

● 综述 ●

GTAW 耦合模型数值模拟研究进展

郭 瑞, 岳建锋, 常玉烁, 刘文吉

(天津工业大学 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387)

摘 要: 计算机技术的发展使焊接数值模拟技术成为人们研究电弧-熔池行为最重要的方式之一。在钨电极惰性气体保护焊(GTAW)仿真模拟过程中,为了准确描述电弧-熔池行为,需要构建相互耦合的数值模型。对模型中涉及的电弧物理特性进行了阐述,并将 GTAW 耦合模型总结为阴极-电弧耦合、阴极-电弧-熔池全耦合两种类型。综述了每种类型的优缺点,讨论现有方法的不足和未来的研究趋势。

关键词: 耦合模型;数值模拟;电弧;熔池

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20192511

中图分类号: TG403

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2021)9-0001-04

Research Progress of Numerical Simulation of GTAW Coupled Model

GUO Rui, YUE Jianfeng, CHANG Yushuo, LIU Wenji

(Key Laboratory of Modern Electromechanical Equipment Technology, Tiangong University, Tianjin 300087, China)

Abstract: With the development of computer technology, welding numerical simulation has become one of the most important ways to study arc-pool behavior. In the process of gas tungsten arc welding (GTAW) simulation, in order to accurately describe the arc-molten pool behavior, it is necessary to build a coupled numerical model. The physical properties of the arc involved in the model were expounded, and the coupling model of GTAW arc summed up as the cathode-arc coupling, cathode, arc and molten pool full coupling, the advantages and disadvantages of each type were reviewed and the shortcomings of existing methods and future research trends were discussed.

Key words: coupled model; numerical simulation; electric arc; molten pool

钨极氩弧焊是以钨材料或钨的合金材料作电极,在惰性气体保护下进行的焊接,又称为 TIG (tungsten inert gas) 焊或 GTAW (gas tungsten arc welding)^[1]。TIG 焊可以实现高质量的焊接,得到优良焊缝,并且电弧稳定,熔池可见性好,因而操作也容易进行,被广泛应用在各行各业中。焊接过程涉及传热、流动、光、电、声和磁等复杂的物理现象,单纯采用理论和实验的方法解决实际生产问题费时费力。随着计算机技术和有限元技术的发展,焊接过程的数值模拟技术不断成熟,这极大地促进了人们对电弧-熔池行为的深入研究和全面认识。

在焊接过程中,阴极区和阳极区会发生极其复杂的物理现象,一般研究人员会将阴极区、阳极区单独隔离出来进行研究。然而,在实际焊接过程中,焊缝的形成始终伴随着电弧和熔池的交互作用。在模

拟焊接过程中,考虑电弧与电极之间的耦合作用对焊接电弧-熔池行为的研究具有重要意义。由于研究时的侧重点不同,研究者建模的方法也不尽相同。在电弧热源模型预测时,电弧、阴极以及它们之间的多场耦合极为重要,此时建立电弧-阴极耦合模型是必要的;在分析熔池行为以及处理三维移动电弧的问题时,电弧与工件之间的交互作用(即电弧与熔池之间的交互作用)又不可忽视,此时需要将阴极、电弧、熔池全耦合进行分析。根据近年来 GTAW 焊接过程数值模拟技术的研究现状,文中将 GTAW 焊接数值模拟统一模型概括为阴极-电弧耦合和阴极-电弧-阳极全耦合,并对其进行了讨论与总结,以期促进 GTAW 焊接统一模型数值模拟技术的发展,并为之后耦合模型在非对称角焊缝熔透成形机制的研究中奠定基础。

1 电弧的物理特性

由于在焊接数值模拟中,耦合模型建立的困难主要是焊接过程中,电弧阴极区和阳极区的物理变化极其复杂,在建模时不得不进行各种假设。因此,

收稿日期:2019-08-26

基金项目:国家自然科学基金项目(U1733125);天津市自然科学基金项目(17JCZDJC38700,18JCYBJC19100)

作者简介:郭瑞(1994-),女,山西运城人,硕士,主要研究方向:焊接数值模拟;电话:15620573371;E-mail:1120603309@qq.com

对电弧阴极区和阳极区的充分认识是建立统一耦合模型的关键。Zhu 等人^[2]在对自由燃烧电弧的阳极表面温度进行预测研究时,将电弧电极区划分为五个区域:阴极区、阴极鞘层区、弧柱区、阳极鞘层区、阳极区。具体划分情况如图 1 所示。

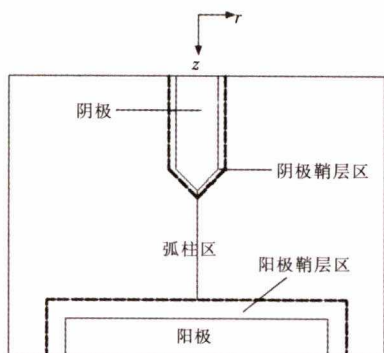


图 1 电弧-电极区划分示意图

Fig.1 Schematic diagram of arc-electrode division

1.1 电弧阴极区的物理特性

焊接电弧阴极附近的狭窄区域为阴极区,是连接阴极与焊接电弧的过渡区域,起到向弧柱区提供电子的作用。阴极区电子的产生机构有两种情况,一是阴极表面的热电子发射、电场发射和碰撞发射等,二是在压降区中形成局部等离子体阴极,并产生热电离^[1]。一般情况下,热电子发射在热阴极材料作为阴极的情况下居于主导地位;电场发射在冷阴极材料作阴极时居主导地位,它与阴极表面电场强度高低有关;当阴极表面的热电子发射量持续减少时,会产生碰撞发射。在实际焊接过程中,因电极材料、电弧气氛、电流值的不同,这三种电子产生形式以某一种起着主导作用。在 GTAW 焊接过程中,通常是以钨极(高熔点,属于热阴极材料)作为阴极,熔化和蒸发速率低,在实际应用中通常被忽略;电场发射也可以被忽略。在 Shirvan 等人^[3]的研究中,认为阴极表面的电子发射以及离子的重组在阴极层中会引起电荷、电离和热不平衡现象,每一种现象都与特定的特征长度有关,并根据德拜长度,将阴极层的子区域区分为三层,空间电荷层(或鞘层)、克努森层和阴极前鞘(或电离层)。

1.2 电弧阳极区的物理特性

电弧等离子体与焊件表面之间很薄的过渡区称为阳极区,该区域中的温度梯度极大,其中发生的复杂物理过程直接决定了电弧对工件表面的电流、热流密度的大小和分布,对焊缝成形有很大的影响。武

传松等人^[4]在对阳极边界层的研究中,将电弧阳极区划分为三个子区域:阳极边界层、近鞘层和鞘层,具体划分如图 2 所示。其中,近鞘层和鞘层中的电离气体不再连续,边界层中的等离子体还是连续介质,但此区域的粒子密度和温度梯度极大。

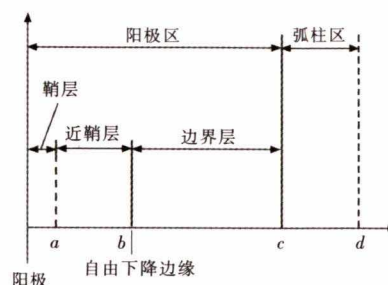


图 2 阳极区划分示意图

Fig.2 Schematic diagram of anode division

2 阴极-电弧耦合方法的研究现状

深入了解焊接过程中的电弧熔池行为,首先需要预测电弧热源模型。电弧热源模型预测的一个必要条件是包括电弧、阴极以及他们之间的温度场、电场等多场耦合,所以在建模时,需要进行阴极-电弧的耦合,包括等离子体柱、阴极和提供热电耦合的阴极层,由于在焊接过程中,电弧阴极区的鞘层和近鞘层内的电离气体已经不再是连续介质,发生的物理现象及其复杂。目前对于阴极-电弧耦合的模型并没有统一的认识,均是基于不同的物理假设建立不同的模型。

Shirvan 等人^[3]在总结前人的研究方法的基础上,将大气压下阴极-电弧耦合模型按照电离层的建模方法分为三类:扩散法、局部 LTE 法和流体动力学方法。扩散法的目的是提供一个从阴极到等离子体柱平滑转变的电流密度,忽略阴极鞘层和克努森层的影响以及近鞘层的物理性质,又被称为“LTE 近似扩散法”,它避免了求解电子密度的连续性方程,成为当前 GTAW 焊接温度场模拟时最常用的方法。LTE 法与扩散法几乎相反,它考虑了阴极前面温度和电场的热不平衡,但忽略了扩散,目前还没有应用于 GTAW 焊中阴极-电弧耦合的研究;在描述阴极层物理特性方面,流体动力学方法是最完整的,包括热不平衡和物理扩散。LTE 方法可以看成是流体动力学方法的简化,而扩散法与之有着本质上的不同。

陈瑋^[5-6]在前人对 GTAW 焊接数值模拟的基础

上,使用 FLUENT 软件建立了一种耦合电极固体、近电极区和弧柱等离子体的双温度耦合鞘层模型(图3)和热力学平衡电弧模型,该模型将弧柱和弧根联系起来(将弧柱的热传导和电势影响引入到近阴极区),同时修正了弧柱的电子能量方程边界条件,使用 Tecplot 软件进行了后处理,但没有考虑到阳极和阳极鞘层。

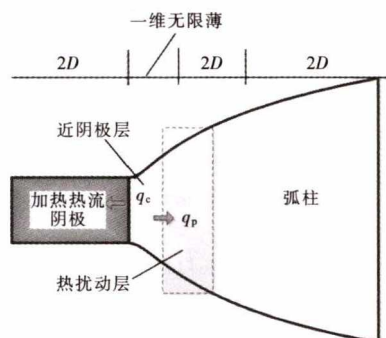


图3 阴极-鞘层-等离子体耦合模型
Fig.3 Cathode-sheath-plasma coupling model

以上研究结果表明,焊接过程中阴极对电弧的影响至关重要,通过建立阴极-电弧耦合模型,可以更好地了解阴极与电弧之间的相互作用,并且计算过程可以大大简化。然而,这种模型未能考虑阳极与近阳极区对电弧的影响,并且一般都是二维稳态模型研究电弧形态,与实际情况始终存在一定偏差。将阴极-电弧耦合模型运用到三维非稳态过程中将是未来的发展方向。

3 阴极-电弧-阳极全耦合的研究现状

当前对阴极-电弧-阳极全耦合数学模型的研究已经不断趋于成熟,然而,由于阴极区和阳极区的物理过程十分复杂,计算量过于庞大,在研究中,研究者往往选择建立二维轴对称模型来研究定点焊接问题并且大多数研究中直接忽略了电弧阴极层和阳极层的作用,导致仿真结果与实际结果存在一定的偏差。在研究三维移动电弧时,对阴极-电弧-阳极全耦合这种模型的需求实际存在。研究者们正在不断尝试,解决如何优化模型、简化计算的问题。

Lowke 等人^[7]最早提出电弧及其电极的简化统一理论并建立了阴极-电弧-阳极全耦合的统一模型,对阴极处的电子密度使用一个简化的边界条件并将两个电极区和两个鞘层视为一个整体,精确模拟了电流密度和电弧等离子体的温度,并对比了双极性扩散与鞘层、无鞘层、仅双极性扩散三种假设对

不同热输入下电弧温度与电势的影响,但在研究中忽略了金属蒸汽对电弧的影响。

Haidar^[8]建立了一种预测电弧焊电极性能的通用模型,详细描述了电弧和电极的相互作用,并给出了 GTAW 熔池形态的发展预测。对模型的处理包括阴极和阳极的非碰撞鞘层区域,并且不考虑双极性扩散的影响。在 GTAW 焊接过程中,阴极区域没有考虑熔化效应,假设阴极形状在时间和空间上固定,并且忽略阴极内的对流,考虑了阴极和阳极偏离局部热平衡(LTE)状态,与实际情况存在一些偏差。

Tanaka 等人^[9-11]建立了静态 GTAW 焊接过程中的全耦合统一数值模型,考虑了电弧等离子体和熔池间的相互作用,不考虑来自熔池和熔池表面凹陷的金属蒸气现象,通过数值模拟,预测了整个焊接过程中温度和速度的分布以及焊缝熔深几何形状。通过与实验数据的对比,发现在将阳极传热的数值结果应用于熔池数值模拟的边界条件时,对不同的阳极材料进行细致的讨论是必要的。

芦凤桂等人^[12-18]根据磁流体动力学理论以及焊接的实际情况,使用 ANSYS 软件建立了包括钨极、电弧和工件三部分的三维统一数学模型(图4),该模型假设电弧处于局部热平衡(LTE)状态,且在熔池成形的问题上,将未熔化的固体区和液体区视为统一区,解决了移动边界问题。并使用该模型研究了定点 TIG 焊接时电弧-熔池相互作用的机制以及电弧-熔池动态行为的基本规律,对电弧与熔池的电场、磁场、热场、流场等多场耦合的情况进行了有限元分析计算。这一做法避免了对电弧熔池界面之间的假定,使得模拟结果更加接近实际情况。但是在研究中,没有对熔池内流体流动和熔池形貌的成因进行深入分析,且未考虑熔池蒸发对电弧的影响。

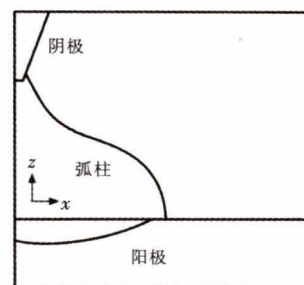


图4 阴极-电弧-熔池耦合模型
Fig.4 Cathode-arc-pool coupling model

文献[19-23]使用 FLUENT 软件合理简化了阴极区和阳极区,建立了钨极-电弧-阳极完整耦合的

三维瞬态统一模型, 利用该模型求解得到了 SUS304 不锈钢在 GTAW 中电弧-熔池体系的温度、速度、电磁力等参数, 论述了 TIG 焊接熔池浅而宽的成因并发现热对流在熔池传热中起主要作用。

虽然当前对阴极-电弧-阳极全耦合模型的研究正在不断深入, 但是对模型的考虑仍然不成熟, 在阴极-电弧-熔池全耦合模型的数值模拟中, 由于计算极其复杂, 研究者们对模型做出了各种假设, 或忽略来自熔池和熔池自由表面凹陷的金属蒸气现象, 或忽略熔池表面的自由变化, 假定熔池表面为刚性, 并且在计算过程中, 大多数没有考虑阴极的变化, 将阴极假定为 LTE 状态。然而, 在实际焊接过程中, 这些问题都实际存在并且相互影响。因此, 优化并完善阴极-电弧-熔池全耦合模型将是未来发展的方向和研究的重点, 而简化计算也将是急需解决的难题。

4 结语

(1) 阴极-电弧耦合模型能在一定程度上模拟焊接电弧并且大大简化计算, 但由于其将电弧独立出来进行建模分析, 忽略其与熔池之间的相互作用, 只考虑了电弧与阴极之间的相互作用, 与实际情况产生一定偏差。

(2) 当前阴极-电弧-阳极全耦合的数值模型, 大多忽略了电弧阴极区和阳极区的作用, 将电弧假定为 LTE 状态, 或者忽略熔池表面变形, 金属蒸汽等因素, 对此类模型进行优化完善无疑是未来的发展方向。

参考文献:

- [1] 杨春利, 林三宝. 电弧焊基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003.
- [2] Zhu Peiyuan, Lowke J J, Morrow R. A unified theory of free burning arcs, cathode sheaths and cathodes [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1992, 25(8): 1221-1230.
- [3] Shirvan A J, Choquet I. A review of cathode-arc coupling modeling in GTAW [J]. *Welding in the World*, 2016, 60(4): 821-835.
- [4] 武传松. 焊接电弧阳极边界层传输机理的研究[C]//中国机械工程学会焊接学会. 第十次全国焊接会议论文集(第2册). 北京: 中国机械工程学会焊接学会, 2001: 5.
- [5] 陈塘. 包含鞘层的非热平衡电弧模拟[C]//中国力学学会等离子体科学与技术专业委员会. 第十六届全国等离子体科学技术会议暨第一届全国等离子体医学研讨会会议摘要集. 北京: 中国力学学会, 2013: 1.
- [6] 陈塘. 耦合电极-鞘层-电弧的数值模拟[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [7] Lowke J J, Morrow R, Haidar J. A simplified unified theory of arcs and their electrodes [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1997, 30(14): 2033-2042.
- [8] Haidar J. Theoretical model for gas metal arc welding and gas tungsten arc welding [J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 84(7): 3518-3529.
- [9] Tanaka M. A unified numerical modeling of stationary tungsten-inert-gas welding process [J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2002, 33(7): 2043-2052.
- [10] Tanaka M. Numerical Study of a free-burning argon arc with anode melting [J]. *Plasma Chemistry & Plasma Processing*, 2003, 23(3): 585-606.
- [11] Tanaka M, Ushio M, Lowke J J. Numerical study of gas tungsten arc plasma with anode melting [J]. *Vacuum*, 2004, 73(3): 381-389.
- [12] 芦凤桂, 姚舜, 钱伟方. 基于 TIG 焊电弧-熔池统一模型分析焊接电弧 [J]. *机械工程学报*, 2004, 40(5): 145-149.
- [13] 芦凤桂, 唐新华, 李少青, 等. 定点 TIG 焊接电弧与熔池交互耦合数值模拟 [J]. *焊接学报*, 2005, 26(9): 69-72.
- [14] 芦凤桂, 姚舜, 楼松年, 等. 熔池表面变形对电弧行为特征的影响 [J]. *焊接学报*, 2004, 25(2): 57-60.
- [15] 芦凤桂, 唐新华, 李少青, 等. TIG 焊接电弧与熔池统一模型有限元分析 [J]. *机械工程材料*, 2006, 30(3): 31-34.
- [16] 芦凤桂. 三维 TIG 焊接电弧与熔池动态交互过程数值分析 [C]//中国焊接协会. 第十一次全国焊接会议论文集(第2册). 北京: 中国焊接协会, 2005: 4.
- [17] Lu F, Yao S, Lou S, et al. Modeling and finite element analysis on GTAW arc and weld pool [J]. *Computational Materials Science*, 2004, 29(3): 371-378.
- [18] Lu F, Tang X, Yu H, et al. Numerical simulation on interaction between TIG welding arc and weld pool [J]. *Computational Materials Science*, 2006, 35(4): 458-465.
- [19] 樊丁, 黄自成, 黄健康, 等. 考虑金属蒸汽的钨极惰性气体保护焊电弧与熔池交互作用三维数值分析 [J]. *物理学报*, 2015, 64(10): 300-310.
- [20] 黄勇, 李慧, 王新鑫, 等. 考虑自由表面的活性 TIG 焊熔池温度场与流场的数值分析 [J]. *兰州理工大学学报*, 2015, 41(6): 32-36.
- [21] 王新鑫, 樊丁, 黄健康, 等. 双钨极 TIG 电弧-熔池传热与流动数值模拟 [J]. *金属学报*, 2015, 51(2): 178-190.
- [22] 肖磊, 樊丁, 黄自成, 等. 考虑金属蒸汽的定点活性钨极惰性气体保护焊电弧与熔池交互作用三维数值分析 [J]. *机械工程学*, 2016, 52(16): 93-99.
- [23] 王新鑫, 樊丁, 黄健康, 等. TIG 焊电弧-熔池传热与流动数值模拟 [J]. *机械工程学报*, 2015, 51(10): 69-78. 