

双丝夹角对双丝间接电弧特性的影响

史传伟, 邹 勇, 邹增大, 吴东亭

(山东大学 材料液态结构演变与加工教育部重点实验室, 济南 250061)

摘 要:建立了双丝间接电弧的三维有限元数学模型,分析了不同双丝夹角对双丝间接电弧特性的影响. 利用高速摄像机拍摄电弧图片与计算结果对比,以验证计算结果的准确性. 结果表明,双丝间接电弧的温度、速度和电流密度等电弧参数在阴极区和阳极区较高,在弧柱区较低,弧柱区下端最低;随着双丝夹角的增加,双丝间接电弧的温度、速度、电流密度在阴极区、阳极区以及弧柱区上端增加,在弧柱区下端下降;上述电弧参数的变化率在阴极区和阳极区大于弧柱区,阳极区大于阴极区,弧柱区上端大于弧柱区下端;双丝间接电弧的偏转程度随着双丝夹角的增加而增加.

关键词:双丝间接电弧焊接; 双丝夹角; 电弧特性; 数值模拟

中图分类号: TG 444⁺. 72 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)02-0059-04

0 序 言

随着现在制造业的发展,对焊接方法及设备提出了很高的要求,提高焊接效率一直是关注的热点. 双丝间接电弧焊接是一种高效节能的焊接方法^[1]. 焊接时双丝分别接直流电源正、负极,工件做为一个独立的部分不接电源,主要依靠弧柱区下端加热. 该方法在提高焊接效率的同时工件热输入增加小,同时还具有熔合比小、节能等优点,是一种具有良好应用前景的焊接方法. 焊接电弧是焊接过程的能量来源,直接关系到焊接热输入、稳定性及接头质量等. 研究双丝间接电弧对于更好地了解这种焊接方法具有重要意义^[2]. 由于电弧的高温特性,利用试验的方法测定电弧的各项参数难以实现,故有必要借助数值模拟方法来研究焊接电弧. 目前对于电弧模拟工作主要集中于等离子电弧^[3]和 TIG 电弧^[4,5]等,双丝间接电弧模拟工作相对较少. 双丝之间夹角对双丝间接电弧形态及电弧特性具有重要影响,文中主要分析焊接电流为 150 A 时,双丝夹角分别为 25°,30°,35°时的电弧特性.

1 间接电弧的数学模型

1.1 理论假设

基于以下假设建立了双丝间接电弧的三维有限

元数学模型^[6]:电弧光学薄(LTE)且不可压缩;电弧处于局部热动平衡状态;电弧区域为纯氩气,没有熔滴过渡.

1.2 控制方程

根据动量、能量、质量守恒方程以及电流连续方程,麦克斯韦方程和欧姆定律建立了间接电弧的数学模型,详见文献[7].

1.3 边界条件

图1为双丝间接电弧的1/2三维计算模型.

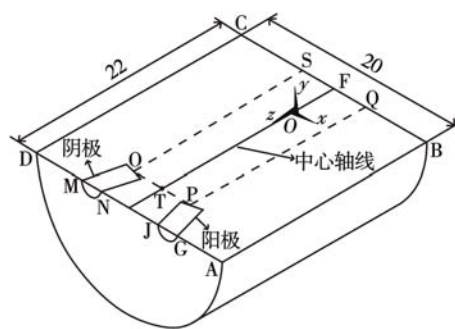


图1 双丝间接电弧计算模型 (mm)

Fig. 1 Calculation domains of twin-wire indirect arc

阴极上表面(即图1中的MN)上的电流边界条件为

$$J_c = \frac{I}{\pi R^2} \quad (1)$$

式中: R 为阴极半径; I 为焊接电流. 对称面 ABCD 磁力线垂直,垂直方向的速度为零. 外围表面和下底面磁力线为零. 外围表面、阴极和阳极表面速度为零.

2 计算结果

双丝间接电弧可分为两极区和弧柱区. 两极区由阴极区(阴极表面 1 mm 内区域)和阳极区(阳极表面 1 mm 内区域)组成. 弧柱区可分为弧柱区上端(两极表面间水平部分)和弧柱区下端.

2.1 计算结果最大值

表 1 为双丝间接电弧的温度、速度和电流密度在两极区的最大值. 可以看出温度和速度的最大值在阳极区,最大电流密度在阴极区. 双丝夹角增加,阳极区的电弧参数增长速度大于阴极区,电弧电压增加. 双丝夹角增加,温度和速度在两极区的最大值之差增大,电流密度的最大值之差减小.

表 1 电弧参数最大值

Table 1 Maximum arc parameters

	角度 $\alpha/(^{\circ})$	温度 T/K	电流密度 $j/(10^7\text{ A}\cdot\text{m}^{-2})$	速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	电弧电压 U/V
阴极区	25°	18 778	8.39	204	16.616
	30°	18 936	8.46	207	17.014
	35°	19 124	8.52	209	17.702
阳极区	25°	19 230	7.42	210	16.616
	30°	19 774	7.73	215	17.014
	35°	20 503	8.06	221	17.702

2.2 对称平面上的电弧温度分布

图 2 为不同双丝夹角时对称面上的温度计算结果.

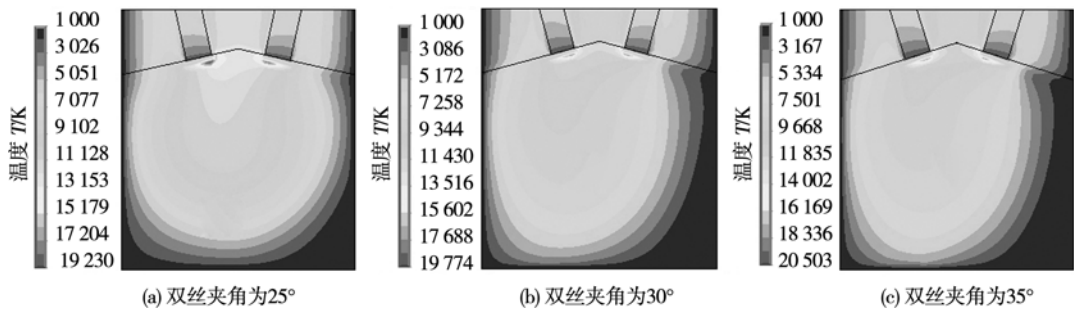


图 2 不同双丝夹角时的电弧温度分布

Fig. 2 Isotherms of twin-wire indirect arc with different angles between twin wires

电弧温度在阴极区和阳极区较高而在弧柱区较低. 随着距离阴极和阳极端部距离的增大,电弧温度逐渐降低. 等温线在阴极区和阳极区密集,在弧柱区稀疏,说明电弧温度在阴极区和阳极区随着距离阴极或阳极尖端距离的增加下降较快,而在弧柱区下降较缓慢. 电弧上宽下窄,类似倒立的钟罩. 电弧向阳极一侧偏转,形态类似于倒立且倾斜的钟罩. 双丝夹角增加,电弧的偏转程度增加,电弧温度在两极区和弧柱区上端升高,在弧柱区下端降低.

2.3 计算结果变化规律

图 3 为电流密度和电势在 x 方向上从阴极区到阳极区的变化规律. 图 3a 为 x 方向上电流密度从阴极区最大值到阳极区最大值的节点解,图 3b 为 x 方向上阳极表面到阴极表面的电势的节点解. 图 4 为电流密度在阴极一侧和阳极一侧从最大值开始沿 z 方向的变化规律.

由图 3 可以看出从阴极区经过弧柱区上端到阳极区,电流密度先减小后增大,变化率随着距离阴极和阳极表面距离的增加而减小,中心轴线上电流变化率最小,且变化规律不受双丝夹角变化的影响.

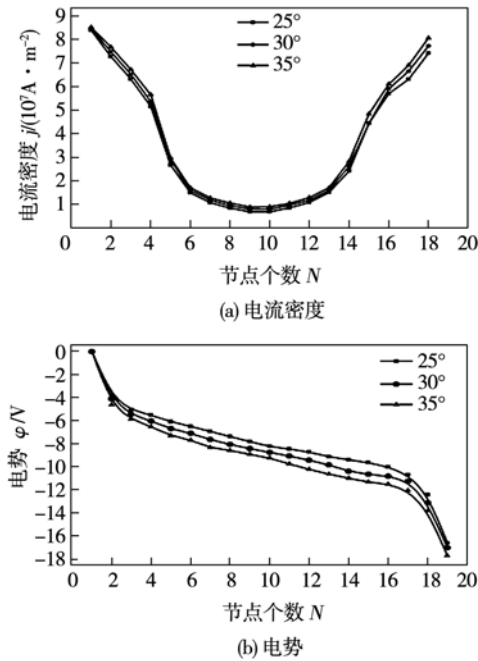


图 3 电流密度和电势分布

Fig. 3 Current density and electrical potential distribution

双丝夹角增加,电弧电压增加较小,当双丝夹角从

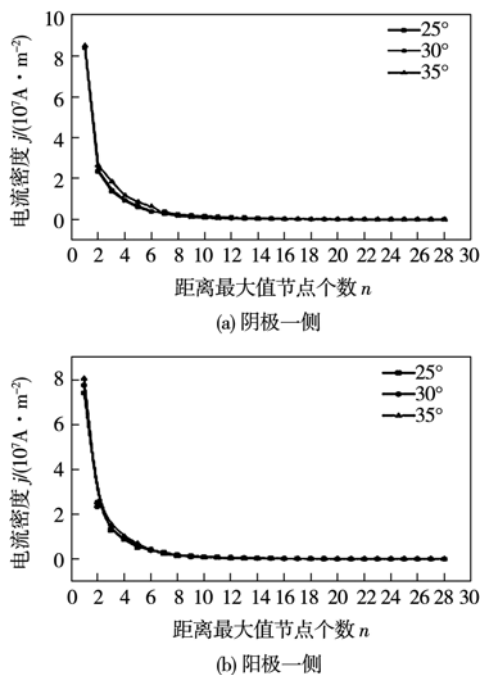


图4 电流密度分布
Fig. 4 Current density distribution

25°增加到35°时,电弧电压从16.616 V增加到17.702 V.从阴极端部到阳极端部,电势逐渐增加,且电势的变化率在阴极区和阳极区较大,在弧柱区较小.

图5为电流密度在弧柱区下端沿 z 方向的变化规律(距离最大值3 mm开始).

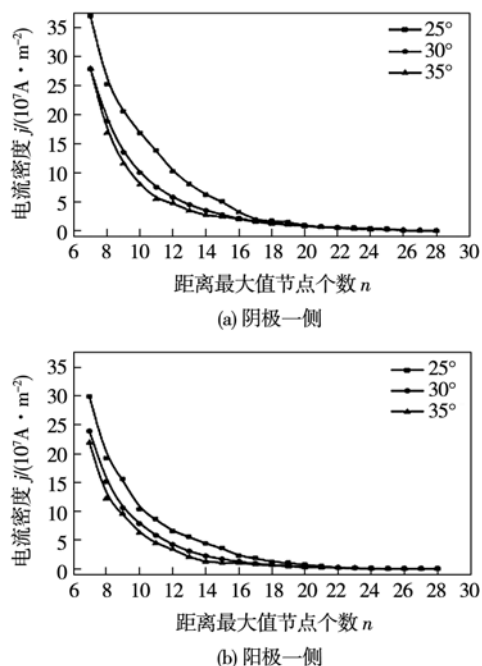


图5 弧柱区下端电流密度分布

Fig. 5 Current density distribution in lower part of arc column region

结合图4和图5可以看出电流密度随着距离电极端部距离的增大而减小,在两极区电流密度下降较快,弧柱区下降较慢,弧柱区下端下降速度更加平缓.电流密度在阴极区和阳极区随着双丝夹角的增大而增大,且阳极区的增量要大于阴极区.电流密度在弧柱区上端随着双丝夹角的增加而增加,在弧柱区下端随双丝夹角的增加而减小.

图6为速度在阴极一侧和阳极一侧从最大值开始沿 z 方向的变化规律.可以看出阴极区、阳极区以及弧柱区上端的速度随着双丝夹角的增大而增大,而阳极区的增量要大于阴极区的增量,这和电流密度的变化趋势是一致的.

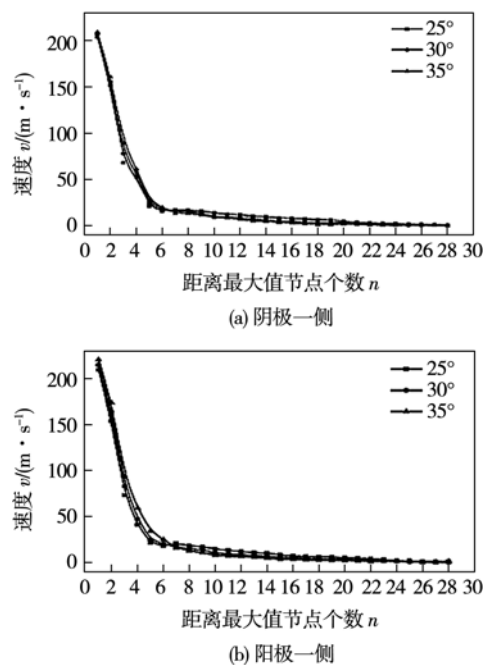


图6 等离子体速度分布
Fig. 6 Plasma velocity distribution

2.4 试验结果

图7为不同双丝夹角时的双丝间接电弧形态图

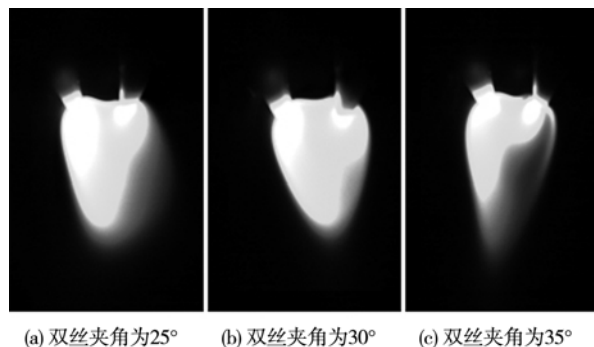


图7 不同双丝夹角时的双丝间接电弧图片

Fig. 7 Figures of twin-wire indirect arc with different angles between twin wires

片. 拍摄时双丝夹角分别为 25° , 30° , 35° , 焊接电流为 150 A, 拍摄速度为 60 帧/s.

由图 7 可以看出随着双丝夹角的增加, 双丝间接电弧偏转程度增加, 这与模拟结果比较吻合, 验证了模拟结果的准确性.

3 讨 论

根据图 4 中的计算结果, 电流密度在阴极、阳极以及弧柱区上端较高, 电流密度是电弧产热的来源^[8], 导致这部分区域产热较多, 温度较高. 电子由阴极表面发射后, 经过圆弧路径到达阳极表面, 电子富集于阳极一侧, 造成电弧的偏转. 同时电流密度和速度是产生磁场的根源, 电流密度大, 速度大的区域磁场强度也大, 双丝间接电弧的磁场分布也呈现两极区大弧柱区小的趋势. 磁场是造成电子发生偏转的原因, 所以电子在阴极区偏转较大, 进入弧柱区后偏转程度较小, 富集于阳极一侧, 造成电弧偏转.

电子沿圆弧路径在阴极和阳极之间流动. 双丝夹角越大, 圆弧路径的弧度越小, 电子经过的路径越短, 更多的电子从弧柱区上端流过, 电流密度增加, 造成温度和速度增加. 而流经弧柱区下端的电子数量减少, 电流密度减小, 温度、速度减小.

计算结果表明电弧温度和产热在阴极区和阳极区要远大于弧柱区. 在实际焊接过程中, 焊丝接电源正、负极, 阴极区和阳极区的热量主要熔化焊丝, 母材依靠弧柱区下端来加热. 大部分电弧产热用来熔化焊丝, 少量用于熔化母材, 所以这种焊接方法焊接效率较高、热输入低.

根据计算结果, 双丝夹角的变化影响温度、速度以及电流密度在电弧区域的分布, 所以改变双丝夹角可以改变电弧热量在母材和焊丝之间的分配. 在焊接过程中两焊丝的熔化速度要协调匹配, 以保证电弧的稳定燃烧. 双丝夹角会影响阴极区和阳极区电弧产热, 影响双丝熔化速度以及焊接过程的稳定性. 故双丝夹角要控制在一定范围内, 以保证电弧的稳定燃烧, 确保焊接过程的正常进行.

4 结 论

(1) 双丝间接电弧电流密度、温度和速度在两极区大于弧柱区, 电弧呈倒立倾斜的钟罩形.

(2) 双丝夹角增大, 电流密度、温度和速度在两极区和弧柱区上端增加增速依次减小; 在弧柱区下端减少; 电弧偏转程度增加.

(3) 通过改变双丝夹角可以改变电弧热量在阴、阳极区和弧柱区的分布, 影响阴极焊丝和阳极焊丝的熔化速度以及电弧稳定性.

参考文献:

- [1] 张顺善, 邹 勇, 邹增大. 磁场对双丝间接电弧焊熔滴过渡的影响[J]. 焊接学报, 2011, 32(6): 69-72.
Zhang Shunshan, Zou Yong, Zou Zengda. Effect of applied magnetic field on metal transfer of twin-wire indirect arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(6): 69-72.
- [2] 曹梅青, 邹增大, 王春茂, 等. 焊接电流对双丝间接电弧焊电弧特性的影响[J]. 焊接学报, 2005, 26(12): 47-50.
Cao Meiqing, Zou Zengda, Wang Chunmao, et al. Influence of welding current on arc characteristic of twin-wire indirect arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(12): 47-50.
- [3] 殷凤良, 胡绳荪, 郑振太, 等. 等离子弧焊电弧的数值模拟[J]. 焊接学报, 2006, 27(8): 51-54.
Yin Fengliang, Hu Shengsun, Zheng Zhen tai, et al. Numerical analysis of arc in plasma arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(8): 51-54.
- [4] Lu F G, Yao S, Lou S N. Modeling and finite element analysis on GTAW arc and weld pool[J]. Computational Materials Science, 2004, 29(3): 371-378.
- [5] Tanaka M, Ushio M. Numerical study of gas tungsten arc plasma with anode melting[J]. Vacuum, 2004, 73(3/4): 381-389.
- [6] Yin F L, Hu S S, Yu C L. Computational simulation for the constricted flow of argon plasma arc[J]. Computational Materials Science, 2007, 40(3): 389-394.
- [7] Shi C W, Zou Y, Zou Z D, et al. Twin-wire indirect arc welding by modeling and experiment[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11): 2292-2299.
- [8] Hsu K C, Etemadi K, Pfender E. Study of the free burning high intensity argon arc[J]. Journal of Applied Physics, 1983, 54(3): 1293-1299.

作者简介: 史传伟, 男, 1983 年出生, 博士研究生. 主要从事双丝间接电弧焊接数值模拟和工艺优化. 发表论文 5 篇. Email: shicw1983@foxmail.com

通讯作者: 邹 勇, 男, 教授, 博士研究生导师. Email: yzou@sdu.edu.cn