

TIG 电弧增材熔池行为的数值模拟研究现状

李春风^{1,2}, 肖笑^{1,2}, 尹玉祥^{1,2}, 李晨^{1,2}, 张柯柯^{1,2}

(1.河南科技大学材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471023;

2.有色金属共性技术河南省协同创新中心, 河南 洛阳 471023)

摘要: TIG(钨极惰性气体保护焊)电弧增材制造由于其材料利用率高、成形效果好等显著优势,已成为制造业研究的热点。本文从数值模拟的角度,着重总结了TIG增材熔滴过渡、热累积和熔池行为3个方面的重要结果。成形工艺参数决定熔滴过渡形式和频率,而熔滴的过渡形式和过渡频率直接影响沉积层的成形质量;热累积影响着成形件的微观组织和应力,可通过控制层间冷却时间来减少热累积;在进行TIG增材熔池数值模拟时,多选择高斯热源和双椭球热源模型。基于以上对TIG电弧增材制造的分析研究,对TIG电弧增材制造的研究方向进行了展望,主要包括建立熔滴与熔池的物理耦合模型和改进电弧热源模型两方面。

关键词: TIG电弧增材制造; 数值模拟; 熔滴过渡; 热累积; 熔池行为

中图分类号: TG457.1 文献标志码: A 文章编号: 1009-6264(2020)07-0025-08

Research status of numerical simulation of TIG arc additive molten pool behavior

LI Chun-feng^{1,2}, XIAO Xiao^{1,2}, YIN Yu-xiang^{1,2}, LI Chen^{1,2}, ZHANG Ke-ke^{1,2}

(1.School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China; 2.Generic Technology of Nonferrous Metals Henan Collaborative Innovation Center, Luoyang 471023, China)

Abstract: TIG(Gas tungsten arc welding) arc additive manufacturing has become a hot spot in manufacturing industry because of its high material utilization and good forming effect. From the point of view of numerical simulation, this paper summarizes the important results of TIG three aspects: droplet transition, thermal accumulation and molten pool behavior. The forming process parameters determine the droplet transition form and frequency, while the droplet transition form and transition frequency directly affect the forming quality of the deposition layer. The thermal accumulation affects the microstructure and stress of the forming parts, which can be reduced by controlling the interlayer cooling time. The gaussian heat source and the double ellipsoidal heat source model are selected for the numerical simulation of the TIG additive pool. Based on the above analysis and research of TIG arc additive manufacturing, the future research direction of the TIG arc additive manufacturing is prospected; one is to establish the physical coupling model of molten drop and molten pool, and the other is to improve the arc heat source model.

Keywords: TIG arc additive manufacturing; numerical simulation; droplet transition; thermal accumulation; molten pool behavior

随着制造业的高速发展,基于“加法”加工技术的增材制造呈现出广阔的应用前景,在航空航天、军工等方面的使用越来越多。与传统的铸造、锻造等工艺相比,增材制造能够减少工序、缩短研发周期,尤其适用于小批量产品的制造,但由于其特殊的热过程会使零件具有一定的缺陷,如残余应力和变形等。现在

增材制造已经成为当今工程界和学术界研究的热点之一^[1-4]。

与激光增材制造、电子束增材制造等技术相比,电弧增材制造因其能够制造沉积率高、设备成本低、材料利用率高、环境友好的大型金属构件而越来越受到工业制造业的关注。目前,电弧增材制

收稿日期: 2020-02-10; 修订日期: 2020-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(51705137);中国博士后面上项目(2018M070)

作者简介: 李春风(1995—),女,硕士研究生,主要研究方向为电弧增材制造,发表论文1篇,E-mail:2680634139@qq.com。

通信作者: 肖笑(1985—),女,讲师,博士,主要研究方向为电弧焊基础,发表论文10余篇,E-mail:xiaoxiaonov@163.com。

引用格式: 李春风,肖笑,尹玉祥,等. TIG电弧增材熔池行为的数值模拟研究现状[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(7):25-32.

LI Chun-feng, XIAO Xiao, YIN Yu-xiang, et al. Research status of numerical simulation of TIG arc additive molten pool behavior[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41(7):25-32.

造技术可以用来加工钛、铝、镍合金、钢等多种工程材料^[5-6]。TIG 电弧增材制造属于电弧增材制造技术的重要分支,它是一种高效节能、飞溅少、可持续的金属制造工艺,其以非熔化的钨极提供稳定的热源,以氩气等惰性气体作保护气体,填充焊丝以熔滴的方式逐滴、逐层沉积,从而获得致密度高、冶金结合性能好、力学性能好的成形件^[7-8]。因此,TIG 电弧增材技术是低成本金属零件直接制造的重要研究方向。

虽然 TIG 电弧增材制造具有诸多优点,但采用这种技术制造的成形件容易产生残余应力和变形问题,从而影响后续的加工操作。造成这一现象的原因是成形件在沉积过程中温度场不均匀。在增材制造过程中,成形件所经历的热循环比较复杂,表现为单个热源多次循环加热,堆积层金属会经历预热和后热作用,会造成较大热应力,使得零件变形甚至开裂;同时因多次再加热和再冷却循环,使得成形件微观结构演化过程也变得更加复杂,出现组织粗大、不均匀等缺陷,进而对沉积部位的使用性能产生不利影响^[9-13]。其中热循环和应力循环用实验手段难以测量,因此目前利用数值模拟分析电弧增材热过程成为一种有效手段。增材熔池内液态金属流动及传热过程决定了沉积层的微观结构、表面成形等,从而成为影响构件质量的重要因素。通过对增材熔池的数值模拟不但可以分析熔池的热场、流场,而且为沉积层的组织演变及应力分析提供了有力的依据。

TIG 电弧增材制造和 TIG 焊接的熔池数值模拟有着诸多的相似之处。首先,二者均以 TIG 电弧为热源,热源模型相同,大部分都是高斯分布或双椭球分布^[14-16]。其次,二者的熔池中液态金属流动的受力特征相似。在进行电弧增材制造与传统 TIG 焊的熔池模拟时一般都考虑到电弧压力、表面张力、浮力和电磁力等力对熔池行为的影响。通过对 TIG 焊熔池数值模拟的研究结果分析,发现 TIG 焊熔池中金属液态的流动方式是电弧压力、电磁力、浮力和表面张力等共同作用的结果;电弧压力和剪切作用力在熔池中形成了双涡流,使熔池内金属连续混合,从而使金属温度均匀,Marangoni 力直接冲击部位熔深较深,焊缝形状宽而浅。在较大的焊接电流作用下,电磁力对熔池流动起着很大的作用;电磁力的作用比浮力更重要,但比 Marangoni 力弱^[17-19]。

由于 TIG 电弧增材制造是采用 TIG 电弧作为热

源将焊丝熔化在基板上层层堆积成金属零件,因此,TIG 电弧增材制造与 TIG 焊的区别主要在于焊丝的熔化、热过程的变化及基板形状的改变。在 TIG 电弧增材制造过程中,焊丝主要在电弧热的作用下熔化成熔滴,从而引起熔池的动态变化,冲击熔池表面,影响熔池的动量、能量和质量传输。同时 TIG 电弧增材过程中电弧对沉积层的反复加热是一个热量累积的过程,热量累积会影响沉积层内部温度场的变化,从而影响材料组织性能及应力。因此在进行 TIG 电弧增材的熔池模拟时,为了提高模拟结果的准确性需要考虑到熔滴过渡和热累积这两方面。

综上所述,为了更深入地分析 TIG 电弧增材制造数值模拟的国内外研究现状,本文首先针对 TIG 电弧增材中的两个特征现象即熔滴过渡、热累积的数值模拟研究进行分析,再阐述 TIG 电弧增材中熔池行为数值模拟的国内外研究现状。最后研究讨论 TIG 电弧增材制造数值模拟研究中存在的主要问题,分析总结目前研究存在的不足,并且对需要深入研究的方向进行展望。

1 TIG 电弧增材熔滴过渡的数值模拟

熔滴过渡行为是影响 TIG 电弧增材过程稳定及成形件质量的重要因素,从数值模拟角度研究 TIG 增材的熔滴过渡行为,从物理本质上来了解熔滴过渡行为,为 TIG 电弧增材熔池的数值模拟奠定了基础。王金彪^[20]通过 FLUENT 软件并基于 VOF 法对 TC4 钛合金 TIG 电弧增材制造的熔滴过渡进行了数值模拟,模型中考虑了重力、表面张力、气体流速等因素对熔滴过渡产生的影响,得到了熔滴过渡过程的模拟结果如图 1 所示。研究表明:改变送丝速度可改变熔滴过渡形式;气体流速影响熔滴过渡和熔滴形状。在进行 TIG 电弧增材时,可以调节成形工艺参数得到熔滴搭桥过渡方式,熔滴稳定接触熔池,从而使焊缝成形良好。

王鑫^[21]建立了旋转电弧 TIG 填丝焊的熔滴过渡模型,考虑了重力、表面张力、周期性等离子流力,研究了工艺参数对熔滴过渡形式的影响,得到了熔滴过渡模拟结果如图 2 所示,结果表明:升高焊接电压,可改变熔滴过渡形式;增加焊接电流,可增加熔滴过渡频率;焊丝端面与熔池之间的距离是影响熔滴过渡形式最主要的因素。贾剑平等^[22]利用 Fluent 软件建立了旋转电弧 TIG 填丝焊熔滴过渡模型,模拟了熔滴过渡过程,研究了在一个过渡周期内熔滴形态的

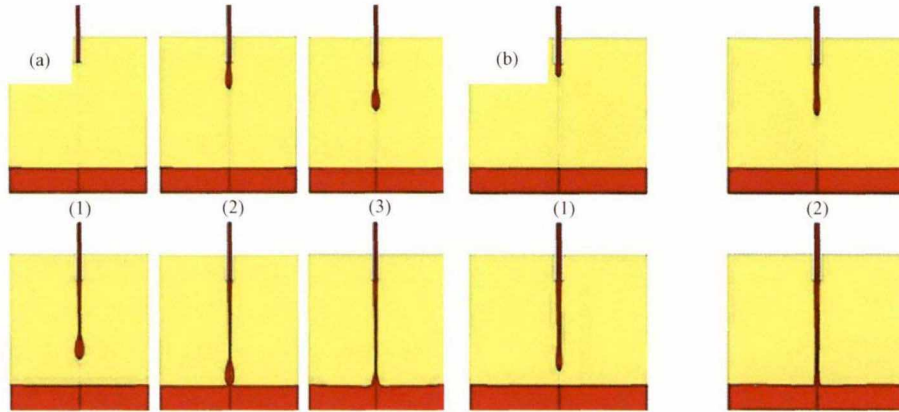


图 1 不同送丝速度下的熔滴过渡过程^[20] (a) 35 mm/s; (b) 45 mm/s(保护气流量为 5 L/min,送丝角度为 45°)

Fig.1 Droplet transition process at different wire feeding speeds^[20]

(a) 35 mm/s; (b) 45 mm/s(the protective gas flow rate is 5 L/min and the wire feeding angle is 45°)

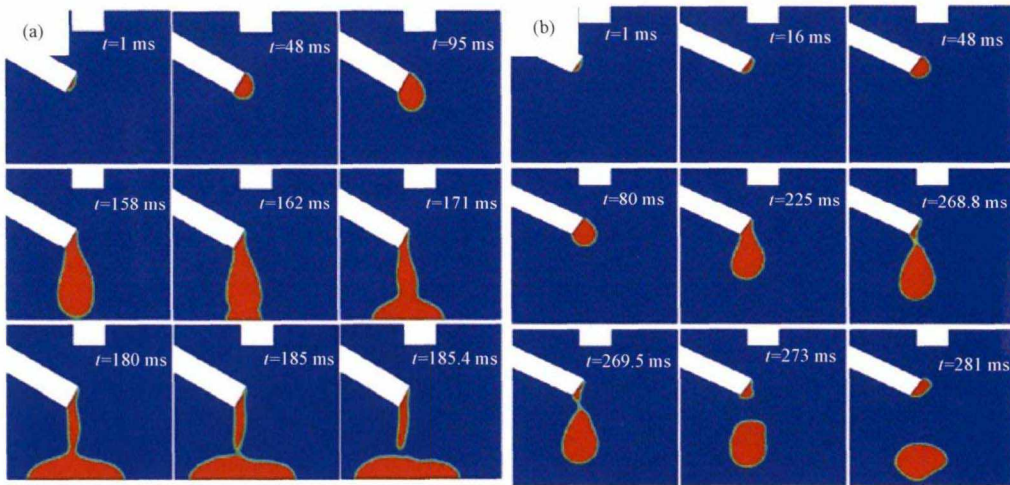


图 2 旋转电弧 TIG 填丝焊熔滴过渡模拟图^[21] (a) 旋转电弧 TIG 填丝焊熔滴过渡模拟图($U=17\text{ V}$);

(b) 旋转电弧 TIG 填丝焊熔滴过渡模拟图($I=175\text{ A}$)

Fig.2 Droplet transition simulation diagram of rotating arc TIG wire filling welding^[21] (a) simulation diagram of droplet transition

in rotating arc TIG wire filling welding($U=17\text{ V}$); (b) simulation diagram of droplet transition in rotating arc

TIG wire filling welding($I=175\text{ A}$)

变化,计算了过渡周期。

上述学者建立的熔滴过渡数值模型均是二维的,分析了熔滴过渡过程,发现通过改变成形工艺参数可以得到熔滴过渡的不同形式和过渡频率,这有助于了解电弧增材的熔滴过渡过程。但是学者们仅仅对熔滴过渡过程进行了研究,熔滴对熔池的作用仍需进一步研究。

有些学者在进行填丝焊研究的基础上,考虑了填丝对熔池行为的影响,研究了在填丝焊的时候熔滴过渡的处理方式。周星^[23]在熔池金属输运模型中,不考虑焊丝的熔化,而是将熔滴看成球状并且以固定频率射入熔池的质量源,实现了质量输运。Traidia

等^[24]提出了将冷丝浸入熔池的一种模拟方法,考虑送丝对熔池中能量和动量平衡的一些影响,其中熔滴过渡方式就是搭桥过渡,模拟结果如图 3 所示,表明:由于冷丝从熔池中吸收能量,导致填充金属的存在使熔池深度局部减小。以上学者只考虑了在 TIG 增材过程中熔滴过渡的处理方式和熔滴过渡对熔池行为的影响,没有建立熔滴和熔池的耦合模型。

2 TIG 电弧增材的数值模拟对热累积的分析

TIG 电弧增材是一个热量累积过程,热量累积会影响沉积层内部温度场的变化,从而影响材料组织性能及

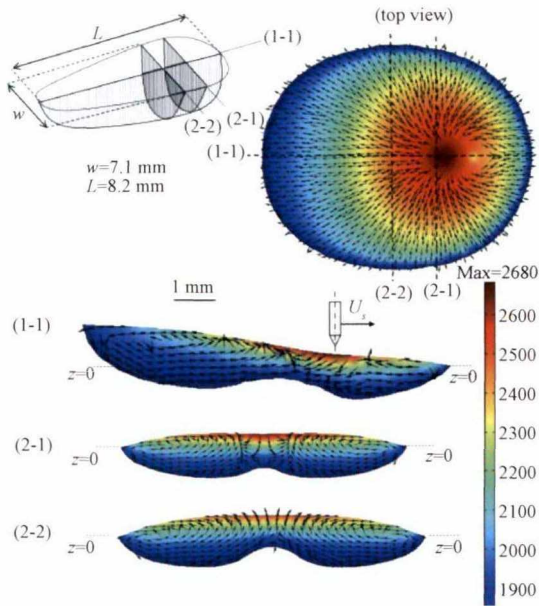


图 3 稳态熔池模拟图^[24](焊接电流 150 A、焊接速度 15 cm/min、送丝速度 100 cm/min)

Fig.3 Simulation diagram of steady-state molten pool^[24] (welding current of 150 A, welding speed of 15 cm/min and wire feeding speed of 100 cm/min)

应力。当热量积累严重时,会导致成形件成形效果极差。为防止成形件过热,相邻沉积层间通常需要进行一定程度的冷却,以减小热输入量。因此在进行 TIG 电弧增材的数值模拟时,层间温度的控制尤其重要。

师建行^[25]利用 MSC.Marc 软件分别建立 1 层和 3 层的增材制造有限元分析模型,并通过选择使用合适的层间冷却时间使层间温度保持在 80 °C 附近。柏久阳^[26]TIG 增材数值模拟中为实现层间温度的控制,选择冷却一段时间,使层间温度降低到设置值,再进行下一道铝合金的沉积。耿海滨^[27]主要研究 TIG 电弧增材逐层堆积成形时,过渡阶段温度场和熔池熔合区温度梯度演变规律,其中过渡阶段温度场模拟如结果图 4 所示,藉此设计层间温度,自下而上建立一致的熔池热边界条件。0~20 层时过渡阶段层间温度差异较大,20 层以后逐渐趋于稳定。过渡阶段热源距基板较近,应设置较高的层间温度以保持熔池周围热边界条件的一致性。权国政等^[28]通过模拟研究不同增材工艺参数对残余应力的影响规律,发现在一定范围内采用较高的熔丝线能量,较低的熔丝速度和较高的预热温度,增材后的残余应力水平较低。

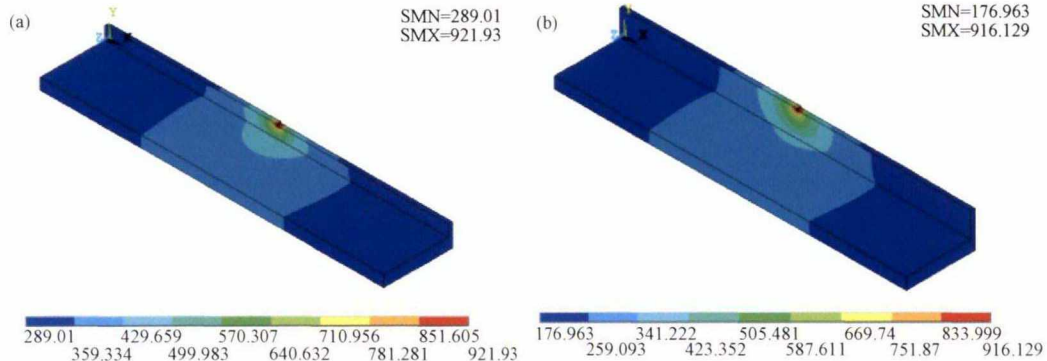


图 4 温度场演变过程模拟图^[27](成形速度为 0.3 m/min,送丝速度为 2 m/min)

(a) 第 10 层成形路径中点处温度场演变过程; (b) 第 20 层成形路径中点处温度场演变过程

Fig.4 Simulation diagram of temperature field evolution^[27] (welding speed of 0.3 m/min and wire feeding speed of 2 m/min)

(a) evolution process of temperature field at the middle point of the forming path of the 10th layer; (b) evolution process of temperature field at the middle point of the forming path of the 20th layer

根据以上分析,TIG 电弧增材过程中的热积累影响着成形件的温度场、应力以及成形效果,因此需要考虑层间温度的控制,避免出现成形效果差的情况。

3 TIG 电弧增材熔池的数值模拟

为了进行 TIG 增材制造熔池的数值分析,通常选择有限元分析软件对 TIG 电弧增材制造过程的熔池行为进行模拟,研究其温度场分布特征以及熔池流动

情况。在进行 TIG 增材制造熔池的数值模拟时,热源模型的选择往往是影响模拟准确性的关键因素,学者们通常采用的热源模型为双椭球热源模型和高斯热源模型。

3.1 双椭球热源模型的熔池数值模拟

陈建刚等^[29]建立了 5056 铝合金平板 TIG 堆焊模型,研究 TIG 填丝焊温度场的分布规律,结果指出:在焊接方向上,基板已加热部位等温线呈稀疏状态,

基板前面未加热部位等温线呈密集状态。柏久阳^[26]建立了 2219 铝合金 TIG 增材制造的有限元数值模型,研究了 TIG 增材制造的温度场特征和热循环过程,得到了如图 5 所示的温度场模拟图,分析得出:在演变一段时间后温度场会达到稳定状态;达到稳定区

域后,不同沉积层中对应位置的热循环过程具有相似性特征。师建行^[25]利用有限元方法模拟了 5183 铝合金 TIG 增材沉积态金属制造过程的热循环,结果指出:沉积一定层数之后热循环趋于稳定;随成型宽度增加,沉积层经历重熔次数增加、温度梯度减小。

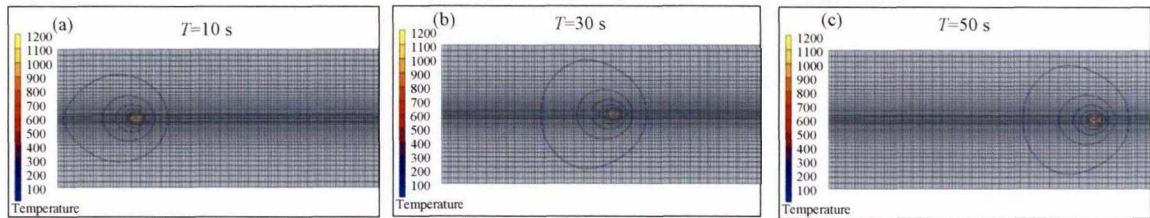


图5 第2增材层沉积过程的温度场演变图^[26] (a)第10 s的温度场;(b)第30 s的温度场;(c)第50 s的温度场

Fig.5 The temperature field evolution of the deposition process of the second additive layer^[26]

(a) the temperature field at 10 s; (b) the temperature field at 30 s; (c) the temperature field at 50 s

Traidia 等^[24]建立了 TIG 填丝焊数值模拟的 2D~3D 混合模型,在考虑洛伦兹力和焦耳热效应及不考虑工件表面热通量和电流密度分布的情况下,模拟了熔池的流动行为。结果表明:表面张力梯度系数的正负会影响熔池中液态金属的流动情况;填充金属的存在使熔池深度在受送丝热影响的区域内局部减小。Ganesh 等^[30]采用顺序耦合分析方法进行了 ATIG(活性钨极惰性气体保护焊)和 MPTIG(手工多道极惰性气体保护焊)热-机械数值模拟,结果指出:ATIG 焊为单道焊,在横向上的温度分布更加均匀;在 MPTIG 焊中由于采用了交替焊缝,工件两侧的温度分布不对称。车泽伟^[31]建立数值模型研究分析了热丝 TIG 焊对接温度场,选择双椭球热源模型对试件的温度场进行模拟,验证了模型的正确性。Yegaie 等^[32]建立了热沉 TIG 3 层焊过程的三维有限元仿真模型,对温度场和残余应力进行了预测。发现在热沉 TIG 焊工艺中,由于热沉的影响,高温区域仅局限于热源附近,与常规 TIG 焊工艺相比,最高温度大大降低。

双椭球热源模型分为前 1/4 椭球和后 1/4 椭球两个部分组成,充分考虑到 TIG 电弧能量在熔深方向的分布,也能够体现出 TIG 电弧增材由于移动热源导致的熔池头部短尾部长特征。利用该模型可以使 TIG 电弧增材熔池行为的模拟结果更为准确。

3.2 高斯热源模型的熔池数值模拟

Hejripour 等^[33]采用数值模拟的方法,选择高斯热源模型,在考虑电弧压力、电磁力、自由表面变形、Marangoni 力的情况下,研究了 TIG 增材过程的传热、流动和质量输运过程。研究指出:Marangoni 对流和洛伦兹力使流体向外流动到熔池的熔合边界,熔丝入

口周围的环形涡流将熔丝材料从沉积位置移向熔池底部再到自由表面和熔合边界。耿海滨^[27]利用有限元软件模拟研究了 TIG 增材成形过程温度场,分析成形件全域温度场及增材成形时熔池局域温度场演变规律,表征了熔池热边界条件随成形工艺参数和层数的变化特征。Chen 等^[34]采用有限元法对 316L 薄不锈钢板多道对接 TIG 焊的温度场进行了数值模拟,研究了多道次沉积过程中沉积速度和沉积层间冷却时间对温度场的影响。结果表明:随着沉积速度的增加,温度场中的不均匀温度分布越大,温度梯度越大;冷却时间越长,工件的温度越低。

周星^[23]建立了考虑熔滴对熔池影响的熔池金属运输模型,通过考虑熔滴质量、动量、热传递以及电弧的热、力作用,得到了稳定情况下的沉积层形貌和熔池的温度场和流动场如图 6 所示。

高斯热源模型是平面热源模型,该模型未考虑到 TIG 电弧增材在熔深方向能量的分布情况,以及焊枪移动对能量分布的影响,高斯热源模型能够体现出计算的简便性,但与 TIG 电弧增材实际熔池的特征有一定差别,因此应用的较少。

3.3 其他热源模型的熔池数值模拟

董博伦^[35]对窄间隙填丝打底 TIG 焊熔池行为进行了数值模拟,并且实现了稳定桥络过渡,研究指出:填充金属的过渡加快了熔池内液态金属的流动速度,填充金属进入熔池后并不直接向熔池后方运动,而是先被漩涡带到熔池底部,再向熔池后方运动。Pan 等^[36]建立三维模型研究 VP-TIG 熔池行为和焊缝形成,选择椭圆形热源模型并考虑电弧压力和电磁力,研究了熔池自由表面的温度和速度分布、熔池自由

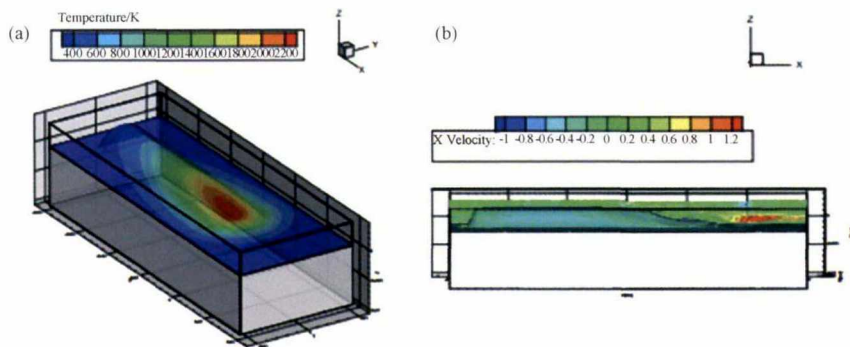


图6 沉积层表面耦合计算温度场结果和X方向分速度场耦合计算结果^[23]

(a) 沉积层表面温度分布; (b) XZ平面X方向速度分布

Fig.6 Coupling calculation results of the temperature field and the velocity field in the X direction of the deposited layer surface^[23]

(a) surface temperature distribution of deposited layer; (b) velocity distribution in the X direction of the XZ plane

表面的变形和沉积层轮廓。黄健康等^[37]建立了焊枪摆动的填丝焊熔池模型,采用了半椭球热源模型,考虑了电弧压力、电磁收缩力和表面张力等力对熔池流动的影响,其中焊枪摆动主要改变了熔池中电磁力的强度分布和力方向,影响熔池对流,结果表明:焊枪摆动使熔池内温度分布更加均匀,使在熔池中的熔滴金属的分布更加均匀。Chiumenti等^[38]采用体热源模型对连续沉积层引起的温度变化、残余应力和变形进行模拟,并且将传热和力学分析精确地耦合起来。

以上关于TIG电弧增材的数值模拟研究了不同热源模型和不同工艺参数下的熔池温度场,发现双椭球热源模型更符合TIG电弧增材熔池模拟的要求,并发现基板形状不同会影响散热条件,进而影响温度场分布。TIG填丝焊主要研究的是熔滴过渡对熔池行为的影响。但是TIG电弧增材把沉积层简化为连续、均匀的介质,没有考虑熔滴过渡,因此无法准确地表征熔池的流动、热传递和质量运输行为。

4 总结与展望

从TIG电弧增材熔池行为的数值模拟研究现状

可以看出,熔滴过渡及热累积的处理是极为重要的。熔滴过渡方式选择更为平稳的搭桥过渡,多以能量和质量源项的方式加载到模型中,以此实现增材过程。学者们通过控制层间冷却时间来控制层间温度,以此来消除热累积的影响。采用不同热源模型模拟了TIG增材熔池,多选择高斯热源和双椭球热源模型,得到了熔池温度场及各种流场。

现有针对TIG增材熔池行为的数值模拟研究仍存在不足:研究多集中于TIG单道单层焊和多道焊,关于TIG增材单道多层熔池行为的深入研究比较少;TIG增材的数值模拟将沉积层简化为连续、均匀的介质,忽略了熔滴以及熔滴过渡方式对熔池流动行为、传热过程和几何形态的影响。因此,本文在综合分析国内外研究的基础上,认为以下方面仍可作深入研究:

1) 结合成形件的尺寸,建立熔滴过渡和熔池的多物理场强耦合数值模型,从热质传递过程上来揭示熔池行为内部机理;

2) 增材过程中电弧的物理特性也随之发生改变,在充分分析电弧的特性后,改进电弧热源模型,提高模拟精度。

参 考 文 献

- [1] Gisario A, Kazarian M, Martina F, et al. Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: a review[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2019, 53: 124-149.
- [2] Ding J, Colegrove P, Mehnen J, et al. A computationally efficient finite element model of wire and arc additive manufacture[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(1/4): 227-236.
- [3] Wu B, Pan Z, Ding D, et al. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 35: 127-139.

- [4] Rodrigues T A, Duarte V, Miranda R M, et al. Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM) [J]. *Materials*, 2019, 12(7) : 1121.
- [5] 王延庆, 沈竞兴, 吴海全. 3D 打印材料应用和研究现状 [J]. *航空材料学报*, 2016, 36(4) : 89-98.
WANG Yan-qing, SHEN Jing-xing, WU Hai-quan. Application and research status of alternative materials for 3D-printing technology [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2016, 36(4) : 89-98.
- [6] 郭龙龙, 贺雨田, 鞠录岩, 等. 脉冲 TIG 增材制造技术研究进展 [J]. *材料工程*, 2018, 46(12) : 10-17.
GUO Long-long, HE Yu-tian, JU Lu-yan, et al. Progress in additive manufacturing technique based on pulsed TIG [J]. *Materials Engineering*, 2018, 46(12) : 10-17.
- [7] 熊俊, 薛永刚, 陈辉, 等. 电弧增材制造成形控制技术的研究现状与展望 [J]. *电焊机*, 2015, 45(9) : 45-50.
XIONG Jun, XUE Yong-gang, CHEN Hui, et al. Status and development prospects of forming control technology in arc-based additive manufacturing [J]. *Electric Welding Machine*, 2015, 45(9) : 45-50.
- [8] 李少海. 基于 SYSWELD 的 TIG 堆焊试件应力及变形数值模拟分析 [J]. *热加工工艺*, 2012, 41(17) : 145-147.
LI Shao-hai. Numerical simulation on stress and deformation of TIG surfacing specimen based on SYSWELD [J]. *Hot Working Technology*, 2012, 41(17) : 145-147.
- [9] 刘东帅, 吕彦明, 周文军, 等. 基于 ANSYS 的 TIG 电弧增材制造温度场数值模拟分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(24) : 241405.
LIU Dong-shuai, LÜ Yan-ming, ZHOU Wen-jun, et al. Numerical simulation of temperature field in TIG arc additive manufacturing based on ANSYS [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(24) : 241405.
- [10] Sachajdak A, Słoma J, Szczygieł I. Thermal model of the gas metal arc welding hardfacing process [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 141 : 378-385.
- [11] Xiong J, Lei Y, Li R. Finite element analysis and experimental validation of thermal behavior for thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing with various substrate preheating temperatures [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 126 : 43-52.
- [12] Charles Murgau C, Lundbäck A, Åkerfeldt P, et al. Temperature and microstructure evolution in gas tungsten arc welding wire feed additive manufacturing of Ti-6Al-4V [J]. *Materials*, 2019, 12(21) : 3534.
- [13] Ge J, Ma T, Han W, et al. Thermal-induced microstructural evolution and defect distribution of wire-arc additive manufacturing 2Cr13 part; Numerical simulation and experimental characterization [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 163 : 114335.
- [14] Kong X, Asserin O, Gounand S, et al. 3D finite element simulation of TIG weld pool [C] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2012, 33(1) : 012025.
- [15] 张建宝, 王宏. TIG 焊熔池表面变形的数值模拟 [J]. *热加工工艺*, 2016, 45(11) : 223-225.
ZHANG Jian-bao, WANG Hong. Numerical simulation of TIG weld pool surface deformation [J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(11) : 223-225.
- [16] 贾金龙, 赵玥, 董明晔, 等. 基于温度函数法的铝合金电弧增材制造残余应力与变形数值模拟 [J]. *焊接学报*, 2019(9) : 1-6.
JIA Jin-long, ZHAO Yue, DONG Ming-ye, et al. Numerical simulation of residual stress and deformation of aluminum arc additive manufacturing based on temperature function method [J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2019(9) : 1-6.
- [17] 张瑞华, 樊丁, 杜华云. GTA 焊接熔池特性的数值模拟 [J]. *兰州理工大学学报*, 2004(5) : 21-23.
ZHANG Rui-hua, FAN Ding, DU Hua-yun. Numerical simulation of melt pool in GTA welding [J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2004(5) : 21-23.
- [18] Wang X, Luo Y, Fan D. Investigation of heat transfer and fluid flow in high current GTA welding by a unified model [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, 142 : 20-29.
- [19] Trautmann M, Hertel M, Füssell U. Numerical simulation of TIG weld pool dynamics using smoothed particle hydrodynamics [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 115 : 842-853.
- [20] 王金彪. TIG 工艺参数对钛合金增材制造成形影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
WANG Jin-biao. Research on the influence of GTAW process parameters on titanium alloy additive manufacturing forming [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [21] 王鑫. 基于数值模拟的旋转电弧 TIG 焊熔滴过渡研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
WANG Xin. Research on droplet transfer during rotating TIG filler wire welding process based on numerical simulation [D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.

- [22] 贾剑平,詹志平,王鑫,等.基于旋转电弧的TIG填丝焊熔滴过渡数值模拟[J].热加工工艺,2019,48(7):192-194.
JIA Jian-ping,ZHAN Zhi-ping,WANG Xin,et al.Numerical simulation of droplet transfer in GTAW wire filling welding based on rotating arc[J].Hot Working Technology,2019,48(7):192-194.
- [23] 周星.电弧增材制造中电弧和熔池热质传递数值模拟[D].武汉:华中科技大学,2018.
ZHOU Xing.Numerical simulation of heat and mass transfer of arc and pool in arc additive manufacturing[D].Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2018.
- [24] Traidia A,Roger F,Guyot E,et al.Hybrid 2D-3D modelling of GTA welding with filler wire addition[J].International Journal of Heat and Mass Transfer,2012,55(15/16):3946-3963.
- [25] 师建行.5183 铝合金 TIG 增材制造数值模拟及微观组织分析[D].黑龙江:哈尔滨工业大学,2016.
SHI Jian-hang.Numerical simulation and microstructure of 5183 aluminum by additive manufacturing of TIG[D].Heilongjiang: Harbin Institute of Technology,2016.
- [26] 柏久阳.2219 铝合金 GTA 增材制造及其热处理过程的组织演变[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
BAI Jiu-yang.Microstructure evolution of 2219-aluminum GTA based additive manufacturing and heat treatment[D].Harbin: Harbin Institute of Technology,2017.
- [27] 耿海滨.5A06 铝合金 TIG 电弧增材制造控形基础研究[D].陕西:西北工业大学,2017.
GENG Hai-bin.Study on shape control of GTAW based wire and arc additive manufacturing of 5A06 aluminium alloy[D].Shanxi: Northwestern Polytechnical University,2017.
- [28] 权国政,赵江,施瑞菊,等.多层熔丝增材数值模拟及残余应力控制研究[J/OL].机械科学与技术,2019;1-6.<https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20190176>.
QUAN Guo-zheng,ZHAO Jiang,SHI Rui-ju,et al.Numerical simulation and residual stress control of multilayer fused additives[J/OL].Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering,2019;1-6.<https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20190176>.
- [29] 陈建刚,魏正英,杜军,等.5056 铝合金氩弧焊接数值分析与熔池形貌研究[J].热加工工艺,2018,47(7):181-184.
CHEN Jian-gang,WEI Zheng-ying,DU Jun,et al.Numerical simulation and weld morphology of 5056 aluminum alloy TIG welding [J].Hot Working Technology,2018,47(7):181-184.
- [30] Ganesh K C,Balasubramanian K R,Vasudevan M,et al.Effect of multipass TIG and activated TIG welding process on the thermo-mechanical behavior of 316LN stainless steel weld joints[J].Metallurgical and Materials Transactions B,2016,47(2):1347-1362.
- [31] 车泽伟.高强不锈钢热丝 TIG 焊工艺及温度场数值模拟[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
CHE Ze-wei.Welding procedure development and temperature field numerical simulation in hot-wire TIG welding of high strength stainless steel[D].Harbin:Harbin Institute of Technology,2017.
- [32] Yegaie S,Kermanpur A,Shamanian M.Numerical simulation and experimental investigation of temperature and residual stresses in TIG with a heat sink process of Monel 400 plates[J].Journal of Materials Processing Tech.,2010,210(13):1690-1701.
- [33] Hejripour F,Valentine D T,Aidun D K.Study of mass transport in cold wire deposition for wire arc additive manufacturing[J].International Journal of Heat and Mass Transfer,2018,125:471-484.
- [34] Chen Y,Han J M,Tan J,et al.Numerical simulation on temperature and stress field of multi-pass welding of thin stainless steel plate[J].Applied Mechanics and Materials,2013,302:258-262.
- [35] 董博伦.316LN 不锈钢窄间隙 TIG 焊电弧特性与熔池行为的数值模拟[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
DONG Bo-lun.Numerical simulation of arc characteristics and molten pool behaviors in narrow gap TIG welding of 316LN stainless steel[D].Harbin:Harbin Institute of Technology,2018.
- [36] Pan J,Hu S,Yang L,et al.Investigation of molten pool behavior and weld bead formation in VP-GTAW by numerical modelling [J].Materials and Design,2016,111:600-607.
- [37] 黄健康,陈会子,杨茂鸿,等.基于示踪粒子的摆动 TIG 填丝焊熔池行为数值分析[J].焊接学报,2019,40(6):7-13+161.
HUANG Jian-kang,CHEN Hui-zi,YANG Mao-hong,et al.Numerical analysis of the behavior of swing TIG wire-filled weld pool based on tracer particles[J].Transactions of The China Welding Institution,2019,40(6):7-13+161
- [38] Chiumenti M,Cervera M,Salmi A,et al.Finite element modeling of multi-pass welding and shaped metal deposition processes[J].Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering,2010,199(37/40):2343-2359.