

钨极间距对双钨极 TIG 焊电弧特性的影响研究

郭朝博^{1,2}, 崔露露³, 陶凯^{1,2}, 李兴霞^{1,2}, 马天凤^{1,2}, 吴喆¹

(1.河南工学院 材料科学与工程学院,河南 新乡 453003;2.河南工学院 河南省金属材料改性技术工程技术研究中心,河南 新乡 453003;3.河南工学院图书馆,河南 新乡 453003)

摘要 针对双钨极 TIG 焊电弧建立了三维稳态数学模型,通过假设和边界条件对控制方程组进行迭代求解,分析不同钨极间距下的电弧特性。通过与单钨极 TIG 焊电弧进行对比,探讨了电弧温度、等离子速度、电弧压力等的差异性。通过分析不同钨极间距的电弧特性,探讨电弧形态、电磁力、电弧压力的变化规律。结果表明:双钨极 TIG 焊耦合电弧形态呈非轴对称分布;与单钨极 TIG 焊相比,可大幅降低电弧温度、等离子速度和电弧压力,且在两钨极垂直方向上的电弧压力变化较缓。随钨极间距的增大,电弧间的相互作用力变弱,耦合电弧逐渐分离为两个单独电弧;电磁力的方向逐渐由电弧中心向两侧偏移,且电磁力逐渐降低;电弧压力逐渐从单峰分布向双峰分布转换,最大电弧压力先降后升。

关键词 双钨极 TIG 焊;电弧特性;钨极间距;数值模拟

中图分类号 TG402

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2025)01-0058-06

DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20240809.001

Study on influence of tungsten electrode spacing on arc characteristics of twin-tungsten electrode TIG welding

GUO Chaobo^{1,2}, CUI Lulu³, TAO Kai^{1,2}, LI Xingxia^{1,2}, MA Tianfeng^{1,2}, WU Zhe¹

(1.School of Materials Science and Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China;

2.Henan Engineering Research Center for Modification Technology of Metal Materials, Henan Institute of Technology,

Xinxiang 453003, China; 3.Library of Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China)

Abstract A three-dimensional steady state mathematical model was established for the TIG welding arc. The control equations were solved iteratively by assumptions and boundary conditions, and the arc characteristics under different tungsten electrode spacing were analyzed. The arc temperature, plasma velocity and arc pressure were discussed by comparing with single tungsten electrode TIG arc. By analyzing the arc characteristics of different tungsten electrode spacing, the variation rules of arc shape, electromagnetic force and arc pressure were discussed. The results show that the coupling arc shape of twin-tungsten TIG welding is asymmetrically distributed. Compared with single tungsten electrode TIG welding, the arc temperature, plasma velocity and arc pressure can be greatly reduced, and the arc pressure changes slowly in the vertical direction of the two tungsten electrodes. With the increase of tungsten electrode spacing, the interaction force between arcs becomes weaker, and the coupling arc gradually separates into two separate arcs. The direction of the electromagnetic force gradually shifts from the arc center to both sides, and the electromagnetic force gradually decreases. The arc pressure gradually changes from unimodal to bimodal distribution, and the maximum arc pressure drops first and then rises.

Keywords twin-tungsten electrode TIG welding; arc characteristic; tungsten electrode spacing; numerical simulation

收稿日期:2024-03-13;修回日期:2024-05-20

基金项目:河南省自然科学基金(232300420365);高等学校重点科研项目基础研究专项计划(20B430003)

第一作者:郭朝博,男,博士,讲师。E-mail:guochbo@hait.edu.cn。

moment resisting frames[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2022, 51(5):1180-1200.

[14] 赵品, 荣学亮, 叶见曙, 等. 波形钢腹板箱梁的腹板受力性能及桥面板横向内力分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2021, 42(3):367-372.

ZHAO Pin, RONG Xueliang, YE Jianshu, et al. Analysis on mechanical property of web and transverse internal force in bridge deck of box girder with corrugated steel webs[J]. Jour-

nal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2021, 42(3):367-372. (in Chinese)

[15] 李威, 贾捷. 弯曲受力状态下钢箱梁钢板极限承载性能仿真[J]. 计算机仿真, 2023, 40(11):231-235.

LI Wei, JIA Jie. Simulation of ultimate bearing capacity of steel box girders and plates under bending stress[J]. Computer Simulation, 2023, 40(11):231-235. (in Chinese)

钨极氩弧焊(TIG焊)因电弧稳定性高在材料加工领域得到了广泛的应用,但较低的热输入限制了该方法的发展。如果仅依靠提高焊接电流的方法增加热输入,又会因电弧压力过大而导致出现咬边、焊穿等缺陷。YAMADA^[1]提出了双钨极 TIG 焊接工艺,采用两个独立的钨极代替单钨极而产生一个整体的耦合电弧。此方法可在大电流作用下产生较小的电弧压力,在保证电弧稳定性的基础上大大提高焊接热输入,从而提高焊接效率,改善焊接质量。

双钨极 TIG 焊在工业生产中已得到了应用,黄九龄等^[2]针对纯钛薄板分析了电极间距对电弧耦合、焊缝成形的影响规律。HOU 等^[3]探讨了双钨极 TIG 焊在奥氏体不锈钢堆焊中的应用。KABA 等^[4]分析了异种铝合金双钨极 TIG 焊对热影响区的影响。ZHANG 等^[5]分析了活性双钨极 TIG 焊对熔深的影响规律。LIU 等^[6]分析了双钨极 TIG 焊的电弧形态、电弧压力分布规律,但对于双电弧耦合机理的研究还不够深入。尤其是焊接电弧温度高、弧光强等特点进一步限制了通过试验方法对其物理本质进行探讨。随计算技术及数值模拟的发展,通过数值计算对双钨极 TIG 焊的耦合电弧进行分析成为可能。针对单 TIG 焊电弧,大量研究工作者建立数学模型分别针对焊接电流、弧长、保护气钨极形状等进行了分析^[7-10]。对于双钨极 TIG 焊电弧,DING 等^[11]通过建立二维简化模型、李桓等^[12]通过建立三维模型对耦合电弧行为进行数值分析。王新鑫等^[13]建立三维模型对不同弧长的耦合电弧进行了分析。LIU 等^[14]建立了粒子迁移物理模型,对电子的运动状态进行了描述。但对于双钨极 TIG 焊电弧的耦合行为及钨极间距对电弧形态的影响还需进一步研究。

本文作者针对双钨极 TIG 焊电弧的特点建立三维数学模型,利用磁流体力学相关理论对模型进行分析,通过与单 TIG 焊电弧进行对比,获得电弧形态、温度、速度、电磁力、电弧压力等的分布规律;通过对不同钨极间距进行分析,获得电弧形态、电磁力、电弧压力的变化规律。

1 数学模型

1.1 基本假设

双钨极 TIG 焊电弧模型示意图如图 1 所示。为了简化计算,在保证模型精度的情况下对双钨极 TIG 焊电弧模型作出如下假设:

1) 电弧等离子是连续介质,且处于局部热平衡状态,即电弧等离子体中的电子和等离子温度相等。

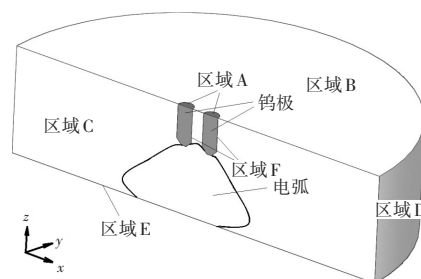


图1 双钨极 TIG 焊电弧模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of twin-tungsten electrode TIG welding arc model

2) 电弧等离子体是光学薄的。

3) 由于电弧边缘区域的紊流状态对电弧区域影响较小,假设电弧等离子体的流动始终处于层流状态。

4) 由于黏性效应导致的热损失对模型计算结果影响较小,可忽略不计。

1.2 控制方程

质量守恒方程:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0. \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{F}. \quad (2)$$

能量守恒方程:

$$\nabla \cdot (\rho c_p \mathbf{v} T) = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + S. \quad (3)$$

式中: ρ 为密度; \mathbf{v} 为速度矢量; p 为压力; c_p 为定压比热容; T 为热力学温度; κ 为热导率。其中 $\boldsymbol{\tau}$ 为黏性应力张量,其表达式:

$$\tau_{ij} = \mu \left(2 \frac{\partial v_i}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{v} \right) \quad i=j$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad i \neq j$$

式中: μ 为动力黏度系数; v_i 为 x_i 方向的速度分量; \mathbf{F} 为电磁力源项。其表达式:

$$\mathbf{F} = \mathbf{j} \times \mathbf{B}. \quad (5)$$

式中: \mathbf{j} 为电流密度; \mathbf{B} 为磁通密度。

S 为热量源项,是焦耳热、电子焓和辐射热损失之和,其表达式:

$$S = \frac{j_x^2 + j_y^2 + j_z^2}{\sigma} + \frac{5k_B}{2e} \left(j_x \frac{\partial T}{\partial x} + j_y \frac{\partial T}{\partial y} + j_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - S_R. \quad (6)$$

式中: σ 为电导率; k_B 为玻尔兹曼常数; e 为电子电量; S_R 为辐射损失。

电流连续性方程:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) = 0. \quad (7)$$

欧姆定律:

$$\mathbf{j} = -\sigma (\nabla \phi). \quad (8)$$

磁矢量泊松方程:

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{j} \quad (9)$$

磁通密度:

$$\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B} \quad (10)$$

式中: ϕ 为电势; σ 为电导率; \mathbf{A} 为磁矢量; μ_0 为真空磁导率。

1.3 边界条件

针对双钨极 TIG 焊电弧的特点,建立对称性的三维模型。本模型中所用钨极平行排放,直径为 3.2 mm,锥角为 60°,尖端带有平顶,其直径为 0.51 mm。两钨极的焊接电流均为 100 A,电弧弧长为 10 mm。本模型所用保护气为纯氩气,气体流量为 10 L/min,其热物理参数选自文献[15]。该模型的边界条件如表 1 所示。为了增加模拟结果的准确性,模型所用边界条件与实际过程保持一致。 \mathbf{n} 为边界单位法向量;区域 A 和 F 为钨极边界,其中区域 A 为电流入口边界条件,区域 F 为耦合边界条件;区域 B 为保护气入口,保护气作用区域和速度与实际喷嘴及流量保持一致;区域 D 为气体出口,采用压力出口边界条件;区域 E 为阳极表面,由于等离子体温度在 5 000 K 以下时很难发生电离,为提高模型计算精度,假定阳极表面温度为 5 000 K。

表 1 模型的边界条件

Table 1 Boundary conditions of model

区域	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	T/K	ϕ/V	$A/(\text{Wb}\cdot\text{m}^{-1})$
A	—	1 000	$ j = \frac{I}{\pi r^2}$	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
B	v_{giv}	1 000	$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
C	$\frac{\partial v}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
D	$\frac{\partial v}{\partial n} = 0$	1 000	$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$	0
E	0	5 000	0	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
F	0	耦合	耦合	耦合

2 试验验证

针对所建立模型,对两钨极的焊接电流均为 100 A 的 TIG 焊电弧进行数值分析,并获得温度场分布,提取温度高于 10 000 K 的区域与文献[16]中的电弧形体进行对比,如图 2 所示。在 $x-z$ 平面和 $y-z$ 平面的电弧形态与试验结果相接近,只是在作用范围上较宽。为了进一步验证模型的准确性,分别对焊接电流为 100、200 A 的单 TIG 焊电弧进行数值分析,并提取其最大电弧压力,与试验结果对比,如表 2 所示。模拟和试验结果间的差异较小,尤其当电流较低时。随电流的增大,

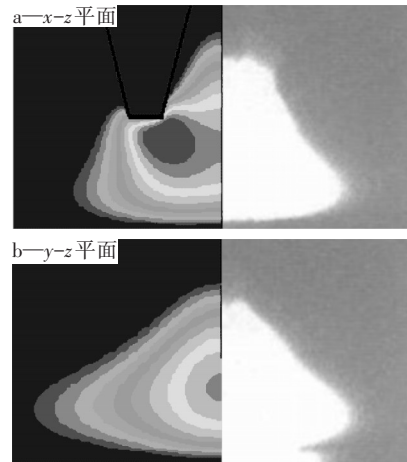


图 2 双钨极 TIG 焊电弧形态的模拟与文献[16]结果对比
Fig.2 Comparison of simulation of arc shape of twin-tungsten electrode TIG welding with results in references[16]

表 2 最大电弧压力模拟与试验结果对比

Table 2 Comparison of simulation results of maximum arc pressure with experimental results

钨极	电流/A	模拟结果/Pa	试验结果 ^[20] /Pa
双	100	112	111
单	100	111	110
单	200	521	513

金属蒸汽等对电弧的影响逐渐增大,在大电流时模拟和试验结果间的差异变大。

3 模拟结果与讨论

3.1 物理场分布规律分析

针对双钨极 TIG 焊电弧在 $x-z$ 和 $y-z$ 平面呈对称分布的特性,分别对对称面上的速度场和温度场分布进行分析,钨极间距为 4 mm 的分布云图如图 3、4 所示。由于钨极间距较小,两钨极和阳极间形成一个耦合的电弧,与单 TIG 焊电弧相比,电弧等离子体并不是直接由钨极区域垂直加速流向阳极,而是在电磁力的作用下,两钨极产生的电弧相互吸引,钨极下方的等离子体逐渐向中心靠拢,随后指向阳极运动,这直接导致双钨极 TIG 焊电弧形态并不呈钟罩型分布。

表 3 为双钨极和单钨极 TIG 焊电弧的最高温度和最大等离子速度的结果对比。在双钨极 TIG 焊电弧的 $x-z$ 平面上其最高温度和最大速度分别约为 17 926 K 和 83.6 m/s,且未出现在对称轴上,而是分别出现在距钨极约为 1.5、2.0 mm 处,相比 200 A 单 TIG 焊电弧均有大比例降低(200 A 单 TIG 焊电弧高温度和速度分别约为 24 350 K 和 256 m/s)。这是由于电弧内部不同的电流密度分布造成的。在双钨极 TIG 焊中,总电流可均分在两个单独的钨极中,致使通过各钨极中的电流减

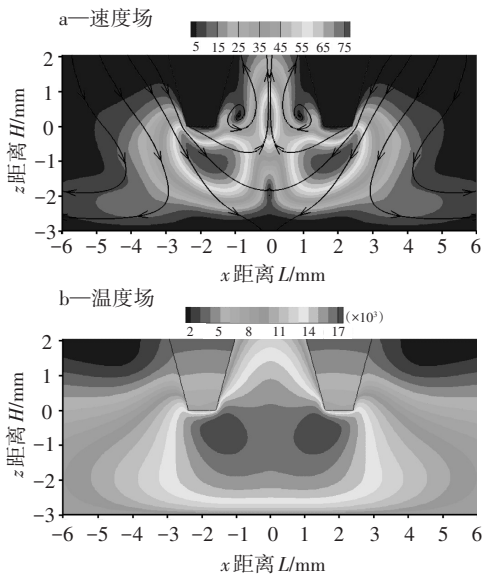


图3 双钨极 TIG 焊电弧的速度场和温度场(x-z 平面)
Fig.3 Velocity and temperature fields of twin-tungsten TIG welding arc (x-z plane)

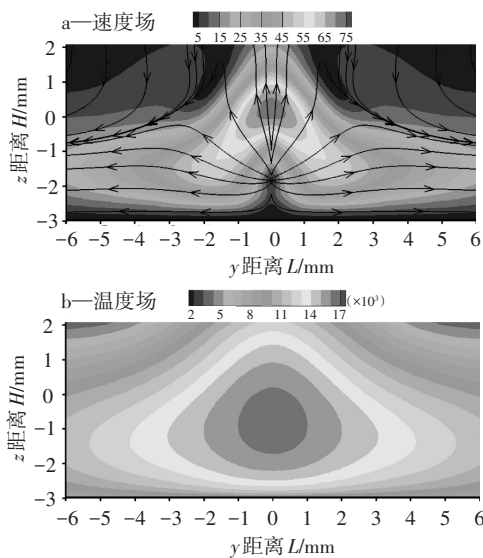


图4 双钨极 TIG 焊电弧的速度场和温度场(y-z 平面)
Fig.4 Velocity and temperature fields of twin-tungsten TIG welding arc (y-z plane)

表3 双钨极和单钨极 TIG 焊电弧的最高温度和最大等离子速度

Table 3 Maximum temperature and maximum plasma velocity of twin and single tungsten TIG welding arc

钨极	电流/A	温度/K	速度/(m·s ⁻¹)
双	100	17 926	83.6
单	100	17 796	83.9
单	200	24 350	256

半,在小电流的作用下各钨极下方产生较低的电流密度,进而影响到焦耳热的产生,最终导致电弧温度下降。又由于电流密度降低导致磁通密度降低,根据式(5),得出电磁力下降,进而致使等离子体速度的降低。在两钨极尖端中间区域的等离子体有向上流动的趋势(图3),这会将电弧的热量带到两钨极中间区域,最终形成在两钨极中间区域聚集,在接近钨极区域稍宽,接近阳极区域稍窄的电弧形态。

由于电磁力的作用,钨极下方的等离子体向中心区域流动,致使在该区域的等离子体在向下运动的同时也产生向四周的扩散(图3a)。等离子运动同时伴随着热量的扩散,致使在x-z平面上形成图3b的电弧形态。

相对于100 A单TIG焊电弧,双钨极TIG焊电弧的最高温度提高,最高速度降低,但差别不大(100 A单TIG焊电弧最高温度和最高速度分别约为17 796 K和83.9 m/s)。最高温度和最高速度距离钨极尖端的距离也接近,只是在等离子体运动方向上有所差异。双钨极TIG焊电弧在钨极下方区域呈单电弧的状态(图4),随远离钨极,两电弧开始耦合成单一电弧,因此在距离钨极较近的区域会呈单TIG焊的特性。式(5)中电磁力的大小受电流密度影响,双钨极和单钨极在相同电流下使钨极下方的电流密度接近,产生的电磁力也接近,只是在双钨极TIG焊中由于磁场的作用,电磁力会向两钨极中心区偏移,导致电弧等离子体具有接近的温度和速度。而当单TIG焊电流为200 A时,钨极下方的电流密度会显著提高,导致电弧温度和等离子体速度大幅提高。

3.2 电弧压力分布规律分析

图5为双钨极和单钨极TIG焊阳极表面的电弧压力分布图。与单TIG焊相似,最大电弧压力出现在电弧中心处,其最大值约为112 Pa,随着与中心距离的增大,电弧压力快速降低,随后变化逐渐平缓,其变化规律与100 A单TIG焊类似。由于双钨极TIG焊电弧的非轴对称性使电弧压力在不同的方向上的分布不同。电弧压力在不同方向上的差异与电弧形态的分布有关。电弧形态的非对称分布直接导致电弧压力在x方向较大,其分布较广。

3.2 电弧压力分布规律分析

图5为双钨极和单钨极TIG焊阳极表面的电弧压力分布图。与单TIG焊相似,最大电弧压力出现在电弧中心处,其最大值约为112 Pa,随着与中心距离的增大,电弧压力快速降低,随后变化逐渐平缓,其变化规律与100 A单TIG焊类似。由于双钨极TIG焊电弧的非轴对称性使电弧压力在不同的方向上的分布不同。电弧压力在不同方向上的差异与电弧形态的分布有关。电弧形态的非对称分布直接导致电弧压力在x方向较大,其分布较广。

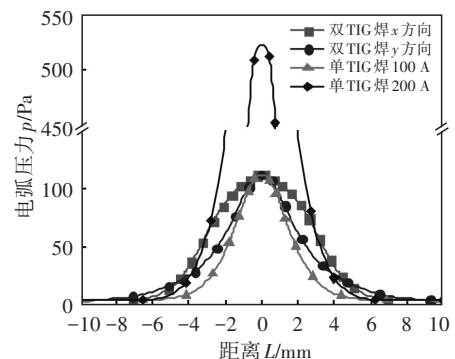


图5 双钨极和单钨极 TIG 焊阳极表面的电弧压力分布图
Fig.5 Arc pressure distribution diagram of anode surface of twin and single tungsten TIG welding

双钨极 TIG 焊可获得远小于 200 A 时单 TIG 焊的电弧压力(表 2)。最大电弧压力下降约 21.7%。由于双钨极产生的耦合电弧在阳极附近电弧形态横截面积较大,导致等离子流速降低,从而影响等离子体撞击阳极表面,导致电弧压力减小。

3.3 钨极间距对电弧压力影响规律分析

为了分析不同钨极间距对电弧形态的影响,可以用电弧中 10 000 K 的温度曲线代表电弧形态,如图 6 所示。在钨极间距为 4~10 mm 时,两钨极产生的电弧可以形成一个耦合的电弧,随着钨极间距的进一步增大,两钨极产生的电弧之间的作用力减弱,将产生两个单独的电弧。电弧的耦合作用主要受到磁场强度的影响,而钨极附近区域的磁场强度最大,随着钨极间距的增大,在两钨极中间区域的磁场强度逐渐减弱,这也致使两钨极所产生电弧之间的作用力逐渐减弱,钨极下方电磁力方向也从指向两钨极中间区域而逐渐指向钨极下方,最终导致两电弧分开形成单独电弧。

电弧形态影响电弧压力的分布。图 7 为不同钨极间距下的电弧压力分布图。随钨极间距的增大,电弧压力逐渐从单峰分布向双峰分布转换,且最大电弧压力下降(如钨极间距从 4 mm 到 8 mm 变化时)。随间距的增大(如钨极间距从 8 mm 到 14 mm 变化时),双峰之间的距离进一步增大,且最大电弧压力逐步增加,但增加的趋势逐渐变缓,并逐渐趋近于 100 A 单 TIG 焊电弧压力分布。

为进一步分析电弧压力的变化规律,提取出钨极

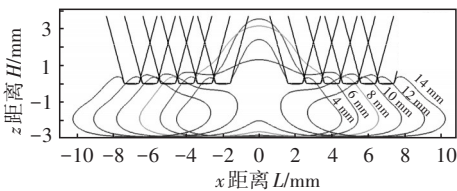


图 6 不同钨极间距的电弧形态分布图

Fig.6 Arc shape distributions of different tungsten electrode spacing

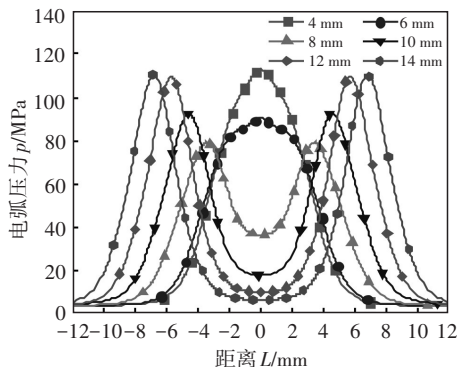


图 7 不同钨极间距下电弧压力分布图

Fig.7 Distributions of arc pressure with different tungsten electrode spacing

间距为 4、8、12 mm 时阳极表面电磁力分布云图,如图 8 所示。其中黑半弧线为钨极在阳极表面的投影。最大电磁力出现在钨极下方外侧区域,且随着钨极间距的增大,最大电磁力下降。最大电磁力分别为 15 403、9 928、9 542 N/m³。

钨极间距为 4 mm 时,两钨极产生的电弧间的电磁力作用较强,形成一个耦合电弧,电磁力方向指向电弧中心区域。随钨极间距的增大,电磁力的方向逐渐由电弧中心向两侧偏移,且钨极间距越大,电磁力方向逐渐指向钨极下方。由图 8 可以看出,阳极中心处的电磁力随着钨极间距的增大而降低,这也致使电弧压力由单峰分布变为双峰分布。

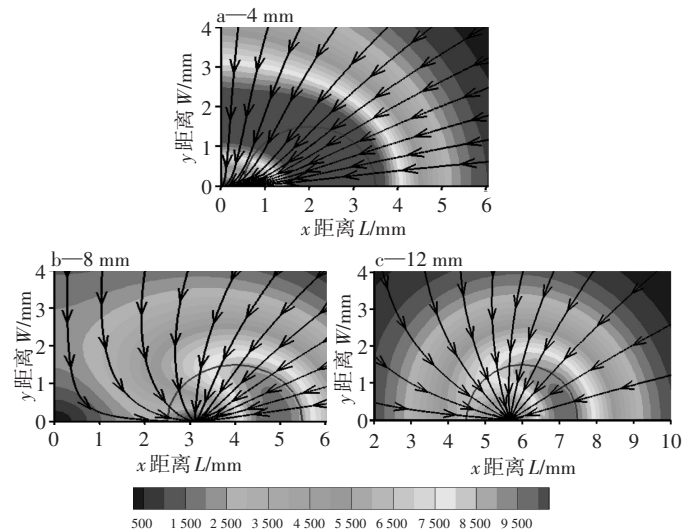


图 8 不同钨极间距下阳极表面电磁力分布

Fig.8 Distributions of electromagnetic force on anode surface with different tungsten electrode spacing

4 结论

- 1) 双钨极 TIG 焊的电弧形态随钨极间距的增大由耦合电弧转变为分离电弧。
- 2) 与单 TIG 相比,双钨极 TIG 焊可获得较低的电弧温度、等离子速度和电弧压力。
- 3) 电磁力随钨极间距的增大而减小。
- 4) 电弧压力随钨极间距的增大由单峰分布转换为双峰分布,且最大电弧压力先降后升。

5 参考文献

- [1] YAMADA M. High deposition rate TIG welding method. Report 1 [C]//Pre-Prints of the National Meeting of JWS. Japan Welding Society, 1998:24-25.
- [2] 黄九龄,孔凉,王敏,等. 纯钛 TA2 薄板双钨极氩弧焊焊接工艺[J]. 焊接学报, 2019, 40(9): 14-18.
HUANG Jiuling, KONG Liang, WANG Min, et al. Pure titanium TA2 thin plate double tungsten electrode argon arc welding

- process [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(9): 14-18. (in Chinese)
- [3] HOU Z L, FU K J, FANG D S, et al. Microstructure and mechanical performances of stainless steel cladding by twin-electrode GTAW [J]. Materials Transactions, 2021, 62(7): 995-1000.
- [4] KABA L, DJEGHLAL M, OUALLAM S, et al. Dissimilar welding of aluminum alloys 2024 T3 and 7075 T6 by TIG process with double tungsten electrodes [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118(3/4): 937-948.
- [5] ZHANG J, SHAO P Z, WANG X X, et al. Improving weld penetration by two-TIG arc activated via mixing oxygen into shielding gas [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125(1/2): 169-181.
- [6] LIU L M, ZHU Y L, LIU R T. Influence of cusp external magnetic field on deposition rate of two-electrode TIG welding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(9/10): 6549-6558.
- [7] 黄勇, 刘林, 王新鑫, 等. TIG电弧等离子体双温度数值模拟 [J]. 焊接学报, 2018, 39(10): 6-10.
HUANG Yong, LIU Lin, WANG Xinxin, et al. A two-temperature modeling of TIG arc plasma [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(10): 6-10. (in Chinese)
- [8] NAHED C, GOUNAND S, MEDALE M. A numerical study of the effects of cathode geometry on tungsten inert gas type electric arcs [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 182: 121923.
- [9] WANG X X, LUO Y, CHI L X, et al. Numerical investigation of transport phenomena of arc plasma in argon-oxygen gas mixture [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 154: 119708.
- [10] XIANG J T, PARK H K, TANAKA K G, et al. Numerical study of the effects and transport mechanisms of iron vapour in tungsten inert-gas welding in argon [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(4): 044004.
- [11] DING X P, LI H, YANG L L, et al. Numerical analysis of arc characteristics in two-electrode GTAW [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(9/10/11/12): 1867-1874.
- [12] 李桓, 王飞, CRESSAULT Y, 等. 双钨极TIG电弧压强分布及其与等离子体喷射的关系 [J]. 电焊机, 2017, 47(7): 1-5.
LI Huan, WANG Fei, CRESSAULT Y, et al. Arc pressure in tandem TIG arc and its relation with plasma jet [J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(7): 1-5. (in Chinese)
- [13] 王新鑫, 樊丁, 黄健康, 等. 双钨极耦合电弧数值模拟 [J]. 物理学报, 2013, 62(22): 412-421.
WANG Xinxin, FAN Ding, HUANG Jiankang, et al. Numerical simulation of coupled arc in double electrode tungsten inert gas welding [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(22): 412-421. (in Chinese)
- [14] LIU L M, XU X K, XU G M, et al. Effect of laser on double-arc physical characteristics in pulsed laser-induced double-TIG welding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(3/4): 1515-1529.
- [15] 陈熙. 热等离子体传热与流动 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 1.
CHEN Xi. Thermal plasma heat transfer and flow [M]. Beijing: Beijing Science Press, 2009: 1. (in Chinese)
- [16] LENG X S, ZHANG G J, WU L. The characteristic of twin-electrode TIG coupling arc pressure [J]. Journal of Physics, D Applied Physics: A, 2006, 39(6): 1120-1126.