DOI: 10.3901/JME.2018.02.001

熔焊热过程与熔池行为数值模拟的研究进展*

武传松 孟祥萌 陈 姬 秦国梁

(山东大学材料液固结构演变与加工教育部重点实验室 济南 250061)

摘要: 熔焊是目前机械制造业中应用最为广泛的材料连接技术。熔焊过程中的传热与熔池流动行为对于焊缝成形、接头微观组织与服役性能等起着决定性作用。准确地分析和计算熔焊热过程与熔池形态,对于焊接冶金分析、应力变形分析、过程控制及工艺优化等都具有十分重要的意义,也是使焊接工艺从“定性”走向“定量”分析、从“经验”走向“科学”的重要途径。对焊接电弧物理、熔滴过渡、熔池形态、高速焊接熔池传热与流动、等离子弧焊和激光焊接的小孔与熔池动态行为、激光-电弧复合热源焊接热过程的数值模拟研究现状与存在问题进行了评述,讨论了上述前沿领域的研究方向与发展趋势,旨在为实现熔焊工艺优化和过程控制提供理论依据。

关键词: 熔化焊; 熔池行为; 传热与流动; 数值模拟; 研究进展

中图分类号: TG402

Progress in Numerical Simulation of Thermal Processes and Weld Pool Behaviors in Fusion Welding

WU Chuansong MENG Xiangmeng CHEN Ji QIN Guoliang

(Key Laboratory for Liquid-Solid Structural Evolution and Processing of Materials of Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061)

Abstract: The fusion welding processes are extensively used material joining processes in manufacturing industry. The thermal physics and weld pool behaviors in fusion welding have decisive influence on the weld bead quality, the microstructure and service performance of the joints. Accurate analysis and calculation of thermal processes and weld pool behaviors are of great significance to the welding metallurgy analysis, stress & deformation analysis, process control and process optimization etc. Numerical simulation is also a necessary way to turn welding from qualitative description & experience-based art into quantitative analysis- & and science-based engineering branch. The state-of-art and existing problems of numerical simulation for arc physics, droplet transfer behavior, high-speed weld bead defect formation, keyhole dynamics and weld pool behaviors of plasma arc welding, laser welding and laser-arc hybrid welding are reviewed, and the trend in this field is also discussed, aiming at providing a fundamental guideline for the fusion welding process optimization and control.

Key words: fusion welding; weld pool behavior; heat transfer and fluid flow; numerical simulation; research progress

0 前言

焊接方法按照其工艺过程的特点可以分为三类: 熔化焊、压力焊和钎焊, 其中熔化焊(简称熔焊)工艺在各类焊接工艺方法中占据主导地位, 在制造业的应用最为广泛^[1]。在熔焊过程中, 待连接工件的局部区域在焊接热源作用下发生熔化, 形成液态金属的熔池; 熔池内发生强烈的液态金属流动和各

种物理化学反应; 随着热源的移动, 熔池尾部的液态金属发生凝固, 形成冶金结合的焊接接头。

熔焊过程中的传热与液态金属流动会影响熔池的形状与尺寸、温度分布、凝固冷却过程以及焊缝与热影响区的组织演变^[2]。因此, 熔焊的热过程及熔池的流动行为对于焊接接头的组织和性能有着重要影响。但熔焊过程中熔池的温度分布与液态金属流动难以使用试验的手段定量表征, 主要原因如下: ① 熔池温度与流速随时间变化极快; ② 熔池尺寸较小, 熔池中温度与流速的梯度较大; ③ 熔池被强烈的弧光或光致等离子体笼罩, 干扰强烈, 难

* 国家自然科学基金资助项目(51742503, 51074098)。20170520 收到初稿, 20171105 收到修改稿

以直接测量;④即使采取特殊技术(滤光或激光频闪)措施,也只能观测熔池表面的温度和流动,而熔池内部的温度与流动难以测量。

数值分析法通过建立合理的可以反映焊接过程物理特点的数学模型,采用数值的方法求解能量、动量和质量守恒方程等控制方程及其边界条件,可以定量地分析计算熔焊过程中的热物理现象。随着硬件计算能力的提升和通用流体力学计算软件(如 ANSYS Fluent、FLOW 3D、COMSOL 等)的发展,数值分析法已成为研究熔焊热过程与熔池流动行为的主要手段之一。

根据近年来熔焊过程数值模拟领域的研究现状,本文对焊接电弧、熔滴过渡、高速电弧焊接熔池行为、等离子弧焊接(Plasma arc welding, PAW)熔池-小孔传热特性、激光焊熔池与小孔行为、激光-电弧复合热源焊接熔池流态与温度场等领域的数值模拟研究现状与存在问题进行了评述,讨论了上述前沿领域的研究方向与发展趋势。

1 焊接电弧传输机制的数值分析

在电弧焊过程中,焊接电弧燃烧于电极和工件之间,将电流密度、热流密度和电弧力施加于熔池,对焊接热效率、熔化效率、熔池热-力行为有着重要的影响。因此,对焊接电弧的物理传输机制开展相关研究,是深入了解电弧焊熔池行为和热过程的前提和基础。

1.1 GTAW 电弧的数值分析

TANAKA 等^[3]建立了钨极惰性气体保护焊(Gas tungsten arc welding, GTAW)电弧二维轴对称模型,包含钨极、电弧、熔池和工件四部分,电弧与钨极、电弧与熔池的界面为模型的内部界面,基于局部热力学平衡(Local thermodynamic equilibrium, LTE)处理电弧与电极之间的鞘层,考虑了电弧等离子体产生的电弧剪切力、电磁力、Marangoni 力和浮力对液态金属流动的影响。图 1 是电弧和熔池中的温度分布和流体流动数值计算结果。TANAKA 等^[4]还研究了 Ar 气保护气中 H₂、He 或 N₂ 的加入对电弧温度、电压、热流和剪切力的影响。

KONISHI 等^[5]近期建立了 GTAW 电弧非热平衡(Non-LTE)双温数值分析模型,通过分别计算电弧中重粒子(Ar 离子或 He 离子)和电子的能量控制方程,可以得到二者各自的温度分布。图 2 所示为传统单温模型与双温模型的对比。分析认为,当焊接电流较低时,电弧等离子体的非热平衡特征明显,采用非热平衡模型可以提高模型的计算精度。

图 1 GTAW 电弧与熔池的温度场与流场

图 2 单温模型与双温模型的对比

在焊接电流较低时,GTAW 熔池自由表面变形较小,一般可以将其处理为平面。但是,在焊接电流较高(超过 250 A)时,GTAW 熔池表面会发生显著变形,从而影响电弧热-力在熔池表面的分布^[6]。KIM 等^[6]建立了包括钨极-电弧-熔池的二维轴对称 GTAW 模型,研究了熔池表面变形对电弧热-力分布的影响。计算结果表明,当熔池表面发生凹陷后,电弧的电流密度和热流密度不再呈高斯分布,而是呈双峰分布。

除了熔池的几何形状(如熔池大小、表面凹陷等)外,由熔池表面产生的金属蒸气也会对焊接电弧的热-力分布产生显著影响,这主要是因为金属原子较之 Ar、He 等保护气体原子有着更低的激活能和更高的辐射系数。针对该问题,YAMAMOTO 等^[7-8]在其二维 GTAW 定点电弧模型中考虑了金属蒸气的影响,采用黏度近似法处理金属蒸气传输方程中的扩散项系数,通过求解金属蒸气的传输方程,计算了金属蒸气在电弧内的分布及其对电弧尺寸和热流密度的影响,结果如图 3 所示^[7]。计算表明,金属蒸气会使得电弧的直径增大,热流密度相应减小。MOUGENOT 等^[9]使用 Saturne 软件建立了考虑金属蒸气 and 不同保护气体成分的三维 GTAW 钨极-电弧-熔池一体化模型,研究了保护气体对电弧等离

子体热力特性及最终焊缝形成的影响。

图3 GTAW 电弧的温度、流动和金属蒸气分布

1.2 GMAW 电弧的数值分析

SCHNICK 等^[10-11]利用 ANSYS CFX 软件建立了熔化极气体保护焊(Gas metal arc welding, GMAW)焊丝-电弧-工件的二维轴对称模型, 基于 LTE 处理电弧与焊丝之间的鞘层, 使用扩散系数模型处理金属蒸气在 Ar 气中的扩散, 使用 $k-\epsilon$ 模型计算金属蒸气与 Ar 气的湍流混合, 着重研究了由焊丝端部产生的金属蒸气对电弧温度和电流密度分布的影响。计算结果表明, 由于 GMAW 电弧中心金属蒸气浓度较高, 电弧中心区域温度和电流密度都有所下降, 如图 4 所示^[10]。但是该模型仅认为电弧区域为流体, 假设焊丝和工件均不熔化。

图4 GMAW 电弧温度、流速和金属蒸气分数

MURPHY 等^[12-13]在此基础上建立了焊丝、电弧和熔池自适应耦合的三维 GMAW 数值分析模型, 考虑了焊丝移动、熔池金属流动、熔池表面变形、高温熔滴的冲击和金属蒸气的作用。研究表明, 对于 Al 合金 GMAW 焊接而言, 电弧中由于存在较高浓度的 Al 蒸气而温度相对较低, 焊丝倾角和熔池表面形状也会影响电流密度的分布, 进而影响熔池温度, 如图 5 所示^[12]。这说明建立电弧-熔池一体化模型是十分必要的。WANG 等^[14]在 MURPHY 工作基础上研究了保护气体成分(纯 Ar、纯 CO₂ 和 Ar+CO₂

混合气)对 GMAW 电弧行为和熔池形成的影响。研究表明, 保护气体的热物理属性对电弧形状和温度有着重要影响。随着保护气体成分中 CO₂ 浓度的增加, 等离子体密度和比热均显著上升, 从而使电弧半径收缩, 热流密度增大。但是, 上述模型不考虑焊丝的熔化, 因此无法模拟熔滴的过渡行为, 也无法反应焊丝端部形状变化对电弧行为的影响。

图5 GMAW 电弧行为模拟结果

除了上述单电极电弧的数值分析研究外, 国内外研究者还针对多电极电弧的热力行为开展了相关数值分析研究, 如双电极 GTAW^[15]、双丝 GMAW^[16]等, 定量揭示了多电极电弧具有更高焊接效率的原因。

整体而言, 关于焊接电弧传输机制的数值分析研究经历了由二维轴对称模型至三维模型、由固定表面至自由表面、由 LTE 模型至非 LTE 模型、由等离子体单相模型至等离子体+金属蒸气多项模型的发展。综合考虑上述因素, 同时将模型计算成本控制在合理的范围内是焊接电弧传输机制的数值分析研究的重要发展方向。

2 熔滴过渡行为的数值分析

在 GMAW 过程中, 焊丝端部熔化, 形成熔滴; 熔滴脱离焊丝之后, 带有一定的速度、温度和质量进入熔池, 对熔池表面造成冲击, 因而对熔池的能量、动量和质量传输均有重要影响。熔滴过渡是决定焊接过程稳定性和焊缝质量的重要因素。

WANG 等^[17]针对 GMAW 熔滴过渡行为建立了焊丝熔化-熔滴过渡的数值分析模型, 使用流体体积函数法(Volume of fraction, VOF)对熔滴表面形状进行追踪, 计算了大滴过渡和射滴过渡时熔滴内的温

度场和流场。为简化计算,模型中并未包括 GMAW 电弧,而是将电弧对焊丝的影响简化为假定的热流密度和电流密度边界。图 6 为大滴过渡过程中熔滴的温度场、流场和电流密度分布。

图 6 大滴过渡过程中熔滴的温度场、流场和电流密度

为了更准确地描述熔滴过渡过程中相互耦合的复杂物理过程, HU 等^[18]建立了 GMAW 焊丝-电弧-熔池二维轴对称模型。电弧等离子体、熔滴和熔池的温度分布以及流场计算结果如图 7 所示。在此基础上, RAO 等^[19]还研究了保护气体中 He 气比例对电弧和熔滴过渡行为的影响。随着 He 气比例的提高,电磁力由促进熔滴过渡逐渐变为抑制熔滴过渡,因此熔滴尺寸逐渐增大,过渡频率逐渐降低。

图 7 GMAW 熔滴过渡行为的模拟结果

XU 等^[20]建立了 GMAW 电弧运动情况下焊丝-电弧-熔池三维瞬态数值分析模型,计算发现在移动 GMAW 过程中电弧等离子体的速度、温度和压力以及熔滴过渡行为均呈现一定的非对称性,电弧温度、压力等峰值向焊接方向偏移。但是,目前的 GMAW 焊丝-电弧-熔池三维模型计算成本极高,一次计算至少需要数百个小时,这远远超出了普通桌面级计

算机的运算能力。

近期, OGINO 等^[21-22]和 HERTEL 等^[23-24]在 GMAW 焊丝-电弧二维模型中考虑了由高温熔滴产生的金属蒸气的影响,模拟了电弧等离子体的温度场和流场以及熔滴的形成与过渡。图 8 为熔滴及其产生的金属蒸气对 GMAW 电弧的影响^[21]。计算表明,随着焊丝金属气化速率的增大,电弧在焊丝上的作用位置上移,从而影响 GMAW 的熔滴过渡行为;高温熔滴在电弧内过渡过程中会产生大量的金属蒸气,因此弧柱中心区域金属蒸气浓度较高,温度相对较低。但上述研究均没有考虑熔池的流动和表面变形对电弧和熔滴过渡行为的影响。

图 8 熔滴和金属蒸气对 GMAW 电弧的影响

需要指出的是,现有的关于 GMAW 熔滴过渡的数值分析模型大都是针对定点焊的二维轴对称模型。虽然有少数研究者建立了电弧移动情况下 GMAW 熔滴过渡的三维模型,但也存在着计算成本较高、计算精度有待提高等问题。

3 高速焊接焊缝成形缺陷的数值分析

与定点焊或低速焊(焊速不大于 1 m/min)相比,高速熔焊过程中熔池的传热与流动行为具有独特性,并经常伴随着焊缝成形缺陷的产生。当焊接功率或焊接速度超过某一临界值时,焊缝两侧焊趾区域会形成沟槽或凹陷,即咬边缺陷;随着焊接功率和焊接速度的进一步提高,焊缝表面沿焊接方向出现严重的高低起伏,即驼峰焊道缺陷^[25-26]。咬边和驼峰焊道的产生与熔池的热-力行为有着密切联系,因此采用数值分析法计算高速熔焊过程中熔池的传热传质行为,可以定量地探究咬边和驼峰焊道等焊缝成形缺陷的形成机理。

3.1 咬边缺陷的数值分析

SUDIK^[27]、OHJI 等^[28]分别建立了 GTAW 对接焊与 GMAW 角接焊熔池三维热传导数值分析模型,首先计算焊接过程中的温度分布,再根据电弧压力、表面张力和重力的平衡方程确定熔池的自由表面形貌,并模拟了咬边缺陷的形成过程,如图 9a 所示。但上述模型仅考虑了焊接过程中的传热,并未考虑液态金属流动对咬边缺陷的影响。

MENG 等^[29]根据大电流高速 GTAW 熔池自由表面会发生显著变形的特点,提出了随熔池自由表

面变形动态变化的电弧热源和电弧压力分布公式,建立了高速 GTAW 熔池三维瞬态传热与流动数值模型,运用 VOF 法对熔池自由表面进行追踪,计算了咬边缺陷形成过程中的温度场、流场和自由表面形貌,获得的咬边形貌和熔合线形状与试验结果有着良好的吻合。图 9b 为模型计算的咬边形貌。分析认为,咬边缺陷的形成具有综合的热-力作用机理:在电弧剪切力作用下熔池表面凹陷,形成一个仅有极薄液态金属层的凹陷区,当凹陷区域占据熔池最宽处时,边缘的液态金属薄层迅速凝固,从而诱发咬边缺陷的产生;在高焊速时熔池呈现典型的泪滴状,沿熔池两侧流动的液态金属会在熔池中部产生指向熔池中心线方向的速度分量,进而促使咬边缺陷的发展。

图 9 GTAW 咬边缺陷的模拟形貌

3.2 驼峰焊道缺陷的数值分析

陈姬等^[30]推导了包含后向液体流动能项的熔池自由表面变形方程,并提出了更为符合高速 GMAW 特点的熔滴热焓分布模式,在此基础上建立了高速 GMAW 焊接热传导模型,模拟了驼峰焊道的形成过程,如图 10a 所示。分析认为,电弧热源和熔滴热焓无法向熔池中部的液态薄层提供足够的热能,导致该区域先于尾部液态金属凝固,是驼峰焊道形成的主要原因。但该模型只是间接考虑液态金属流动对驼峰焊道形成的影响。CHO 等^[31]使用 FLOW 3D 软件建立了高速脉冲 GMAW 熔池三维瞬态数值模型,研究了驼峰焊道形成过程中的温度分布及液态金属流动。模型采用 VOF 法对熔池自由表面进行追踪,考虑到熔池凹陷区域对电弧的拘束作用,电弧热源则被处理为高斯面热源。使用该模型模拟了飞行的高温熔滴对熔池表面的冲击。图 10b

是计算获得的 GMAW 驼峰焊道形貌。驼峰焊道的形成有三个必要条件:一是熔池液态金属被拉长,形成狭长的液体通道;二是作用于液体通道上的表面张力阻碍熔池尾部液态金属的回流;三是液体通道发生颈缩并迅速凝固,将熔池的前部和后部完全阻断。WU 等^[32]根据高速 GMAW 驼峰焊道的数值模拟结果,采用双丝 GMAW 可避免上述促进驼峰焊道形成的因素。

图 10 GMAW 驼峰焊道缺陷的模拟形貌

XU 等^[33]通过在模型中引入高速流动的等离子体,建立了弱耦合的高速 GMAW 电弧-熔池一体化模型。模型中假定等离子体的流速沿径向呈高斯分布,向下高速运动的电弧等离子体冲击熔池表面,产生电弧压力和电弧剪切力,使得熔池自由表面发生变形。该模型无须预设任何电弧力分布形式。但是,XU 的模拟结果显示在焊接电流 150 A、焊速 1 m/min 的情况下即会形成驼峰焊道缺陷,这偏离实际情况。

MENG 等^[34]在高速 GTAW 咬边缺陷数值分析模型的基础上,根据高速 GTAW 中电弧形态与熔池形貌特点,提出了随熔池表面变形自适应变化的剪切力双椭圆电弧分布公式,进而模拟了驼峰焊道缺陷的形成过程,如图 11 所示。熔池自由表面的显著凹陷以及凹陷区的拉长被认为是驼峰焊道形成的两个起始条件。针对模型中各个熔池驱动力(电弧压力、电弧剪切力、电磁力、表面张力、Marangoni 力、重力和浮力)的敏感性分析则表明,电弧剪切力

是促进驼峰焊道形成的主要驱动力,表面张力是阻止驼峰焊道形成的主要阻力^[35]。

图11 GTAW 驼峰焊道形成过程

关于高速焊接焊缝成形缺陷的数值分析模型可以较为准确地计算咬边和驼峰焊道形成过程中的熔池传热与流动行为,从热-力角度综合地解释缺陷的形成过程。但现有的模型大多为“解释模型”,且计算成本普遍偏高,难以快速准确地预测缺陷形成的临界条件。因此,在深入探究咬边和驼峰焊道形成机理的基础上建立合理的缺陷预测模型是高速焊接数值分析研究的重要研究方向之一。

4 PAW 小孔与熔池行为的数值分析

在 PAW 过程中,等离子弧的热-力作用导致熔池内形成贯穿工件厚度的小孔。小孔的动态变化直接影响电弧的热-力分布和 PAW 熔池行为。因此,小孔的建模与处理是 PAW 热过程与熔池行为数值分析的核心问题之一。

武传松等^[36-37]根据 PAW 焊缝形状特点,分别提出了适用于 PAW 温度场计算的锥体体积热源和双椭球体+锥体组合式体积热源,从而间接考虑了小孔对焊接温度场的影响。霍玉双等^[38]和 SUN 等^[39-40]建立了恒流 PAW 三维准稳态和受控脉冲穿孔 PAW 瞬态热传导模型,根据小孔壁面的力平衡条件,计算了小孔的形状。在 PAW 过程中小孔孔道并非是竖直的,背面小孔中心与焊枪中心存在一定的偏移^[41]。张晓宇等^[42]在考虑小孔孔道弯曲的基础上,提出了中心线弯曲的锥体体积热源,同时热源的作用区域与小孔的动态深度有关,从而体现了小孔对热源分布的影响。上述模型都没有考虑 PAW 过程中的熔池流动和小孔演变。

4.1 PAW 传热与流动模型

为了得到更为合理的小孔形状以及动态的小

孔演变过程,国内外研究者尝试在 PAW 传热与流动模型中耦合特定的界面追踪算法(如小孔壁面平衡方程、VOF 法、Level-set 法等)来计算小孔形状,追踪小孔壁面的动态演变过程。

FAN 等^[43]针对等离子弧定点焊,建立了熔池二维瞬态传热与流动模型,模拟了工件加热-熔池形成-小孔的长大与塌陷。ZHANG 等^[44-45]建立了 PAW 熔池三维瞬态传热与流动模型,使用 VOF 法对熔池自由表面和小孔壁面进行追踪,并提出了改进的双椭球体+锥体组合式体积热源,热源锥体区域的作用深度随小孔深度的瞬时变化而变化,从而在模型中反映了小孔对等离子弧热源分布的影响。PAW 过程中的温度场和流场分布以及小孔动态演变过程如图 12 所示^[45]。上述模型虽然考虑了小孔动态演变对热源分布的影响,但却忽略了小孔对等离子弧力分布的影响。

图12 PAW 熔池流场及小孔动态行为

LI 等^[46]根据 PAW 穿孔过程中电弧热作用的特点,提出了随小孔动态变化的空间曲面热源模型,合理地描述了等离子弧热流在小孔壁面上的瞬时分布特点,建立了随小孔动态变化的等离子弧压力模型。PAW 电弧热流随小孔的动态变化如图 13 所示。在新的电弧热-力模型的基础上,计算了温度场、流场以及小孔动态行为,分析了“等离子弧热力分布-小孔-熔池”的耦合关系^[46-47]。

4.2 等离子弧-熔池一体化 PAW 数值模型

PAW 过程中电弧、小孔与熔池之间存在复杂的相互耦合关系。通过建立包含钨极、喷嘴、弧柱和工件的 PAW 电弧-熔池一体化模型,对等离子弧、小孔和熔池的物理耦合机理和三者之间的热力传递机制进行研究,更为符合物理。

图 13 电弧热流随小孔的动态变化

JIAN 等^[48]和 PAN 等^[49]建立了直流 PAW 钨极-电弧-工件耦合二维轴对称数值分析模型,以研究等离子弧定点焊中的传热传质现象。模型使用 VOF 法追踪等离子弧与熔池的界面,采用热平衡-扩散近似法(LTE-diffusion approximation)处理等离子弧-熔池和等离子弧-钨极的界面(鞘层),从而避免了对鞘层内复杂物理现象的求解。该模型计算了等离子弧的传输行为、熔池的温度场和流场以及小孔的形成与穿孔,忽略了由熔池产生的金属蒸气对等离子弧的影响。

陈树君等^[50]建立了变极性 PAW 的三维瞬态计算模型,提出了随电弧极性变化的分时导电模型,计算了变极性 PAW 电弧的温度场、流场、电流密度和电弧压力的分布情况,以及电弧压力随时间的变化过程。

菅晓霞等^[51]首先在等离子弧定点焊一体化模型中考虑了金属蒸气的影响。模型采用黏度近似法处理金属蒸气质量分数方程中的扩散系数,计算了等离子弧定点焊过程中金属蒸气的产生与扩散,分析了金属蒸气对等离子弧温度场、流场和电磁场的影响,以及对熔池上表面热流密度的影响,如图 14 所示。对比表明,考虑金属蒸气的影响后模型的计算精度有着显著提升。在此基础上, JIAN 等^[52]采用滑移网格技术建立了连续 PAW 焊接时等离子弧-熔池-小孔的三维瞬态数值分析模型,分析了连续焊过程中熔池液态金属的流动行为和小孔前后壁面热力作用的不对称性。图 15 为连续 PAW 过程中电弧和熔池的温度场分布。

图 14 金属蒸气对 PAW 电弧和熔池行为的影响

图 15 连续 PAW 电弧和熔池温度场

5 激光焊小孔与熔池行为的数值分析

小孔的形成是激光深熔焊最为重要的特征,小孔的动态行为是激光焊熔池热力行为研究的重点,对于小孔的建模和处理也一直是激光焊数值分析的核心问题。自 20 世纪 80 年代以来,国内外研究者尝试从不同角度出发提出了多种处理激光深熔焊小孔效应的方法。

5.1 体积热源模型

在以计算温度场为主要目的的激光深熔焊热传导模型中,一些研究者通过建立恰当的体积热源来间接考虑小孔对传热过程的影响。该类数值分析模型在建模时往往不考虑小孔的几何形状,因此极大地简化了数学建模的复杂程度。多种形式的体积热源模型相继被提出,如高斯分布圆锥形体积热源模型^[53]、指数衰减圆柱形体积热源^[54]、热流峰值递增+椎体或曲面旋转体热源^[55-56]。此外,胥国祥等^[54-55]还利用光线追踪法对 KAPLAN 的热平衡小孔模型进行改进,将小孔尺寸与体积热源分布参数建立了一定的联系,从而给出了组合式体积热源分布参数的选择方法。

5.2 预置小孔形状的数值模型

一些研究者假定激光深熔焊熔池达到准稳态后小孔的形状不再发生动态变化,通过预先假定小孔形状的方法来考虑小孔对熔池行为的影响,研究激光深熔焊中熔池传热与流动行为。预置的小孔有圆柱形^[57]、圆台形^[58]或是基于能量或力平衡方程计算的特定形状^[59-61]。目前较为常用的预置小孔形状确定方法是 KAPLAN^[59]提出的点对点能量平衡模型。张转转等^[60]、BACHMANN 等^[61]在 KAPLAN

模型的基础上,使用组合热源反映激光热作用的特点,计算了准稳态下激光深熔焊的熔池温度分布与液态金属流动。

5.3 小孔动态演变的数值模型

X 射线透射成像和高速 CCD 图像均表明,即便使用固定的激光功率,熔池达到准稳态后小孔的形状也不是固定不变的,而是呈现出周期性的振荡状态,甚至会发生闭合和重新开启^[62]。小孔的动态行为不但直接影响激光深熔焊的熔池热力行为,还与气孔等工艺缺陷的形成密切相关。因此,建立具有动态小孔的激光焊数学模型,研究小孔的长大、振荡和塌陷等瞬时行为及其对整个激光深熔焊热力过程的影响是当前激光焊数值分析热点领域之一。

AI 等^[63]根据激光深熔焊过程中的 Fresnel 吸收和反韧致辐射提出了空间衰减的高斯热源+双椭球体组合热源,其中高斯热源代表激光能量在小孔壁面的吸收,双椭球热源则代表着光致等离子体的反韧致辐射。建立了激光深熔焊三维传热与流动模型,使用 VOF 对瞬时小孔壁面和熔池自由表面进行追踪,模拟了激光深熔焊过程中小孔的长大和振荡,以及熔池的温度场和流场。PANWISAWAS 等^[64]则在胥国祥的组合式体积热源基础上建立了激光深熔焊传热与流动模型,模拟了 Ti 合金激光焊中小孔的振荡与塌陷过程,模拟的气孔分布与 X 射线断层摄影图像的结果吻合良好。由此可见,在具有动态小孔的激光焊熔池数值模拟中,组合热源依然是一种常用的对激光热作用的简化处理方式。

虽然组合热源可以在一定程度上表征激光能量在空间中的分布规律,但却不能真正反映激光深熔焊中最为重要的物理现象—激光束在小孔壁面上的多重反射与吸收,如图 16a 所示^[65]。针对该问题,一些研究者提出了使用光线追踪法计算激光束在小孔壁面上的多重反射行为,从而更为准确地表述激光能量在小孔壁面上的分布。目前最为常用的针对激光深熔焊的光束追踪法为直接搜寻法(Direct search method, DSM)。该方法首先将激光离散为多条光束(数百至数千),各条光束具有的激光能量一般在空间上呈高斯分布。通过计算每条光束在小孔壁面上的反射路径和在各个反射点上的吸收率,即可以确定激光在小孔壁面上的能量分布^[65]。图 16b 为使用 DSM 法计算的激光束反射路径^[66]。CHO 等^[67]采用 VOF 法对动态小孔界面进行追踪,并结合基于光线追踪法的多重反射 Fresnel 吸收模型计算了激光能量在小孔壁面的分布规律,模拟了小孔的形成、塌陷过程及气孔缺陷的形成,如图 17 所示。近期, HAN 等^[68]提出了基于逐步搜索法(Progressive

search method, PSM)的多重反射模型,该模型可以提高光线追踪的精度。另外,在 PSM 中每条激光束被进一步离散为多条子光束,因此该模型不但可以

图 16 多重反射与光线追踪

图 17 激光深熔焊小孔及熔池动态行为

计算多重反射, 还可以计算激光的透射与散射。对比表明, 基于 PSM 的激光多重反射模型可以提高激光深熔焊数值模型的计算精度。

PANG 等^[69-70]使用锐利面法对小孔壁面上的蒸发反力、表面张力和 Marangoni 力进行处理, 建立了三维激光深熔焊动态小孔和熔池的锐利面模型, 模拟了熔池的传热、流动与小孔演变。计算了单激光焊和双激光焊时小孔周期性的塌陷与气孔的形成。图 18 为单激光焊中小孔的振荡与塌陷过程^[69]。分析认为小孔的不稳定与壁面上的凸起引起的 Rayleigh 不稳定流有关。另外, PANG 等^[71]在对 Ti 合金 CO₂ 激光深熔焊的数值分析中发现, 工艺气孔的数量和尺寸与小孔深度的振荡程度密切相关。

图 18 小孔的振荡与塌陷

5.4 小孔内气相的模拟

在激光深熔焊过程中, 小孔内部实际充满着高温、高流速、可压缩的金属蒸汽或光致等离子体,

气相的传热与流动行为极为复杂, 其对于激光能量的吸收和小孔动态演变也有着一定的影响。现有的激光深熔焊模型多为单相模型(热传导模型)或固液双相模型(熔池传热与流动模型), 虽然在使用 VOF 法对小孔壁面进行追踪时一般需要包含气相, 但现有的模型大多不对其中的气相进行处理, 故不能准确反映气相的物理行为。

TAN 等^[72-73]在庞盛永的激光深熔焊锐利面模型基础上耦合了材料蒸发模型和 Fe 蒸气的传输方程, 通过假定金属蒸气为理想气体, 计算了小孔内铁蒸气的分布以及流速。计算结果表明, 激光的多重反射与金属蒸气对激光能量的吸收(反韧致辐射)都对激光能量在小孔壁面上的分布有一定影响。庞盛永等建立了激光深熔焊金属蒸气-小孔-熔池的多相物理耦合模型, 计算了小孔的动态演变和小孔内金属蒸气的流动, 模型获得的焊缝尺寸、金属蒸气流速等数据均和试验测定值较为接近^[74-75]。图 19 为计算的小孔内金属蒸气流场分布^[74]。同时, 该模型着重考虑了大气压力对小孔及其内部金属蒸气的影响, 认为当不考虑大气压时, 模拟的小孔壁面温度偏低, 而金属蒸气流速显著偏高。

图 19 激光深熔焊小孔内金属蒸气的流场

气液固三相激光焊模型的计算成本通常较高, 这主要是因为金属蒸气与液态金属的流速存在巨大差异(金属蒸气的流速通常为数百 m/s, 而液态金属的流速一般不超过 1 m/s), 若想准确地金属蒸气流速, 整个模型必须使用极小的时间步长。针对该问题, 近期, PANG 等^[76]首次提出了多时间尺度计算法, 小孔内部区域采用纳秒级的时间步长, 熔池区域采用微秒级的时间步长, 从而在保证计算精度的前提下极大地提高了计算效率。

6 激光-电弧复合焊接的数值模拟

由于激光与电弧的协同效应, 激光-电弧复合焊

接工艺兼备激光焊和电弧焊各自的优点,又克服了二者的不足,从而实现优质、高效的焊接。近年来,国内外研究者对激光-电弧复合热源焊接工艺开展了相关的数值分析研究。胥国祥等^[55-56]基于激光+GMAW 三维瞬态热传导模型模拟了焊接过程中的温度场与焊缝形状。ZHANG 等^[77]基于预置小孔的激光深熔焊模型,建立了激光+GMAW 熔池三维传热与流动数值分析模型,图 20 为模型计算的熔池温度场及流场。但该模型没有考虑小孔动态演变、熔滴冲击等重要因素对焊接热力过程的影响。

图 20 激光+GMAW 复合焊熔池温度场及流场

由于激光-电弧复合热源焊接熔池行为的复杂性,除了常规的传热与流动外,还需要在模型中考虑小孔动态演变、熔池自由表面变形、激光与电弧的相互影响等诸多因素。ZHOU 等^[78]基于多重反射计算了激光能量在小孔壁面上的分布,将电弧热流处理为高斯面热源,同时在模型中引入高速向下飞行的熔滴,使用 VOF 法对小孔和熔池表面进行追踪,建立了激光+GMAW 同轴定点焊二维传热与流动模型。计算表明,熔滴冲击对于激光-电弧复合焊熔池中的液态金属流动和元素分布都有着重要影响。CHO 等^[79-80]基于 FLOW 3D 软件建立了激光+GMAW 复合热源焊接三维数值分析模型,分别采用高斯热源模型和基于光线追踪的小孔模型处理 GMAW 电弧和激光的热源分布,同时考虑了熔滴对熔池的能量、动量和质量影响,计算了激光+GMAW 复合焊过程中的小孔演变、熔池温度场和流场等,如图 21 所示^[80]。结果表明,复合焊中小孔底部会形成一个顺时针的环流,对熔池具有搅拌作用,有利于合金元素的均匀分布和气泡的逸出。

上述模型均将激光与电弧独立处理,没有考虑激光和电弧的相互作用。WU 等^[81]通过在电弧热源模型中引入压缩因子 k ,初步考虑了激光对 GMAW 电弧的引导与压缩作用,建立了激光+GMAW 熔池三维传热与流动数值分析模型。模型模拟了激光+GMAW 复合焊接过程中的温度场和流场以及小孔的振荡和塌陷,熔池内气泡的形成及其逸出路径,如图 22 所示^[81]。

图 21 不锈钢激光+GMAW 复合焊熔池行为

图 22 激光+GMAW 熔池及小孔动态行为

现有的激光电弧复合热源焊接数值模型大多基于已有的激光焊和(或)电弧焊模型建立,已经可以在一定程度上反映激光电弧复合热源焊接过程中复杂的热力传输行为,但对于激光和电弧之间的相互作用机制模型还缺乏深入考虑。

7 结论与展望

(1) 电极(钨极或焊丝)-电弧-熔池一体化的数值分析模型是当前定量研究电弧传输机制和熔滴过渡行为的重要手段,金属蒸气对于电弧和熔滴有着显著影响,在模型建立时应当予以考虑。

(2) 综合考虑传热、液态金属流动、熔池自由表面变形以及焊缝金属凝固的数值分析模型可以计

算高速焊过程中的温度场、流场以及焊缝成形, 从而定量预测与揭示咬边、驼峰焊道等焊缝成形缺陷的形成及其内在机理。

(3) 在针对 PAW 熔池热力行为的数值分析建模中应充分考虑小孔的动态演变对熔池行为的影响。另外, 可以通过建立随小孔形状动态变化的等离子弧热力分布模型或钨极-电弧-熔池一体化模型研究“等离子弧热力-小孔-熔池”的耦合关系。

(4) 在激光深熔焊数值分析中, 组合式体积热源是简化处理激光能量在小孔壁面上分布的有效手段, 但该方法并不能反应激光深熔焊中光束多重反射的物理过程, 而基于光线追踪的激光多重反射模型则可以较为合理地描述激光能量的分布。小孔内金属蒸气(或光致等离子体)的传热与流动行为也是目前激光深熔焊数值分析的重要研究方向。

(5) 基于已有的激光焊和电弧焊模型, 现有的激光-电弧复合热源焊接数值分析模型已经可以在一定程度上反映激光电弧复合热源焊接过程中复杂的热力传输行为, 但对于激光和电弧之间的相互作用仍有待于深入系统的研究。

参 考 文 献

- [1] 林尚扬. 我国焊接生产现状与焊接技术的发展[J]. 船舶工程, 2005, 27(5): 15-24.
LIN Shangyang. Present situation of welding production and development trend of welding technology in China [J]. Ship Engineering, 2005, 27(5): 15-24.
- [2] 武传松. 焊接热过程与熔池形态[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
WU Chuansong. Thermal processes and weld pool behaviors of welding[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [3] TANAKA M, TERASAKI H, USHIO M, et al. A unified numerical modeling of stationary tungsten-inert-gas welding process[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2002, 33(7): 2043-2052.
- [4] TANAKA M, TASHIRO S, SATOH T, et al. Influence of shielding gas composition on arc properties in TIG welding[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2013, 13(3): 225-231.
- [5] KONISHI K, SHIGETA M, TANAKA M, et al. Numerical study on thermal non-equilibrium of arc plasmas in TIG welding processes using a two-temperature model[J]. Welding in the World, 2016, 61(1): 197-207.
- [6] KIM W H, FAN H G, NA S J. A mathematical model of gas tungsten arc welding considering the cathode and the free surface of the weld pool[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1997, 28(4): 679-686.
- [7] YAMAMOTO K, TANAKA M, TASHIRO S, et al. Metal vapour behaviour in thermal plasma of gas tungsten arcs during welding[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2013, 13(6): 566-572.
- [8] TANAKA M, YAMAMOTO K, TASHIRO S, et al. Time-dependent calculations of molten pool formation and thermal plasma with metal vapour in gas tungsten arc welding[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2010, 43(43): 434009.
- [9] MOUGENOT J, GONZALEZ J J, FRETON P, et al. Argon and Arca1.37 plasma characteristics in a TIG configuration [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46: 495203.
- [10] SCHNICK M, FUESSEL U, HERTEL M, et al. Numerical investigations of arc behaviour in gas metal arc welding using ANSYS CFX [J]. Frontiers of Materials Science, 2011, 5(2): 98-108.
- [11] SCHNICK M, FÜSSEL U, HERTEL M, et al. Numerical investigations of the influence of metal vapour in GMA welding [J]. Welding in the World, 2011, 55(11-12): 114-120.
- [12] MURPHY A B, THOMAS D G. Prediction of arc, weld pool and weld properties with a desktop computer model of metal-inert-gas welding [J]. Welding in the World, 2017: 623-633.
- [13] LU F, WANG H P, MURPHY A B, et al. Analysis of energy flow in gas metal arc welding processes through self-consistent three-dimensional process simulation[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2014, 68(1): 215-223.
- [14] WANG L L, LU F G, WANG H P, et al. Effects of shielding gas composition on arc profile and molten pool dynamics in gas metal arc welding of steels [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 47(46): 465202.
- [15] WANG X, FAQ D, HUANG J, et al. Numerical simulation of arc plasma and weld pool in double electrodes tungsten inert gas welding[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 85: 924-934.
- [16] DING X P, LI H, WEI H L, et al. Numerical analysis of arc plasma behavior in double-wire GMAW[J]. Vacuum, 2016, 124: 46-54.
- [17] WANG F, HOU W K, HU S J, et al. Modelling and

- analysis of metal transfer in gas metal arc welding [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2003, 36(9): 1143.
- [18] HU J, TSAI H L. Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part I: The arc[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2007, 50(50): 833-846.
- [19] RAO Z H, HU J, LIAO S M, et al. Modeling of the transport phenomena in GMAW using argon-helium mixtures. Part I: The arc[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2010, 53(25-26): 5707-5721.
- [20] XU G, HU J, TSAI H L. Three-dimensional modeling of arc plasma and metal transfer in gas metal arc welding [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(7): 1709-1724.
- [21] OGINO Y, HIRATA Y. Numerical simulation of metal transfer in argon gas-shielded GMAW [J]. *Welding in the World*, 2015, 59(4): 465-473.
- [22] OGINO Y, HIRATA Y, MURPHY A B. Numerical simulation of GMAW process using Ar and an Ar-CO₂ gas mixture[J]. *Welding in the World*, 2016, 60(2): 345-353.
- [23] HERTEL M, ROSE S, FÜSSEL U. Numerical simulation of arc and droplet transfer in pulsed GMAW of mild steel in argon [J]. *Welding in the World*, 2016, 60(5): 1055-1061.
- [24] HERTEL M, TRAUTMANN M, JÄCKEL S, et al. The role of metal vapour in gas metal arc welding and methods of combined experimental and numerical process analysis[J]. *Plasma Chemistry & Plasma Processing*, 2017, 37(3): 531-547.
- [25] NGUYEN T C, WECKMAN D C, JOHNSON D A, et al. High speed fusion weld bead defects[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2006, 11(6): 618-633.
- [26] WEI P S. Thermal science of weld bead defects: A review [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2011, 133(3): 031005.
- [27] SUDNIK V A. Research into fusion welding technologies based on physical-mathematical models[J]. *Welding and Cutting*, 1991, 10: 588-590.
- [28] OHJI T, MIYASAKA F, YAMAMOTO T, et al. Mathematical model for MAG welding in a manufacturing environment [J]. *Paton Welding Journal*, 2006, 3(11): 11-15.
- [29] MENG X, QIN G, BAI X, et al. Numerical analysis of undercut defect mechanism in high speed gas tungsten arc welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 236: 225-234.
- [30] 陈姬, 武传松. 高速 GMAW 驼峰焊道形成过程的数值分析[J]. *金属学报*, 2009, 45(9): 1070-1076.
- CHEN Ji, WU Chuansong. Numerical simulation of forming process of humping bead in high speed GMAW[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2009, 45(9): 1070-1076.
- [31] CHO M H, FARSON D F, DAVE F. Understanding bead hump formation in gas metal arc welding using a numerical simulation[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2007, 38(2): 305-319.
- [32] WU D, HUA X, YE D, et al. Understanding of humping formation and suppression mechanisms using the numerical simulation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 104: 634-643.
- [33] XU G, CAO Q, HU Q, et al. Modelling of bead hump formation in high speed gas metal arc welding[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2016, 21(8): 700-710.
- [34] MENG X, QIN G, ZOU Z. Investigation of humping defect in high speed gas tungsten arc welding by numerical modelling[J]. *Materials & Design*, 2016, 94: 69-78.
- [35] MENG X, QIN G, ZOU Z. Sensitivity of driving forces on molten pool behavior and defect formation in high-speed gas tungsten arc welding[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 107: 1119-1128.
- [36] 武传松, 王怀刚, 张明贤. 小孔等离子弧焊接热场瞬时演变过程的数值分析[J]. *金属学报*, 2006, 42(3): 311-316.
- WU Chuansong, WANG Huaigang, ZHANG Mingxian. Numerical analysis of transient development of temperature field in keyhole plasma arc welding[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2006, 42(3): 311-316.
- [37] WU C S, HU Q X, GAO J Q. An adaptive heat source model for finite-element analysis of keyhole plasma arc welding [J]. *Computational Materials Science*, 2009, 46(1): 167-172.
- [38] 霍玉双, 武传松, 陈茂爱. 等离子弧焊接小孔形状和穿孔过程的数值分析[J]. *金属学报*, 2011, 47(6): 706-712.
- HUO Yushuang, WU Chuansong, CHEN Maoai. Numerical simulation of keyhole shape and transformation from partial to open states in plasma arc welding[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2011, 47(6): 706-712.
- [39] SUN J H, WU C S, FENG Y H. Modeling the transient heat transfer for the controlled pulse key-holing process

- in plasma arc welding[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011, 50(9): 1664-1671.
- [40] SUN J H, WU C S, CHEN M A. Numerical analysis of transient temperature field and keyhole geometry in controlled pulse key-holing plasma arc welding[J]. *Numerical Heat Transfer Part A-Applications*, 2013, 64(5): 416-434.
- [41] LIU Z M, WU C S, CHEN J. Sensing dynamic keyhole behaviors in controlled-pulse keyholing plasma arc welding[J]. *Welding Journal*, 2013, 92(12): 381-389.
- [42] 张晓宇, 武传松. 考虑小孔后向偏移的等离子弧焊接热过程模型[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(14): 66-71.
- ZHANG Xiaoyu, WU Chuansong. Thermal process model of plasma arc welding with considering the backside keyhole deviation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(14): 66-71.
- [43] FAN H G, KOVACEVIC R. Keyhole formation and collapse in plasma arc welding [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1999, 32(22): 2902-2909.
- [44] ZHANG T, WU C S, FENG Y H. Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in keyhole plasma arc welding[J]. *Numerical Heat Transfer Part a-Applications*, 2011, 60(8): 685-698.
- [45] WU C S, ZHENG W, CHEN M A. Improving the prediction accuracy of keyhole establishment time in plasma arc welding[J]. *Numerical Heat Transfer Part a: Applications*, 2014, 66(4): 420-432.
- [46] LI T Q, WU C S. Numerical simulation of plasma arc welding with keyhole-dependent heat source and arc pressure distribution[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 78(1-4): 593-602.
- [47] LI T Q, WU C S. An analytic formula describing the plasma arc pressure distribution[J]. *China Welding*, 2014, 23(2): 7-11.
- [48] JIAN X, WU C S. Numerical analysis of the coupled arc-weld pool-keyhole behaviors in stationary plasma arc welding[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 84: 839-847.
- [49] PAN J, HU S, YANG L, et al. Numerical analysis of the heat transfer and material flow during keyhole plasma arc welding using a fully coupled tungsten-plasma-anode model[J]. *Acta Materialia*, 2016, 118: 221-229.
- [50] 陈树君, 徐斌, 蒋凡. 变极性等离子弧焊电弧物理特性的数值模拟[J]. *金属学报*, 2017, 53(5): 631-640.
- CHEN Shujun, XU Bin, JIANG Fan. Numerical simulation of physical characteristics of variable polarity plasma arc welding [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2017, 53(5): 631-640.
- [51] 菅晓霞, 武传松. Fe 蒸气对等离子弧焊接熔池行为的影响[J]. *金属学报*, 2016, 52(11): 1467-1476.
- JIAN Xiaoxia, WU Chuansong. Influence of Fe vapor on weld pool behavior of plasma arc welding[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, 52(11): 1467-1476.
- [52] JIAN X X, WU C S, ZHANG G, et al. A unified 3D model for an interaction mechanism of the plasma arc, weld pool and keyhole in plasma arc welding[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, 48(46): 465504.
- [53] 李存洲. 激光深熔焊热场的数值模拟研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2004.
- LI Cunzhou. Numerical study of thermal field in deep penetration laser welding[D]. Beijing: Beihang University, 2004.
- [54] 陈军城, 俞海良, 芦凤桂, 等. 高强度激光穿透焊熔池温度场数值模拟[J]. *应用激光*, 2008, 28(3): 177-180.
- CHEN Juncheng, YU Hailiang, LU Fenggui, et al. Numerical simulation for temperature field in molten pool of deep penetration laser welding of high strength steel[J]. *Applied Laser*, 2008, 28(3): 177-180.
- [55] 胥国祥, 武传松, 秦国梁, 等. 激光+GMAW 复合热源焊焊缝成形的数值模拟 I: 表征激光作用的体积热源分布模式[J]. *金属学报*, 2008, 44(4): 478-482.
- XU Guoxiang, WU Chuansong, QIN Guoliang, et al. Numerical simulation of weld formation in laser+GMAW hybrid welding I: Volumetric distribution mode describing laser thermal action[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2008, 44(4): 478-482.
- [56] 胥国祥, 武传松, 秦国梁, 等. 激光+GMAW 复合热源焊焊缝成形的数值模拟 II: 组合式体积热源的作用模型[J]. *金属学报*, 2008, 44(6): 641-646.
- XU Guoxiang, WU Chuansong, QIN Guoliang, et al. Numerical simulation of weld formation in laser+GMAW hybrid welding II: Combined volumetric distribution model of hybrid welding heat source[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2008, 44(6): 641-646.
- [57] POSTACIOGLU N, KAPADIA P, DOWDEN J. A theoretical model of thermocapillary flows in laser welding[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1991, 24(1): 15-20.
- [58] GATZEN M, TANG Z, VOLLERTSEN F. Effect of electromagnetic stirring on the element distribution in laser beam welding of aluminium with filler wire[J].

- Physics Procedia, 2011, 12: 56-65.
- [59] KAPLAN A. A model of deep penetration laser welding based on calculation of the keyhole profile[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 1994, 27(9): 1805-1814.
- [60] 张转转, 胥国祥, 武传松. 基于小孔形状的 TCS 不锈钢激光+GMAW-P 复合焊热场模型[J]. 金属学报, 2011, 47(11): 1450-1458.
- ZHANG Zhuanzhuan, XU Guoxiang, WU Chuansong. Thermal field model for laser+GMAW-P hybrid welding of TCS stainless steel based on the predicted keyhole shape[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(11): 1450-1458.
- [61] BACHMANN M, AVILOV V, GUMENYUK A, et al. Experimental and numerical investigation of an electromagnetic weld pool support system for high power laser beam welding of austenitic stainless steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(3): 578-591.
- [62] MATSUNAWA A. Problems and solutions in deep penetration laser welding[J]. Science and Technology of welding and Joining, 2001, 6(6): 351-354.
- [63] AI Y, JIANG P, SHAO X, et al. A three-dimensional numerical simulation model for weld characteristics analysis in fiber laser keyhole welding[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2017, 108: 614-626.
- [64] PANWISAWAS C, PERUMAL B, WARD R M, et al. Keyhole formation and thermal fluid flow-induced porosity during laser fusion welding in titanium alloys: Experimental and modeling[J]. Acta Materialia, 2016, 126: 251-263.
- [65] CHO J H, NA S J. Implementation of real-time multiple reflection and Fresnel absorption of laser beam in keyhole[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2006, 39(24): 5372.
- [66] DAL M, FABBRO R. An overview of the state of art in laser welding simulation [J]. Optics & Laser Technology, 2016, 78: 2-14.
- [67] CHO W I, NA S J, THOMY C, et al. Numerical simulation of molten pool dynamics in high power disk laser welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(1): 262-275.
- [68] HAN S W, AHN J, NA S J. A study on ray tracing method for CFD simulations of laser keyhole welding : Progressive search method[J]. Welding in the World, 2016, 60(2): 247-258.
- [69] PANG S, CHEN L, ZHOU J, et al. A three-dimensional sharp interface model for self-consistent keyhole and weld pool dynamics in deep penetration laser welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2010, 44(2): 025301.
- [70] PANG S, CHEN W, ZHOU J, et al. Self-consistent modeling of keyhole and weld pool dynamics in tandem dual beam laser welding of aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 217: 131-143.
- [71] PANG S, CHEN W, WANG W. A quantitative model of keyhole instability induced porosity in laser welding of titanium alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2014, 45(6): 2808-2818.
- [72] TAN W, SHIN Y C. Analysis of multi-phase interaction and its effects on keyhole dynamics with a multi-physics numerical model[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 47(34): 345501.
- [73] TAN W, BAILEY N S, SHIN Y C. Investigation of keyhole plume and molten pool based on a three-dimensional dynamic model with sharp interface formulation[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(5): 055501.
- [74] PANG S, CHEN X, ZHOU J, et al. 3D transient multiphase model for keyhole, vapor plume, and weld pool dynamics in laser welding including the ambient pressure effect[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 74: 47-58.
- [75] PANG S, SHAO X, LI W, et al. Dynamic characteristics and mechanisms of compressible metallic vapor plume behaviors in transient keyhole during deep penetration fiber laser welding[J]. Applied Physics A, 2016, 122(7): 1-18.
- [76] PANG S Y, CHEN X, LI W, et al. Efficient multiple time scale method for modeling compressible vapor plume dynamics inside transient keyhole during fiber laser welding[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 77: 203-214.
- [77] ZHANG Z Z, WU C S. Effect of fluid flow in the weld pool on the numerical simulation accuracy of the thermal field in hybrid welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2015, 20: 215-223.
- [78] ZHOU J, TSAI H L. Modeling of transport phenomena in hybrid laser-MIG keyhole welding[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2008, 51(17-18): 4353-4366.
- [79] CHO W I, NA S J, CHO M H, et al. Numerical study of alloying element distribution in CO₂ laser-GMA hybrid

- welding[J]. Computational Materials Science, 2010, 49(4): 792-800.
- [80] CHO J H, NA S J. Three-dimensional analysis of molten pool in GMA-laser hybrid welding [J]. Welding Journal, 2009, 88(2): 35-43.
- [81] WU C S, ZHANG H T, CHEN J. Numerical simulation of keyhole behaviors and fluid dynamics in laser-gas metal arc hybrid welding of ferrite stainless steel plate[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 25: 235-245.
- 作者简介: 武传松(通信作者), 男, 1959 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为焊接物理、高效焊接工艺过程的数值模拟与测试控制。
E-mail: wucs@sdu.edu.cn
- 孟祥萌, 男, 1990 年出生, 博士研究生。主要研究方向为高速电弧焊模拟及工艺。
E-mail: xmmengsdu@gmail.com

第 7 届上银优秀机械博士论文奖——优秀奖

基于金刚石铣削伺服的微纳机械制造系统研究

作者: 朱志伟

毕业学校: 香港理工大学

指导教师: 杜雪

复杂微纳结构表面指一类具有多层次及多尺度周期结构, 且主要特征尺寸介于数十纳米至数十微米的功能表面, 在诸多领域被广泛认为极具发展前景。为突破现行机械加工方法对复杂微纳结构的创成能力, 本文融合刀具伺服车削与飞刀铣削原理性优点, 提出了一种金刚石铣削伺服(Diamond milling servo, DMS)加工新方法。其基本特征在于: 切削过程中, 刀具跟随机床主轴旋转做主切削运动, 而工件固连于伺服运动轴随之做快速往复运动以跟踪复杂切削轨迹, 在侧向运动辅助下切削过程覆盖全工件表面以创成复杂曲面。

为进一步丰富 DMS 对复杂微纳结构的制造能力, 本文在 DMS 基本框架内发展并系统研究了系列加工新方法。主要包括: ① 结合多轴刀具伺服思想, 沿 DMS 侧向进给方向引入往复伺服运动, 提出双轴 DMS 切削方法以调制表面残留刀痕; ② 考虑 DMS 刀具运动多切削方向特性, 提出交叉 DMS 切削方法以重复切削表面残留刀痕至理想结构; ③ 针对复杂微纳结构多尺度特征, 提出具有时空多尺度切削特征的旋转振动 DMS 方法, 以一次加工获得多尺度复杂微纳结构表面。

针对所提出的诸多切削新方法, 系统深入地研究了各方法基本原理、切削运动学、最优刀具路径、表面生成机制、及机电伺服装备的设计与原型样机制造, 为加工过程参数选取及加工方法的实际应用提供了理论基础及技术支撑。最终, 通过典型微透镜阵列、连续/非连续微纳混合结构表面、光学衍射均化表面、及脆性材料切削等, 实际验证了所提出 DMS 及其系列衍化新方法的原理可行性及优越性。

本文的主要研究意义可归纳如下: ① 提出了基于金刚石铣削伺服的系列机械微纳制造新方法为复杂微纳结构的创成提供了一种高效可行的新途径; ② 所提出之切削新方法从根本上解决了现行复杂光学曲面超精密机械加工诸多固有不足, 极大的提升了复杂光学曲面的机械加工能力; ③ 与现行微纳结构创成的主流特种加工方法相比, 所提出切削创成的策略将获得对不同材料及结构拓扑的创成柔性, 从而促进其在诸多领域的进一步广泛应用。