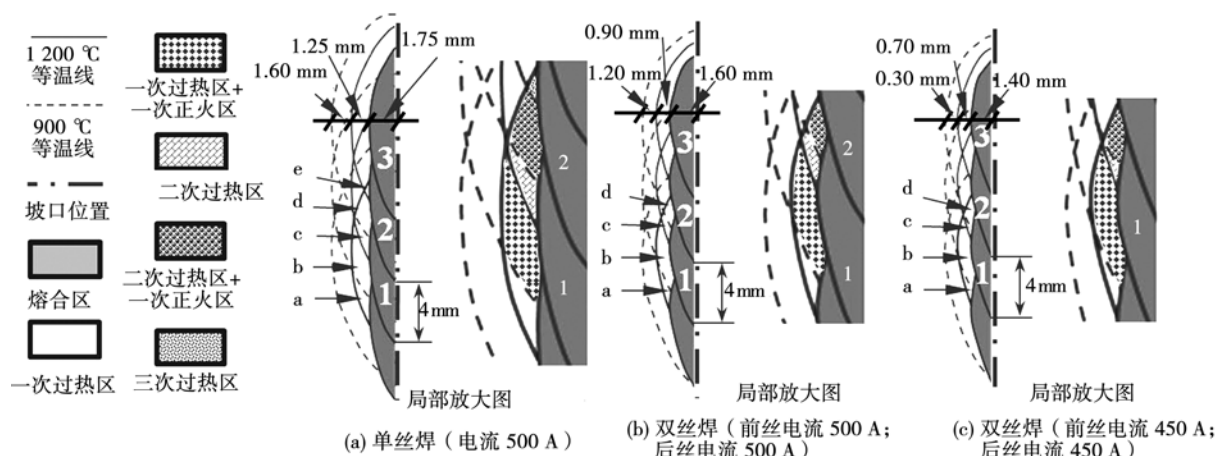


图 5 窄间隙埋弧多层多道焊侧壁热影响区等温图

Fig. 5 constant temperature line in heat affected zone of sidewall

续的过热区不再连续. 对于单丝焊, 约有 50% 的原过热区最终经历正火作用, 组织得到细化; 对于前、后丝电流均为 500 A 的双丝焊, 这一比例约为 55%; 对于前丝电流 450 A、后丝电流 550 A 的双丝焊, 这一比例约为 60%. 如表 1 所示, 双丝焊热输入约为单丝焊的 1.3 倍, 但每道焊接产生的原始过热粗晶区宽度却更小 (图 5, 单丝焊为 1.25 mm, 双丝焊为 0.70 ~ 0.90 mm), 并且后层焊道的热量对前层焊道的热处理效果更突出. 这主要与两种焊接形式指向坡口侧壁的焊丝姿态不同, 并且双丝焊的后丝离侧壁较远有关. 单丝焊时, 焊丝在垂直于坡口侧壁的平面指向侧壁, 侧壁分得了较多的电弧能量; 双丝焊时, 前丝在非垂直于坡口侧壁的平面指向侧壁, 侧壁分得的前丝电弧能量较少, 而后丝又离侧壁较远, 对侧壁的热影响较小.

双丝焊时, 两根焊丝所起的作用与单丝焊时不同. 单丝焊时需要兼顾侧壁熔合和焊道的铺展. 双丝焊时, 前丝的主要作用是保证侧壁熔合而不必兼顾焊道的铺展, 后丝的主要作用是完成焊道的铺展、增加填充金属量, 而不必兼顾侧壁的熔合. 在保证侧壁充分熔合的基础上, 根据双丝焊时两根焊丝的不同作用适当调整焊接工艺, 使前后焊丝的工艺参数不同, 可得到更小的过热区. 从图 5 中可以看出, 降低前丝的电流后, 坡口侧壁的过热区范围进一步减小, 原过热区最终经历正火作用的比例进一步扩大. 这对提升焊接接头的力学性能是有利的.

4 结 论

(1) 多层多道焊时, 前层焊道的过热区会在后层焊道的热处理作用下发生组织演化, 使原本连续

的过热区不再连续. 在焊道厚度为 4 mm 的假设下, 对于文中所研究的两种焊接姿态, 单丝焊约有 50% 的原过热区最终经历正火作用, 双丝焊约有 55% ~ 60%.

(2) 双丝焊时, 根据两根焊丝的不同作用, 在保证侧壁充分熔合的基础上降低前丝电流, 提高后丝电流. 可以在不降低填充效率的基础上获得更小的坡口侧壁过热区, 并且原过热区最终经历正火作用的比例更高.

参考文献:

- [1] 林尚扬, 于 丹, 于静伟. 压力容器焊接新技术及其应用[J]. 压力容器, 2009(11): 1-6.
Lin Shangyang, Yu Dan, Yu Jingwei. New welding technologies for pressure vessel manufacturing[J]. Pressure Vessel Technology, 2009(11): 1-6.
- [2] Hantsch H, Million K, Zimmerman H. Submerged arc narrow-gap welding of thick-walled components[J]. Welding Journal, 1982(7): 27-34.
- [3] 陈裕川. 窄间隙埋弧焊技术的新发展(一)[J]. 现代焊接, 2012(4): 15-20.
Chen Yuchuan. New development of narrow gap submerged arc welding technique(1)[J]. Modern Welding Technology, 2012(4): 15-20.
- [4] 孟庆国, 方洪渊, 徐文立, 等. 双丝焊热源模型[J]. 机械工程学报, 2005(4): 110-113.
Meng Qingguo, Fang Hongyuan, Xu Wenli, et al. Heat source model for twin wire welding[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005(4): 110-113.
- [5] 张 磊, 柳长青, 于静伟. 窄间隙埋弧焊温度场数值分析[J]. 焊接学报, 2016, 37(3).
Zhang Lei, Liu Changqing, Yu Jingwei, et al. Numerical analysis of narrow gap submerged arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(3): 83-87.

作者简介: 张 磊, 男, 1986 年出生, 硕士, 工程师. 主要从事窄间隙埋弧焊及摩擦焊方面的研究工作. 发表论文 8 篇. Email: leibanzhanglei@163.com

通讯作者: 于静伟, 男, 研究员. Email: hwi_mhh@126.com