

DOI:10.11951/j.issn.1005-0299.20210121

Q235与304L异种钢角焊缝GTAW电弧能量分配规律研究

赵金涛, 岳建锋, 谢昶, 刘文吉, 刘海华

(天津市现代机电装备技术重点实验室(天津工业大学), 天津 300387)

摘要: 针对 Q235 低碳钢与 304L 不锈钢的异种钢角焊缝两侧母材热物性参数的差异以及电弧热量分配不正确, 导致的焊后热应力集中, 易发生裂纹等焊接质量问题, 本文开展了 GTAW 电弧能量分配规律的研究。采用多物理场软件 COMSOL Multiphysics, 建立了异种钢角焊缝直流脉冲 GTAW 电弧瞬态二维非对称模型, 并对 Q235 和 304L 角焊缝焊接时电弧的温度场、电磁场、流场和不同焊枪角度下的电弧能量分布进行了耦合计算。解释了异种钢焊接时, 由于材料导磁性能差异造成的电弧磁偏吹现象, 以及焊接电流对电弧磁偏吹的影响规律, 获得了不同焊枪角度条件下电弧热流密度在焊缝两侧分布规律: 在焊枪角度为 10° 时, 焊缝两侧能量分布基本相等。利用焊枪偏转调控异种钢焊缝两侧的电弧能量输入, 建立了焊缝两侧分配能量流与焊枪偏转角度的回归方程, 通过焊接试验对模拟结果进行了验证, 在焊枪偏转角度为 10° 时获得了较好的焊接质量。

关键词: 异种钢; 角焊缝; 电弧; GTAW; 能量分配

中图分类号: TG403

文献标志码: A

文章编号: 1005-0299(2021)06-0027-08

Study on energy distribution law of GTAW arc in fillet welds of Q235 and 304L dissimilar steels

ZHAO Jintao, YUE Jianfeng, XIE Chang, LIU Wenji, LIU Haihua

(Tianjin Key Laboratory of Modern Mechatronics Equipment Technology (Tiangong University), Tianjin 300387, China)

Abstract: In view of the differences between the thermophysical property parameters of base metal on both sides of dissimilar steel welds of Q235 low-carbon steel and 304L stainless steel, as well as the incorrectness of arc heat distribution, which results in the problems of post-welding thermal stress concentration, prone to crack and other welding defects, the energy distribution law of GTAW arc was investigated. A two-dimensional asymmetric model of dc-pulse GTAW arc transient in fillet welds of dissimilar steels was established by COMSOL Multiphysics. The temperature field, electromagnetic field, flow field, and arc energy distribution at different welding gun angles of Q235 and 304L fillet welds were coupled. The arc magnetic deviation phenomenon caused by the difference of magnetic conductivity of materials during welding of dissimilar steels and the influence of welding current on the arc magnetic deviation phenomenon were explained. The distribution law of arc heat flux on both sides of welds under different welding gun angles was obtained. When the welding gun angle was 10° , the energy distribution on both sides of welds was basically equal. The arc energy input on both sides of dissimilar steel welds was controlled by welding gun deflection, and the regression equation between energy flow on both sides of welds and welding gun deflection angle was established. The simulation results were verified by welding test, which provides technical support for energy control on both sides of dissimilar steel welds.

Keywords: dissimilar steel; fillet weld; arc; GTAW; energy distribution

收稿日期: 2021-05-24.

网络出版日期: 2021-09-30.

基金项目: 天津市教委科研计划项目(2019KJ011&2019ZD07).

作者简介: 赵金涛(1997—), 男, 硕士研究生;

岳建锋(1973—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 岳建锋, E-mail: billyue@163.com

期刊网址: http://hit.alljournals.cn/mst_cn/ch/index.aspx

随着科技的发展, 机械装备向大型化、轻量化方向发展, 对构件性能提出更高要求^[1], 单一金属材料已不能满足工程的使用要求, 而异种钢焊接结构件由于具有不同材料的优异性能, 且具有成本优势, 受到重视并在石油化工^[2]、航空航天、

电站锅炉^[3]、工程机械等行业的装备和构件中得到广泛应用^[4-6]。

异种钢焊接时,由于焊缝两侧材料热导率、比热容、熔点等热物理性能的差异^[7],以及焊缝两侧材料导磁性能的差异造成焊接电弧的磁偏吹现象,致使在焊接过程中焊缝两侧材料受到电弧不均匀的加热和冷却^[8],导致焊缝处产生较大的集中内应力^[9-10],以及裂纹等焊接缺陷^[11-12]。近年来,304L 不锈钢和 Q235 低碳钢异种钢焊接结构件开始用于工业生产,但由于 304L 不锈钢热导率远大于 Q235 低碳钢,且 304L 不锈钢比热容低于 Q235 低碳钢。因此,为获得良好的焊缝熔透质量,在焊接过程中,304L 不锈钢侧比 Q235 低碳钢侧应给予更多的电弧热输入,这也意味着需要对焊接电弧热进行必要的能量分配和干预。脉冲 GTAW 焊接作为在工业生产中广泛使用的一种焊接方法,具有电弧稳定^[13],热输入小,便于精确控制电弧能量分布,能够对可焊性较差的金属进行焊接^[14]。采用脉冲 GTAW 进行异种钢的焊接,可以更为精确地进行电弧能量的控制,获得好的焊接质量。

针对 Q235 低碳钢和 304L 不锈钢异种金属 GTAW 角焊,建立了直流脉冲的二维瞬态电弧模型,采用数值模拟与实验相结合的方式分析了异种钢焊接电弧偏转机理,焊接电流对磁偏吹的影响规律。获得了异种钢两侧电弧热流密度在工件表面的分布,以及不同焊枪角度对两侧热流密度的影响规律。建立了焊接角度影响两侧能量分配的回归方程,并对不同焊枪偏转角度下电弧热输入对 304L 不锈钢和 Q235 低碳钢角焊缝焊接结果的影响进行焊接试验验证。研究结果可为异种钢角焊接两侧金属能量调控提供一定的技术支持。

1 数学模型

1.1 基本假设

电弧的数值计算模型如图 1 所示,在计算时对电弧做出如下假设。

1) 假定氩气、等离子体均处于标准大气压下且不可压缩^[15]。

2) 假定电弧为光学薄膜介质,且处于局部热力学平衡(LTE)下^[16]。

3) 忽略电弧粘性效应导致的热损失和重力影响。

4) 氩气和电弧等离子体的流动状态为层流^[17]。

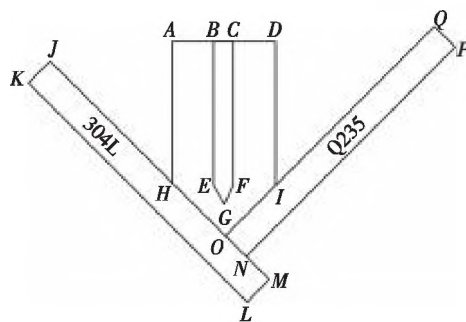


图1 模型求解域

Fig. 1 Schematic of calculation domain

1.2 控制方程

基于以上假设,得出下列模型控制方程。

质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程

$$\left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{j} \times \mathbf{B} + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

能量守恒方程

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (3)$$

能量守恒方程源项 S 的表达式为

$$S = \mathbf{j} \times \mathbf{E} + \frac{5k_B}{2e} \mathbf{j} \cdot \nabla T - 4\pi \epsilon_N \quad (4)$$

式中: ρ 为等离子体的密度; $\mathbf{v}$ 为速度矢量; T 为温度; C_p 为定压比热; k_B 为玻尔兹曼常数, 值为 $5.670\,373 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; σ 为电导率; $\mathbf{j}$ 为电流密度; e 为电子电量; ϵ_N 为氩气随温度变化的净排放系数。

式(4)中三项分别表示电弧焦耳热、电子传输焔以及电弧辐射热损失。

电流连续性方程

$$\nabla \cdot \left(\sigma \nabla V + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (5)$$

推导出电场及电流密度方程为

$$\mathbf{E} = -\nabla V - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (6)$$

$$\mathbf{j} = -\sigma \nabla V - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (7)$$

磁矢量方程

$$\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \left(\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{A} \right) + \sigma \nabla V = 0 \quad (8)$$

磁感应强度为

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{j}$ 为电流密度; $\mathbf{B}$ 为磁感应强度; μ_0 为真空磁导率; V 为电势; $\mathbf{A}$ 为磁矢势。

1.3 计算区域及边界条件

瞬态电弧模型的计算区域见图1,其中, $JKLM$ 区域为Q235低碳钢计算域, $PQON$ 为304L,其中,不锈钢计算域,材料计算域大小为 $50\text{ mm} \times 4\text{ mm}$,图2为材料的热物理性能参数;图1中 $BCFGE$ 五边形区域为钨针计算域,钨针直径为 2.4 mm ,钨针尖端角度为 60° ,模型中为了计算方便,并使结果能够更快收敛,将钨针尖端简化为直径 0.2 mm 的圆弧,电弧弧长为 3 mm 。

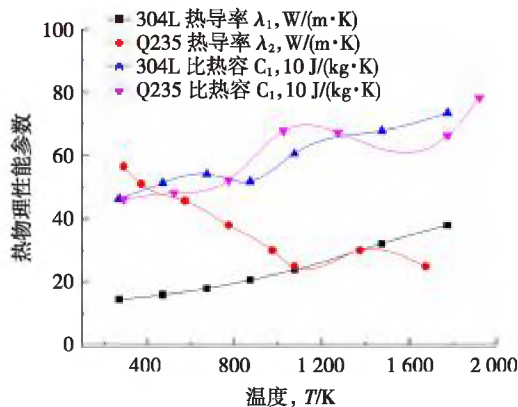


图2 材料热物理性能参数

Fig. 2 Thermophysical properties of materials

图1中 BC 为电极阴极,本模型计算峰值电流为直流脉冲电流,基值电流 $I_0 = 50\text{ A}$,峰值电流 $I_p = 120\text{ A}$,电流频率 $f = 1\text{ Hz}$,占空比为 0.5 。模型计算时长为 3 s 。电流脉冲图形如图3所示。

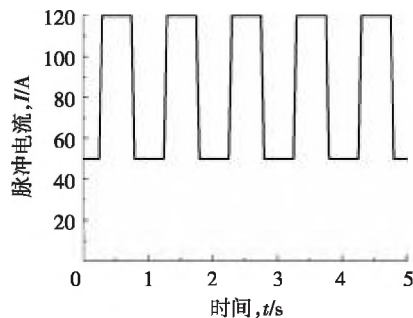


图3 电流脉冲图

Fig. 3 Current pulse diagram

图1中 AB 和 CD 为氩气入口,气体流量为 18 L/min ,相对应的气体流速在表1中表示为 u_g 。 HO 和 IO 为氩气出口。该模型的其他边界条件设定如表1所示,表中 R_c 为钨针半径。

表1 边界条件

Table 1 Boundary conditions

边界	轴向速度, u	径向速度, v	温度, T	电势, φ
BC	-	-	$t = T_0$	$n \cdot j = -\frac{I(t)}{\pi R_c^2}$
EG, FG	-	-	$T = 3\,000\text{ K}$	$n \cdot j = 0$
AB, CD	$-u_g$	$v = 0$	$T = 1\,000\text{ K}$	$n \cdot j = 0$
AH, DI	$\frac{\partial u}{\partial y} = 0$	$v = 0$	$T = 1\,000\text{ K}$	$n \cdot j = 0$
JL, QN	-	-	$T = T_0$	$V = 0$

1.4 数值计算方法

采用COMSOL Multiphysics多物理场仿真软件构建电弧瞬态模型,包括电场、磁场、层流以及流体传热多个物理场,对多个物理场进行统一全耦合求解。使用COMSOL Multiphysics软件的感应/直流耦合放电多物理场接口:电流接口计算电弧的电流和电势分布,使用标量电势作为因变量,基于欧姆定律求解电流守恒方程;磁场接口计算电弧磁场和感应电流分布,求解使用矢量磁势的麦克斯韦方程;流体传热接口计算电弧的传导传热、对流传热和辐射传热;层流接口求解电弧的能量、质量和动量守恒。通过构建瞬态电弧模型的全耦合偏微分方程组,使用有限元法(FEM)对该偏微分方程组进行空间坐标 (x, y) 的离散化处理。经离散化处理后得到该瞬态模型的非线性方程组,使用牛顿法对该方程组进行迭代求解。设置最大迭代次数为100次,初始衰减因子为 0.01 ,最小衰减因子为 10^{-6} ,相对容差设置为 0.001 。

采用COMSOL Multiphysics多物理场仿真软件自带网格划分工具进行网格划分。对模型求解域使用自由三角形网格进行划分,等离子区域以及近焊缝区细密,其他区域网格稀疏,从而保证模型计算精度和节省计算时间。划分自由三角形网格3218个,求解自由度48054。网格划分如图4所示。

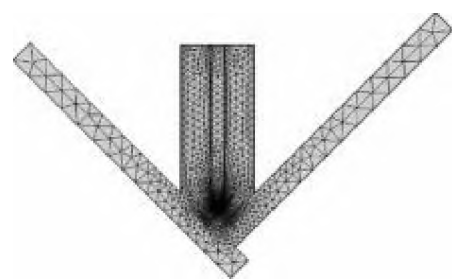


图4 求解域网格划分

Fig. 4 Calculation domain mesh division

2 结果与讨论

2.1 温度场

图5为焊接电流与焊接时间的关系曲线。图6为图5中不同焊接时刻的电弧温度场。图6(a)为 $t = 0\text{ s}$ 时基值电流(I_b)为 50 A 时的温度场,电弧最高温度(T)为 $13\,198\text{ K}$,位于钨针下方 1.16 mm 处。图6(c)为 $t = 1.0\text{ s}$ 时基值电流(I_b)为 50 A 时的温度场。电弧最高温度为 $13\,572\text{ K}$,最高温位于钨针下方 1.2 mm 处。与 $t = 0\text{ s}$ 时相比, $t = 1.0\text{ s}$ 时电弧最高温大于 $t = 0\text{ s}$ 时的电弧最高温。由于

峰值电流时电弧温度的影响,造成后续基值电流时电弧温度略大于 $t = 0$ s 时的电弧温度。此外,与峰值电流期间的电弧体积相比,基值电流期间电弧体积明显减小,仅能起维持电弧燃烧作用。

图 6(b) 为 $t = 0.5$ s 时峰值电流 (I_p) 为 120 A 时电弧的温度场,可以看到,电弧等离子体的中心区域电弧温度梯度较小,电弧外部温度迅速降低。峰值时刻电弧最高温度为 19 243 K,电弧最高温位于钨针下方 1.4 mm 处。由于角焊缝的形状,焊缝两侧的工件对电弧起到了一定的聚拢和压缩的作用。

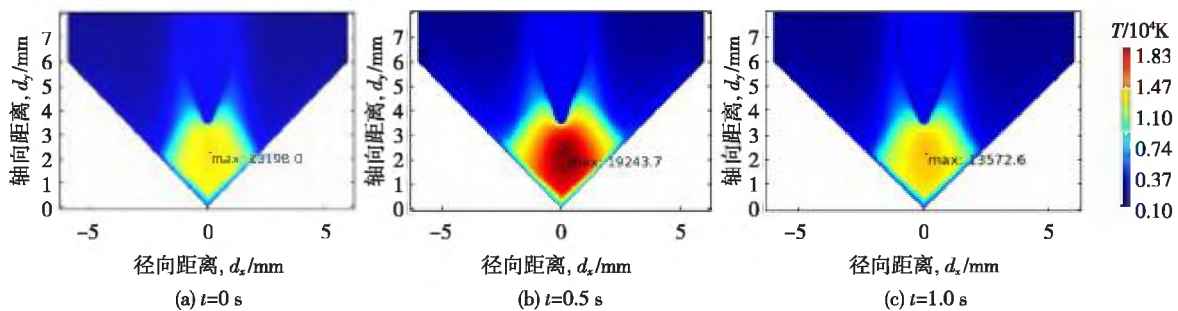


图 6 不同时刻电弧温度场云图

Fig. 6 Cloud map of arc temperature field at different times

2.2 电弧磁偏吹

从图 6 模拟计算结果可以看出,电弧左右两侧温度场分布呈现非对称性,电弧向右侧 Q235 低碳钢一侧发生了一定角度的偏转。如图 6 所示,电弧最高温并未在钨针所在轴线上。电弧中心的偏移导致电弧热输入在异种金属两侧不再等量分配,焊后会产生热应力集中、裂纹等焊接缺陷。通过改变模型峰值电流大小,取 $I_p = 80$ 、100、120、150 A,计算电弧温度场。图 7 为不同峰值电流时电弧向 Q235 侧的偏转角度,可以看到,在低电流时电弧向 Q235 低碳钢侧偏转角度较小,为 4° ,当电流升高至 100 A 以上时,电弧偏转角度保持恒定,向 304L 不锈钢侧偏转 11° 。

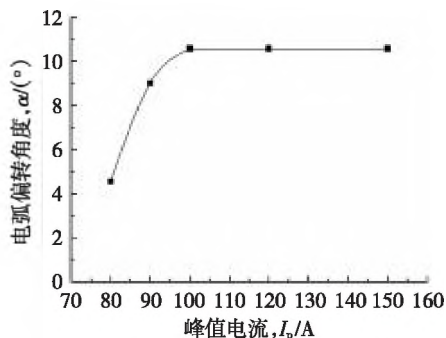


图 7 不用电流时电弧偏转角度

Fig. 7 Arc deflection angle without current

针对前述模拟计算结果进行了试验验证,发现焊件尺寸及其材料与仿真条件一致。图 8(b)

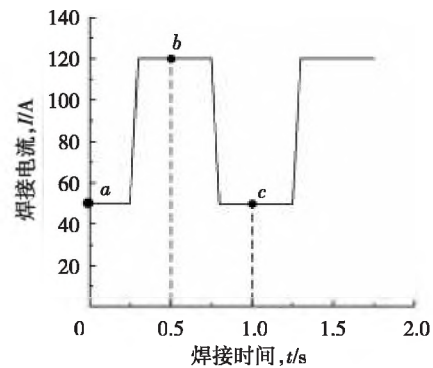


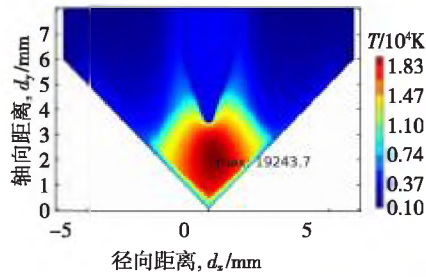
图 5 焊接电流

Fig. 5 Welding current

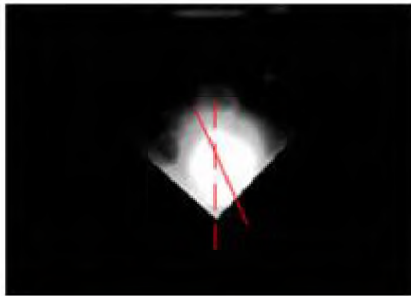
为使用 CMOS 高速工业相机拍摄的峰值电流为 120 A 时的电弧形态。对图片中的电弧偏转角度进行测量发现,电弧向 Q235 侧偏转约 13° ,与模型模拟结果基本相同。图 8(c) 为使用 TI400S 红外热像仪拍摄的电弧温度场,该设备的测温范围为 233 ~ 1 973 K,超过测温范围将会显示为白色。通过与图 8(a) 模型温度场对比,电弧外围温度场基本相同,均约为 2 000 K,电弧温度场向 Q235 侧偏转了 12° ,与模型模拟结果相同,验证了模型的正确性。

针对异种钢焊接时电弧的偏转现象开展了机理分析,探究了异种钢焊接电弧的磁场分布情况。图 9 为 $I_p = 120$ A 时电弧在阳极表面电弧磁通密度分布。图 9 结果表明:电弧两侧在距离焊缝相同位置,304L 侧电弧磁通密度大于 Q235 侧;工件表面电弧最小磁通密度位于 Q235 侧距离焊缝中心 0.7 mm 处。由于焊缝两侧材料的差异,右侧为 Q235 低碳钢,其相对磁导率常温下为 285^[18];而左侧为 304L 奥氏体不锈钢,相对磁导率为 1。由于 Q235 材料良好的导磁性能,造成 Q235 侧电弧磁通密度降低,从而使 Q235 侧电弧磁场强度小于 304L 侧。电弧受到的 Q235 侧的电磁力小于 304L 侧,因此,电弧向 Q235 侧发生了一定角度的偏转。由于焊缝两侧材料导磁性能的巨大差异,导致焊接电弧向导磁性能好的一侧发生偏转,

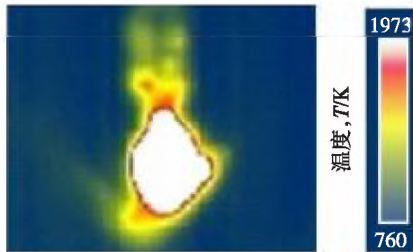
产生磁偏吹现象,最终导致电弧整体结构发生偏转。



(a) 模型电弧温度场



(b) 电弧形态



(c) 红外热像仪拍摄的电弧温度场

图8 峰值电流时电弧形态及温度场

Fig. 8 Arc form and temperature field at peak current: (a) arc temperature field of model; (b) arc shape; (c) arc temperature field captured by infrared thermal imager

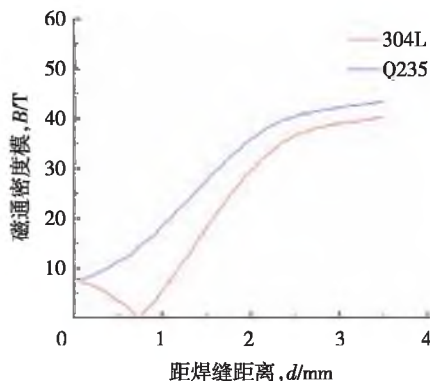


图9 焊件表面电弧磁通密度

Fig. 9 Arc flux density on weldment surface

2.3 电弧能量分配

由于异种钢热导率、熔点等性能的差异,焊缝两侧材料对电弧热量的需求是不同的。图10为 $I_p = 120$ A 时异种钢焊件两侧热流密度分布情况,由于电弧的偏转,Q235侧热流密度明显大于

304L侧,分布范围也更广。在阳极表面对热流密度进行积分获得阳热流极总量^[19],即

$$Q = \int_{\Omega} q ds \quad (10)$$

利用式(10),对热流密度积分计算可得Q235一侧热流总量为359.9 W,304L一侧热流总量为247.3 W。Q235侧热流总量占总热流的59%。从图10中可以看出,异种钢焊接时焊缝两侧电弧能量由于磁偏吹发生了调整,而异种钢焊缝两侧304L不锈钢的热导率约为Q235低碳钢的2倍,因此,需要对电弧热输入能量进行有效的合理分配。

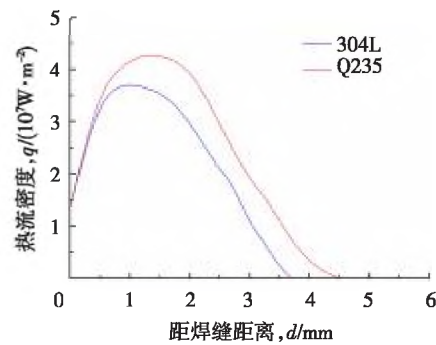


图10 阳极热流密度

Fig. 10 Anodic thermal flow density

通过调整焊枪角度,对电弧能量在焊缝两侧的分配规律进行研究。将焊枪向右侧Q235钢偏转不同的角度使电弧逐渐向左侧304L侧偏转,图11为焊枪不同偏转角度下阳极热流密度分布。从图11可知,电弧热流主要分布在距离焊缝中心4.5 mm的范围内,且最大热流密度并未在焊缝处,而在距离焊缝1~2 mm处。随着焊枪角度向Q235侧的偏转,Q235侧电弧热流密度逐渐降低,电弧能量分布范围逐渐减小;304L侧电弧热流密度逐渐升高,电弧能量分布范围逐渐增大。在焊枪偏转10°时,电弧的磁偏吹现象被纠正,电弧偏转角度为0°,焊缝两侧热流密度分布基本相同。

利用式(10)计算得到不同焊枪偏转角度下的阳极热流总量,热流密度随着焊枪角度的变化规律如图12所示。对计算结果进行数值拟合,获得焊缝左右两侧热流总量与焊枪偏转角度的关系,即

$$\begin{cases} Q_{304L} = 0.4606\alpha^3 - 1.06722\alpha^2 + 12.42859\alpha + 239.03193 \\ Q_{Q235} = -0.00907\alpha^3 + 0.31521\alpha^2 - 7.6153\alpha + 360.17404 \end{cases} \quad (0 \leq \alpha \leq 18) \quad (11)$$

式中： Q_{304L} 、 Q_{Q235} 分别为 304L 侧和 Q235 侧的电弧总热量； α 为焊枪偏转角度。

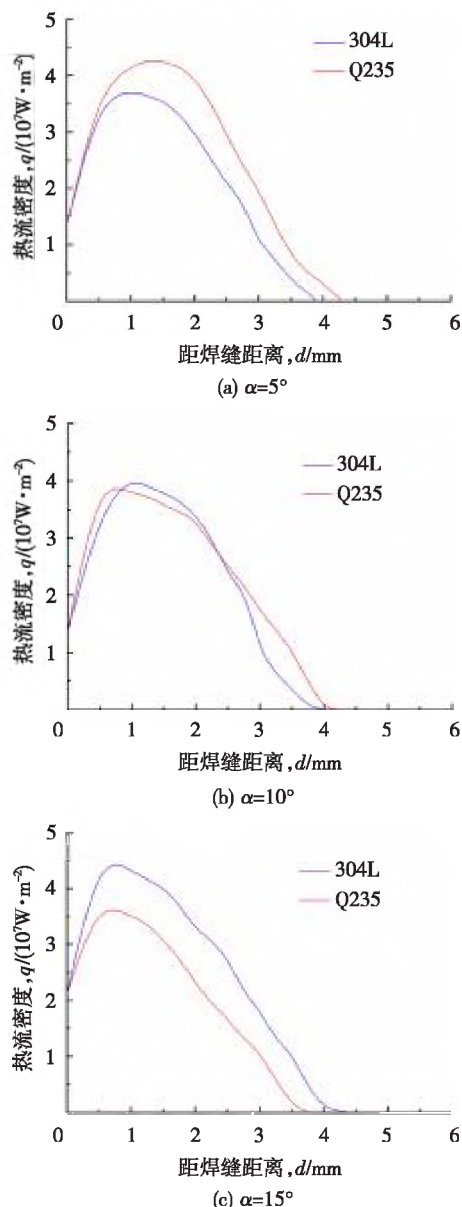


图 11 焊枪向右偏转不同角度阳极热流密度

Fig. 11 Anodic thermal flow density under different deflection angles of welding gun to the right

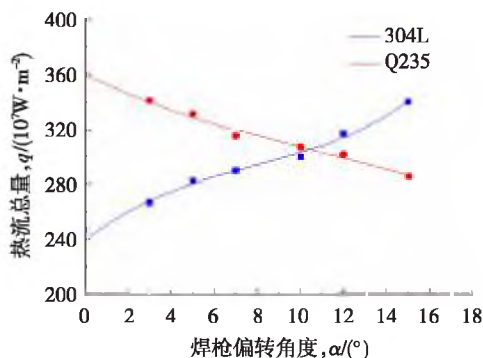


图 12 不同偏转角度下阳极热流总量

Fig. 12 Total anode heat current at different deflection angles

在不同焊枪偏转角度时, 阳极左右两侧总热

流量为 610 W, 随着焊枪角度的偏转, 总热流量略有降低。焊接热效率为 69.2% ~ 71.6%, 与文献 [20] 的计算结果相符。在焊枪偏转角度小于 10° 时, Q235 侧总热输入大于 304L 侧; 焊枪偏转角度为 10° 时, 焊缝两侧总热输入基本相等; 焊枪偏转角度大于 10° 时, Q235 侧总热输入小于 304L 侧。

2.4 实验验证

对上述不同焊枪偏转角度下电弧热输入对 304L 不锈钢和 Q235 低碳钢角焊缝焊接结果的影响进行焊接试验验证。采用与模型相同的焊接参数和工件材料, 焊接速度为 100 mm/min。对焊接后的工件自然冷却, 然后制作金相试件, 观察熔池融合线。图 13 分别为焊枪角度为 0°、5° 和 10° 时熔池融合线。



图 13 不同焊枪偏转角度时焊缝融合线

Fig. 13 Fusion lines of welds at different deflection angles of welding gun

由图 13 实验结果可知:当焊枪偏转角度为 0° 时,由于电弧的磁偏吹现象以及材料热物理性能的差异,Q235 侧获得电弧热量占总热量的 59%,熔池主要位于 Q235 侧,Q235 侧焊脚长度和熔深远大于 304L 侧;当焊枪向 Q235 侧偏转 5° 时,电弧向 304L 侧偏转,Q235 侧获得的电弧热量减少,占总热量的 54%,Q235 侧熔池焊脚长度和熔深相比,焊枪偏转角度为 0° 时明显变小,熔池开始向 304L 侧转移;当焊枪向 Q235 侧偏转 10° 时,Q235 侧获得的电弧热量占总热量的 49%,304L 侧获得较多的电弧热量,304L 侧焊脚长度和熔深略大于 Q235 侧,获得了较好的焊接质量。实验结果表明,随着焊枪的偏转,304L 不锈钢侧获得的电弧热量逐渐增多,Q235 侧焊脚长度和熔深逐渐变小,熔池逐渐从 Q235 侧向 304L 侧转移,焊接质量逐渐提高。

3 结 论

1)建立了异种钢角焊缝直流脉冲 GTAW 瞬态电弧模型。获得了脉冲电流作用下的峰值电流和基值电流时的电弧温度场,角焊缝对电弧起到了一定的聚拢和抬升的作用。

2)采用实验与数值模拟相结合的方法,获得了不同焊接电流作用下的电弧形态。对不锈钢和低碳钢进行焊接时,电弧为非对称状态,电弧将会向低碳钢一侧发生偏转,且发生偏转的角度随着焊接峰值电流升高到 100 A 后保持不变。

3)通过将焊枪角度向 Q235 侧偏转不同的角度,获得不同偏转角度下焊缝两侧电弧热流密度在焊缝两侧分布规律,以及焊缝两侧的总热量与焊枪偏转角度的关系。随着偏转角度的不断增大,Q235 侧热流密度和热流总量不断降低,304L 侧不断升高,在偏转角度为 10° 时,两侧热流密度和热流总量基本保持一致。

4)对不同焊枪偏转角度下电弧热输入对 304L 不锈钢和 Q235 低碳钢角焊缝焊接结果的影响进行焊接试验验证,研究发现,随着焊枪角度向 Q235 侧偏转,焊接质量逐渐提高,在焊枪偏转角度为 10° 时获得了较好的焊接质量。

参考文献:

[1] WU W Y, HU S S, SHEN J Q. Microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of laser welded dissimilar joints between ferritic stainless steel and carbon steel [J]. *Materials and Design*, 2015, 65: 855-861

DOI:10.1016/j.matdes.2014.09.064

[2] BEHNAM S, HASSAN S, MAHDI R, et al. Microstructural, mechanical and corrosion properties of dissimilar joint between AISI A321 stainless steel and ASTM A537CL1 structural steel produced by GTAW process [J]. *Metallurgical Research & Technology*, 2019, 116 (4): 418-429.
DOI: 10.1051/metal/2019012

[3] 李依依,陆善平.我国压水堆用材料与异材焊接[J].*材料科学与工艺*,2020,28(3):1-8.
LI Yiyi, LU Shanping. Materials for pressurized water reactors and dissimilar materials welding in China [J]. *Materials Science and Technology*, 2020, 28 (3): 1-8.
DOI:10.11951/j.issn.1005-0299.20200063

[4] 黄逸飞,罗震,敖三三,等.基于非对称热源的非对称热源的异种钢深熔 TIG 焊接数值模拟 [J]. *机械工程学报*, 2018, 54 (2): 41-47.
HUANG Yifei, LUO Zhen, AO Sansan, et al. Numerical simulation of keyhole TIG welding of dissimilar steels based on asymmetric heat source [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54 (2): 41-47.
DOI:10.3901/JME.2018.02.041

[5] 黄本生,陈权,杨江,等. Q345/316L 异种钢焊接残余应力与变形数值模拟 [J]. *焊接学报*, 2019, 40 (2): 138-144, 167.
HUANG Bensheng, CHEN Quan, YANG Jiang, et al. Numerical simulation of welding residual stress and Distortion in Q345/316L dissimilar steel [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40 (2): 138-144, 167
DOI:10.12073/j.hjxb.2019400057

[6] 张伯奇,蔡志鹏,李克俭,等.异种钢焊接接头蠕变过程的有限元模拟 [J]. *中国机械工程*, 2015, 26 (2): 266-271, 277.
ZHANG Boqi, CAI Zhipeng, LI Kejian, et al. Finite element analysis of creep behavior of dissimilar steel welded joint [J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26 (2): 266-271, 277.
DOI:10.3969/j.jssn.1004-132X.2015.02.025

[7] 王海燕,牛春菊,崔国涛,等.焊接工艺对 TP304/SS400 异种钢焊接接头组织和性能的影响 [J]. *焊接学报*, 2019, 40 (5): 131-136, 167.
WANG Haiyan, NIU Chunju, CUI Guotao, et al. Study of microstructure and properties of TP304/SS400 dissimilar welding joints under three processes [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40 (5): 131-136, 167.
DOI:10.12073/j.hjxb.2019400140

[8] DENG D, MURAKAWA H, LIANG W. Numerical and experimental investigations on welding residual

- stress in multi-pass butt welded austenitic stainless steel pipe [J]. *Computational Materials Science*, 2008, 42:234–244.
DOI:10.1016/j.commatsci.2007.07.009
- [9] RAKESH C, ASHA I, KANAK K. Stress analysis of dissimilar metal weld between carbon steel and stainless steel formed by transition grading technique [J]. *Materials Today:Proceedings*, 2015, 2(4/5):1657–1644.
DOI: 10.1016/j.matpr.2015.07.093
- [10] 李琴, 王于豪, 丁雅萍, 等. 焊接工艺参数对 Q345 钢平板焊接残余应力的影响 [J]. *材料科学与工程*, 2020, 28(6):80–87.
LI Qin, WANG Yuhao, DING Yaping, et al. Effect of welding parameters on residual stress of Q345 steel plate welding [J]. *Materials Science and Technology*, 2020, 28(6):80–87.
DOI:10.11951/j.issn.1005–0299.20190037
- [11] 蔡建鹏, 叶延洪, 张彦杰, 邓德安. 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.
DOI:10.3901/JME.2015.10.055
- [12] DURANTON P, DEVAUX J, ROBIN V, et al. 3D modelling of multipass welding of a 316L stainless steel pipe [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004 (153–154):457–463.
DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.128
- [13] 吴健文, 徐孟嘉, 范文艳, 等. 钛合金快脉冲柔性波形调制 TIG 焊接工艺 [J]. *机械工程学报*, 2020, 56(6):102–109.
WU Jianwen, XU Mengjia, FAN Wenyan, et al. Flexible waveform interpulse TIG welding for titanium alloy [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(6):102–109.
DOI:10.3901/JME.2020.06.102
- [14] 程世佳, 朱志明, 符平坡. 基于电弧图像的脉冲 TIG 焊电弧形态及特征温度演变规律 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2021, 61(9):994–1001.
CHENG Shijia, ZHU Zhiming, FU Pingpo. Arc shape variations and characteristic temperatures of pulsed TIG welding arcs based on observed arc images [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2021, 61(9):994–1001.
DOI:10.16511/j.cnki.qhdxsb.2020.25.035
- [15] 肖磊, 樊丁, 黄健康. 交变磁场作用下的 GTAW 非稳态电弧数值模拟 [J]. *机械工程学报*, 2018, 54(16):79–85.
XIAO Lei, FAN Ding, HUANG Jiankang. Numerical simulation of unsteady arc in GTAW with alternate axial magnetic field [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(16):79–85.
DOI:10.3901/JME.2018.16.079
- [16] FAN H G, NA S J, SHI Y W. Numerical simulation of current density in gas tungsten arc welding including the influence of the cathode [J]. *Journal of Engineering Manufacture*, 2015, 211(4):321–327
DOI:10.1243/0954405971516293
- [17] XIAO L, FAN D, HUANG J K. Tungsten cathode-arc plasma-weld pool interaction in the magnetically rotated or deflected gas tungsten arc welding configuration [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 32:127–137.
DOI:10.1016/j.jmapro.2018.01.026
- [18] 刘怡, 胡博, 代占鑫, 等. Q235 钢短裂纹扩展的力-磁耦合模拟 [J]. *金属热处理*, 2018, 43(12):226–231.
LIU Yi, HU Bo, DAI Zhanxin, et al. Simulation of short crack propagation in Q235 steel based on coupling of stress and magnetic [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2018, 43(12):226–231.
DOI: 10.13251/j.issn.0254–6051.2018.12.045
- [19] 刘政军, 李宇航, 苏允海. Ar 与 H₂ 混合气体保护下 GTAW 电弧特性数值模拟 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(7):67–71, 164.
LIU Zhengjun, LI Yuhang, SU Yunhai. Numerical simulation of arc characteristics under mixtures of argon and hydrogen in gas tungsten arc welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(7):67–71, 164.
DOI:10.12073/j.hjxb.2019400183
- [20] 武传松. 焊接热过程与熔池形态 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008:16–19.
WU Chuansong. *Welding thermal processes and weld pool behaviors* [M]. Beijing: China Machine Press, 2008:16–19.

(编辑 吕雪梅)

本文引用格式:

赵金涛, 岳建锋, 谢昶, 等. Q235 与 304L 异种钢角焊缝 GTAW 电弧能量分配规律研究 [J]. *材料科学与工程*, 2021, 29(6):27–34. DOI:10.11951/j.issn.1005–0299.20210121
ZHAO Jintao, YUE Jianfeng, XIE Chang, et al. Study on energy distribution law of GTAW arc in fillet welds of Q235 and 304L dissimilar steels [J]. *Materials Science and Technology*, 2021, 29(6):27–34. DOI:10.11951/j.issn.1005–0299.20210121