

DOI: 10.3901/JME.2018.02.041

基于非对称热源的异种钢深熔 TIG 焊接数值模拟*

黄逸飞¹ 罗震^{1,2} 敖三三¹ 樊文飞¹

(1. 天津大学材料科学与工程学院 天津 300072;

2. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心 上海 200240)

摘要: 针对深熔钨极氩弧焊接方法, 研究其在 8 mm 厚 316L 不锈钢与 Q345 低合金钢连接上的应用, 并采用 ANSYS 有限元软件模拟焊接过程, 对焊接过程的稳定性进行评估。结果表明, 一定焊接参数下, 深熔 TIG 焊接 8 mm 厚度异种钢能达到单面焊双面成形, 得到成形良好的焊缝。同时基于异种钢焊接试验结果提出一种非对称的热源模式, 由上部分双椭圆热源与下部分圆柱热源组合形成, 热源各部分独立调节。非对称热源在模拟中的应用, 得到与实际焊缝吻合度更高的结果, 平均误差不超过 8%; 模拟结果显示, 316L 不锈钢侧温度较低, 其窄的背面焊道宽度和高表面张力, 弥补 Q345 侧的不足, 使得小孔平衡, 维持焊接过程的稳定进行。

关键词: 深熔 TIG 焊; 异种钢; 非对称热源; 数值模拟

中图分类号: TG457

Numerical Simulation of Keyhole TIG Welding of Dissimilar Steels Based on Asymmetric Heat Source

HUANG Yifei¹ LUO Zhen^{1,2} AO Sansan¹ FAN Wenfei¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072;

2. Collaborative Innovation Center of Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240)

Abstract: A research of the welding process of the 8mm thickness 316L stainless steel and Q345 low alloy steel is conducted using key-hole tungsten inert-gas welding. ANSYS finite element software is used to simulate the welding process and evaluate the stability of the welding process. The results show that under certain welding parameters, a well formed weld with sided welding double-sided forming can achieved by keyhole TIG welding of dissimilar steel. At the same time, an asymmetric heat source model is proposed based on the results of dissimilar steel welding. The upper part of the double ellipsoid heat source is combined with the lower part of the cylindrical heat source, and the heat source is adjusted independently. The application of asymmetric heat source results in a high degree of coincidence with the experimental weld, with an average error of no more than 8%. The simulation results show that, temperature in the 316L stainless steel side is lower, and the narrow root weld bead width and high surface tension in 316L stainless steel side make up for the defect of Q345 side, causing the keyhole balanced and maintaining the stability of the welding process.

Key words: keyhole TIG welding; dissimilar steels; asymmetric heat source; numerical simulation

0 前言

随着现代工业的发展, 异种钢焊接由于可以满足不同条件下的耐腐蚀性能和力学性能的需要, 在机械、石油、化工等行业得到越来越多的重视^[1-3]。随着计算机技术的发展, 运用有限元仿真软件进行焊接数值模拟已经成为一种重要的研究方法。在异种钢数值模拟过程中, 过去研究人员均采用对称的

热源形式进行模拟计算。然而, 异种材料在各项材料性能上的差异明显, 对热源的敏感程度也不同, 采用对称式热源模型有其局限性, 模拟结果与实际偏差较大。

深熔钨极氩弧焊接方法, 是通过大电流(一般大于 300 A), 使得较大的电弧力与金属表面张力平衡, 形成小孔, 实现深熔焊接^[4]。目前国内外, 对于深熔钨极氩弧(Tungsten inert-gas, TIG)焊接大多局限于不锈钢或钛合金等密度小、热导率低材料。天津大学 FENG 等^[5]对 10 mm 厚度不锈钢的深熔 TIG 焊接进行了探究, 成功得到成形良好的单面焊双面

* 国家自然科学基金资助项目(51275342, 51405334)。20170524 收到初稿, 20170911 收到修改稿

成形的焊道。但是对于应用广泛的低合金钢以及碳钢, 由于热导率较大, 表面张力小等因素, 在深熔 TIG 焊接上仍然存在困难。樊文飞等^[6]在对深熔 TIG 焊接 8 mm 厚度低合金钢的研究中发现, 焊接过程十分不稳定, 工艺窗口窄, 需要一定辅助工艺来改善促进其成型稳定。本文中采用 316L 不锈钢与 Q345 低合金钢异种材料, 成功实现了深熔 TIG 焊接, 得到成型良好的焊缝, 拓展了深熔 TIG 焊接在低合金钢上的使用范围。并运用 ANSYS 有限元分析软件, 采用非对称的热源模型, 充分考虑了热源与材料的特点, 得到与实际焊接符合良好的计算结果。

1 试验过程

试验采用课题组自行设计的深熔 TIG 焊接平台, 焊接使用 8 mm 厚的 316L 不锈钢与 8 mm 厚的 Q345 低合金钢材料, 尺寸均为 150 mm×100 mm×8 mm, 采用深熔 TIG 焊接方法单面焊双面成形, 示意图如图 1 所示。

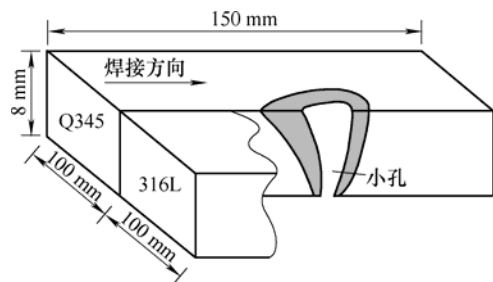


图 1 焊接试样示意图

深熔 TIG 焊接试验选用工艺参数如表 1 所示。

表 1 焊接参数

焊接电流	焊接电压	焊接速度	保护气流量
I/A	U/V	V/(mm·min ⁻¹)	V/(L·min ⁻¹)
440	15	340	25

焊接得到成型良好的焊缝, 焊后取焊缝横截面, 进行金相制作观察, 焊道宏观形貌与焊缝轮廓图如图 2 所示。

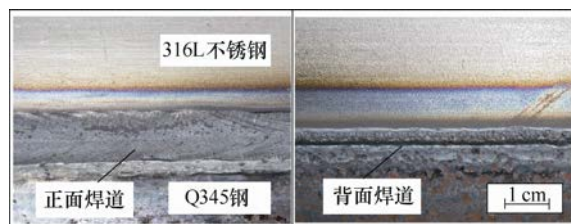


图 2 焊缝外观图

从图 3 可以看出, 该工艺参数下焊缝成形良好, 无明显缺陷。在 316L 不锈钢侧, 焊缝呈现“钉子

形”, 具有小孔焊接的特点; Q345 钢侧, 焊缝为均匀的弧线; 此处也可以明显看出, 两种材料在相同电弧作用下的行为差异。

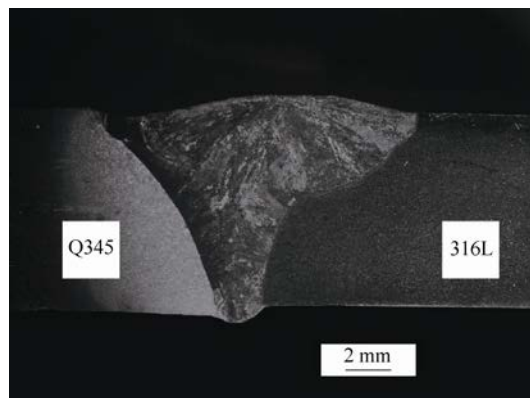


图 3 焊缝截面图

LATHABAI 等^[7]指出, 液态熔池必须可以被表面张力托住, 这是一个能够实现深熔 TIG 焊必须要满足的条件, 并推出一个根部焊道宽度 w 、板厚 h 、表面张力 γ 和密度 ρ 之间的一个不等式关系, 即

$$wh < \lambda / \rho g \quad (1)$$

式中, g 为重力加速度。可以看出在条件一定的情况下, 背面焊道越窄, 小孔越稳定。实际上, 单独 Q345 钢深熔 TIG 焊接难以成功, 经常出现塌陷, 小孔难以形成^[8]。然而在本文的异种焊接试验中, 成功实现了单面焊双面成形, 为深入研究这一现象的理论解释, 采用 ANSYS 软件模拟焊接过程, 分析焊接过程的温度场。

2 数值模拟

2.1 有限元模型的建立

利用 ANSYS 自带建模系统进行三维实体建模。实体模型相较于实际的焊接工件, 在尺寸上有所缩小以在保证计算精度的前提下缩短计算时间, 设置模型尺寸 100 mm×100 mm×8 mm。单元类型选取 solid70 三维热实体八节点六面体单元。网格划分采用了近焊缝处细密, 设过渡区间到远焊缝出网格稀疏, 用以在保证计算精度的前提下减少计算时间, 共划分成 184 135 个节点, 有限元模型如图 4 所示。

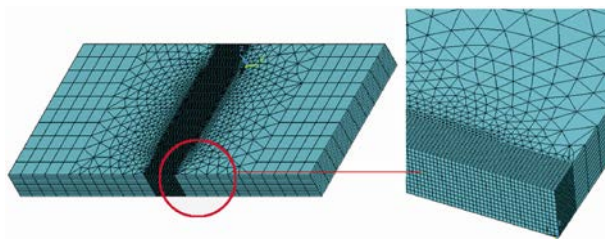


图 4 有限元模型及其局部放大图

相关材料热物理参数由文献[9]给出。高温缺乏部分采用插值法、外推法获得。实际取值如图 5 所示。

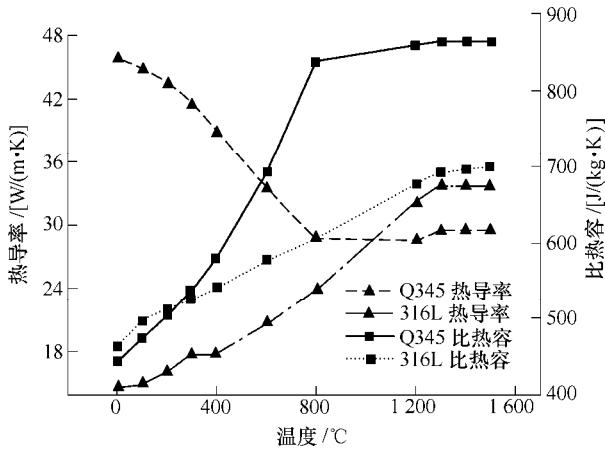


图 5 材料常数曲线

焊接过程温度场模拟中，边界条件一般为表面对流换热以及辐射换热边界条件，由于获得对流换热系数随温度的变化规律是很困难的事，所以模拟中采用经验公式来近似反映其非线性。

同时为简化分析，本文采用将辐射换热系数转化为相应对流换热系数的形式，考虑总的传热系数 $\beta^{[10]}$ ，即

$$q_0 = \beta(T - T_0) \quad (2)$$

式中， q_0 为总的热流密度， T_0 为参考温度，设为 20 °C， T 为工件温度。实际取值如表 2 所示。

表 2 总传热系数取值

温度/°C	总传热系数 β /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
20	39
200	47
500	68
1 000	110
1 500	180

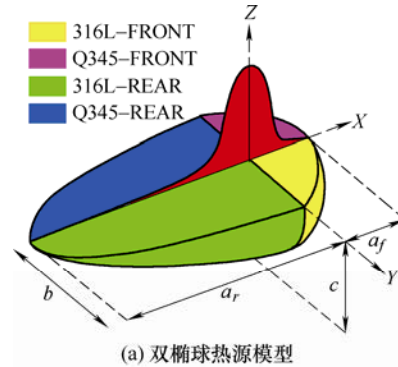
模拟计算时，在各个面上都施加对流换热边界条件，并设置基准温度为常温 20 °C。

2.2 非对称热源模型

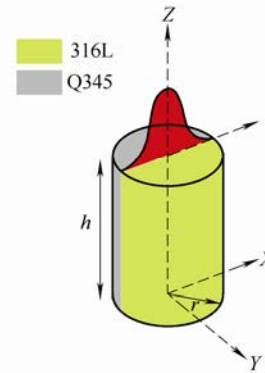
由于深熔 TIG 焊接的小孔焊特征明显，传统的 TIG 热源模式不再适用。胡庆贤^[11]在研究穿孔型等离子焊接过程中，提出了上部分双椭球热源与下部分圆柱体热源的组合热源形式。双椭球模型近似模拟电弧对材料的烧蚀，以及在较宽范围内的电弧压力作用；圆柱热源模型模拟了在中心区域小孔形成后的纵深方向的影响。据此，文中采用相似的方法定义深熔 TIG 焊的热源形式。

传统的热源模型在参数设置上考虑热源的对称性，但是研究发现，采用对称热源模拟异种钢焊接过程，很难得到符合良好的计算结果。而且，不同

材料的热物理常数有差别，液态金属黏度也有差别，电弧力作用下热源液态金属凹陷程度同样有差别。基于此分析，考虑材料的不对称性，提出一种非对称的热源模式^[12]。具体如图 6 所示。



(a) 双椭球热源模型



(b) 圆柱体热源模型

图 6 热源模型示意图

如图 6a 中所示，热源被焊接中心线分成两个区域，每个区域都是 1/4 的双椭球。双椭球热源的功率密度函数如下

$$q_1(x, y, z) = \frac{12\sqrt{3}Q_{DE}}{\pi\sqrt{\pi}(a_f + a_r)bc} \exp(-3x^2/a_f^2) \exp(-3y^2/b^2) \exp(-3z^2/c^2) \quad (3)$$

$$q_1(x, y, z) = \frac{12\sqrt{3}Q_{DE}}{\pi\sqrt{\pi}(a_f + a_r)bc}$$

$$\exp(-3x^2/a_r^2) \exp(-3y^2/b^2) \exp(-3z^2/c^2) \quad (4)$$

式中， q_1 、 q_2 分别为双椭球前半球和后半球的功率密度分布； Q_{DE} 为双椭球(Double ellipsoid, DE)热源总功率；热源形状参数 a_f 、 a_r 、 b 、 c 意义如图 6a 所示，其取值实际焊缝形状有关。

图 6b 表示圆柱体热源示意图，均匀分布高斯柱体(Cylinder, C)热源模型设定柱体热源的径向热流呈高斯分布，而在柱体的深度方向上均匀分布，热源为一个内嵌的圆柱体。热源函数如下

$$q(r, z) = q_m \cdot D(z) \cdot \exp\left(-\frac{3r^2}{r_0^2}\right) \quad (5)$$

式中, r_0 为加热半径; $D(z)$ 和 q_m 分别为调节函数和加热斑点中心最大热流, 有

$$D(z) = \frac{mz + r_0}{r_0} \quad (6)$$

式中, m 为调节系数。

$$q_m = \frac{6Q_C}{\pi r_0 h(mz + 2r_0)} \quad (7)$$

式中, h 为热源作用深度; Q_C 为圆柱热源的总功率。

要说明的是, 圆柱体热源中心热流分布被设置成沿深度方向衰减, 用来模拟实际焊接过程在深度方向的热量损失。

$$Q = \eta UI \quad (8)$$

式中, η 为电弧功率有效系数; Q 为热源总功率。

组合热源功率分配系数为 χ_{DE} 、 χ_C , 则有

$$Q_{DE} = Q \cdot \chi_{DE} \quad (9)$$

$$Q_C = Q \cdot \chi_C \quad (10)$$

与传统对称式热源不同, 非对称热源各个部分形状参数均可独立调节, 用来模拟热源对不同材料的不同加热情况。实际模拟中, 316L 不锈钢侧的热源是由右侧的双椭球热源与圆柱体热源组合得到, Q345 钢侧亦然。在异种钢模拟中, 结合实际焊接情况, 参数的调节遵循该原则: 在同一材料上参数保持一致。

2.3 加载求解

在模型上加载体热源, 热源为上部分的双椭球热源和下部分圆柱体热源的组合, 两部分热源同时以速度 V 沿着 X 轴移动, 来模拟热源的移动; 设置焊接时间 10 s, 由于本研究主要探究焊接过程的稳定性, 故不求解冷却过程。

3 模型验证

为验证该模型的正确性, 同时探究非对称热源在异种钢模拟中的优势, 下面利用 ANSYS 实际模拟结果与实际焊接对比的方式验证。

经前期模拟调试, 选取各项参数如下: 热源功率因数 η 取 0.8, 组合热源功率分配系数 χ_{DE} 取 0.82, χ_C 取 0.18; 热源形状参数取值见表 3。

表 3 热源形状参数

316L 侧热源形状参数	取值/mm	Q345 侧形状参数	取值/mm
a_f	2.0	a_f	2.3
a_r	6.0	a_r	6.9
b	11.4	b	9.2
c	3.5	c	2.8
r	1.0	r	1.5
h	4.5	h	5.2

模拟计算, 并取焊接时间 10 s 时瞬时温度场云图(图 7)。

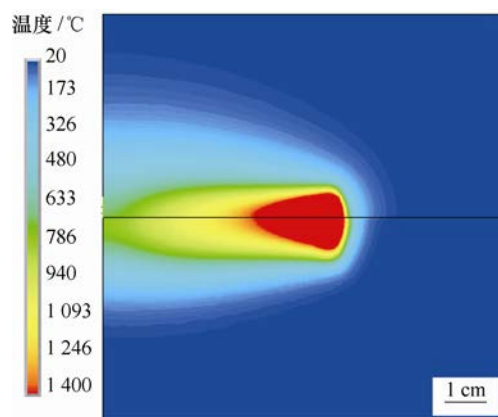


图 7 焊件表面温度场云图

图 7 中, 上半部分是不锈钢, 下半部分是低合金钢。为了直观评价模拟过程, 取焊接 10 s 时瞬时熔池截面图, 如图 8 所示。

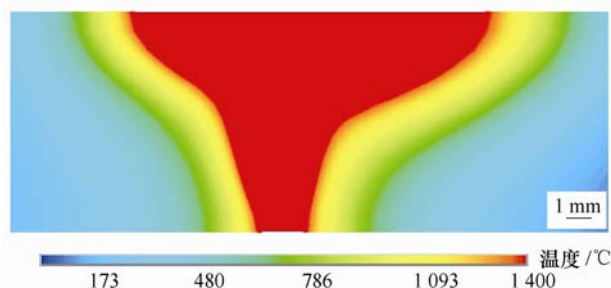


图 8 模拟焊缝截面示意图

图 8 中左侧是 Q345 低合金钢区域, 右侧是 316L 不锈钢区域(下文截面图均按此方式显示), 可以看出, 在非对称热源作用下, 不锈钢侧与 Q345 侧热场分布明显不对称。不锈钢侧有一个明显的转折点, 而模拟的低合金钢侧转折点稍不明显。这是由于, 碳钢一侧热导率大, 热流输入后很快会向母材传递, 从而使得热流分布更加平缓; 而不锈钢侧热输入传导慢, 造成模拟得到温度场形状与设定热源接近, 故产生一个较明显的突变。

为评估模拟质量并进一步证实非对称热源的优势, 将模拟熔合线与实际熔合线对比; 与此同时, 用传统对称热源作用下的模拟结果作为对照组, 进行对比, 对比图如图 9 所示。

从图 9 中看出, 熔合线形状, 两种热源模式差异明显。316L 侧在非对称热源模式下熔合线上部更加平缓, 而拐点处变化更剧烈; Q345 侧非对称热源模式下拐点处变化更小而整体走势更陡。

以焊缝根部中心点为原点, 建立焊缝轮廓的模型, 如图 10 所示。运用统计学原理, 计算两种热源模式下相对实际焊缝的误差。由于一般来说, 对焊

缝的描述是基于相同深度下的熔宽来的, 所以计算是基于相同熔深 y 取值下焊缝宽度 x 的误差, 计算结果如表 4 所示。

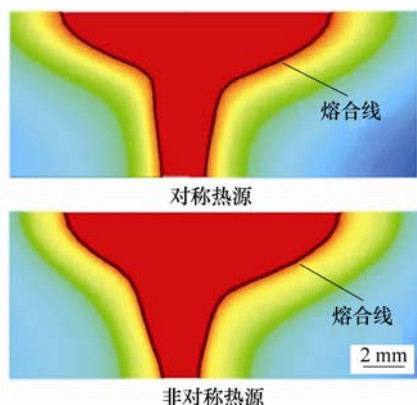
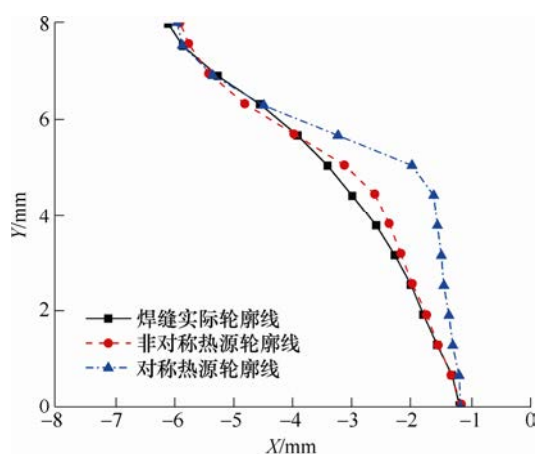
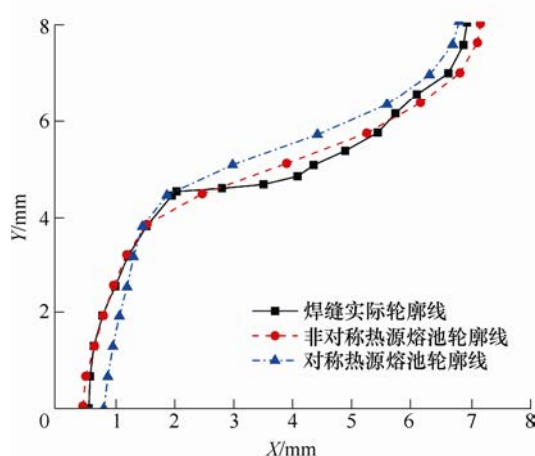


图 9 两种模型下焊缝熔合线示意图



(a) Q345 钢侧焊缝形貌对比



(b) 316L 钢侧焊缝形貌对比

图 10 熔合线形貌对比图

表 4 焊缝参数及误差分析

参数	实际焊缝熔宽		非对称热源结果		对称热源结果	
	316L	Q345	316L	Q345	316L	Q345
正面熔宽/mm	6.91	6.09	7.10	5.91	6.78	5.90
背面熔宽/mm	0.61	1.19	0.52	1.16	0.85	1.16
最大误差(%)	—	—	25.7	12.9	46.8	45.6
平均误差(%)	—	—	7.76	4.16	19.1	18.6

从数据可以看出, 在熔宽数据上, 两种模型相差不大。这是因为在模拟过程中, 控制熔宽与实际一致十分重要。但是在误差分析中, 对称热源各部分相对误差最大都超过 40%, 而且相对误差超过 18%; 非对称热源最大误差 25%, 且相对误差均不超过 8%。这表明在异种钢焊接熔合线走势控制上, 非对称热源表现出极大的适应性, 与实际结果高度一致。所以, 在异种钢深熔 TIG 焊接过程中, 采用非对称热源进行模拟能得到吻合度高的结果。

4 结果分析

上文已经验证有限元模型的正确性, 基于此对模拟温度场进行分析。

为深入了解背面焊道的情况, 在焊件背面取一系列观测点, 取其温度曲线, 观测点设置如图 11 所示。

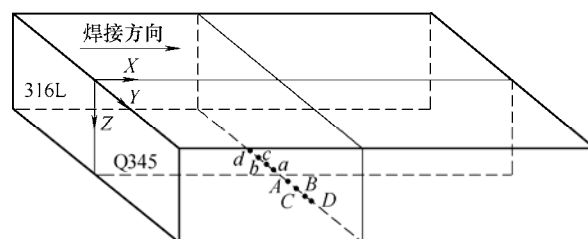
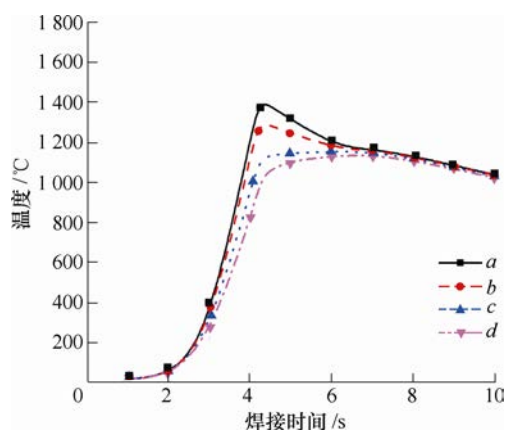


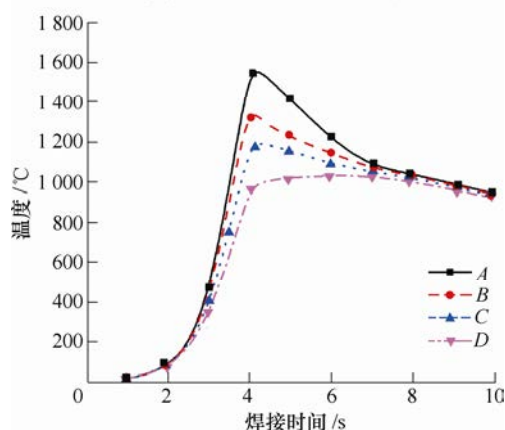
图 11 焊件上观测点分布示意图

其中 Q345 侧, 自中间向两侧分别为 $A(20,0.5,8)$, $B(20,1.0,8)$, $C(20,1.5,8)$, $D(20,2.0,8)$, 316L 侧观测点与之对称分布, 如图 11 所示。提取观测点的模拟结果温度循环曲线, 如图 12 所示。

从图 12 中看出, 在同一焊接截断面上的点温度曲线有着相似的趋势。焊接过程中, 热源匀速沿着焊接中心线移动, 随着其距离观测点越来越近, 观测点处温度缓慢上升; 在 4 s 时刻, 热源到达观测点上方, 温度急剧上升; 在随后, 热源远离观测点, 此时观测点温度趋势分为两种。一种是处于热源正中心附近的观测点, 如 A, B 点 (a, b) , 在焊接热源瞬时高温下达到最高温度, 随着热源继续前进, 温度逐渐下降; 第二种是距离热源中心一定距离之外的观测点, 如 $C, D(c, d)$ 等, 热源在其上方时, 没有对其直接加热, 而是通过 A 及其附近金属的热传递而升温, 随着热源远离, 热传递继续进行, 故其仍会继续升温一段时间, 直至散热大于热传递, 而后开始降温。不难看出, 距离焊缝中心越远的点, 能达到的最高温度越低, 在不锈钢侧 a 点处温度最高达 $1\ 410\ ^\circ\text{C}$, 随着距焊接中心越远, 到 d 点温度最高只有 $1\ 140\ ^\circ\text{C}$ 。在 Q345 一侧, 温度变化有着相同的趋势。



(a) 316L 不锈钢侧观测点温度曲线



(b) Q345 低合金钢侧观测点温度曲线

图 12 热循环曲线示意图

对比 316L 不锈钢和 Q345 低合金钢上对称的点的温度。在焊接时间 4 s 时, 316L 上 *a* 点温度达到最高 1 410 °C, 而对应的 Q345 上的 *A* 点, 温度达 1 589 °C, 较 *a* 点高 179 °C; 而随着距离中心线距离增大, 二者差异逐渐减小, 直到 *D* 点较 *d* 点, 温度高 41 °C。

在深熔 TIG 焊接中, 小孔的稳定对焊接质量起决定作用。而由式(1)知, 在板厚一定时背面焊道宽度 w 和表面张力 γ 是影响焊接稳定的主要因素。一方面, 不锈钢表面张力约是 Q345 低合金钢的 3 倍; 另一方面, 随着温度降低, 表面张力逐渐增大, 而由模拟结果得出, 在 316L 侧板件温度高于 Q345 侧, 尤其是在熔池高温区, 温度相差 179 °C, 使得 316L 侧表面张力远大于 Q345 侧, 有利于小孔稳定。同时由于 316L 不锈钢热导率低, 导致其高温的熔池区域面积较小, 实际焊缝图 3 也说明这点, 不锈钢侧背面焊道宽度只有 Q345 侧宽度的 51.2%。从这两点看出, 316L 不锈钢的深熔 TIG 焊接性能要远优于 Q345 钢, 而在本文异种钢的焊接中, 316L 不锈钢侧的窄的背面熔宽和大表面张力很好地平衡了 Q345 钢的不足, 使得小孔能稳定存在, 焊接顺利进行。

5 结论

(1) 利用深熔 TIG 连接 8 mm 厚的 316L 不锈钢与 Q345 低合金钢, 成功实现单面焊双面成形, 焊缝成形良好, 无明显缺陷。

(2) 采用 ANSYS 软件进行数值模拟, 对比了对称热源与非对称热源在异种钢焊接中的模拟结果, 表明非对称热源的平均误差远小于对称热源。基于此, 得出异种钢深熔焊接模拟结果, 与实际焊缝符合良好。

(3) 通过比较异种钢 316L 侧与 Q345 侧的温度循环曲线, 提出异种钢深熔 TIG 焊接实现的理论基础。316L 不锈钢侧窄的背面焊道宽度, 以及更高的表面张力弥补了 Q345 侧的不足, 使得小孔形成稳定, 保证了焊接过程平稳。

参 考 文 献

- [1] 李增荣. Q235 钢与 1Cr18Ni9Ti 不锈钢异种钢焊接接头性能的研究[J]. 中国新技术新产品, 2012(21): 21.
LI Zengrong. Study on the performance of Q235 steel and 1Cr18Ni9Ti stainless steel dissimilar steel welded joints[J]. China New Technologies and New Products, 2012(21): 21.
- [2] 蔡建鹏, 叶延洪, 张彦杰, 等. 坡口形式对 Q345/SUS304 异种钢对接接头残余应力和变形的影响[J]. 机械工程学报, 2015, 51(10): 55-61.
CAI Jianpeng, YE Yanhong, ZHANG Yanjie, et al. Study on influences of groove type on welding residual stress and deformation in Q345/SUS304 dissimilar steel butt-welded joints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10): 55-61.
- [3] 李克俭, 蔡志鹏, 李轶非, 等. 碳迁移对 9%Cr 和 2.25%Cr 异种钢焊接接头高温韧性的影响[J]. 机械工程学报, 2015, 51(16): 150-155.
LI Kejian, CAI Zhipeng, LI Yifei, et al. Influence of carbon migration on the toughness of heat affected zone of 9%Cr+2.25%Cr dissimilar welds at high temperature[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(16): 150-155.
- [4] 张瑞华, 栗海霞, 李明, 等. K-TIG 焊接电弧特性的数值分析[J]. 电焊机, 2013, 42(12): 7-11.
ZHANG Ruihua, LI Haixia, LI Ming, et al. Numerical analysis on keyhole gas tungsten arc welding[J]. Electric Welding Machine, 2013, 42(12): 7-11.
- [5] FENG Y, LUO Z, LIU Z, et al. Keyhole gas tungsten arc welding of AISI 316L stainless steel[J]. Materials & Design, 2015, 85: 24-31.

- [6] 樊文飞, 罗震, 冯悦峤, 等. 低合金钢 Q345 的深熔 TIG 焊研究[J]. 上海交通大学学报, 2016(S1): 102-105.
FAN Wenfei, LUO Zhen, FENG Yueqiao, et al. Study on the deep penetration TIG welding of Q345 steel[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016(S1): 102-105.
- [7] LATHABAI S, JAVRIVS B L, BARTON K J. Comparison of keyhole and conventional gas tungsten arc welds in commercially pure titanium[J]. Materials Science and Engineering: A, 2001, 299(1): 81-93.
- [8] 冯悦峤. 中厚钢板的深熔 TIG 焊工艺研究及温度场数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2016.
FENG Yueqiao. Process investigation and temperature field simulation on deep penetration TIG welding of mid-thickness steel[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [9] 潘家祯. 压力容器材料实用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
PAN Jiazhen. Practical handbook for pressure vessel materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000.
- [10] 李慧娟. 厚板多层多道焊的有限元数值模拟分析[D]. 天津: 天津大学, 2007.
LI Huijuan. Finite element numerical simulation analysis of multi-layer multi-pass welding of thick plate[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [11] 胡庆贤. 穿孔等离子弧焊接温度场的有限元分析[D]. 济南: 山东大学, 2007.
HU Qingxian. Finite element analysis of temperature field in perforated plasma arc welding[D]. Jinan: Shandong University, 2007.
- [12] EISAZADEH H, BUNN J, AIDUN D K. Numerical and experimental investigation of residual stress distribution in a dissimilar ferritic-austenitic weld[J]. Welding Journal, 2017, 96(1): 21-30.

作者简介: 黄逸飞, 男, 1995 年出生。主要研究方向为焊接数值模拟。

E-mail: yifeihuang@tju.edu.cn

罗震(通信作者), 男, 1967 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为电弧增材制造, 深熔 TIG 焊接与其相关数值仿真。

E-mail: lz@tju.edu.cn