

GTAW 多相流数值模拟的相界面实时标记方法

韩庆璘¹, 李大用², 李鑫磊¹, 张广军¹

(1. 哈尔滨工业大学, 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨, 150001; 2. 渤海造船厂集团有限公司, 葫芦岛, 125003)

摘要: 在大电流 GTAW 的非稳态多相流数值模拟中, 需要将电弧热与电弧压力加载在金属相与气相之间的动态变化的界面上, 以便准确描述电弧与熔池之间的相互作用。因此提出了一种相界面实时标记方法, 通过在三维计算域网格数据中遍历搜索相体积分数梯度的最大值, 识别出临近相界面的单层网格区域并施加标记, 将面热源与表面力除以网格厚度转化为体热源与体积力并加载到标记区域。结果表明, 该方法鲁棒性强, 对不同幅度凹凸起伏的 GTAW 相界面均能准确标记, 标记时间仅占控制方程迭代时间的 7.34%, 能够满足实时性要求。利用该方法能够准确模拟电弧压力对熔池的挖掘作用以及电弧热沿工件深度方向的渗透作用, 无需采用复合热源模型, 即可在计算结果中呈现大电流 GTAW 的指状熔深特征。

创新点: 提出了基于相体积分数梯度最大值的相界面的标记方法, 在 GTAW 多相流数值模拟中实时、准确地标记了动态变化的相界面区域, 即电弧热与电弧压力的作用区域。

关键词: GTAW; 熔池流场; 相界面; 实时标记

中图分类号: TG 402

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20201123002

0 序言

随着计算机的计算能力不断提高以及计算流体力学 (CFD) 理论的不完善^[1], GTAW 的熔池流动传热数值模拟也朝着提高计算精度的方向发展^[2]。然而在大电流 GTAW 过程中, 熔池的自由表面在大电弧压力的作用下发生变化, 表现为前沿下凹形成弧坑, 后沿凸起形成余高^[3]。如果此时仍然将电弧热与电弧压力加载在工件原有的水平面上, 其计算结果必将与实际情况有很大的出入。因此有必要将电弧热与电弧压力准确加载在金属相与气相之间动态变化的界面上, 使之与实际过程吻合。

为了体现电弧热随熔池前沿下凹而向深度方向渗透的作用, Goldak 等人^[4]提出了双椭球体热源模型来计算 GTAW 的温度场, 其计算精度优于常规的高斯面热源。在此基础上, 柱状体热源、双椭球 + 锥形复合体热源等体热源模型分别在激光焊接、等离子束焊接的熔池流动传热数值模拟中得到

应用^[5]。然而, 上述热源形状参数较多, 其取值严重依赖试验结果与操作者经验, 需要多次试算才能确定^[6]。并且在考虑到熔池自由表面变化后, 其中一部分体热源作用在弧坑部位的气相区, 与实际过程不符。

目前 GTAW 熔池流动传热数值模拟通常将熔池上方的部分气相区包含到计算域内, 利用多相流模型来追踪相界面。一种方法是求解熔池表面的受力平衡方程得到相界面位置, 但 GTAW 属于非平衡过程, 故该方法存在一定的局限性。另一种方法是利用流体体积法 (volume of fraction, VOF) 计算相体积分数^[7], 相体积分数为 0.5 的等值面即为两相的界面^[8], 但该等值面是在后处理过程中构建而成的, 计算时无法在此处加载边界条件。如果用临近相界面的网格区域来代表相界面, 并将面热源、表面力等效转化为体热源、体积力加载在上述区域, 也能准确反映热源、电弧压力的作用位置随相界面的实时变化。此方法需要对相界面区域的网格进行实时标记, 文献中将相体积分数介于 0 和 1 之间的所有网格均予以标记^[9], 但是标记的鲁棒性较差, 错标、漏标现象频繁发生, 并且所标记区域是厚度不均匀的, 不利于面热源、表面力向体热源、体积

力等效转化^[10]. 此外, GTAW 多相流数值模拟计算域中庞大的网格数量, 特殊的网格数据读写规则也对标记方法的可行性、准确性、实时性提出了挑战.

针对上述问题, 文中提出了一种基于相体积分数梯度最大值的相界面的实时标记方法, 在 CFD 软件 Fluent 的基础上, 通过用户自定义函数 UDF 进行二次开发, 只需对网格数据进行三次遍历, 即可在三维计算域中实时、准确标记出临近相界面的单层网格区域, 为电弧热与电弧压力提供正确的作用位置, 提高 GTAW 多相流模拟的准确性.

1 相界面区域的网格标记问题分析

为了模拟 GTAW 过程中在金属相与气相之间界面的变化情况, 计算域必须包含金属工件及工件上方的一部分气相区域, 并求解多相流方程. 考虑到金属相与气相之间互相不混合, 其相界面可以通过 VOF 方法进行追踪. VOF 方法利用相体积分数来描述网格中流体的组分. 对于一个网格的金属相体积分数 α_{metal} , 分为以下 3 种情况: ①当 $\alpha_{\text{metal}} = 1$ 时, 该网格中充满了金属相; ②当 $\alpha_{\text{metal}} = 0$ 时, 该网格中充满了气相; ③当 $0 < \alpha_{\text{metal}} < 1$ 时, 该网格中同时包含金属相和气相. 这表明该相界面与网格相交, 即该网格中包含了相界面的局部区域. 然而由所有满足 $0 < \alpha_{\text{metal}} < 1$ 条件的网格组成的区域不能准确反映相界面. 文中以 α_{metal} 的二维分布情况为例, 对存在的问题进行讨论.

在熔池自由表面流动变形之前, 工件纵截面上 α_{metal} 的分布如图 1a 所示, 此时相界面为两相之间的水平面, 应将相界面下方一层的金属相网格予以标记. 由于相界面穿过了两个网格之间的边界线, 而没有与任何网格的内部区域相交, 故 α_{metal} 的值非 0 即 1, 采用 $0 < \alpha_{\text{metal}} < 1$ 作为标记判据将无法标记任何网格, 造成了“弃真”错误. “弃真”错误使得电弧热与电弧力无处加载, 计算过程无法正常进行.

当熔池自由表面流动变形之后, 工件纵截面上 α_{metal} 的分布如图 1b 所示. 图中边界线加粗的网格是满足 $0 < \alpha_{\text{metal}} < 1$ 的网格. 其中 A 网格内部以气相为主, 只包含少量的金属相, 若在该网格上加加载热源, 无异于将热源加载于气相区, 因此标记 A 网格是不合理的. 同理, B 网格内部以金属相为主, 只包含少量的气相, 且其上方相邻的网格也满足标记条件, 故 B 网格应被归为熔池内部区域, 而非相界

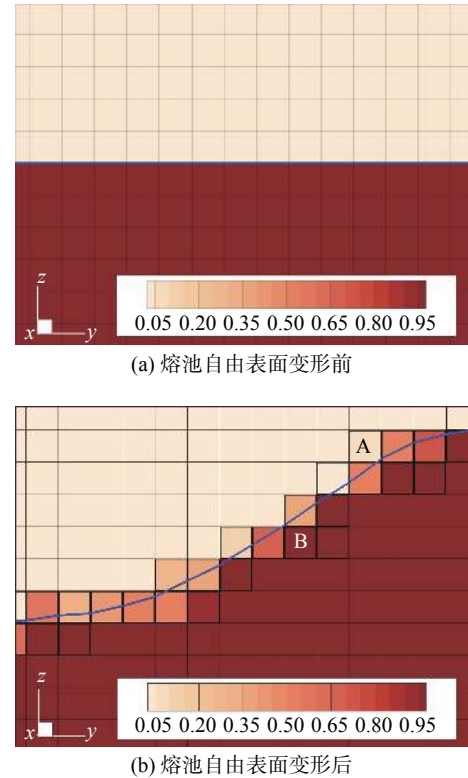


图 1 金属相体积分数的二维分布

Fig. 1 2D distribution of the metal phase volume fraction. (a) before surface deformation; (b) after surface deformation

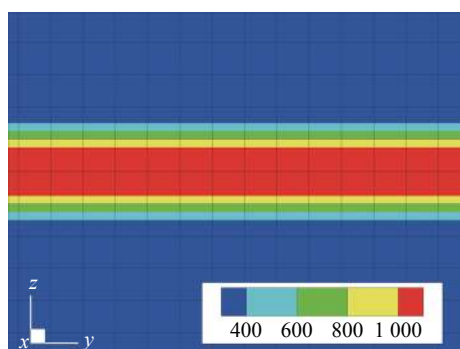
面区域. 所以采用 $0 < \alpha_{\text{metal}} < 1$ 作为标记判据导致了“存伪”错误. 此外由于计算舍入误差 ε 的存在, 即使在单相区的内部也会出现 α_{metal} 值为 ε 和 $1 - \varepsilon$ 的网格, 这些网格也会被错误标记为相界面区域. “存伪”错误导致电弧热与电弧力过度加载, 熔池温度与熔池自由表面变形量将高于实际值. 不仅如此, 上述两种错误还使得被标记区域的厚度不均匀. 将面热源除以被标记区域的厚度转化为体热源之后, 其能量在较薄的区域分布更加集中, 而在较厚的区域分布更加分散, 与转化前的能量分布存在较大的出入, 电弧压力同理. 所以, 为了使上述转化等效, 必须保证被标记区域的厚度均匀.

综上所述, 采用 $0 < \alpha_{\text{metal}} < 1$ 作为判据标记的区域难以准确反映相界面的状况, 对提高计算精度不利. 因此亟需设计开发出一种鲁棒性高的相界面区域网格实时标记方法.

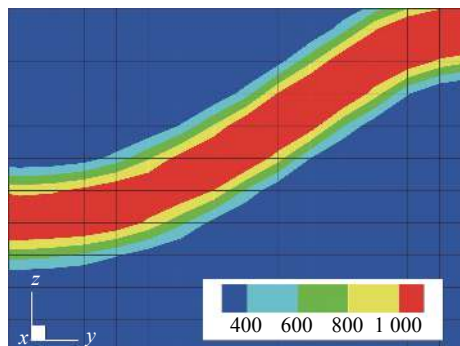
2 基于相体积分数梯度最大值的标记方法

为了解决相界面标记不准确的问题, 分析了

α_{metal} 在空间上的变化情况. 与图 1 对应的 α_{metal} 梯度场如图 2 所示, 可以看出在远离相界面的单相区内部, α_{metal} 接近于 0 或 1, 其梯度很小; 而在相界面附近的区域, α_{metal} 从 0 迅速变化到 1, 其梯度明显高于单相区. 利用上述特征, 可以准确地计算域中识别出相界面区域, 并予以标记. 然而, 若仅通过设置 α_{metal} 梯度的阈值进行判断, 仍然无法保证所标记区域的厚度均匀性. 因此采用如下策略: 沿工件厚度方向找出各个位置的 α_{metal} 梯度的最大值点位置并予以标记, 从而得到能够准确反映相界面几何状况的单层网格区域.



(a) 熔池自由表面变形前



(b) 熔池自由表面变形后

图 2 相体积分数梯度场 (m^{-1})

Fig. 2 Gradient field of the metal phase volume fraction. (a) before surface deformation; (b) after surface deformation

根据上述分析, 设计了一套基于相体积分数梯度最大值的相界面网格实时标记方法, 并在 Fluent 软件环境下通过 UDF 二次开发编程, 在三维计算域中实现了相界面实时标记. UDF 提供了宏作为二次开发工具, 其中循环宏能够按照网格索引号的顺序遍历计算域内的网格, 单元格宏能够在上述遍历过程中读写网格数据. 然而, 网格索引号是在网格绘制过程中建立的, 与网格的位置坐标之间没有明确的对应关系, 因此不支持根据位置坐标直接访问指定网格, 只能在遍历计算域的过

程中对网格数据逐一处理. 这种网格数据存储结构不利于不同网格之间的数据比较, 因此常规的最值的判定方法无法在此环境下使用. 针对上述限制, 文中所设计的方法在 Fluent 软件环境下的实现流程如图 3 所示.

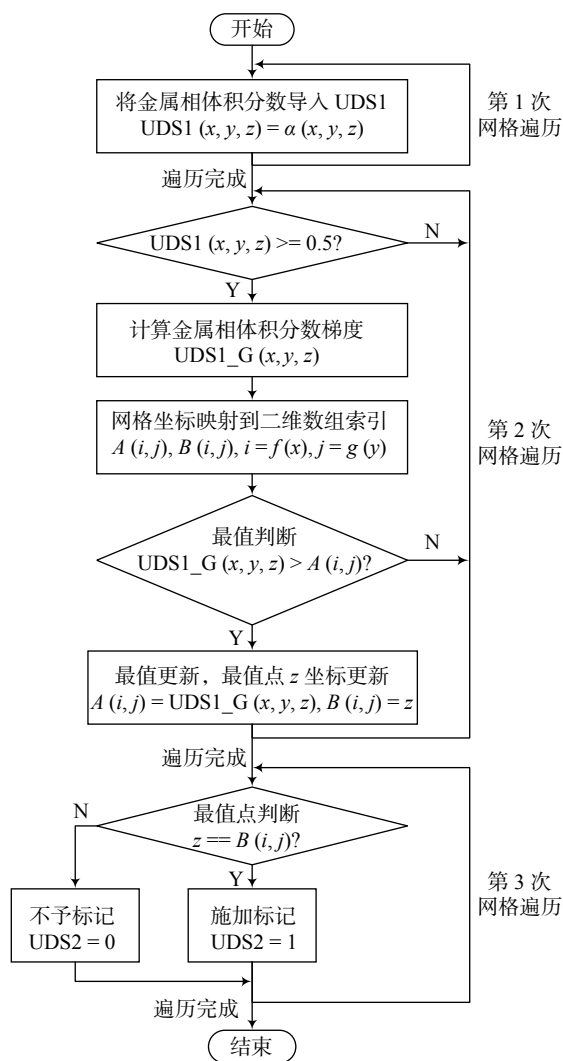


图 3 相界面区域实时标记方法流程

Fig. 3 Workflow chart of the proposed real-time marking method for phase interface zone

(1) 计算 α_{metal} 梯度. 虽然 Sobel 算子、Laplace 算子等工具能够用于求解离散数据的梯度, 但使用上述工具需要读取目标位置周围网格的数据, 这在 Fluent 软件的遍历过程中难以实现. 而在 Fluent 软件环境中该问题可以借助用户自定义标量 UDS 间接完成: 在第 1 次遍历时将计算域内所有网格的 α_{metal} 数值导入到 UDS, 在第 2 次遍历时即可通过 UDS 梯度宏 C_UDSI_G 获得 α_{metal} 的梯度场. 上述 UDS 只进行数据存储与梯度计算, 不参与物理量的传输.

(2) 筛除气相区. 由图 1、图 2 可知, 相界面附近的金属相网格和气相网格都有着较高的 α_{metal} 梯度值, 对应金属相区的边界与气相区的边界. 而 GTAW 的源项只需要被加载在金属相区的边界, 因此采用四舍五入原则, 将 $\alpha_{\text{metal}} < 0.5$ 的网格视为气相区处理, 不予标记.

(3) 寻找 α_{metal} 梯度的最大值点. 该步需要对计算域内的各个 xy 位置沿 z 方向寻找 α_{metal} 梯度达到最大值的网格, 这些网格所组成的区域即为相界面单层网格区域. 而最值的判断需要对指定的多个网格的数据进行比较, UDF 没有提供相关的工具, 并且 Fluent 网格数据的存储结构与遍历方式也不利于此. 针对上述问题, 根据网格的位置坐标, 计算出网格在计算域中沿坐标轴方向的位置序号, 并建立临时数组, 使该数组的索引号与网格的位置序号一一对应. 按照对应关系将网格数据导入数组中, 即可借助数组的相关操作求解最值点.

考虑到计算域中网格数量庞大, 若采用三维数组进行存储与计算, 必然会占用大量的计算资源, 影响计算效率. 而文中方法采取的策略是将 xy 坐标相同而 z 坐标不同的网格分为一组, 建立每组网格的 xy 坐标与二维数组索引号之间的对应关系, 求出各组网格的 α_{metal} 梯度最大值与最大值点 z 坐标, 并分别存储在两个二维数组中, 为后续施加标记提供依据. 上述两个二维数组的初值均为 0, 在网格遍历过程中, 将网格的 α_{metal} 梯度数据与数组 A 中对应单元的数据进行比较, 如果前者大于后者, 则将前者赋予后者, 并将该网格的 z 坐标数据赋予数组 B 中对应的单元, 否则不进行任何赋值操作. 不同组的网格指向数组的不同单元, 无需进行组间比较; 而同一组的网格指向数组的同一单元, 进行组内比较, 在遍历完成后, 数组 A 中将存储各个 xy 位置的 α_{metal} 梯度的最大值, 而数组 B 中将存储对应的最大值点 z 坐标. 上述过程只需要对计算域内的网格进行 1 次完整的遍历, 而对遍历顺序没有要求.

(4) 施加标记. 文中方法采用 UDS 作为标记变量, 对于计算域内的网格逐一进行判断, 如果其 z 坐标与数组 B 中对应单元所存储的最大值点 z 坐标相同, 则将 UDS 赋值为 1, 否则赋值为 0. 经过一次遍历, 即可将相界面区域的所有网格的 UDS 赋值为 1, 实现实时标记. 该 UDS 不参与物理量的传输.

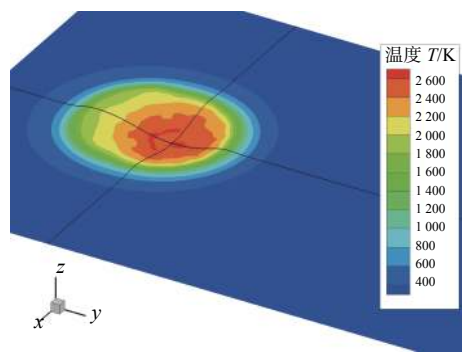
将上述流程整理成 C 语言代码并嵌入到 UDF 的 DEFINE_ADJUST 宏之中, 即可在每次迭代求解控制方程之前执行, 实时标记相界面区域网格. 将面热源、表面力等效转化为体热源、体积力后, 加载在计算域中 UDS 值为 1 的标记区域即可.

3 算法验证

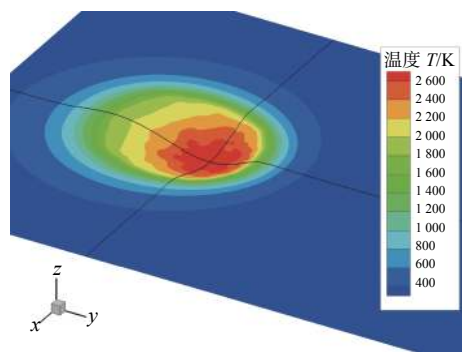
为了验证所提出的相界面实时标记方法, 设计了一个大电流 GTAW 多相流非稳态计算模拟案例. 该案例中计算域为长方体区域, 以焊接方向为 y 方向, 工件厚度方向为 z 方向, x 方向与焊接方向垂直. 计算域内包含 604 200 个长方体网格, 在初始条件下 z 方向上半部分为气相区, 下半部分为金属相区. 在 xOy 投影面上, 电弧热与电弧压力均服从高斯分布, 有效分布半径 5 mm, 并且以 5 mm/s 的焊接速度沿 y 方向前进. 焊接电流取 400 A, 电弧电压取 16 V, 电弧压力峰值取 1 000 Pa. 工件材料为 Q235. 在计算过程中, 采用上述标记方法, 在每次迭代之前实时标记金属相与气相之间的界面网格区域, 将电弧热与电弧压力除以网格厚度, 等效转化为单层网格的体热源与体积力之后, 投影到所标记的区域作为热源与动量源. 考虑了熔池自由表面起伏对电弧热、电弧压力的影响, 以及熔池中浮力、表面张力与电磁力的作用^[10]. 计算环境为 Windows 10, 64 位操作系统, AMD R5 3600X CPU (12 线程 3.8 GHz) 以及 16 G 内存, 软件版本为 Fluent 16.0.

该案例计算过程中, 每次标记相界面网格区域所用时间平均为 122 ms, 控制方程每迭代一步所用时间平均为 1 662 ms, 标记时间仅占控制方程迭代时间的 7.34%, 能够满足实时标记的要求. 使用 Tecplot 软件对计算结果进行后处理. 图 4 给出了案例在 0.5, 1.0, 1.5 以及 2.0 s 4 个时刻下, VOF = 0.5 的等值面 (即相界面) 上的温度场计算结果, 图 5 给出了对应时刻下 UDS 的空间分布, 即网格标记的情况. 对比图 4 与图 5 可以看出, 在任一时刻下, 所标记的区域的形状、位置均与相界面吻合, 且为单层网格区域, 说明文中方法鲁棒性强, 对 GTAW 相界面不同幅度的凹凸起伏均能适应, 并且标记位置准确, 厚度均匀, 为电弧热与电弧压力提供了准确的作用位置.

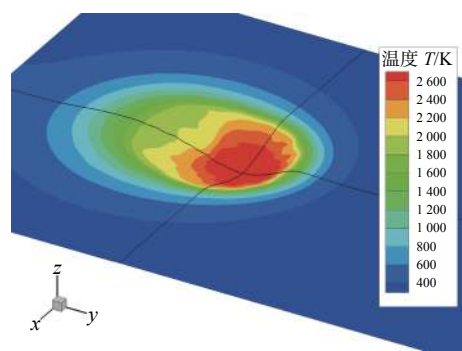
图 6 给出了案例在 2.0 s 时刻下熔池横截面上的流场与温度场. 即使没有采用复合热源模型, 计



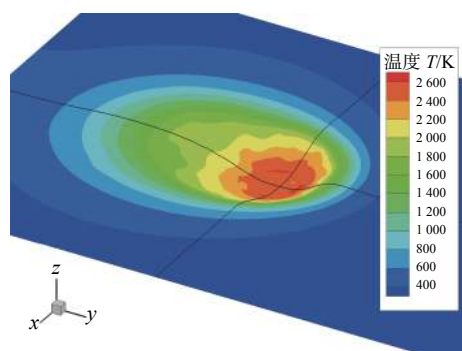
(a) 0.5 s



(b) 1.0 s



(c) 1.5 s

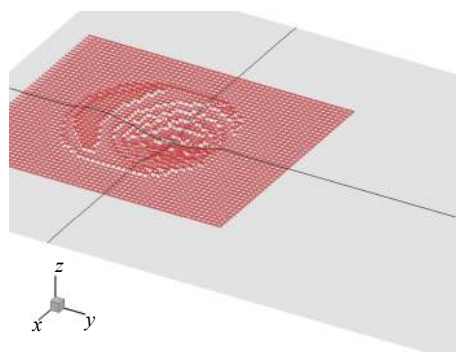


(d) 2.0 s

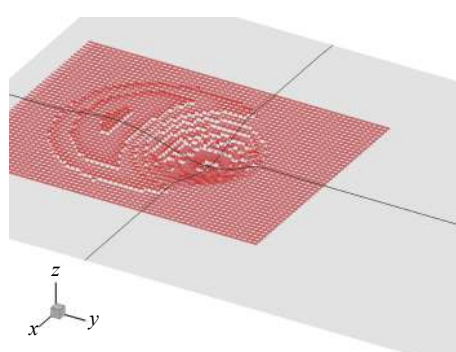
图 4 相界面上的 GTAW 温度场

Fig. 4 GTAW temperature field at the phase interface.
(a) 0.5 s; (b) 1.0 s; (c) 1.5 s; (d) 2.0 s

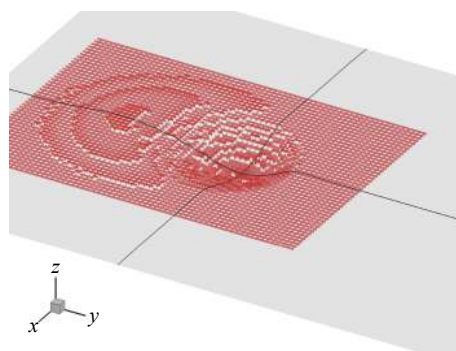
算结果也呈现出了指状熔深特征, 与大电流 GTAW 的焊缝横截面形貌相吻合. 这是采用常规的高斯平面热源或双椭球体热源所无法得到的结果. 该结果得益于计算模型对 GTAW 物理过程的准确描述,



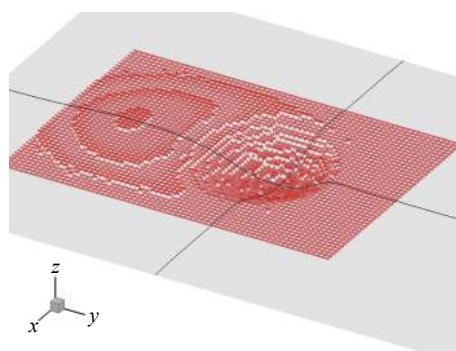
(a) 0.5 s



(b) 1.0 s



(c) 1.5 s



(d) 2.0 s

图 5 相界面区域标记结果

Fig. 5 Marking result of the phase interface zone.
(a) 0.5 s; (b) 1.0 s; (c) 1.5 s; (d) 2.0 s

即电弧压力对熔池的挖掘作用以及电弧热沿工件深度方向的渗透作用. 案例采用文中方法准确、实时地标记了相界面区域, 将电弧压力始终加载在相界面区域, 反映了熔池前沿被电弧压力不断下压,

所形成弧坑的深度先逐渐增加,而后在表面张力、重力等共同作用下趋于稳定的过程;将电弧热始终加载在相界面区域,反映了随着弧坑深度增加,电弧热的作用位置也逐渐向工件内部深入的过程,得到了与实际更加吻合的结果。

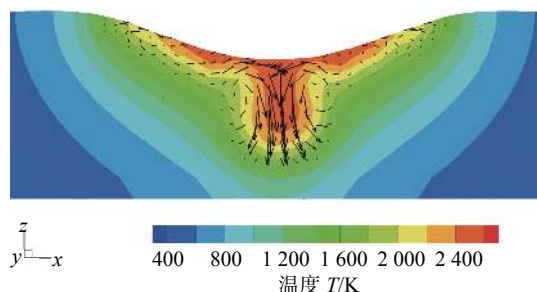


图6 2.0 s时刻下熔池横截面上的流场与温度场

Fig. 6 Flow field and temperature field on the cross section of the molten pool at 2.0 s

在GTAW过程中,熔池前沿弧坑的深宽比一般不超过1/2,所以所提出的相界面实时标记方法采用 z 方向的单层网格区域来描述相界面合理.计算结果表明,采用长方体结构化网格划分方式,文中方法准确有效.不仅如此,在多道搭接的情况下,文中方法可以准确标记出被搭接焊道的表面,使搭接焊道的电弧热与电弧压力作用在正确的位置。

对于以下情况,文中方法存在一定的局限性,有待进一步完善:①在PAW过程中,电弧对熔池的挖掘作用更加强烈,在熔池前沿会产生大深宽比的小孔,故不适合采用 z 方向的单层网格区域来描述相界面,需要对寻找梯度最大值点的方向做出调整.②在GMAW过程中,熔池上方还包含金属熔滴,因此相体积分场更为复杂,文中方法旨在标记出工件、熔池、凝固后的焊缝金属与气体之间的气固界面以及气液界面,而非熔滴表面,因此需要在文中方法基础上,根据 α_{metal} 与 α_{metal} 梯度信息进一步判断,避免将标记错误地加载在熔滴上。

4 结论

(1) 提出了基于相体积分数梯度最大值的GTAW多相流数值模拟相界面实时标记方法,标记时间仅占控制方程迭代时间的7.34%,对GTAW不同幅度凹凸起伏的相界面均能准确标记。

(2) 利用该方法能够准确模拟GTAW电弧压力对熔池的挖掘作用以及电弧热沿工件深度方向

的渗透作用。

参考文献

- [1] Park K, Jeong H, Baek S, *et al.* Turbulent molten pool analysis of tandem GMA automotive steel sheet welding[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2019, 129(1): 1 – 6.
- [2] 刘政军, 李宇航, 苏允海. 纵向磁场下GTAW电弧传热与流动数值模拟[J]. 焊接学报, 2019, 40(5): 120 – 125.
Liu Zhengjun, Li Yuhang, Su Yunhai. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow for arc plasma in gas tungsten arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(5): 120 – 125.
- [3] 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.
Huang Jiankang, Chen Huizi, Yang Maohong, *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.
- [4] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources[J]. Metallurgical Transactions B, 1984, 15(2): 299 – 305.
- [5] Tian Deyong, Yan Tingyan, Gao Qiyu, *et al.* Thermal cycle and its influence on the microstructure of laser welded butt joint of 8 mm thick Ti-6Al-4V alloy[J]. China Welding, 2019, 28(3): 61 – 66.
- [6] Chujutalli J H, Loureno M I, Estefen S F. Experimental-based methodology for the double ellipsoidal heat source parameters in welding simulations[J]. Marine Systems & Ocean Technology, 2020, 15(2): 110 – 123.
- [7] 夏胜全, 孙晓明. CO₂短路过渡焊接熔池三维瞬态数值模拟[J]. 焊接学报, 2016, 37(1): 115 – 119.
Xia Shengquan, Sun Xiaoming. Three-dimensional transient numerical simulation of melting pool in CO₂ short-circuiting arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(1): 115 – 119.
- [8] Fang Yuchao, Yang Ziyu, Dong Shulei, *et al.* Modelling of electron energy absorption and backscattering during EBW[J]. China Welding, 2020, 29(1): 26 – 36.
- [9] Wang R, Lei Y. Simulation study of keyhole formation during laser deep penetration welding[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 44-47: 400 – 403.
- [10] 高学松. 搭接接头摆动激光-GMAW复合焊接传热过程与熔池流场的数值分析[D]. 山东: 山东大学, 2019.
Gao Xuesong. Numerical analysis of thermal process and fluid flow in weld pool during oscillating Laser-GMAW hybrid welding of lap joints[D]. Shandong: Shandong University, 2019.

第一作者: 韩庆麟, 博士研究生; 主要从事电弧增材制造方面的科研工作; Email: hanqinglin2014@163.com.

通信作者: 张广军, 博士, 教授; Email: zhanggj@hit.edu.cn.

(编辑: 杨婉春)