

排水罩风场特征及其对焊接电弧影响的数值模拟

高延峰, 胡 翱

(南昌航空大学,航空制造工程学院,南昌 330063)

摘 要: 水下焊接技术在水下工程建设和修复方面具有大量的应用需求. 在水下焊接方法中,局部干法焊接采用排水罩将焊接区域的水排开进行焊接,接头质量较好,易于实现水下自动化焊接. 然而,局部干法焊接时需要在排水罩内通入高压空气将水排开. 为了研究高压气体在排水罩内形成的风场结构及其对焊接过程和电弧特性的影响,文中采用数值模拟的方法,对排水罩内的湍流气体进行了模拟. 并研究了排水罩内侧向风场对电弧等离子体的温度场、速度场、压力场的影响规律. 发现侧向风场对弧柱中心区以外部分的影响较大,弧柱的吹偏角度与侧向风速基本上呈线性关系. 最后进行了焊接试验,采用高速相机拍摄电弧在不同侧向风速下的形态,发现其实际变化与模拟结果基本一致.

关键词: 局部干法焊接; 电弧; 风场结构; 数值模拟

中图分类号: TG 403 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20150827001

0 序 言

随着海洋工程建设的日益增多,水下构件的自动化焊接已成为急需解决的技术难题. 在众多的水下焊接方法中,局部干法焊接利用微型排水罩将焊接区域的水排开进行焊接,接头质量容易保证,而且无需大型排水设备,易于实现水下焊接自动化,在海洋工程建设方面具有良好的应用前景.

日本学者设计了水帘式和钢刷式焊枪进行局部干法焊接,美国学者提出了一种可移动气室式焊接方法. 北京石油化工学院与上海核工程研究设计院合作^[1-2],研制了一套局部干法水下自动焊接试验系统,实现了水下局部干法 MIG 全自动焊接. 华南理工大学将旋转电弧传感器用于水下局部干法焊接中,侧重研究了焊接电流信号和焊缝识别方法^[3-4]. 这些研究为实现局部干法水下焊接的工程应用提供了良好的基础.

局部干法焊接时,需要在排水罩内通入高压气体将水排开,高压气体在排水罩内的高速流动对焊接过程会产生一定的影响. 然而,目前关于排水罩内高压气体的风场结构,及其对电弧特性影响研究的文献却很少. 文中采用 Fluent 有限元软件,首先对排水罩内气体的风场结构进行数值模拟,根据模拟结果优化排水罩结构. 然后通过定义电弧特

性^[5]、保护气的等离子体属性^[6]等,研究电弧等离子体温度场、速度场和压力场在不同侧向风速作用下的变化情况. 最后通过高速摄像方法拍摄电弧形态,验证仿真结果,从而为局部干法水下焊接质量控制提供理论支持.

1 数学模型的建立

1.1 控制方程

以 MIG 焊接电弧系统为物理原型进行数学建模. 为简化电弧模型,对焊接电弧等离子体的传热与流动规律作以下基本假设.

- (1) 电弧等离子体为导电不可压缩连续流体.
- (2) 电弧等离子体处于局部热平衡(LTE)状态.
- (3) 电弧等离子体是光学薄的,流动为层流状态.
- (4) 电弧周围为纯氩气环境.
- (5) 不考虑电极鞘层的影响.
- (6) 不考虑熔滴形态对电弧温度场的影响.

基于上述假设,选择三维直角坐标系下不可压缩流体的 Navier-Stokes 控制方程和麦克斯韦方程组作为电弧模拟的基本方程.

流体连续性方程为

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

(1)

等离子体流速为

$$v_1 = v_{1x} + v_{1y} + v_{1z}$$

(2)

电流连续性方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z}\right)=0$$

(3)

欧姆定律为

$$J_x=-\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial x}, J_y=-\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial y}, J_z=-\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z}$$

(4)

安培环流定律为

$$B_0=\frac{\mu_0}{x}\int_0^x J_z x dx$$

(5)

能量守恒方程为

$$\rho c_p\left(v_{1x} \frac{\partial T}{\partial x}+v_{1y} \frac{\partial T}{\partial y}+v_{1z} \frac{\partial T}{\partial z}\right)=$$
$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k \frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k \frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k \frac{\partial T}{\partial z}\right)+S_Q$$

(6)

动量方程(以 x 方向为例)为

$$\rho\left(u_x \frac{\partial u}{\partial x}+u_y \frac{\partial u}{\partial y}+u_z \frac{\partial u}{\partial z}\right)=$$
$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial z}\right)-\frac{\partial P}{\partial x}+S_x$$

(7)

式中: v_1 为等离子体流速; v_{1x} 为 x 方向等离子体流速; v_{1y} 为 y 方向等离子体流速; v_{1z} 为 z 方向等离子体流速; σ 为氩气电导率; φ 为电势; J_x 为 x 方向电流密度; J_y 为 y 方向电流密度; J_z 为 z 方向电流密度; B_0 为电弧自感应磁场强度; μ_0 为真空磁导率; S_Q 为能量方程源项; ρ 为氩气密度; c_p 为氩气比热容, k 为氩气导热系数; T 为温度; μ 为氩气动力粘性系数; p 为环境压力; S_x 为 x 方向动量源项.

1.2 材料属性的定义

MIG 焊接时保护气为纯氩气,其材料属性对仿真结果的准确性有很大影响. 文中采用的氩气热力学属性,即密度、电导率、粘度、定压比热容、热传导系数及其与温度的函数关系来自于参考文献[5].

1.3 模型构造与计算求解

文中所使用的排水罩结构如图 1 所示,高压气体从顶部的进气口通入,经过多孔介质隔板后进入排水罩内,然后从底部的出气口排出,底部的出气口是一圈被压紧的海绵材料. 通过调节进气口气体的流量,使排水罩内部保持较高的压力,从而将其中的水排出.

在对电弧特性进行模拟时,建立了电弧的三维模型,如图 2 所示. 电弧只在模型的中心区域产生,其形状设置为圆柱体. 模型的外部建立为矩形结构,可以划分出高质量的均匀六面体网格,也便于添加均匀的风场,能较为真实的反应实际情况. 使用前处理软件绘制模型并对其进行结构化网格划分. 建模时焊丝端面与其轴线垂直,网格划分时在电弧周围进行加密处理.

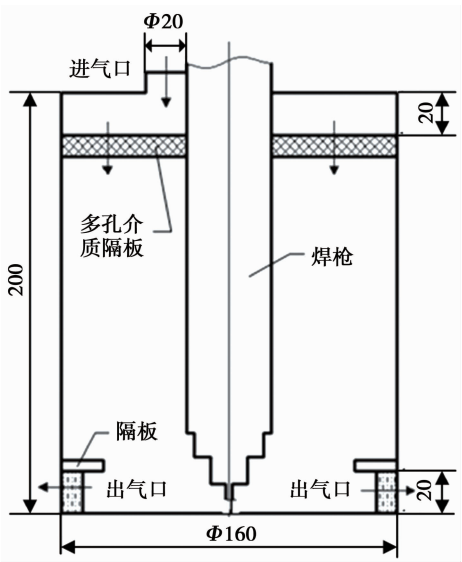


图 1 排水罩结构图(mm)
Fig. 1 Structure of water shield

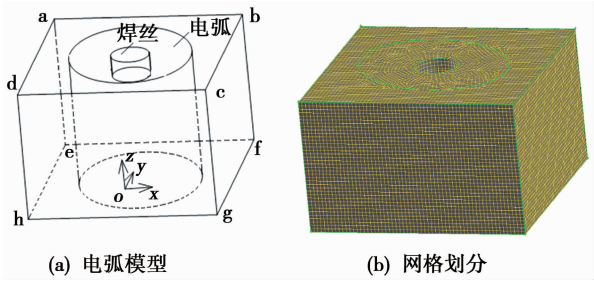


图 2 电弧模型及网格划分
Fig. 2 Welding arc modeling and meshing

边界条件设置的合理与否将直接影响到 Fluent 能否求解以及求解结果的准确性. 文中根据实际情况和前面的基本假设设置边界条件,其边界条件如表 1 所示. 表中 p 为设定的环境压力; v 为风速,在边界 $abcd$ 上表示的是保护气的风速,在边界 $adhe$ 上表示的是侧向风速.

表 1 边界条件设置
Table 1 Boundary condition setting

边界名称	边界类型	压力 p /MPa	风速 v /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
abcd	速度入口	—	0.2
abfe	壁面	—	—
dceh	壁面	—	—
adhe	速度入口	—	0.6,1.0,2.0,5.0
begf	压力出口	0.2	—
efgh	壁面	—	—

基于本节的基本假设,电弧等离子体为不可压

缩流动,选择 Pressure Based 求解器,压力速度耦合方式选择 SIMPLE 算法。

2 结果分析

2.1 排水罩内高压气流的风场特征

排水罩应该设计合理的结构,使得其中的气体能够形成从上到下低速的层流,不同部位的风速差尽可能小,避免形成环流。气体的流动轨迹尽可能短,以便将焊接产生的烟雾快速排出排水罩。为了简化计算,文中忽略排水罩内焊枪对于风场流动的影响。通过对排水罩结构进行优化,发现在出口上侧设隔板可增加出口风速,而在入口处使用多孔介质隔板又可降低风速,减少环流。图 3 表示了使用多孔介质隔板与否两种条件下排水罩内的风场特征,其中带箭头曲线为气体流动轨迹线,根据仿真结果可得。出口压力约为 0.2 MPa,略低于设定的入口压力 0.25 MPa。

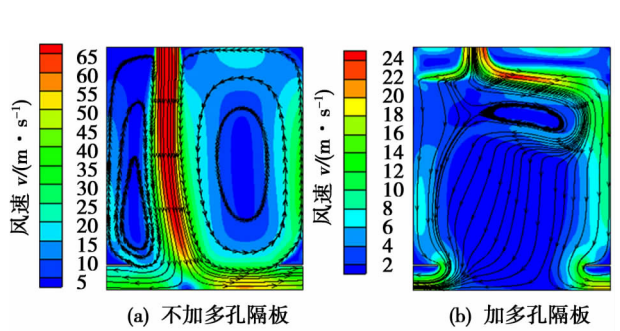


图 3 排水罩内部风场结构

Fig. 3 Wind field structure in water shield

由图 3a 可见,当排水罩内不加多孔隔板时,在排水罩出气口两侧挡板上部有局部湍流存在,从而影响烟雾的排出。同时,在进气口的正下方,气体流速非常大,而该区域距离电弧较近,对电弧的稳定性产生较大的影响。增加多孔隔板后的情况如图 3b 所示,气体进入排水罩后,由于多孔介质隔板的阻挡,气体流向两侧,并从距离进气口较远的一侧流下,基本没有湍流现象,在排水罩的底部,不存在气体向上回流的情况,颗粒的轨迹线基本成束状流出排水罩,而且风速大大降低,有利于电弧的稳定性。这样的风场可以使得焊接产生的烟气和工件表面蒸发产生的水蒸气快速的排出排水罩,保证焊接质量和排水罩内传感器的正常工作。

2.2 侧向风场对电弧特性的影响

从图 3 的模拟结果可见,在排水罩底部具有横向流动的风场,使用多孔介质隔板后基本可以消除

湍流现象,且风速大大降低,有利于保证焊接质量。模拟结果显示,排水罩底部侧向风场的风速大约在 1.0 ~ 5.0 m/s 之间。侧向风场引起的气体流动会对焊接电弧产生吹袭力,从而会改变电弧温度场的分布,对电弧的稳定性产生影响。为此,文中采用数值模拟方法研究了侧向风速对电弧温度场、压力场和速度场的影响规律。模拟时设定环境压力与排水罩内压力一致,为 0.2 MPa。

图 4 是不同侧向风速下电弧的温度场分布情况。由图 4a, b 可以看出,在侧向风速 $v < 1.0$ m/s 时,其对电弧温度场的影响很小,几乎看不到明显变化,当侧向风速为 2.0 m/s 时(图 4c),电弧温度场有轻微的偏移,当侧向风速达到 5.0 m/s 时(图 4d),电弧温度场发生明显偏移。电弧温度场在侧向风场下变化最明显的是弧柱以外部分,即电弧等离子体的周边受到的影响较大,而电弧中心区域较小。

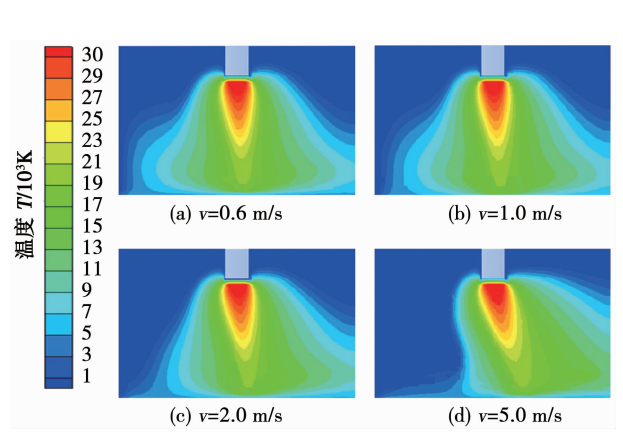


图 4 不同侧向风速下的电弧温度场分布

Fig. 4 Arc temperature distribution under different lateral wind

图 5 是不同侧向风速下电弧等离子体的流速分布。可见,电弧中心区域等离子体的流速远远大于侧向风速,弧柱区外的等离子体流速急速下降,当周围区域受到侧向风场吹袭时,电弧等离子体的流向发生径向偏移,影响电弧形态。这也是图 4d 弧柱区外的温度场在侧向风场下变化较大的原因。

图 6 是电弧等离子体的压力分布。由图 6 可以看出,在侧向风场作用下,焊丝端面和熔池端面高压区发生偏移。侧向风速较小时电弧弧柱对熔池的压力变化不明显。而当侧向风速达到 5.0 m/s 时(图 6d),中心弧柱区对熔池的压力有所减小。

为了进一步研究电弧等离子体的温度场、速度场、压力场随侧向风速的变化,文中对其吹偏角度进行了分析。电弧等离子体在侧向风场下的偏离线与

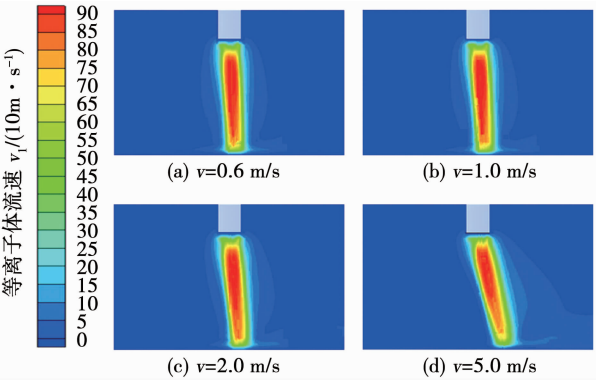


图 5 不同侧向风速下的等离子体流速
Fig. 5 Arc plasma velocity under different lateral wind

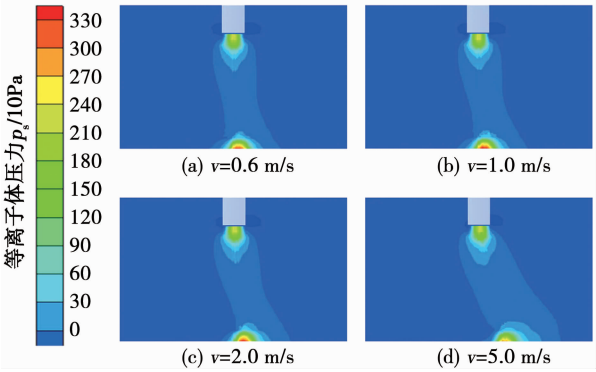


图 6 不同侧向风速时的等离子体压力
Fig. 6 Arc plasma pressure distribution under different lateral wind

焊丝轴线的夹角为 θ , 其随着侧向风速的变化规律如图 7 所示。

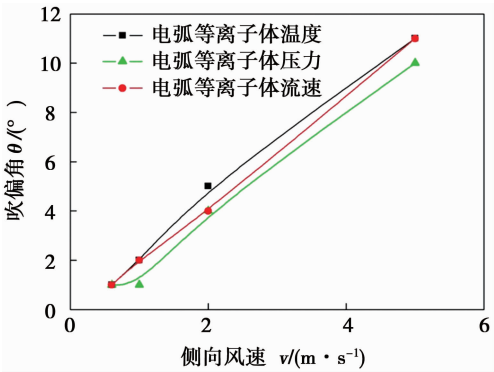


图 7 电弧等离子体偏角变化
Fig. 7 Deflection angle changing of weld arc

从图 7 可以看出,电弧等离子体的温度场、压力场和流速在侧向风场的作用下发生偏移,偏移角度与侧向风速基本成线性关系,其中温度场的偏移角度略大于压力场的偏移角度。

3 试验研究

为了验证仿真结果,进行了焊接试验. 试验参数为焊接电流 190 A, 焊接电压 24 V, 保护气为纯氩气, 氩气流量 20 L/min. 试验材料选用尺寸 500 mm $\times$ 50 mm $\times$ 5 mm 的 Q235 钢板. 拍摄了电弧在侧向风场吹袭下的形态, 选取较稳定的形态如图 8 所示。

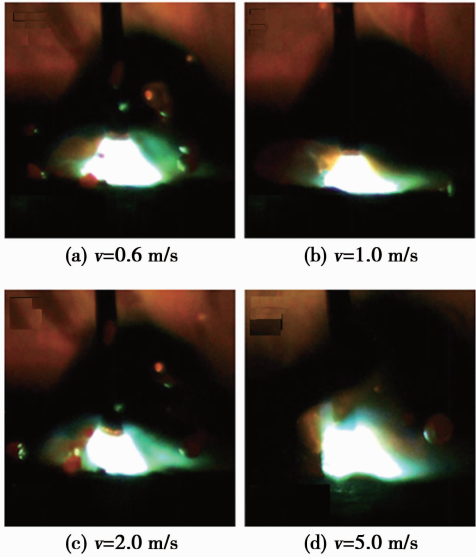


图 8 不同侧向风速时的电弧形态
Fig. 8 Arc shapes under different lateral wind

由于需要高速摄像, 试验时拆除微型排水罩, 用纯氩气在侧面吹袭, 产生风速可控的侧向风场, 在大气环境下实施焊接试验, 从而模拟局部干法焊接环境. 由图 8 可以看出, 试验中电弧的实际变化情况与图 4 的温度场变化情况基本一致, 说明仿真结果较为真实。

4 结 论

- (1) 在焊接过程中侧向风场对中心弧柱区以外部分影响较大, 而对中心弧柱区影响较小.
- (2) 弧柱区在侧向风场作用下发生偏移, 其偏移角与侧向风速基本呈线性关系.
- (3) 通过试验验证了仿真结果的合理性, 为局部干法水下焊接工艺研究提供了理论依据.

参考文献:

[1] 朱加雷, 焦向东, 金 枫, 等. 局部干法自动水下焊接系统的研究[J]. 电焊机, 2009, 39(8): 10-13.

参考文献：

[1] Woo W, Feng Z, Wang X L, *et al.* Neutron diffraction measurments of residual stresses in friction stir welding: a review[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2011, 16(1): 23-32.

[2] Prime M B, Gnäupel-Herold T, Baumann J A, *et al.* Residual stress measurements in a thick, dissimilar aluminum alloy friction stir weld[J]. *Acta Materialia*, 2006, 54(15): 4013-4021.

[3] Malarvizhi S, Raghukandan K, Viswanathan N. Effect of post weld aging treatment on tensile properties of electron beam welded AA2219 aluminum alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 37(3-4): 294-301.

[4] 刘 鹏, 李亚江, 王 娟. Mg/Al 异种材料扩散焊界面组织结构及力学性能[J]. *焊接学报*, 2007, 28(6): 45-48.

Liu Peng, Li Yajiang, Wang Jun. Microstructure and properties near interface zone of diffusion bonded joint for Mg/Al dissimilar materials [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, 28(6): 45-48.

[5] Panteli A, Robson J D, Brough I, *et al.* The effect of high strain

rate deformation on intermetallic reaction during ultrasonic welding aluminium to magnesium[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2012, 556: 31-42.

[6] 尚 晶, 王克鸿, 田宏军, 等. 冷金属过渡搭接焊镁铝异种金属接头组织及性能[J]. *焊接学报*, 2011, 32(12): 41-45.

Shang Jing, Wang Kehong, Tian Hongjun, *et al.* Study on cold metal transfer welded lap joints of Mg/Al dissimilar metals[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(12): 41-45.

[7] Xiao L, Wang N. Growth behavior of intermetallic compounds during reactive diffusion between aluminum alloy 1060 and magnesium at 573-673K[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2015, 456: 389-397.

[8] Li Donggang, Wang Kai, Wang Qiang, *et al.* Diffusion interaction between Al and Mg controlled by a high magnetic field[J]. *Applied Physics A*, 2011, 105: 969-974.

作者简介: 金玉花,女,1971 年出生,博士,副教授,硕士研究生导师. 主要从事有色金属连接技术及其相关理论研究和教学工作. 发表论文 10 余篇. Email: yhj8686@163.com

[上接第 62 页]

Zhu Jialei, Jiao Xiangdong, Jin Feng, *et al.* Research on local dry automatic under water welding system[J]. *Electric Welding Machine*, 2009, 39(8): 10-13.

[2] 蒋力培, 王中辉, 焦向东, 等. 水下焊接高压空气环境下 GTAW 电弧特性[J]. *焊接学报*, 2007, 28(6): 1-4.

Jiang Lipai, Wang Zhonghui, Jiao Xiangdong, *et al.* Characteristics of GTAW arc in underwater welding under high-pressure air condition [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, 28(6): 1-4.

[3] 梁 明, 王国荣, 钟继光. 采用微型排水罩的药芯焊丝水下焊接焊缝自动跟踪系统[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(3): 148-153.

Liang Ming, Wang Guorong, Zhong Jiguang. Vision-based seam tracking system of the underwater flux-cored arc welding[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(3): 148-153.

[4] 杜健辉, 石永华, 王国荣, 等. 基于 PCA_Nu-SVR 的水下焊缝偏差识别方法[J]. *焊接学报*, 2011, 32(3): 21-24.

Du Jianhui, Shi Yonghua, Wang Guorong, *et al.* Seam offset identification of underwater arc welding using PCA_Nu-SVR[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(3): 21-24.

[5] Hu J, Tsai H L. Heat and mass transfer in gas metal arc welding. part I: the arc[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50(5): 833-846.

[6] Choo R T C, Szekeely J, Westhoff R C. On the calculation of the free surface temperature of gas-tungsten-arc weld pools from first principles; part I. modeling the welding arc [J]. *Metallurgical Transations B*, 1992, 23 (3): 357-369.

作者简介: 高延峰,男,1974 年出生,博士,副教授. 主要从事焊接自动化方面的研究工作. 发表论文 30 余篇. Email: gaoyf@ nchu. edu. cn