

基于不同等离子电流的等离子-MIG 复合焊数值模拟

董军强¹, 陈克选^{1,2}, 陈鹏¹

(1. 兰州理工大学, 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050)

摘要: 建立 Q235 低碳钢平板对接三维有限元模型, 研究不同等离子电流对 Q235 钢焊接熔深、温度场及残余应力的影响。采用双椭球体热源模型加三维锥体热源模型的组合式体积热源模型, 模拟等离子-MIG 复合焊热源, 通过 Q235 钢平板对接焊工艺试验结果验证数值模拟的准确性。结果表明, 焊缝截面熔池形貌的数值模拟结果与试验结果吻合较好, 说明该热源模型可以可靠模拟等离子和 MIG 电弧 2 种热源的耦合效果; 以不同等离子电流大小为因素, 研究等离子电流对等离子-MIG 复合焊接温度场及应力场的影响, 等离子电流可以有效增加熔深并减小高残余应力集中区。

关键词: 等离子-MIG 复合焊; 数值模拟; 温度场; 应力场

中图分类号: TG434 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20220131001

Numerical simulation of plasma-MIG hybrid welding based on different plasma currents

Dong Junqiang¹, Chen Kexuan^{1,2}, Chen Peng¹

(1. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: A three-dimensional 3D finite element model of Q235 low carbon steel plate butt joint was established to study the effects of different plasma currents on welding penetration, temperature field and residual stress of Q235 steel. The combined volume heat source model of the double ellipsoid heat source model and the three-dimensional cone heat source model was used to simulate the plasma-MIG hybrid welding heat source, and the accuracy of the numerical simulation was verified by the experimental results of the butt welding process of the Q235 steel plate. The results show that the numerical simulation results of the weld pool morphology of the weld section are in good agreement with the experimental results, and the heat source model can reliably simulate the combined effect of the two heat sources of plasma and MIG arc. The effects of plasma current on the temperature field and stress field of plasma-MIG hybrid welding were studied with different plasma currents as factors. The results show that the plasma current can effectively increase the penetration and reduce the high residual stress concentration area.

Key words: plasma-MIG hybrid welding, numerical simulation, temperature field, stress field

0 前言

随着实际生产中对焊接效率的要求日益提高, 等离子-MIG 复合焊作为一种高效节能、优质经济的焊接工艺方法, 逐渐进入到工业生产当中^[1]。等离子-MIG 复合焊是将等离子弧焊和 MIG 焊这 2 种不同的焊接工艺相结合而成的一种新型焊接工艺方法, 通

过两热源复合方式实现优势互补, 可提高焊接质量和焊接效率^[2]。等离子-MIG 复合焊根据热源位置不同可分为同轴式和旁轴式 2 种, 旁轴式等离子-MIG 复合焊接系统, 复合焊枪采用一体式设计, 复合焊枪中 MIG 焊丝呈倾斜状与等离子焊钨极之间呈一定角度设计, 焊接时等离子电弧保持与工件表面垂直状态, 以保证在焊接中、厚板时焊件可靠穿透, 形

成穿孔熔池,实现穿孔等离子弧焊接,而 MIG 焊电弧倾斜呈一定角度与等离子电弧完成耦合,实现复合焊接。

等离子-MIG 复合焊通过 2 种热源的耦合作用,能够在发挥各自优点的同时避免各自的不足,最终获得更高的焊接质量。目前对等离子-MIG 复合焊的研究集中于焊接工艺、电弧形态、热源耦合、熔滴过渡等。文献 [3] 中对 5083 和 6061 铝合金进行等离子-MIG 复合焊工艺试验,对其力学性能和焊缝组织进行分析;文献 [4] 采用鱼骨法对 7075 铝合金进行焊接热裂纹敏感性试验,研究了焊接热输入对于热裂纹敏感性的影响规律;文献 [5] 利用 Fluent 有限元分析软件建立电弧熔池一体化模型,对等离子-MIG 复合焊电弧、熔池温度场及力学行为进行了研究。关于等离子-MIG 复合焊温度场及残余应力研究相对较少。

文中基于非线性热弹塑性有限元分析法对 Q235 低碳钢平板对接焊进行数值模拟,通过工艺试验结果进行热源校核,来验证数值模拟的可靠性,然后建立 4 种不同等离子电流的试验方案,分析焊接过程中等离子电流对复合焊熔深、温度场及应力场的影响,为等离子-MIG 复合焊工艺试验提供理论依据。

1 试验方法

采用等离子-MIG 复合焊设备进行 Q235 低碳钢平板对接工艺试验,验证热源模型的准确性,试验设备由焊接系统和数据采集系统组成,如图 1 所示,焊接系统包括复合焊枪、送丝机构、供气系统、水冷系统、等离子维弧电源、等离子主弧电源、MIG 电源和工件行走机构;数据采集系统包括 NI 数据采集卡、霍尔传感器、K 形热电偶及温度变送器。试验采用的焊丝牌号为 ER70-5S,直径为 $\phi 1.2\text{ mm}$,保护气和离子气为纯度 99.99% 的高纯氩气,其他焊接工艺参数见表 1。

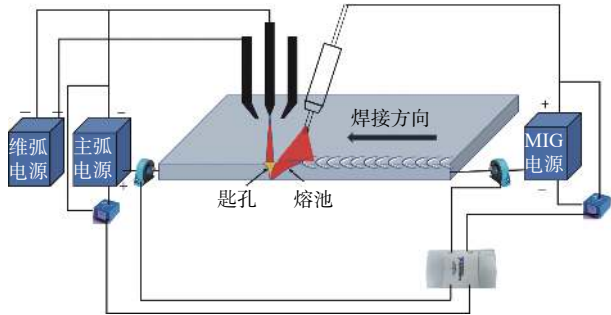


图 1 试验系统

表 1 焊接工艺参数

MIG 电流 I/A	MIG 电压 U/V	等离子电流 I_1/A	等离子电压 U_1/V	焊接速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	保护气体流量 $Q/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	离子气体流量 $Q_1/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$
150	15	100	12	5	10	6

2 数值模拟

2.1 有限元模型建立

Q235 低碳钢等离子-MIG 复合焊平板对接焊试验采用尺寸为 2 块 $120\text{ mm}\times 120\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 的钢板,为兼顾计算精度和计算效率,将整个计算区域划分为焊缝区、热影响区和远离焊缝区,3 个区域采用不同的网格密度来进行过渡网格划分,网格单元个数为 13 215 个,网格划分如图 2 所示。

2.2 材料参数设定

试验材料选择 Q235 低碳钢,采用材料性能参数计算软件 JMatPro 计算了 Q235 低碳钢随温度变化的性能参数,热物性参数和力学性能参数分别如图 3、图 4 所示。

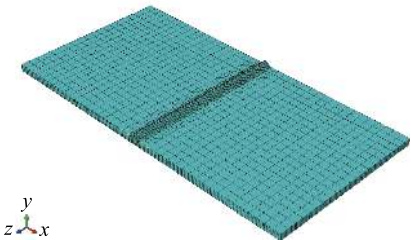


图 2 网格划分图

2.3 热源模型的建立及验证

2.3.1 热源模型的建立

热源模型的选择在焊接温度场数值模拟中起着至关重要的作用,对于热源模型选择的判断标准就是其热流分布是否符合该种焊接方法,而判断是否符合的方法就是对比实际焊接和数值模拟所得到熔

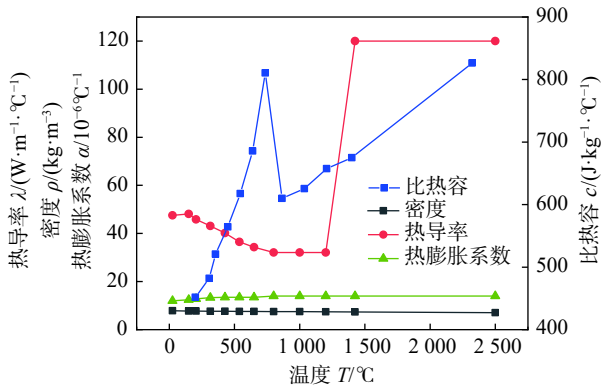


图3 热物理性能参数

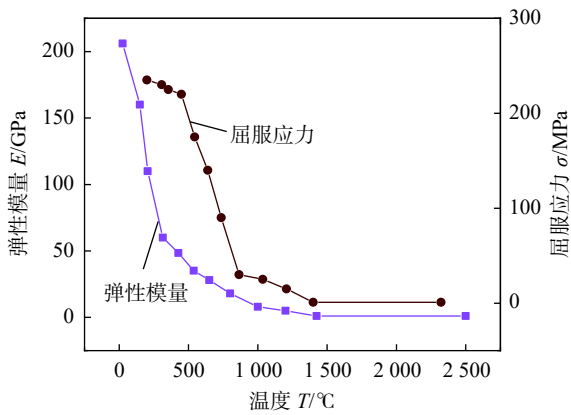


图4 力学性能参数

池形貌是否一致。针对等离子-MIG复合焊复杂的热源机理,文中采用组合式体积热源模型进行计算,根据等离子和MIG焊各自的热源特性,选择双椭球热源模型模拟MIG电弧热源^[6],选择三维锥体热源模型模拟等离子电弧热源^[7-8],双椭球热源模型和三维锥体热源模型的热流密度表达式为

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(f_f Q_a)}{a_f b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{\partial x^2}{a_f^2} - \frac{\partial y^2}{b^2} - \frac{\partial z^2}{c^2}\right), \quad x \geq 0 \quad (1)$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(f_r Q_a)}{a_r b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{\partial x^2}{a_r^2} - \frac{\partial y^2}{b^2} - \frac{\partial z^2}{c^2}\right), \quad x < 0 \quad (2)$$

$$Q_a = \eta_1 U_1 I_1 \quad (3)$$

式中: a_f, a_r, b, c 为双椭球热源分布参数 (mm); f_f, f_r 为前后半球的热源分配系数, 其中 $f_f + f_r = 2$; Q_a 为MIG电弧的有效电弧功率 (W); η_1 是MIG电弧的能量效率; U_1 是MIG电弧电压 (V); I_1 是MIG电弧电流 (A)。

$$q(r, z) = \frac{9\eta_2 Q_b}{\pi(e^3 - 1)} \frac{\exp\left(-\frac{3r^2}{r_0^2}\right)}{(z_e - z_i)(r_e^2 + r_e r_i + r_i^2)} \quad (4)$$

$$r_0(z) = r_i + (r_e - r_i) \frac{z - z_i}{z_e - z_i} \quad (5)$$

$$Q_b = \eta_2 U_2 I_2 \quad (6)$$

式中: η_2 为等离子弧焊的能量效率; Q_b 为等离子电弧有效热输入 (W); U_2 是等离子电弧电压 (V); I_2 是等离子电弧电流 (A); e 为自然常数; z_e, z_i 为倒锥体上下表面厚度方向坐标; r_e, r_i 为倒锥体上下表面有效加热半径 (mm); $r_0(z)$ 为随厚度方向衰减的加热半径值 (mm)。

2.3.2 热源模型的验证

Q235低碳钢平板对接焊试验完成后,将焊缝区利用线切割取样,对样品进行粗磨、细磨、抛光以及腐蚀,拍摄腐蚀出的焊缝截面熔池形貌,将所得熔池形貌与数值模拟结果进行对比,对比结果如图5所示,图5中左边为模拟结果,将模拟结果温度梯度1450℃以上设置为灰色,即灰色为熔池,右边为试验所得熔池形貌,可以看出模拟结果与试验结果所得熔池形貌吻合良好,为进一步验证数值模拟是否准确,利用K形热电偶测量试验过程中母材3个位置的实时温度,热电偶分布如图6所示,并提取模拟温度值进行对比,对比结果如图7所示,可以看出试验测量的温度和模拟温度相差在10℃以内,这也验证等离子-MIG复合焊数值模拟的可靠性。

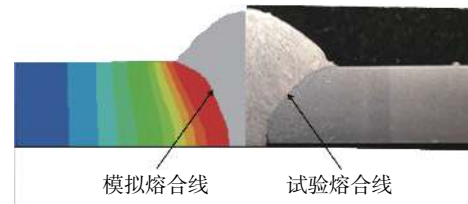


图5 熔池形貌对比

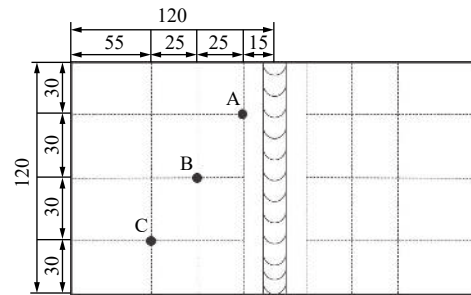


图6 热电偶分布

2.4 控制方程和边界条件

文中主要研究基于上述热源模型来计算温度分布和热循环,忽略熔池中流体流动。若所建模型合

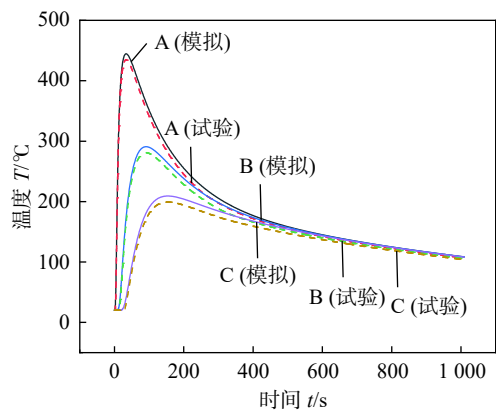


图7 热循环曲线对比

理,则误差可以控制在合理范围内。瞬态热传导方程如下^[6]

$$\rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} - (v_0) \frac{\partial T}{\partial y} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v \tag{7}$$

式中: ρ 为密度; C_p 为比热; T 为温度; k 为热导率; q_v 为体积热源项; v_0 为焊接速度。坐标系的原点随工件的移动而移动,初始条件为

$$t = 0, \quad T(x, y, z, 0) = T_0 \tag{8}$$

表2 焊接工艺参数

编号	MIG 电流 I/A	MIG 电压 U/V	等离子电流 I_1/A	等离子电压 U_1/V	焊接速度 $v/(mm \cdot s^{-1})$	保护气体流量 $Q/(L \cdot min^{-1})$	离子气体流量 $Q_1/(L \cdot min^{-1})$
case1	150	15	—	—	5	10	—
case2	150	15	80	12	5	10	6
case3	150	15	90	12	5	10	6
case4	150	15	100	12	5	10	6

图9为数值模拟得到的4种试验方案温度云图及熔池形貌,可以看出随着等离子电流的增大,焊缝熔池深度明显增加。1号为单独MIG所得熔池形貌,熔池深度较浅;2号为等离子电流80A时等离子-MIG复合焊所得熔池形貌,相较单独MIG焊来说复合焊的热源模型中引入了三维锥体热源,能够较好的还原等离子弧生成匙孔的能力,能够在工件度方向获得更加深的熔池;3号和4号则是在80A等离子电流复合焊的基础上继续增加等离子电流,使得等离子弧热源在整个复合焊热源中所占比例增加,熔深进一步增大。

为进一步研究等离子电流对于复合焊接温度场的影响,分别提取了4种试验方案在焊缝表面 $z = 50\text{ mm}$ 处的节点温度,节点温度随时间变化的曲线如

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha (T - T_0) \tag{9}$$

式中: t 为时间; α 是辐射和对流的组合传热系数; T_0 是环境温度,设为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 。

在数值模拟计算过程中,为防止计算区域在计算中发生刚性移动,在计算区域4个顶点分别施加约束,约束情况如图8所示。

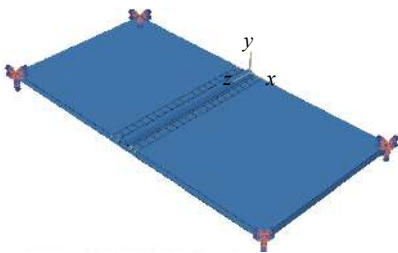


图8 载荷约束情况

3 结果与分析

3.1 温度场结果分析

为研究不同等离子电流对等离子-MIG复合焊温度场的影响,确定4种不同等离子电流的试验方案,4种试验的焊接工艺参数见表2。

图10所示,图中可以明显的观察到在等离子-MIG复合焊试验中提取出的节点温度随时间变化曲线当中有2个尖峰,而单独MIG焊没有,这是由于等离子-MIG复合焊的热源模型为三维锥体热源+双椭球热源,其中三维锥体热源模型在前,双椭球热源模型在后,由于等离子弧热源效率要高于MIG焊,因此在整体热源分配当中三维锥体热源的热源分配系数更高,这也就造成了在节点温度上会形成2个温度尖峰,且尖峰温度之间存在温度差。随等离子电流的增大,等离子弧热输入增加,第1个温度尖峰与第2个温度尖峰温差增大。

3.2 焊接残余应力分析

为研究不同等离子电流对等离子-MIG复合焊接残余应力的影响,分别提取垂直焊缝中心线和沿

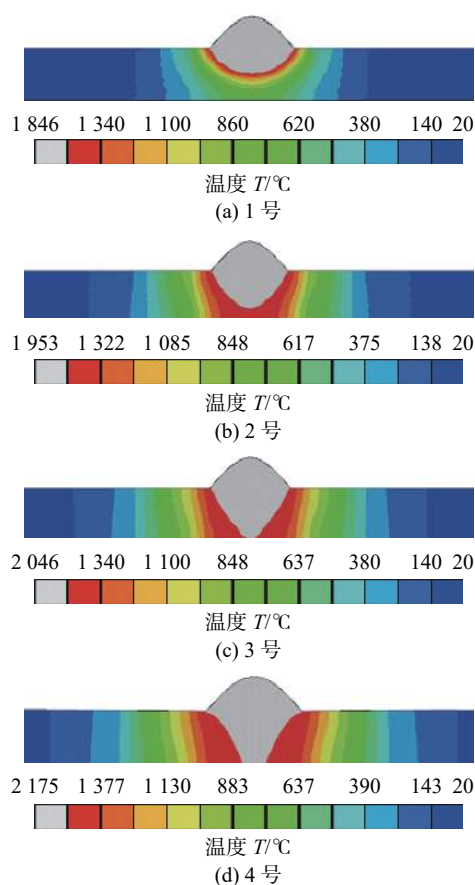


图9 4种试验熔池形貌对比

焊缝中心线两条路径上4种试验方案的纵向残余应力,不同等离子电流焊接残余应力如图11所示。图11a为垂直焊缝中心线路径上纵向残余应力,从中可以看出,焊缝中心处为拉应力,热影响区附近为压应力,而距离焊缝中心较远的板材边缘由于热输入较小,因此残余应力也是很小。对比4种试验方案的残余应力,可以看出,随等离子电流的增大导致整体热输入增大,纵向残余应力也是依次增大。图11b为沿焊缝中心线的纵向残余应力,从图中可以看出,起弧和收弧位置残余应力很小,距起弧和收弧位置10 mm左右处为压应力,焊缝中部为拉应力。比较4组试验方案的残余应力情况,MIG焊的高应力集中区较大,而其他3组复合焊高应力集中区相对较小,且MIG焊残余应力上升和下降斜率更大,这是由于MIG焊是一个热源,而复合焊则是等离子电弧在前,MIG电弧在后,其中等离子弧在前可以起到对工件预热的作用,预热作用可以有效降低残余应力,这就使得复合焊的高应力集中区明显的小于MIG焊。在3组复合焊接中随着等离子电流增大,高应力集中区也随

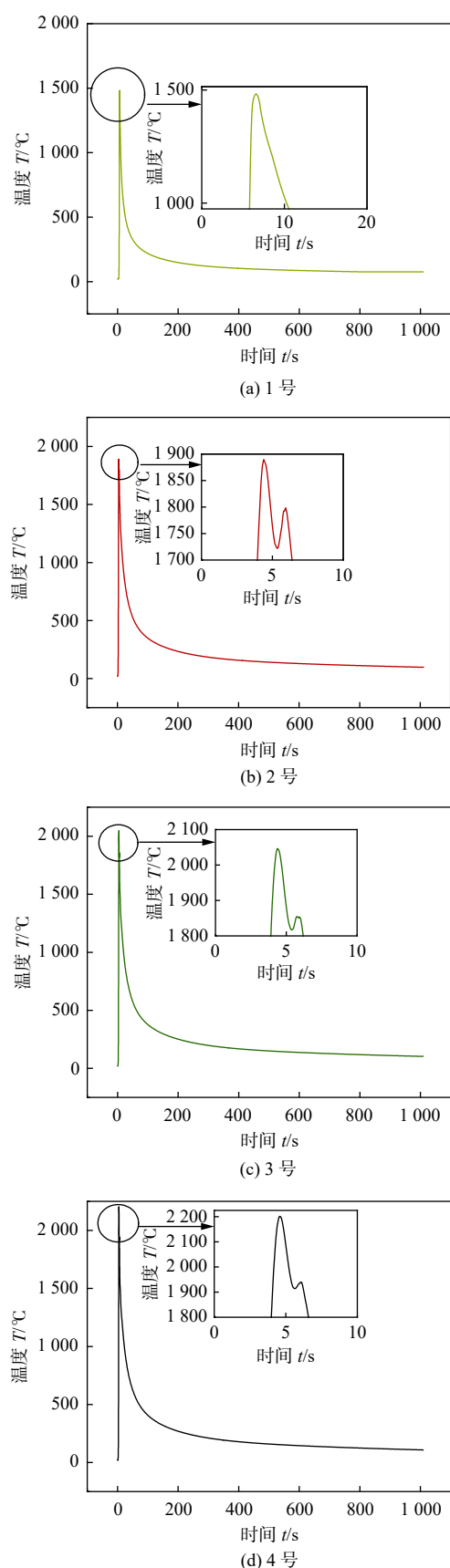
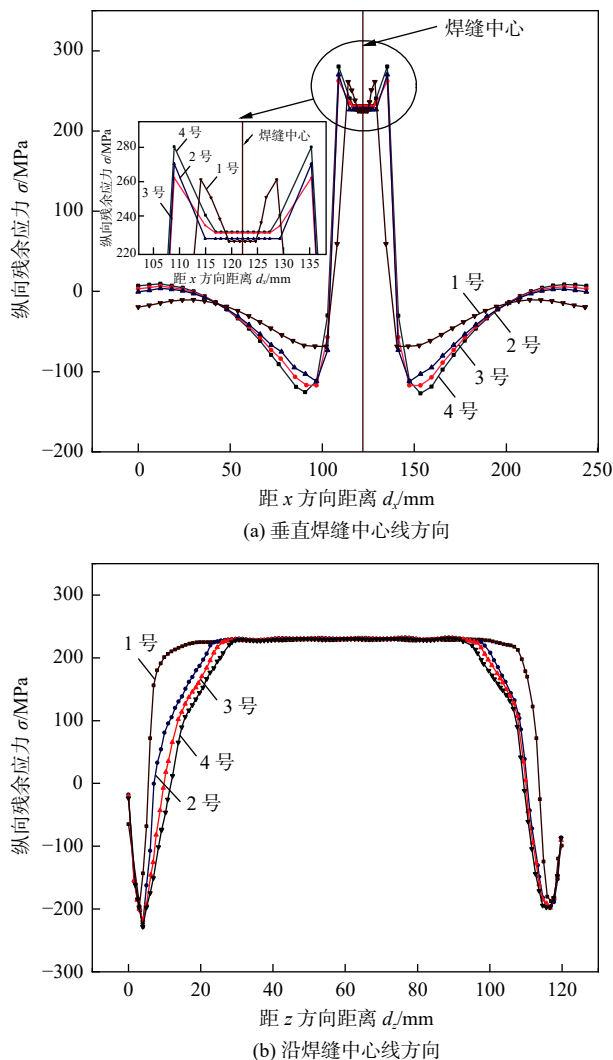


图10 4种试验方案节点温度随时间变化曲线

之减小,说明在等离子-MIG复合焊中,增加等离子电流不仅能够有效增加熔深,还可减少高应力集中区。



4 结论

(1)建立等离子-MIG复合焊接有限元模型,对Q235钢平板对接焊进行数值模拟,并利用工艺试验结果验证,试验结果与数值模拟结果吻合较好,说明等离子-MIG复合焊数值模拟的可靠性。

(2)通过对4种试验方案熔池形貌及温度梯度的

分析,表明等离子电流可以有效增加焊缝熔深,从等离子-MIG复合焊提取的表面节点温度随时间变化曲线可以看出,曲线中存在2个峰值温度,随等离子电流增加,2个峰值之间的温度差值增大。

(3)分析了4种试验方案在垂直焊缝中心和沿焊缝中心2条路径上的纵向残余应力,在垂直焊缝中心的残余应力分布中,4组试验残余应力分布趋势基本一致,复合焊残余应力稍大;在沿焊缝中心的残余应力分布中,MIG焊残余应力趋势明显不同于其他3组,高应力集中区更大,说明等离子电流在复合焊接中有着预热工件和减小高应力集中区的作用。

参考文献

- [1] 胡庆贤,吴浩,王晓丽,等.等离子电流对PAW+缆式七丝MIG复合焊电弧温度场的影响[C]//第二十二次全国焊接学术会议“计算机辅助焊接工程”分会场摘要集,2018:6.
- [2] 范津铭.等离子-MIG复合焊熔滴过渡行为的数值模拟[D].大连:大连交通大学,2018.
- [3] 孙振邦.7A52铝合金VPPA-MIG复合焊接数值模拟及试验研究[D].呼和浩特:内蒙古工业大学,2020.
- [4] 邵盈恺,王玉玺,杨志斌,等.基于焊缝熔深优化的7075铝合金等离子-MIG复合焊接热裂纹敏感性[J].金属学报,2018,54(4):547-556.
- [5] 朴圣君,金成.等离子-MIG/MAG复合焊接电弧及熔池的数值模拟[J].热加工工艺,2016,45(23):202-209.
- [6] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources[J]. Metallurgical Transactions B, 1984, 15(2): 299-305.
- [7] Wu C S, Zhang T, Feng Y H. Numerical analysis of the heat and fluid flow in a weld pool with a dynamic keyhole[J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 2013, 40(4): 186-197.
- [8] 吴向阳,宿浩,孙岩,等.激光+GMAW复合热源焊接过程热-力耦合数值分析[J].焊接学报,2021,42(9):91-96.

第一作者:董军强,硕士;主要从事焊接数值模拟研究;1074604633@qq.com。

(编辑:曲畅)

本文引用格式:

董军强,陈克选,陈鹏.基于不同等离子电流的等离子-MIG复合焊数值模拟[J].焊接,2023(5):1-6.

Dong Junqiang, Chen Kexuan, Chen Peng. Numerical simulation of plasma-MIG hybrid welding based on different plasma currents[J]. Welding & Joining, 2023(5): 1-6.