

等离子体电弧炉内流动与传热数值模拟

邓晶^{1,2} 李要建¹ 王蕊¹ 田君国¹ 徐永香¹ 盛宏至¹

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100190)

摘要 本文采用磁流体动力学 (MHD) 模型对直流等离子体自由燃烧电弧和电弧炉内部的流动与传热进行了数值模拟研究。通过对基于磁矢量势描述的电磁场方程组和流体动力学方程组的耦合迭代计算, 求解得到了流体的温度场和速度场等, 计算结果清晰地反映出等离子体电弧的高温阴极射流现象, 并与同行的实验和数值结果进行了对比。本模拟方法和结果对于电弧炉的工业应用和优化设计有重要的指导意义。

关键词 等离子体; 电弧; 数值模拟; 磁流体

中图分类号: O316.3 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-231X(2010)05-0879-04

NUMERICAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER AND FLUID FLOW IN A DC PLASMA-ARC REACTOR

DENG Jing^{1,2} LI Yao-Jian¹ WANG Rui¹ TIAN Jun-Guo¹ XU Yong-Xiang¹ SHENG Hong-Zhi¹

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of sciences, Beijing 100190, China)

Abstract In this work, Magneto-Hydrodynamic (MHD) model is used to simulate the heat transfer and fluid flow situation in the DC argon plasma free-burning arc and arc reactor. Through the coupled iterative computation about electromagnetic equations described by magnetic vector potential and hydrodynamic equations, the temperature and velocity distributions are solved. The simulation results clearly describe the phenomenon of high temperature cathode jet of the plasma-arc, and they are compared with the results solved by other researchers. The numerical simulation model and results have important guiding significance for the industry application and optimal design of the arc reactors.

Key words plasma; arc; numerical simulation; magneto fluid

0 引言

等离子体技术被广泛应用于材料加工、有机危险废弃物的裂解以及含有重金属或放射性元素的无机废弃物的玻璃化, 即 PP/V(Plasma Pyrolysis/Vitrification) 技术^[1]。在等离子体电弧炉内, 温度分布和速度分布对于有害元素的质量输运有重要影响, 并且直接决定了危险废弃物的摧毁效率。由于等离子体炉内的高温 and 电磁辐射条件, 对于炉内核心区域流场和温度场的直接测量难以实现, 因此使用数值模拟方法就成为了一种必然的选择。

磁流体动力学 (MHD) 方法是一种模拟等离子体电弧流动与传热的有效方法。在磁流体动力学模型中, 等离子体被视为一种导电的流体, 其电导率随着温度变化。此外, 等离子体的密度、比热容、黏度和热导率都是温度的函数^[2]。

传统的等离子体电弧模拟通常采用磁感应强度

B 来描述磁场^[3,4,6], 需要通过对电流密度进行复杂的积分计算来求解磁场强度。在本工作中, 作者采用了磁矢量势 A 取代磁感应强度 B 来描述磁场。经过如此的改进, 可以方便地采用常见计算流体力学方法来求解电磁场。对于电磁场计算得简化有助于在后续模拟工作中加入化学反应动力学方程来实现化学流体力学耦合求解。

本文使用流体力学计算软件 FLUENT 的 UDS 方法^[3], 根据磁流体动力学 (MHD) 的特点对于 FLUENT 软件进行编程二次开发, 实现对电磁场方程组和流体动力学方程组的耦合求解。

1 等离子体电弧的数值模拟

1.1 假设条件

模型中所使用的假设包括:

收稿日期: 2009-12-04; 修订日期: 2010-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.50476081); 国家 863 计划项目 (No.2003AA644040)

作者简介: 邓晶 (1984-), 男, 四川广安人, 博士研究生, 主要从事等离子体电弧装置的数值模拟和实验研究。

- (1) 流场的流动为轴对称、定常、层流;
- (2) 在电弧区域采用局部热平衡假设;
- (3) 等离子体是光学薄的;
- (4) 等离子体的密度、比热容、速度、黏性、热导率和电导率都仅为温度的函数^[2];
- (5) 忽略重力和黏性耗散。

1.2 控制方程和计算方法

在定常和轴对称条件下,描述电弧等离子体的磁流体力学(MHD)方程组为:

质量方程:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v_r) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = 0 \quad (1)$$

径向动量方程:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v_r^2) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_r v_z) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(2r\mu \frac{\partial v_r}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z}\right)\right] - 2\mu \frac{v_r}{r^2} - \boxed{j_z B_\theta} \quad (2)$$

轴向动量方程:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v_r v_z) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z^2) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}\left(2\mu \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left[r\mu\left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z}\right)\right] + \boxed{j_r B_\theta} \quad (3)$$

能量方程:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho c_p v_r T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho c_p v_z T) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(rk \frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k \frac{\partial T}{\partial z}\right) + \frac{j_r^2 + j_z^2}{\sigma} + \frac{5k_B}{2e}\left(j_r \frac{\partial T}{\partial r} + j_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) - U \quad (4)$$

其中,下标 r 和 z 分别表示径向和轴向, T 为温度, p 为压强, v_r 和 v_z 分别为速度的径向分量和轴向分量, ρ 、 c_p 、 μ 、 k 和 σ 分别为等离子体的密度、比热容、黏度、热导率和电导率。方框标注的项是与等离子体相关的特殊动量和能量源项,其中方程(4)方框中的三项分别是焦耳热、电子热和辐射项。

在本文中,方程(3)的电流密度分量 j_r 和 j_z ,以及磁感应强度的周向分量 B_θ 是通过基于磁矢量势方法描述的麦克斯韦方程组求解获得的。

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= -\nabla\varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \\ \mathbf{B} &= -\nabla \times \mathbf{A} \end{aligned} \quad (5)$$

电磁学方程组(5)中的 \mathbf{E} , φ , \mathbf{B} , \mathbf{A} 分别表示电场强度矢量、电势、磁感应强度矢量、磁矢量势。

在定常和轴对称情况下,通过对电磁方程组的推导可以得到如下方程组:

电流连续方程:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z}\right) = 0 \quad (6)$$

麦克斯韦方程:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r \frac{\partial A_z}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial A_z}{\partial z}\right) = -\mu j_z$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r \frac{\partial A_r}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial A_r}{\partial z}\right) = -\mu j_r \quad (7)$$

欧姆定律:

$$\begin{aligned} j_z &= -\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \\ j_r &= -\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial r} \end{aligned} \quad (8)$$

上面所提到的方程(1)~(4)、(6)、(7)都满足椭圆型偏微分方程(PDE)的形式,可以采用流体力学计算软件 FLUENT 进行耦合求解。FLUENT 的求解器中已经集成了方程(1)~(4),作者采用 UDS 方法^[5]将方程(6)和(7)编程导入到 FLUENT 中。方程(2)、(3)、(4)、(7)中的特殊源项采用 UDF 方法^[5]处理。

1.3 边界条件

本算例为直流等离子体自由燃烧电弧,计算域如图1所示,此算例被国内外同行广泛地用于计算与实验的对比验证^[3,4,6,7]。阴极柱状电极使用钨材料,锥角为 60° 。阳极为铜制平板电极,工作气体为氩气。进口 BC 和出口 CD 的外部都处于一个大气压下,温度为 1000 K 的氩气气氛。

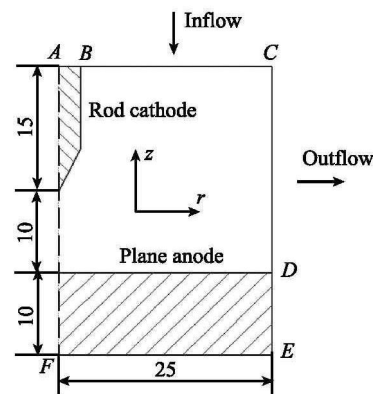


图1 自由燃烧电弧装置结构示意图(mm)

Fig. 1 Structural of the free burning arc equipment

本算例的边界条件汇总在表 1 中, 采用的符号意义是 [7]:

$$\gamma \equiv \frac{\partial \Omega}{\partial n} = 0$$

$\Lambda \equiv$ 由计算域内部推导

上列边界条件 Λ 主要在边界处流动的 Peclet 数不高的情况下使用。选择这种特殊的边界条件是因为计算域前沿的流动还未充分发展, 也因此可以使得求解器比较容易处理回流的现象 [5]。算例中电势方程的边界条件由电流条件给出。

表 1 电弧模型的边界条件

Table 1 Boundary conditions of the arc model

	AB	BC	CD	EF	AF
P	-	10^5 Pa	10^5 Pa	-	γ
T	3000 K	1000 K	Λ	1300 K	γ
φ	$-\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{I}{A}$	γ	γ	0	γ
\vec{A}	γ	γ	0	γ	γ
\vec{v}	-	Λ	Λ	-	γ

1.4 计算结果

通过方程组 (1)~(8) 的耦合迭代计算, 可以获得氩气等离子体电弧的温度、速度、压力、电势等参数的分布。

图 2 显示了电流为 200 A, 电极间距 10 mm 的工况下的电弧等温线。计算所得的流场等温线是电弧流场等温线的典型钟形形式。温度最高点出现在阴极弧根区域, 是由于气体在阴极尖端附近的电流密度集中区域内由焦耳热剧烈加热并电离形成等离子体。

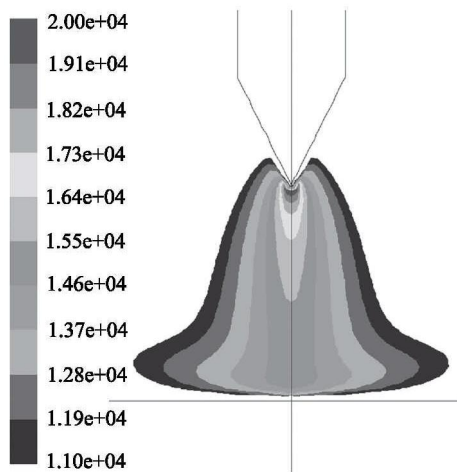


图 2 计算得 200 A 氩气电弧等温线 (K)
Fig. 2 Calculated isotherms of the 200 A argon arc

从最高温度和等温线分布情况来看, 本计算结

果与 K C Hsu 等人的实验结果 [3](图 3) 是比较一致的。计算得阴极尖端电弧速度最大值为 366 m/s, 最大电流密度达到 10^8 A/m² 量级。

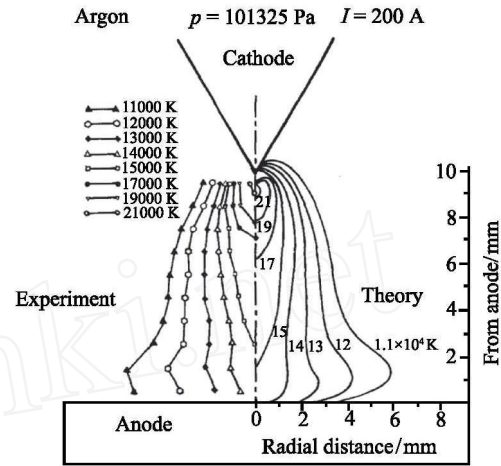


图 3 K C Hsu 测量和计算的 200 A 氩气电弧等温线 [3]
Fig. 3 Measured and calculated isotherms of the 200 A argon arc [3]

2 等离子体电弧炉的数值模拟

2.1 边界条件

图 4 中显示的是由中国科学院力学研究所废弃物处理技术课题组研发的试验用等离子体电弧炉。炉体被简化为一个封闭的轴对称模型 (图 4), 实际上在炉体的侧面布置有进口、出口、观察窗等。炉内布置了柱状的石墨阴极和放置在阳极导电托盘上的石墨坩埚, 阴极尖端到坩埚底部的距离为 20 mm, 阴极的电流为 $I=200$ A, 内壁面为 1000 K 恒温。计算初始化时给出炉内气压为标准大气压, 这符合该电弧炉的实际工作条件。

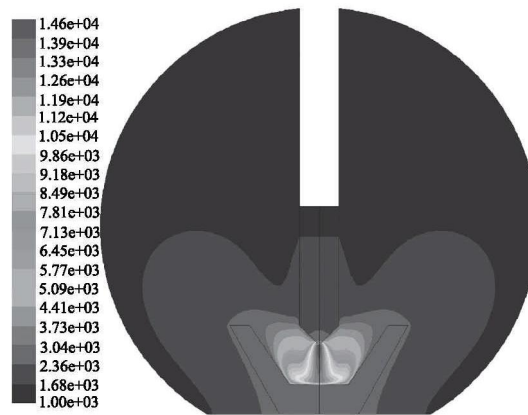


图 4 数值计算所得等离子体电弧炉内温度分布 (K)
Fig. 4 Calculated temperature distribution in the plasma-arc reactor (K)

2.2 计算结果

本例与之前算例的计算方法相同, 所得到的炉内温度分布见图 4。与前例相比, 由于两个电极之间的距离从 10 mm 增加到 20 mm, 电弧的最高温度有明显的下降。

图 4 显示, 炉内高温区域主要集中在坩埚内部, 坩埚上部流出气流温度也达到 3000 K 以上, 可以有效地对各类危险有机物进行裂解处理或对无机物进行熔融处理。

图 5 为计算所得等离子体电弧炉内部的流函数图。计算得炉内阴极头部处最高流速为 139 m/s。氩气在洛伦兹力的作用下形成了阴极射流, 并携带周围的气体产生流动。在图 5 中显示了射流引发的两处旋流(图 5 中 Zone1 和 Zone2), 这对于危险废弃物的处理非常重要, 因为旋流的存在可以增加气体在反应炉内停留的时间, 以便提高危险废弃物的处理效率。由中心射流方向可推知 Zone2 区旋流为顺时针方向, 它的存在可以用于解释在电弧裂解试验中所发现的炭黑在 Zone2 区外侧所布置的观察窗口聚集的特殊现象。

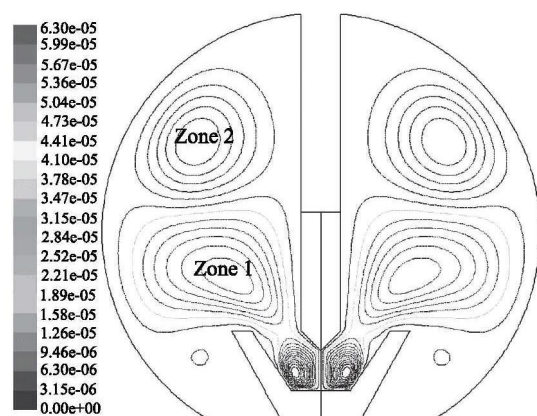


图 5 等离子体电弧炉内部流函数图 (kg/s)

Fig. 5 The stream function distribution in the plasma-arc reactor (kg/s)

3 结 论

本文采用了基于磁矢量势描述的电磁场方程组与流体动力学方程组耦合求解的方法, 获得了与实验结果基本吻合的温度场, 且速度、电势、电流密度

等的计算结果也接近同行的工作^[3,4,6]。这证明了基于磁矢量势描述的 MHD 方法对于等离子体电弧模拟是一种正确有效的方法。本文的数值模拟结果清晰地反映了等离子体电弧的高温阴极射流现象, 以及弧区周围的气体被阴极射流加热和驱动的现象。

相对于 K C Hsu^[3] 和 Xi Chen^[4] 等人的工作, 本工作通过对磁矢量势的偏微分方程进行求解获得磁场强度, 而不是采用对整个电弧区域的电流密度进行繁复的积分^[3,4]来求解磁场强度, 这对于流体力学计算来说是一种大大简化。

A Blais 等人曾进行过与本文类似的工作^[7]。在参考文献 [7] 中, 将阴极表面分成两部分: 阴极侧面和阴极尖端, 并在阴极侧面采用了电磁绝缘条件, 将电流限制在阴极尖端, 即人为设定了电弧的阴极弧根。这样虽然有利于在计算中捕捉电流在阴极尖端的集中现象, 但从物理上说不甚合理。而在本工作中, 在边界条件设置方面采用了相对参考文献 [3], [7] 更少的假设, 更加符合实际的实验条件。

本文建立了一套获得电弧炉内流动和传热状况的数值研究方法, 以期满足热等离子体技术在材料处理和危险废弃物处理工业中的应用需要。

参 考 文 献

- [1] LI Y J, HUANG Z Q, XU Y X, et al. Plasma-Arc Technology for the Thermal Treatment of Chemical Wastes [J]. Environ. Eng. Sci., 2009, 26: 731-737
- [2] K C Hsu. A Self-Consistent Model for the High Intensity Free-Burning Argon Arc [D]. Minneapolis: University of Minnesota, 1982: 21-30
- [3] K C Hsu, K Etemadi, E Pfender. Study of the Free-Burning High-Intensity Argon Arc [J]. J. Appl. Phys., 1983, 53(3): 1293-1301
- [4] CHEN Xi, LI He-Ping. Heat transfer and Fluid Flow in a High-Intensity Free-Burning Arc [J]. Int. J. Heat and Mass Transfer, 2001, 44: 2541-2553
- [5] Fluent Inc. Fluent 6.2 User-Defined Functions Manual [M]. Lebanon: NH, 2005: 1-500
- [6] J Menart, L Lin. Numerical Study of a Free-Burning Argon Arc with Copper Contamination from the Anode [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1999, 19: 153-170
- [7] A Blais, P Proulx, M I Boulous. Three-Dimensional Numerical Modeling of a Magnetically Deflected DC Transferred arc in Argon [J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2003, 36: 488-496