

电弧增材成形中熔积层表面形貌对电弧形态影响的仿真

周祥曼 张海鸥 王桂兰 柏兴旺

Simulation of the influences of surface topography of deposited layer on arc shape and state in arc based additive forming

Zhou Xiang-Man Zhang Hai-Ou Wang Gui-Lan Bai Xing-Wang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 038103 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.038103

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.038103>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I3>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

点堆中子动力学方程组曲率权重法的解

Curvature weight method of solving the point reactor neutron kinetic equations

物理学报.2015, 64(22): 220201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.220201>

耦合高压斯特林制冷效应的复合磁制冷循环的数值模拟

Numerical simulation of a hybrid magnetic refrigeration combined with high pressure Stirling regenerative refrigeration effect

物理学报.2015, 64(21): 210201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.210201>

水平温差对环形浅液池内 Marangoni-热毛细对流的影响

Effect of horizontal temperature difference on Marangoni-thermocapillary convection in a shallow annular pool

物理学报.2015, 64(14): 140202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.140202>

轴对称构件受力分析的插值粒子法

Interpolating particle method for mechanical analysis of space axisymmetric components

物理学报.2015, 64(10): 100204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.100204>

大气风场和温度对无线电声波探测系统探测高度影响的数值研究

A numerical study of effects on detection height of a radio acoustic sounding system influenced by atmospheric wind and temperature

物理学报.2015, 64(10): 100205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.100205>

电弧增材成形中熔积层表面形貌对 电弧形态影响的仿真*

周祥曼¹⁾ 张海鸥¹⁾ 王桂兰^{2)†} 柏兴旺³⁾

1) (华中科技大学, 数字制造装备与技术国家重点实验室, 武汉 430074)

2) (华中科技大学, 材料学院模具技术国家重点实验室, 武汉 430074)

3) (南华大学机械学院, 衡阳 421001)

(2015年9月1日收到; 2015年11月15日收到修改稿)

电弧增材成形常采用单道多层或多道搭接的熔积方式, 不同的熔积方式下对应的熔积层表面形貌不同, 从而影响电弧的形态及其传热传质过程. 本文建立了纯氩保护电弧增材成形的电弧磁流体动力学三维数值模型, 以及不同表面形貌的熔积层模型, 并在保持阳极与阴极之间距离和熔积电流不变的条件下, 通过模拟计算获得增材成形特有的单道和多道搭接熔积条件下的不同表面形貌对应的电弧形态以及相应的温度场、流场、电流密度、电磁力、电弧压力分布. 数值模拟结果表明: 平面基板上起弧情况下电弧中心具有较高的温度、速度、电流密度以及压强; 单道多层熔积情况下熔积层数对电弧的各个参量影响较小; 多道搭接熔积情况下电弧呈非对称分布, 电弧中心温度较前两者低, 电流密度、电磁力和电弧压强的分布偏向熔积层一侧.

关键词: 电弧增材成形, 熔积层形貌, 电弧, 数值模拟

PACS: 81.20.Hy, 52.30.Cv, 02.60.Cb

DOI: 10.7498/aps.65.038103

1 引言

电弧增材成形 (arc based additive forming) 是一种以电弧 (熔化极气体保护焊, 即 GMAW, 或者钨极惰性气体保护焊, 即 GTAW) 为热源的增材成形技术, 具有成形效率高、生产成本低等优点^[1]. 不同于普通的焊接过程, 电弧增材成形过程中常采用单道多层或多道搭接熔积, 因此不同的熔积方式过程中承接电弧的基板或熔积层的形貌是不同的, 而不同的基板或熔积层形貌对电弧的形貌以及相应的温度场、流场、电流密度、电磁力、电弧压力分布会产生影响^[2].

迄今为止, 学者们通过实验和数值模拟的方法对 GMAW 或者 GTAW 过程进行大量的研究, 实验研究一般通过仪器观测或者实验结果的分析来

获得数据^[3,4], 然而焊接过程电弧和熔池具有很高的温度, 实验方法很难反映实时过程, 其中等离子态的电弧在微观上还有一些理论问题没有完全解决, 因此往往给研究带来一定的困难. 数值模拟方法可以对整个过程进行实时动态的模拟, 获得实验方法无法得到的数据, 并进行深入的机理分析和研究. 焊接过程数值模拟研究的数学模型可大致分为两类: 统一模型, 将电弧、熔池动态和熔滴过渡的传热传质过程通过内部边界耦合, 建立一体化的数学模型^[5-16]; 分离模型, 将电弧、熔池动态和熔滴过渡分离进行传热和传质模拟的数学模型^[2,17-23]. 其中 Hu 等^[5,6] 和 Rao 等^[7,8] 建立了完整的包含电弧、熔滴过渡和熔池动态的 GMAW 数值模型, 提出一种调和平均值的界面传热系数来计算电弧和金属界面的热传导, 主要分析了 GMAW 熔滴过渡过程中温度场、流场、电流密度、电磁力

* 国家自然科学基金 (批准号: 51374113, 51175203, 51505210) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhouxman@163.com

等参量的变化. Rao等^[9]还模拟并分析了不同成分比例的保护气对GMAW电弧各个参量和熔滴过渡以及熔池的影响. Murphy等^[10-12]建立了GMAW过程的三维传热传质数学模型, 并利用一种平衡面的方法来追踪熔池自由界面, 相比VOF (volume of fluid)方法, 具有更高的计算效率. Murphy等^[13]还建立了GTAW的统一模型, 研究了不同的保护气和不同比例的Fe蒸汽对保护气物性参数以及对电弧各个参量和熔池流动的影响. Schnick等^[14]建立了GMAW的统一模型, 模拟了电极不同蒸发率下不同比例的Fe蒸汽对电弧最大和最小温度以及电流密度分布的影响, 并通过射流过渡模式下的高速摄影图像间接地证明了模拟结果的正确性. 樊丁等^[15]建立了钨极惰性气体保护焊电弧与熔池相互作用的三维数值模型, 分析金属蒸汽对电弧等离子体温度、速度以及熔池宽度和深度的影响. Yin等^[16]建立了外加轴向磁场作用下的纯氩保护气TIG (tungsten inert gas welding) 焊统一模型, 发现轴向磁场能够使得电弧发生旋转, 减小电弧中心温度, 使电弧呈钟罩形, 同时外加轴向磁场对熔池形貌和对流也有显著的影响. Xu等^[2]建立了三维TIG电弧传热传质数值模型, 研究了不同电流下电弧温度场、流场以及电磁力等的分布情况, 并对比分析了平面和V形基板对电弧温度场、速度场以及电流密度等的影响. 石珂等^[17]建立了脉冲电流下自由燃烧的TIG电弧的二维轴对称数学模型, 通过数值模拟研究了脉冲电流在不同峰值电流、占空比和脉冲频率情况下电弧温度和压力的变化规律. Lowke等^[18,19]利用一种简化的统一理论建立了包含电弧和电极的TIG焊的电弧二维数值模型, 将模拟结果与实验结果进行了对比, 并预测了网格密度、电极形状、内部边界条件等对阴极温度的影响. 王新鑫等^[20]建立了双钨极耦合TIG电弧三维数值模型, 模拟分析了不同的钨极间距和电弧长度对耦合电弧的温度场、流场、电弧压力和电流密度分布的影响, 模拟结果与已有的实验研究相符合.

虽然学者们对电弧模拟研究做了大量的工作, 也包含非平面基板对电弧的影响, 然而对涉及到电弧增材成形过程中单道多层熔积或多道搭接熔积特有的基板或者熔积层形貌对电弧形态及相关参量的影响的研究尚未见报道. 本文采用Fluent软件及基于其UDS (user defined scalar)和UDF (user defined function)的二次开发功能, 建立基于

电弧增材成形过程中纯氩保护气电弧的磁流体动力学三维数值模型, 在保持阳极和阴极之间距离和熔积电流不变的情况下, 研究了不同熔积方式, 包括起弧状态(即平面基板)、单道多层和多道搭接熔积方式下不同的基板或熔积层表面形貌对电弧形态以及相应形态下的温度场、流场、电流密度、电磁力、电弧压力分布的影响, 模拟仿真结果可以为电弧增材成形基础研究和工艺决策提供理论依据.

2 数值模型

2.1 模型假设

1) 电弧为连续的导电流体, 满足局域热平衡 (local thermodynamic equilibrium, LTE) 假设和光学薄的假设^[5-8];

2) 考虑到模拟计算的复杂性和时间成本, 假设电弧为层流状态^[5,7];

3) 通过细化电弧和电极接触区的网格来简化鞘层区^[24,25], 同时由于电弧对电极的表面温度不敏感^[26], 且本文没有计算电弧与电极之间的传热过程, 因此设阳极表面温度为3000 K, 基板或者熔积层的表面温度为2000 K;

4) 在合理的工艺参数下, 就宏观平均时间过程来看, 电弧增材成形过程中电弧的各个参量的宏观时间平均值变化很小, 同时由于电弧流动速度远远大于金属过渡的速度, 因此忽略熔滴过渡对电弧的影响, 并针对电弧模拟, 假设其流动为准稳态过程.

2.2 电弧磁流体动力学模型

磁流体动力学 (magneto hydro dynamic, MHD) 的基本方程是流体力学中的纳维-斯托克斯方程 (Navier-Stokes equations) 和电动力学中的麦克斯韦方程组 (Maxwell's equations). MHD模型可以用来描述连续介质的电弧等离子流. 本文描述电弧等离子体的控制方程如下:

质量连续方程

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

动量守恒方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) \\ & = -\nabla P + \nabla \cdot [\boldsymbol{\tau} \cdot (\nabla \mathbf{V} + \nabla \mathbf{V}^T)] + S_M; \quad (2) \end{aligned}$$

能量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} H) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{c_p} \nabla H \right) + S_E; \quad (3)$$

其中 ρ 为密度, \mathbf{V} 为速度矢量, τ 为黏度张量, S_M 为动量源项, H 为焓, c_p 为比热, k 为热传导系数, S_E 为能量源项.

$$S_M = \mathbf{J} \times \mathbf{B} + \rho g, \quad (4)$$

$$S_E = \frac{\mathbf{J} \cdot \mathbf{J}}{\sigma} + \frac{5k_B}{2e} \left(\frac{\mathbf{J}}{c_p} \cdot \nabla H \right) - S_R. \quad (5)$$

(4) 和 (5) 式中 \mathbf{J} 为电流密度, \mathbf{B} 为磁通密度, g 为重力加速度, σ 为导电率, k_B 为玻尔兹曼常数, e 为电子电量. (5) 式右侧三项分别为电流焦耳热、电子焓和辐射热 S_R .

电流连续方程

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \Phi) = 0; \quad (6)$$

电流密度

$$\mathbf{J} = -\sigma(\nabla \Phi); \quad (7)$$

磁矢势方程

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{J}; \quad (8)$$

磁通密度

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

(6)–(9) 式中 Φ 为电势, μ_0 为真空磁导率, \mathbf{A} 为磁矢势.

2.3 熔积层模型和边界条件

电弧增材成形过程中不同的熔积方式对应的熔积层模型如图 1 所示, 还未形成熔积层时 (即平面基板起弧状态) 如图 1(a) 所示; 单道多层熔积时的第二层熔积 (已经有一层熔积层) 如图 1(b) 所示; 单道多层熔积时的第三层熔积 (已经有两层熔积层) 如图 1(c) 所示; 搭接熔积如图 1(d) 所示. 其中作为阴极的基板厚度为 10 mm, 作为阳极的焊丝直径为 1.6 mm, 保护气入口距离基板或者熔积层表面的距离为 10 mm, 保护气入口直径 (即保护气喷嘴内径) 为 20 mm, 熔积电流为 200 A, 送丝速率为 7.2 m/min, 熔积速率为 600 mm/min, 保护气流量为 15 L/min. 通过实验观察发现, 在当前参数下,

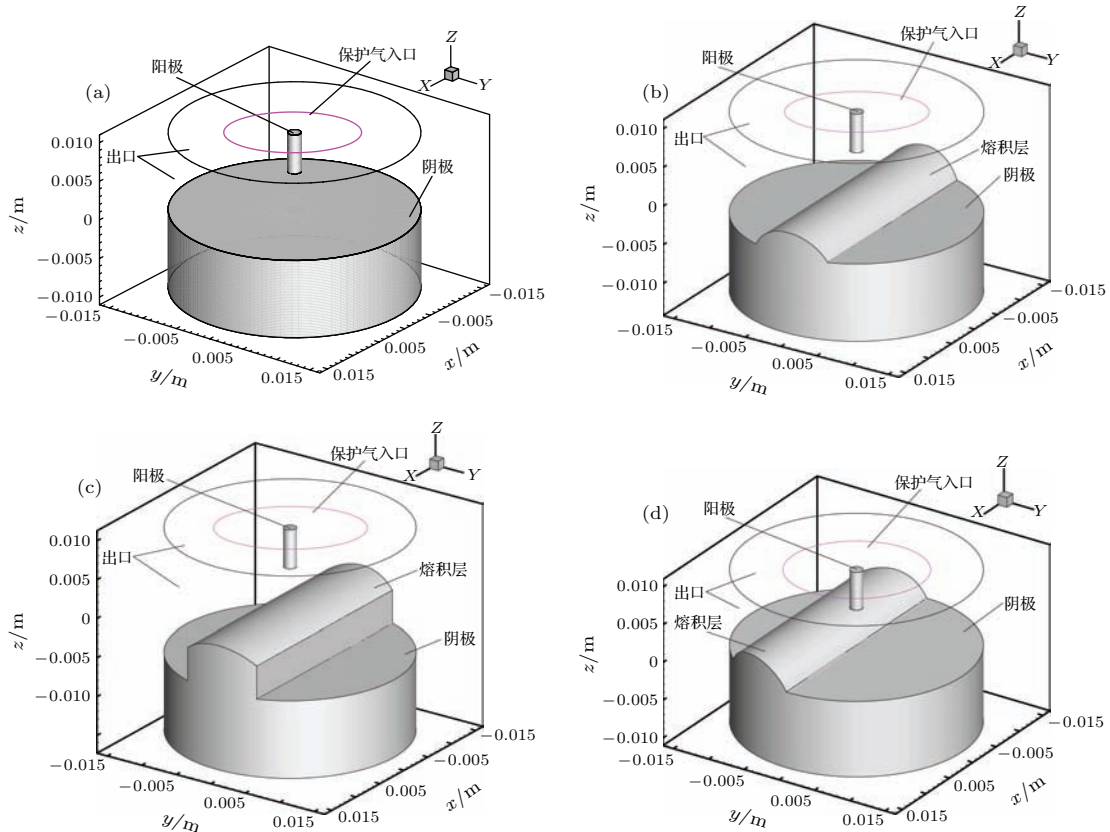


图 1 电弧增材成形过程中常见的熔积层模型 (a) 平面基板; (b) 单道熔积; (c) 单道两层熔积; (d) 搭接熔积
Fig. 1. Schematic diagram of deposited layer model: (a) Planar substrate; (b) single-pass bead; (c) single-pass two layers bead; (d) overlapping weld bead.

表 1 边界条件
Table 1. Boundary conditions.

| 边界 | 速度/m·s ⁻¹ | 压力/Pa | 温度/K | 电势/V | 磁矢势/Wb·s ⁻¹ |
|------------|----------------------|--------|--------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| AB | — | — | 1000 | $-\sigma \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{I}{\pi R_w^2}$ | $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$ |
| MN | — | — | 3000 | 耦合 | 耦合 |
| 阳极和电弧区其他界面 | — | — | 耦合 | 耦合 | 耦合 |
| AC, BD | (10) 式 | — | 300 | $\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$ | $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$ |
| EC, DF | — | 101325 | 300 | $\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$ | $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$ |
| EG, FH | — | 101325 | 300 | $\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$ | $A = \text{const}$ |
| GH | — | — | 2000 | 耦合 | 耦合 |
| GI, HJ | — | — | (11) 式 | $\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$ | $A = \text{const}$ |
| IJ | — | — | (11) 式 | 0 | $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$ |

单层熔积层的平均宽度为10 mm, 平均高度为 3mm, 阳极到基板或熔积层表面的平均距离为5 mm. 同时, 根据实际熔积层形貌, 假设熔积层横断面形貌为圆弧. 此外, 由于作为阳极的焊丝的熔化, 电极尖端实际的形状是变化的, 因此难以用统一的形状去描述焊丝尖端形貌. 为了简化网格同时本文关注重点为熔积层形貌对电弧形态的影响, 因此采用平面来简化阳极尖端.

为了更好地阐明边界条件, 以图 1 (a) 情况为例作图 2 所示的 $X = 0$ 处的中心截面图, 对应详细的边界条件如表 1 所列, 其他熔积模型的边界条件与图 2 类似, 不再赘述.

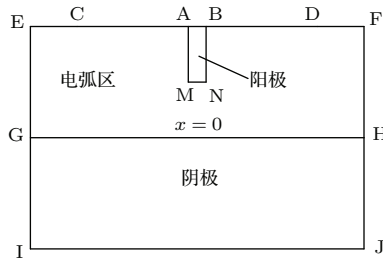


图 2 平面基板熔积模型截面

Fig. 2. Section of planar substrate deposition model.

保护气入口速度与气流量以及保护气喷嘴内径等有关, 计算公式如下 [7]:

$$v_z(r) = \frac{2Q}{\pi} \frac{\left\{ R_n^2 - r^2 + (R_n^2 - R_2^2) \frac{\ln(r/R_n)}{\ln(R_n/R_w)} \right\}}{\left\{ R_n^4 - R_w^4 + \frac{(R_n^2 - R_2^2)^2}{\ln(R_n/R_w)} \right\}},$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, r \in [R_w, R_n], \quad (10)$$

式中, Q 为保护气流量, R_w 为焊丝半径, R_n 为喷嘴内径.

金属与空气接触的部分为对流与辐射综合的边界条件:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_{\text{conv}}(T - T_{\text{amb}}) + \alpha \varepsilon (T^4 - T_{\text{amb}}^4), \quad (11)$$

式中, h_{conv} 为金属与空气的对流换热系数, T_{amb} 为环境温度, α 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, ε 为辐射发射率.

为了突出研究重点, 采取文献 [9] 的思路, 不考虑金属蒸汽对电弧的影响, 直接采用纯氩气作为电弧发生的介质. 氩气物性参数为温度的函数 [27], 如图 3 所示.

阳极和阴极的材料为低碳钢, 低碳钢物性及其他参数如表 2 所列 [23].

表 2 低碳钢物性及其他参数
Table 2. Mild steel and other physical properties.

| 参数 | 符号 | 值 (单位) |
|--------|-------------------|--------------------------------------------|
| 密度 | ρ | 7200 (kg·m ⁻³) |
| 比热 | c_p | 700 (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹) |
| 热导率 | k | 22 (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹) |
| 辐射发射率 | ε | 0.4 |
| 电导率 | σ | 7.7×10^5 (S·m ⁻¹) |
| 对流换热系数 | h_{conv} | 100 (W·m ⁻² ·K ⁻¹) |
| 环境温度 | T_{amb} | 300 (K) |
| 磁导率 | μ_0 | 1.26×10^{-6} (H·m ⁻¹) |

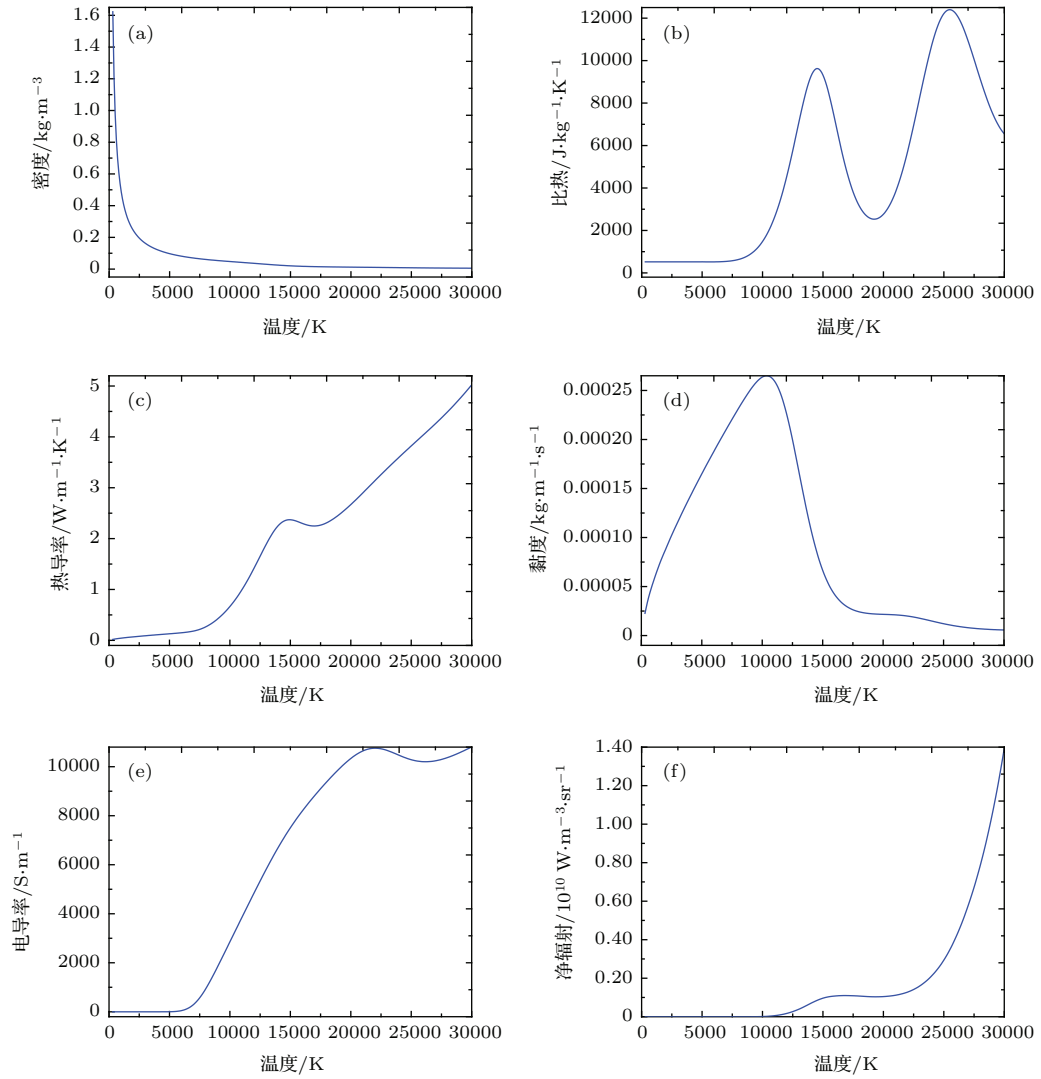


图3 氩气的物性参数 (a)密度; (b)比热; (c)热导率; (d)黏度; (e)电导率; (f)净辐射系数

Fig. 3. Thermophysical properties of argon: (a) Density; (b) specific heat; (c) thermal conductivity; (d) viscosity; (e) electrical conductivity; (f) net radiative emission coefficient.

3 模拟结果与讨论

3.1 温度场与速度场

图4所示为计算收敛后上述四种基板或熔积层形貌下的YZ截面(即 $X = 0$ 截面)温度分布云图. 可以看到平面基板、单道熔积和单道两层熔积(图4(a)—(c))情况下, 在YZ截面上温度场对称分布, 搭接熔积(图4(d))情况下, 由于熔积层形貌的不对称, 温度分布不再对称. 单道熔积和单道两层熔积(图4(b)和图4(c))情况下高温区域相比平面基板(图4(a))小, 这是由于单道熔积层和单道两层熔积层的阴极形貌向上凸出, 增大了阴极表面与电弧之间的接触面积, 导致电弧区电流分布相对发

散^[2], 而电弧热主要由电流焦耳热提供, 因此会出现高温区域较小. 搭接熔积(图4(d))情况下由于空间的不对称, 使得电弧温度场分布出现偏转和空间不对称, 同时电流分布更加发散, 因此最高温度要低于其他三种情况.

图5为平面基板情况时电弧的等温线分布与参考文献^[28]相同电流和弧长情况的电弧温度测量实验结果对比, 可以发现模拟与实验结果总体符合良好. 电极形状的不同, 以及金属蒸汽使电弧的等温线收缩^[15], 是模拟和实验测量之间误差的主要原因. 图6为利用高速摄像机拍摄到的与本文相同工艺参数下的电弧形貌, 图6(a)—(d)分别对应上述四种情况下的电弧形貌, 与图4相比可以发现模拟的电弧形貌与实际电弧形貌很好地符合.

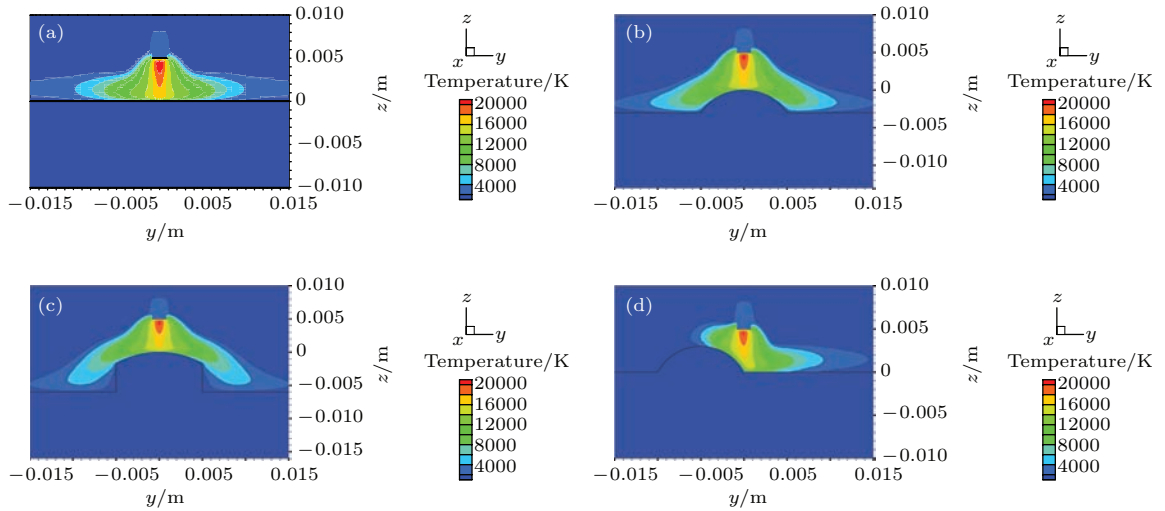


图4 (网刊彩色) YZ 截面温度分布 (单位: K) (a) 平面基板; (b) 单道熔积; (c) 单道两层熔积; (d) 搭接熔积
 Fig. 4. (color online) Distribution of the temperature field at YZ section: (a) Planar substrate; (b) single-pass bead; (c) single-pass two layers bead; (d) overlapping weld bead.

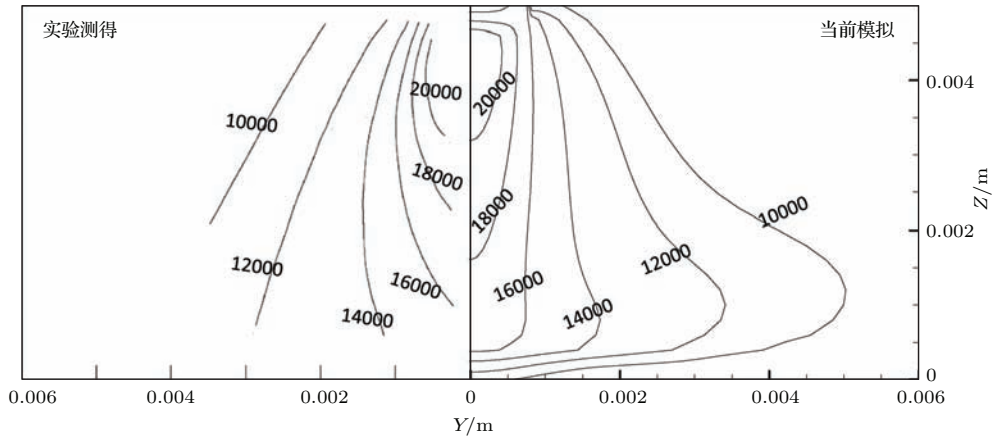


图5 平面基板情况下电弧的等温线与实验结果^[28]对比 (单位: K)

Fig. 5. Comparison of distribution of isotherm between experiment and simulation (unit: K).

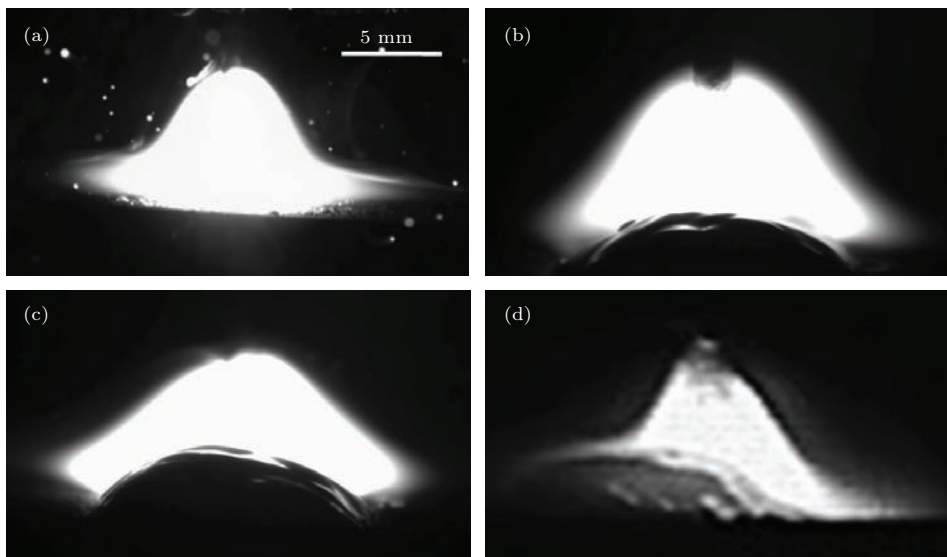


图6 四种情况下的电弧形貌 (a) 平面基板; (b) 单道熔积; (c) 单道两层熔积; (d) 搭接熔积
 Fig. 6. Arc morphology: (a) Planar substrate; (b) single-pass bead; (c) single-pass two layers bead; (d) overlapping weld bead.

图7为YZ截面上的速度矢量分布. 与温度分布类似, 平面基板、单道熔积和单道两层熔积情况下(图7(a)—(c)), YZ截面速度分布呈对称分布, 搭接熔积情况(图7(d))呈现不对称分布. 平面基板情况下电弧中心速度更高、更集中, 单道熔积和单道两层熔积(图7(b)—(c))由于承接电弧冲击的不是平面, 而是中间高两边低, 速度场向两边发散, 因此中心的速度较小, 其结果使得电弧等离子体沿熔积层两边分散. 搭接熔积情况(图7(d))下由于左边的熔积层阻挡作用, 等离子冲击偏向右侧倾斜, 因而使得左右两侧保护气气流出现不平衡现象.

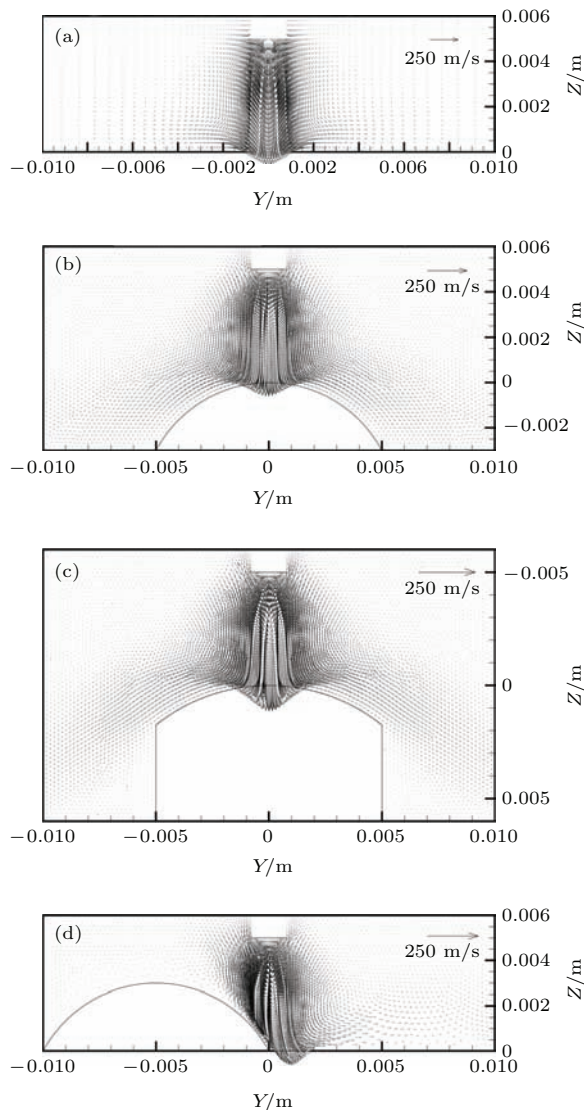


图7 YZ 截面速度场分布 (a) 平面基板; (b) 单道熔积; (c) 单道两层熔积; (d) 搭接熔积

Fig. 7. Distribution of the velocity field at YZ section: (a) Planar substrate; (b) single-pass bead; (c) single-pass two layers bead; (d) overlapping weld bead.

3.2 路径分析

为了更加精确地分析电弧各个参量的分布, 同时由于熔积层形貌不完全对称, 因此在模拟空间取如图8所示的三条路径(此处以平面基板为例, 其他情况路径选取方法相同. 所有的熔积模型的坐标原点都位于阳极正下方的基板或熔积层表面上): Path 1 (在电极轴向中心之间 $P1(0, 0, 0), P2(0, 0, 0.005)$); Path 2 (X 方向, 高度方向处于电极的正中间, $P1(-0.015, 0, 0.0025), P2(0.015, 0, 0.0025)$); Path 3 (Y 方向, 高度方向处于电极的正中间, $P1(0, -0.015, 0.0025), P2(0, 0.015, 0.0025)$).

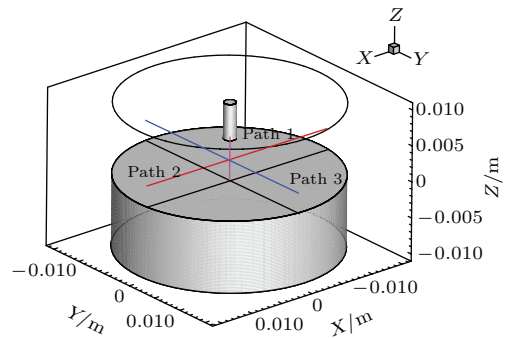


图8 路径示意图

Fig. 8. Schematic diagram of path.

图9为Path 1上的温度、速度、电流密度、电势、电磁力、压强的分布, 每幅图中(a), (b), (c), (d) 四条曲线分别对应图1所示的四种情况的熔积模型(下文中的图10和图11相同). 由图9可以看到, 平面基板的轴向中心的温度、速度、电流密度以及压强整体上要大于其他情况, 而单层熔积和两层熔积情况的各个参量基本相等. 由图9(e)可以看到搭接情况的电磁力远远大于其他情况. 由理论分布可知: 熔积模型完全对称情况下, 中心电流无横向偏转, 因此中心总的电磁力合力应为0, 可以看到平面基板情况下电磁力为0, 而其他三种情况由于下面有熔积层, 为非完全对称结构, 因此中心电流有一定的偏转, 即有X或Y方向的分量, 因此电磁力不等于0, 搭接情况电流偏转会更加严重, 即X和Y方向的电流分量更大, 表现为最大的电磁力分布. 虽然四种情况保持熔积层或基板到阳极的距离相等, 但是搭接情况阳极更加靠近熔积层侧面, 相对距离更近, 表现为图9(d)电极之间电势差更小. 电弧压强主要由电磁力迫使等离子体中带电粒

子相互撞击或者撞击基板产生, 而电磁力由电流密度和相应的磁通密度决定, 因此, 平面基板情况下, 靠近两电极的部位电流更集中(图 9(c)), 从而导致图 9(f) 所示的电弧压强分布.

图 10 为 Path 2 上的温度、速度、电流密度、电势、电磁力、压强的分布, 可以看到除电磁力和电势外, 各个参量基本上呈现近似的高斯分布. 由于 Path 2 方向空间结构对称, 根据上面的分析, 平面基板情况中心电磁力为 0, 其他情况不为 0, 因此电磁力呈现图 10(e) 对称的双峰分布, 同时由于电流密度的主导作用, 除电势分布外, 平面基板情况下

电弧中心其他参量都大于另外三种情况, 这些与前面的分析结论一致.

图 11 为 Path 3 上的温度、速度、电流密度、电势、电磁力、压强的分布, 搭接情况由于在 Path 3 方向上熔积层形貌不对称, 熔积层偏向负 Y 方向, 同时 Path 3 部分穿过熔积层, 因此出现不对称分布, 其中电流密度、电磁力和压强分布偏向负 Y 方向一侧, 这是由于阳极更加靠近熔积层, 因此电流偏向负 Y 方向一侧(图 11(c)), 从而导致熔积层侧电磁力和压强的增大(图 11(e) 和图 11(f)), 这与图 9 分析的结论一致.

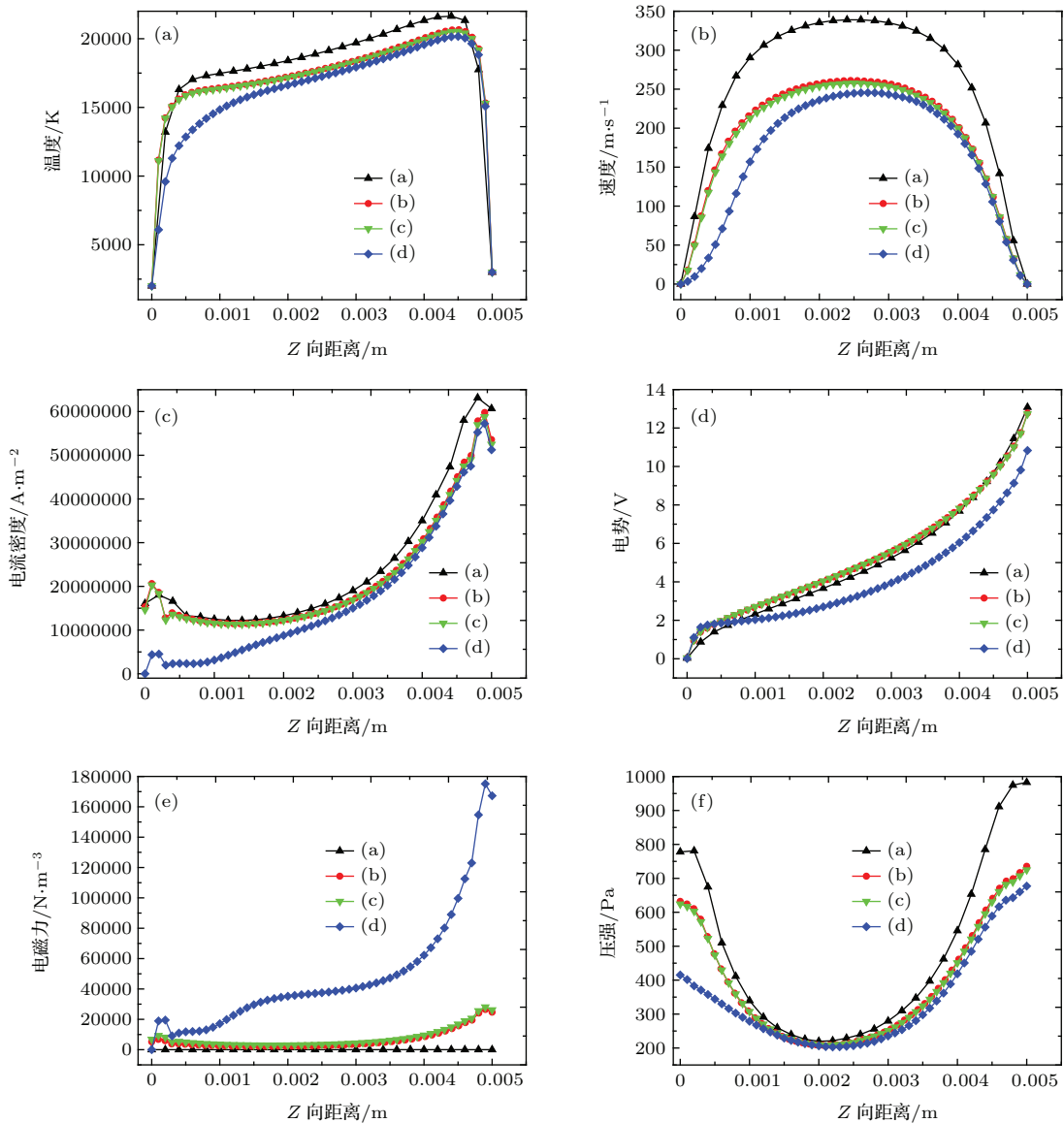


图 9 (网刊彩色) Path 1 上各个参量分布 (a) 温度; (b) 速度; (c) 电流密度; (d) 电势; (e) 电磁力; (f) 压强
 Fig. 9. (color online) Evolution of the distributions on Path 1: (a) Temperature; (b) velocity; (c) current density; (d) potential; (e) electromagnetic force; (f) pressure.

综合图9, 图10和图11三条路径上各个参量分布情况可以看到, 单道多层熔积时的层数对电弧各个参量影响总体较小. 但由图10和图11可以看到, 单层熔积和两层熔积情况下温

度和电势在一定范围内(约 $X = -0.005—0.005$ 和 $Y = -0.005—0.005$)基本相等, 在此范围以外, 开始出现不重合, 这是由于熔积层以外气相区域高度发生变化从而导致上述参量出现变化.

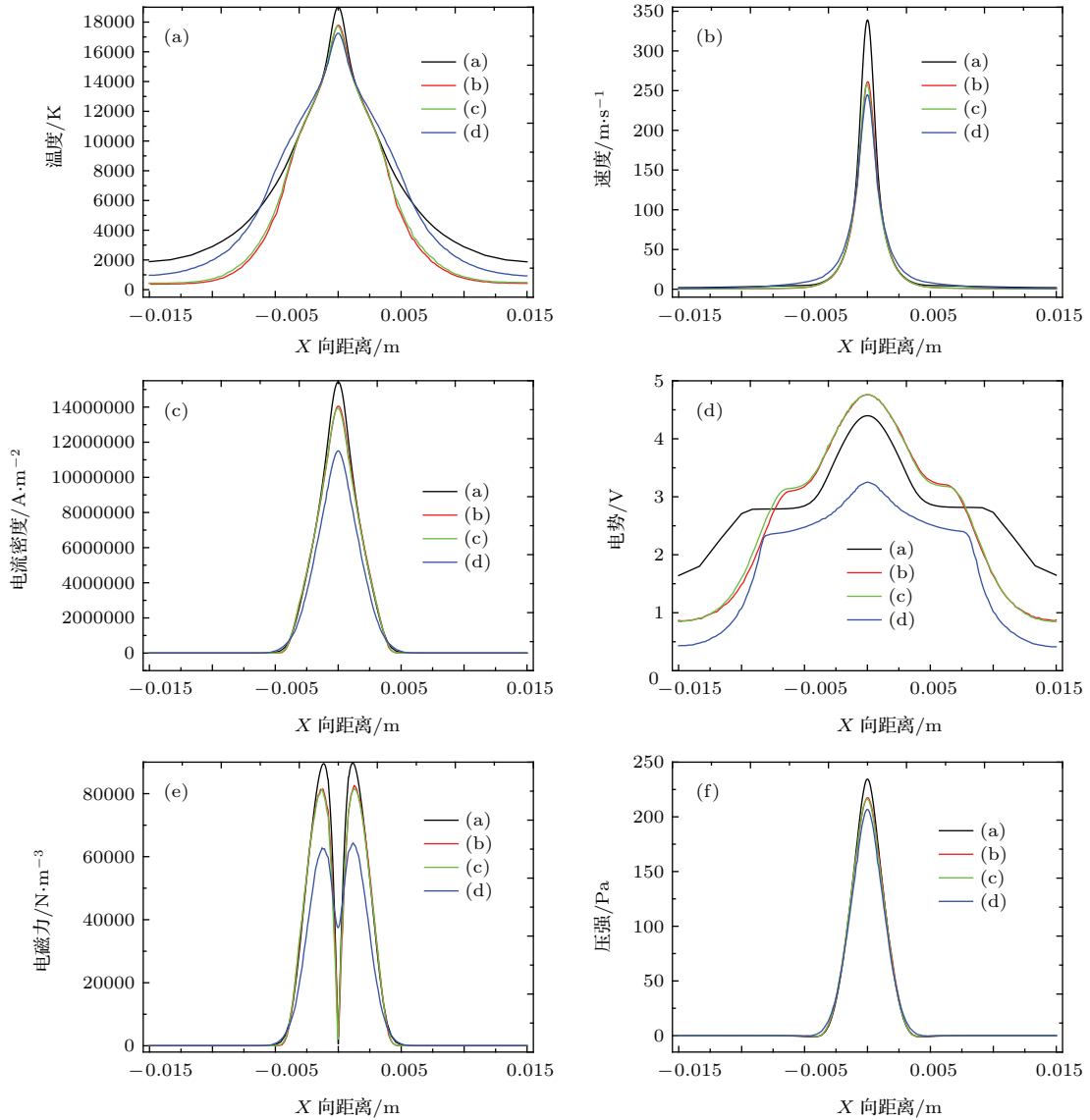


图10 (网刊彩色) Path 2上各个参量分布 (a) 温度; (b) 速度; (c) 电流密度; (d) 电势; (e) 电磁力; (f) 压强
 Fig. 10. (color online) Evolvement of the distributions on Path 2: (a) Temperature; (b) velocity; (c) current density; (d) potential; (e) electromagnetic force; (f) pressure.

4 结 论

本文建立了电弧增材成形过程中电弧磁流体动力学三维数值模型, 模拟了熔积层表面形貌对电弧形态以及相应的温度、速度、电流密度、电势、电磁力、压强分布的影响. 通过对比分析得到以下结论:

- 1) 基板或者熔积层形貌对电弧形态和其相应的参量分布有着重要的影响, 在其他工艺参数不变的情况下, 对电弧形貌起决定性影响;
- 2) 平面基板起弧情况下, 由于熔积层模型完全对称以及阴极为平面, 导致阳极和阴极之间的中心电流更加集中, 故电弧中心具有较高的电流密度、温度、速度以及压强;

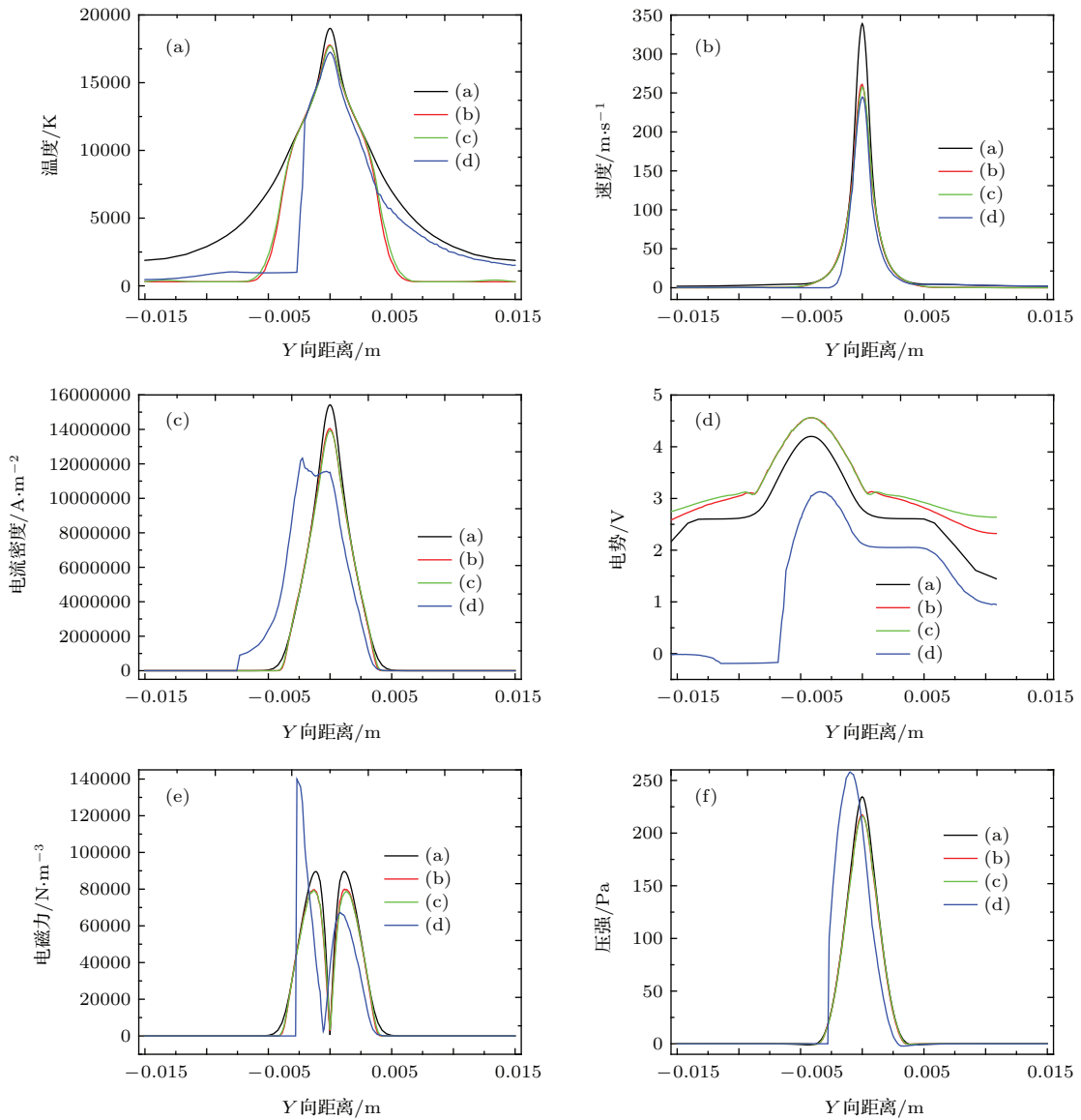


图 11 (网刊彩色) Path 3 上各个参量分布 (a) 温度; (b) 速度; (c) 电流密度; (d) 电势; (e) 电磁力; (f) 压强
 Fig. 11. (color online) Evolution of the distributions on Path 3: (a) Temperature; (b) velocity; (c) current density; (d) potential; (e) electromagnetic force; (f) pressure.

3) 单道多层熔积时, 因电弧主要和熔积层表面发生作用, 且金属电导率较大, 故层数对电弧各个参量影响较小, 但由于熔积层外侧的气相区域的空间尺寸发生变化, 导致温度和电势出现较小的偏差;

4) 多道搭接熔积时, 因熔积层模型不对称, 导致电弧呈现空间非对称分布, 电流密度、电磁力和电弧压强偏向熔积层一侧.

本文所得到的结论揭示了电弧增材成形过程中电弧形态以及各参量的分布随熔积模型表面形态变化的规律, 可以为电弧增材成形基础研究和工艺决策提供理论依据, 同时可为后续熔池动态以及金属过渡模拟分析提供参数.

感谢澳大利亚联邦科学与工业研究组织的 Murphy 博士提供的氩气的物性参数.

参考文献

- [1] Zhang H, Wang X P, Wang G L, Zhang Y 2013 *Rap. Proto. J.* **19** 387
- [2] Xu G, Hu J, Tsai H L 2012 *J. Manuf. Sci. Eng.* **134** 031001
- [3] Wu C S, Chen M A, Lu Y F 2005 *Meas. Sci. Technol.* **16** 2459
- [4] Chang Y L, Liu X L, Lu L, Babkin A S, Lee B Y, Gao F 2014 *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **70** 1543
- [5] Hu J, Tsai H L 2007 *Int. J. Heat Mass Transfer* **50** 833
- [6] Hu J, Tsai H L 2007 *Int. J. Heat Mass Transfer* **50** 808

- [7] Rao Z H, Hu J, Liao S M, Tsai H L 2010 *Int. J. Heat Mass Transfer* **53** 5707
- [8] Rao Z H, Hu J, Liao S M, Tsai H L 2010 *Int. J. Heat Mass Transfer* **53** 5722
- [9] Rao Z H, Liao S M, Tsai H L 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 44902
- [10] Murphy A B 2013 *Sci. Technol. Weld. Join.* **18** 32
- [11] Murphy A B 2011 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44** 194009
- [12] Lu F, Wang H P, Murphy A B, Carlson B E 2014 *J. Heat Mass Transfer* **68** 215
- [13] Murphy A B, Tanaka M, Yamamoto K, Tashiro S, Sato T, Lowke J 2009 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** 194006
- [14] Schnick M, Fuessel U, Hertel M, Haessler M, Spille-Kohoff A, Murphy A B 2010 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** 2460
- [15] Fan D, Huang Z C, Huang J K, Wang X X, Huang Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 108102 (in Chinese) [樊丁, 黄自成, 黄健康, 王新鑫, 黄勇 2015 物理学报 **64** 108102]
- [16] Yin X Q, Gou J J, Zhang J X, Sun J T 2012 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **45** 285203
- [17] Shi Y, Guo C B, Huang J K, Fan D 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 048102 (in Chinese) [石玢, 郭朝博, 黄健康, 樊丁 2011 物理学报 **60** 048102]
- [18] Lowke J J, Kovitya P, Schmidt H P 1992 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **25** 1600
- [19] Lowke J J, Morrow R, Haidar J 1997 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **30** 2033
- [20] Wang X X, Fan D, Huang J K, Huang Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 228101 (in Chinese) [王新鑫, 樊丁, 黄健康, 黄勇 2013 物理学报 **62** 228101]
- [21] Kong F R, Zhang H O, Wang G L 2009 *Acta Metall. Sin.* **45** 415 (in Chinese) [孔凡荣, 张海鸥, 王桂兰 2009 金属学报 **45** 415]
- [22] Schnick M, Fuessel U, Hertel M, Haessler M, Spille-Kohoff A, Murphy A B 2010 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** 434008
- [23] Rao Z H, Zhou J, Liao S M, Tsai H L 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 054905
- [24] Lowke J J, Tanaka M 2006 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39** 3634
- [25] Jian X, Wu C S 2015 *J. Heat Mass Transfer* **84** 839
- [26] Jönsson P G, Eagar T W, Szekely J 1995 *Metall. Mater. Trans. B* **26** 383
- [27] Murphy A B, Tanaka M, Tashiro S, Lowke J J 2009 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** 115205
- [28] Farmer A J D, Haddad G N, Kovitya P 1988 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **21** 432

Simulation of the influences of surface topography of deposited layer on arc shape and state in arc based additive forming*

Zhou Xiang-Man¹⁾ Zhang Hai-Ou¹⁾ Wang Gui-Lan^{2)†} Bai Xing-Wang³⁾

1) (State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

2) (State Key Laboratory of Materials Processing and Die and Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

3) (School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

(Received 1 September 2015; revised manuscript received 15 November 2015)

Abstract

The stacking deposition and the overlapping deposition are usually employed in arc based additive forming process, which will result in different surface topographies of deposited layer. Consequently, the shape and state, heat and mass transfer of electric arc will be affected by the surface topography of deposited layer. A three-dimensional numerical model of electric arc based on magnetic fluid dynamics, local thermodynamic equilibrium and optical thin assumption for arc based additive forming process with pure argon shielding gas is presented. Simultaneously, four kinds of deposited layer model with different surface topographies are established, which are the deposited layer model of planar substrate, namely the substrate without weld bead, deposited layer model of single-pass single-layer, deposited layer model of single-pass two-layers, and deposited layer model of overlapping. The numerical calculation is performed on condition that deposition current and the distance between the electrodes are constant. And the simulation results include the profile of electric arc, corresponding temperature field, flow field, current density, electromagnetic force, and the arc pressure distribution. The temperature field of planar substrate accords well with other researcher's experimental result, and the profiles of electric arc are in good agreement with images captured by high-speed camera. Surface topography of deposited layer plays a decisive role in determining the profile of electric arc under the same process conditions. The comparison of evolvement among the distributions on specified paths shows that the electric arc of planar substrate has higher temperature, velocity, current density and pressure in the arc center, arising from completely symmetrical deposition layer model and smaller contact area between the arc and the substrate; the number of layers of single-pass multi-layer deposited layer has little influence on various parameters of electric arc, but because the deposited layer height changes, the temperature and pressure on the outside of deposited layer have small deviation; asymmetric arc profile will form when the overlapping deposition is performed. There is a relatively low temperature in the arc center, resulting from larger contact area between the arc and the surface of deposited layer. In addition, the distributions of current density, electromagnetic force and pressure deflect to the deposited layer. The above conclusions can provide a theoretical basis for basic research and process decision of arc based additive forming, and it can also provide the parameters for the subsequent weld pool dynamics and metal transfer simulation.

Keywords: arc based additive forming, topography of deposited layer, electric arc, numerical simulation

PACS: 81.20.Hy, 52.30.Cv, 02.60.Cb

DOI: 10.7498/aps.65.038103

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51175203, 51374113, 51505210).

† Corresponding author. E-mail: zhouxman@163.com