

焊接过程多场耦合模拟研究进展*

余律波,王少刚,魏艳红

(南京航空航天大学材料科学与技术学院,南京 211106)

[摘要] 焊接是一个涉及到多物理场耦合的复杂过程,采用传统的试验方法研究焊接现象存在成本高、效率低、局限性问题,数值模拟技术很好地解决了这些问题,因此该技术已成为国内外焊接工作者研究的热点,在航空航天、汽车船舶等领域得到越来越广泛的应用。介绍了影响熔池形态和焊接变形的因素以及外加磁场对改善焊缝成形的作用,重点论述了数值模拟技术在多场耦合作用下焊接熔池形态、应力与变形以及焊缝成形控制等方面的应用及研究现状,在此基础上提出了焊接过程多场耦合模拟的未来发展动向。

关键词: 焊接; 数值模拟; 多场耦合

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.15.064



余律波

南京航空航天大学硕士研究生,主要研究方向为焊接数字化软件和焊接过程模拟。

随着科学技术的发展,现代焊接技术中使用的焊接热源在早期的能源基础上又开发出了电磁、激光等新的能源方式,因此在焊接过程中存在更多的物理场耦合作用。深入了解复杂多物理场耦合及其相互作用机制,可为研究焊接过程中的熔池形态、应力变形及焊缝控制成形等提供重要的理论依据。通过对复杂焊接过程进行数值模拟,有助于掌握焊接现象的本质特征,通过优化焊接结构设计与工艺设计,进一步提高焊接接头的质量,同时大大减少试验工作量,促进焊接生产从“理论—试验—生产”模式向“理论—数值模拟—生产”模式转变。考虑到多物理场作用的焊接模拟技术更加接近实际,计算结果更为精确,对其进行开发和利用将使焊接技术实现从经验走向科学、从定性转向定量的飞跃。目前,焊接多场耦合模拟在航空发动机制造领域的应用逐渐广泛起来,通过对航空发动机机匣、叶片等构件温度场及应力变形的模拟,对于优化焊接工艺、控制焊后残余应力、节省成本以

及提高构件使用寿命和可靠性等,具有重要意义。

焊接熔池热场—流场耦合计算

1 熔池形态的影响因素

焊接过程中的熔池形态与焊接质量密切相关,改善熔池的形态,不仅对改善焊缝形状,也对优化焊缝组织、提高接头的力学性能起到重要作用。实践表明,焊接过程中的热场和流场为影响熔池形态的最主要因素,这是由于:(1)焊接热过程主要决定熔池的体积,表现为温度场对熔池的影响。通常,焊接热输入越大,熔深越深,反之越浅。同时熔池中由于温度分布不均匀导致液态金属密度差异产生浮力使得液态金属流动,影响熔池的形态。(2)焊接熔池的流场通过熔池内部流体的流动从而影响到熔池的形状。在焊接过程中,熔池中液态金属受到流体自身或多物理场所产生作用力的影响,如重力、浮力、表面张力、电磁力等,这些作用力影响流体的流动并在焊件冷却后形

* 基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD); 中央高校基金重大项目培育基金项目(NP2016204)。

成多样的焊缝形貌。

2 熔池形态的数值模拟

数值模拟技术是通过求解基于物理基础的偏微分方程来描述焊接过程,能够处理焊接过程中复杂的热源模型、传热传质以及非线性问题等。早期的焊接热过程数值模拟建立在一定的假设条件基础上,如忽略熔池内部流体的流动、电弧处于静止状态、熔池表面不变形等。20世纪80年代,Oreper等^[1]首次在分析流体流动及传热过程中考虑了表面张力、浮力、电磁力等作用力的影响,并建立了数学模型。在此基础上,国内外学者对焊接数值模拟进行了大量的探索研究,并取得了一定进展。

Cho等^[2]对各种弧焊焊接熔池进行了较多的研究,在小电流埋弧焊熔池行为分析过程中,建立了三维数值传热和流体流动模型,并利用有限元和计算流体力学的方法求解壁流边界模型,深入地研究了熔池流体动态机制以及相应焊缝成形机理,模拟结果与试验结果吻合较好。Pan等^[3]在研究铝合金变极性钨极氩弧焊的熔池行为和焊缝成形过程中,采用控制体积法计算动量和能量传输方程,并提出一个三维计算模型,试验结果对于熔池动态行为及焊缝缺陷形成机理的揭示,为进一步提高焊接生产率提供了良好的基础。图1为试验焊缝纵横截面与模拟结果的对比。

山东大学的赵朋成^[4]研究全熔透TIG焊接熔池表面变形动态行为与工件熔透程度的相关性,充分考虑了三维温度场、流场与熔池表面变形的耦合关系,建立了TIG焊接熔池瞬时行为的数值模型,并计算了整个焊接过程中熔池的演变过程。南京航空航天大学汪奇兵^[5]考虑温度场、流场和应力场对Invar钢激光-MIG复合焊接熔池的影响,采用高斯旋转体热源和双椭球热源组合模型进行计算求解,模拟所得的熔池形态与实际焊接所得的焊缝形貌吻合较好。

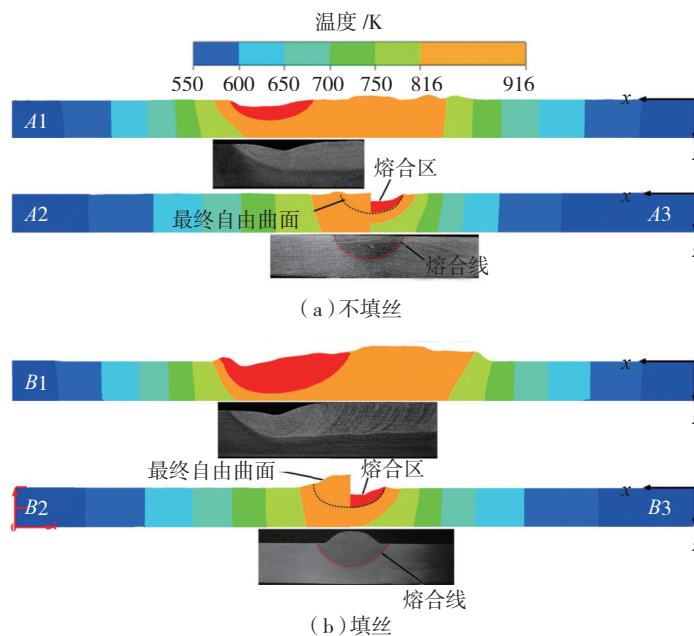
华中科技大学的庞盛永^[6]对激光深熔焊接熔池行为进行了大量的研究,建立了描述瞬态小孔和运动熔池耦合行为的激光深熔焊接三维间断耦合模型以及激光填丝焊接过程中焊丝、小孔和熔池之间瞬态耦合行为的三维数学模型,开发了相应的求解程序,通过数值模拟获得了与X射线试验结果吻合良好的瞬态小孔行为和熔池内部流动趋势。

从国内外的研究进展来看,有关焊接热过程及熔池形态的数值模拟已取得了一定进展并逐渐趋于完善。根据焊接方式以及外加物理场的不同,研究人员充分考虑到多物理场各自的作用机制并对数值模型进行修正,较好地描述了各种焊接方式下的熔池形态,揭示其形成规律,通过数值模拟和试验验证等方式对焊缝形状及其力学性能加以改善,得到了较好的效果。

热场 - 应力 - 应变场及焊接变形预测

1 焊接变形的影响因素

焊接是对金属局部进行快速加热和冷却的过程,加热和冷却的不均匀容易导致被焊材料中的应力与应变不断发生变化,最终在焊接结构中存在的残余应力与变形对构件的质量将产生严重的不利影响,甚至造成产品报废或者留下安全隐患。因此,对于焊接应力与变形的计算分析具有重要的现实意义。影响焊接变形的因素涉及到焊接过程中多物理场的耦合作用。(1)应力场是影响焊接变形最主要的因素。焊接过程中产生的应力随时间不断变化,且各部件之间的应力相互制约,成为影响焊接构件形变量的主要因素。(2)焊接过程中温度场的分布与应力应变密切相关。温度场不仅直接通过热应力应变,而且间接通过引起微观组织变化所产生的相变应力应变对焊接构件的应变产生重要影响。(3)固态相变场对焊接变形的影响不可忽视。由于温度的改变,相变时体积发生膨胀和收缩。固态相变场的变化将在构件中产生相应的拉压应力并对焊接变形产生影响。



注:A1和B1是计算工件的纵向截面;A2和B2是工件的最终表面;A3和B3是焊接过程中的最大熔化截面。

图1 试验焊缝纵横截面与模拟结果的比较

Fig.1 Comparison between experimental cross section and simulation results

2 应力变形的数值模拟

焊接应力与变形一直是焊接工作者研究的重点,20世纪70年代,日本学者上田幸雄等应用材料热弹性理论,考虑材料的力学性能与温度之间的关系,在有限元计算的基础上推导出了数值模拟中焊接热应力的表达式,为焊接应力变形模拟的发展奠定了坚实的基础。近年来,Wang等^[7]对10Ni5CrMoV钢TIG焊接头的焊后残余应力进行有限元分析,在模拟计算过程中充分考虑了材料的硬化规律以及固态相变场,并通过试验测量对模拟结果进行了验证。图2为模拟分析所得的纵向残余应力分布图。

Bonazzi等^[8]利用有限元软件Abaqus对铝合金薄板T型MIG焊接头进行变形仿真模拟,分析了材料的硬度、瞬态三维温度场以及应力场的分布,结果可以很好地预测焊接引起的变形,并为扩大全球数据库、促进铝合金薄板在汽车车身制造业中的应用提供了新的数据。Gietka等^[9]采用有限元分析法,对双相钢多道焊接头的应力应变进行了数值分析,在模拟过程中考虑了热、力学性能以及冶金等方面的因素,得到了应力与位移的分布。Ma等^[10]在预测焊接变形和发展固有应变理论方面作出了大量的贡献,在比较不同能量比对激光-电弧复合焊接对接接头残余应力分布的影响过程中,自行开发了耦合温度场和应力场的三维热弹性有限元程序,模拟了焊接变形和残余应力的分布并详细讨论了能量比的影响,最终试验验证良好。Cao等^[11]以电子束增材制造Ti-6Al-4V平板的热机械行为作为研究对象,利用数值模拟及试验验证的方法计算分析了该合金的热变形和残余应力,提出了一个三维瞬态完全耦合的热模型。

国内对于焊接应力与变形的数值模拟始于20世纪70年代,西安交通大学的楼志文等^[12]首先在焊接温

度场和热弹性应力场的分析中使用了数值模拟方法,并编写了热弹性有限元计算程序。随后,上海交通大学与日本大阪大学合作研究了三维焊接应力和变形的数值分析,提高了模型的计算精度和收敛性,完善了三维焊接应力变形的分析程序,取得了较大的研究进展^[13]。武汉大学李冬林^[14]基于ANSYS软件,对焊接过程中的温度场、应力场以及焊后残余应力与变形进行了三维实时动态模拟研究,其分析方法在平板堆焊的实例计算中得到了有效验证。哈尔滨工业大学的宋奎晶^[15]对TA15钛合金TIG焊热影响区组织以及力学本构关系进行了研究,在应力应变部分计算了高低温下相变应变与相变塑性对焊接残余应力变形的影响。上海交通大学的李勇志^[16]在研究低合金高强度钢焊接过程中采用焊接试验与数值模拟相结合的方法,分析了焊接过程中瞬态应力应变的演变规律,综合考虑材料物理性能、加工硬化、固态相变以及混合相力学性能对焊接应力变形的影响,并建立了三维的多场耦合模型,残余应力变形的计算结果与试验吻合良好,图3为焊接过程中的瞬态温度及应力分布云图。

南京航空航天大学米高阳等^[17-18]通过研究Q235钢激光焊接过程中温度、相变以及应力的相互作用机制,在相变动力学基础上构建了一个热-相变-弹性(Thermal-Metallurgical-Mechanical, TMM)模型,设计了模型

的求解方法并对模拟计算结果进行了试验验证。沈阳航空航天大学的肖翰林^[19]通过数值模拟技术研究航空发动机薄壁机匣的典型接头,采用有限元软件分别对电子束焊和TIG焊的接头进行模拟,模拟结果较好地体现了温度场对应力变形以及二次低温热加工对焊后残余应力的影响,并为机匣部件和机匣整体的模拟奠定了基础,对改进航空发动机复杂薄壁机匣的焊接工艺方案具有实际指导意义。

综合国内外的研究进展,应力变形的数值模拟研究从早期的温度-应力模型发展到近期的温度-组织-应力耦合模型,同时从宏观和微观角度考虑应力变形的影响因素,并根据实际情况对模型进行完善,取得了较好的效果。

热场-流场-磁场耦合计算及焊缝成形控制

1 外加磁场改善焊缝成形机理

利用外加磁场的焊接工艺技术近年来逐渐发展完善,外加磁场主要有:横向、纵向和尖角形磁场,且都分为恒定和脉冲两种类型。在焊接过程中根据不同工艺要求改变所加磁场的强度和脉冲频率,从而达到控制焊缝成形的目的。在电弧焊过程中外加磁场促使电弧旋转,改变弧柱电流和等离子流的分布,影响母材熔化和焊缝成形。激光焊接中,外加磁场改变激光传输过程中等离子体的

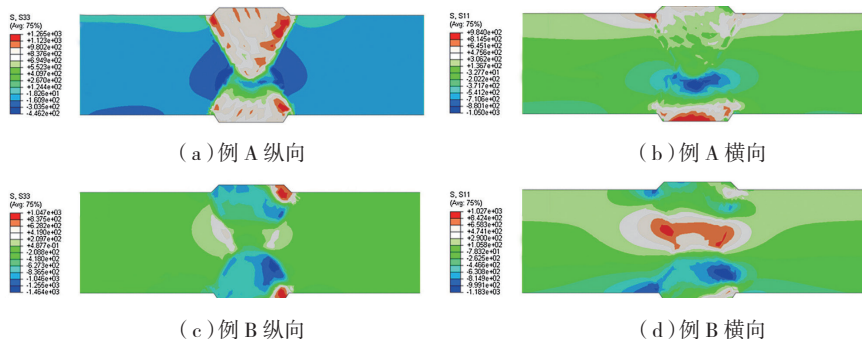
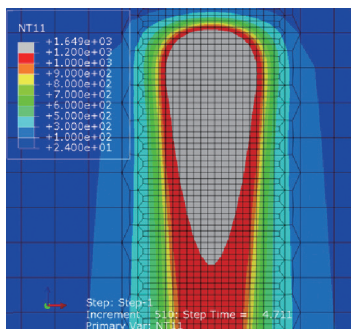
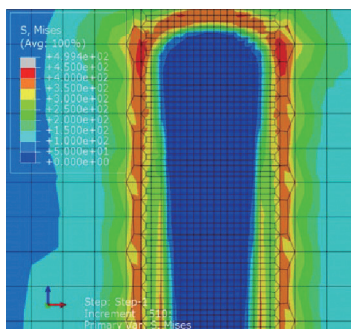


图2 纵向残余应力分布图

Fig.2 Longitudinal residual stress distribution



(a) 温度分布



(b) Mises 应力分布

图3 焊接过程中瞬态温度及应力分布云图
Fig.3 Transient temperature and stress distribution in welding process

密度和分布,影响焊缝熔深。此外,外加磁场在焊接过程中会影响熔池金属流动,细化焊缝金属一次结晶组织以及减少缺陷形成,有利于改善焊缝金属的塑性和韧性,从而提高焊接接头的质量。

2 耦合磁场的数值模拟

近年来,针对磁控焊接控制焊缝成形的数值模拟研究逐渐深入。Bachmann 等^[20]利用多物理场数值模型研究了横向稳恒磁场对铝合金局部渗透高功率激光束焊接的影响,结果表明,液态金属中的洛伦兹力分布对熔体的流动以及焊缝的几何形状具有显著影响,图4为试验焊缝与模拟计算结果的比较。

Bachmann 等^[21]进行了20mm厚不锈钢的外加纵向磁场大功率激光小孔焊接试验,并通过一个三维湍流稳态数值模型来分析研究交流磁场对熔池形态的影响,利用该模型求解了三维传热、流体动力学以及电磁场方程,分析比较了数值模拟和试验

过程中达到最佳熔池支撑时磁通量密度的差异。模拟计算得到的外加磁场下熔池截面温度与速度分布如图5所示。

重庆大学的王聪^[22]建立了外加纵向磁场 TIG 焊熔池的数值模型,并计算分析了磁场强度和焊接速度对熔池温度场、流场以及焊缝成形的影响。沈阳工业大学的刘政军等^[23]以外加磁场作用下的镁合金 TIG 焊熔池作为研究对象,建立了移动热源作用下的三维数学模型,利用 ANSYS 有限元软件实现了电磁场与温度场、流场之间的耦合,计算表明熔池中液态金属在外加磁场所产生电磁力的作用下发生旋转运动,改变了原有传热和流体流动方式,使得焊缝的熔宽增大、熔深减小。

目前国内外对于温度场、流场和磁场的全耦合计算还比较少见,随着人们对磁控焊接过程作用机制的深入了解,有关磁控焊接的数值模拟及其焊缝成形控制研究将不断完善。

结论

综上所述,有关焊接熔池、应力变形和焊缝成形控制的多场耦合数值模拟研究已取得了一定进展,但仍存在一些问题和不足,预计未来一段时间以下几方面将成为该领域研究的热点问题:

(1) 在焊接熔池形态的模拟方面,近年来国内外学者开展了较多研究,基于电弧焊、等离子弧焊以及激光-电弧复合焊等各种焊接方式都取得了较大进展。未来的研究应综合考虑微观机制与宏观热效应对熔池形态的影响,在建立模型时全面分析温度场、流场和磁场等物理场的作用机制,通过改善算法和程序,在保证精度的情况下提高计算效率。

(2) 有关焊接应力变形的数值模拟虽然取得了一定成果,但仍有一些问题需要研究解决。这是由于变形受力的复杂性,针对不同焊接方式、不同结构尺寸的焊件以及焊接坡

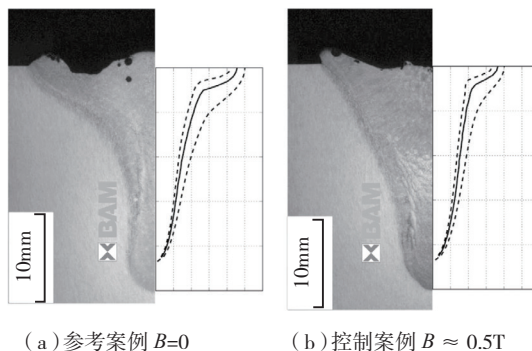


图4 试验和模拟计算焊缝宏观部分的比较
Fig.4 Comparison between experimental and numerical simulation

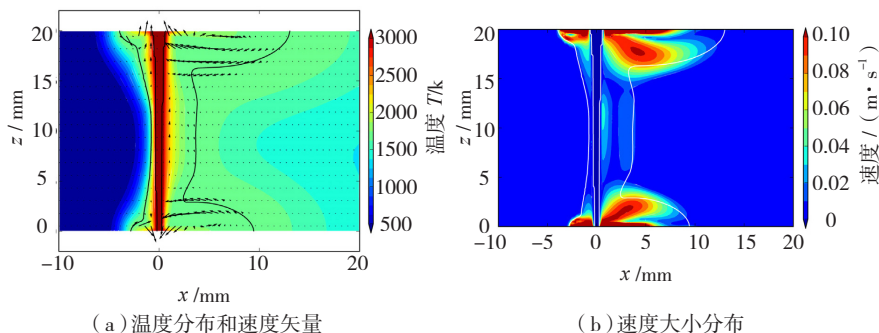


图5 外加磁场下熔池截面温度与速度分布图
Fig.5 Distribution of temperature and velocity of molten pool section under external magnetic field

口形式等各种因素,仍缺少相应的计算模型。同时材料的各项性能参数不够完善,不可避免地导致模拟过程中的简化计算,影响计算精度。

(3) 焊接过程中通过外加磁场控制焊缝成形的研究已不断深入,但在数值模型中如何考虑磁场与电弧、电弧与熔池以及磁场与熔池之间的相互作用机制成为了难点。针对不同焊接方式,涉及电、磁、热、流的外加磁场计算模型需加以改善并避免过多的假设。

(4) 目前焊接过程多场耦合模拟已经从宏观现象发展到微观组织,确定性方法、蒙特卡罗法、元胞自动机法以及相场法的应用使得焊接组织模拟正处于快速发展的阶段,并不断取得可喜的成果。

(5) 目前焊接多场耦合模拟在航空发动机中的应用已取得初步进展,通过对发动机机匣和叶盘等构件温度场和应力变形的模拟,在指导实际生产和改善工艺方案上已取得一定成果。但目前模拟的构件一般为典型接头和较小部件,对于发动机内较大构件以及构件之间连接的模拟还需进一步的研究。对于焊接数值模拟技术真正推动航空装备制造从传统模式向数字化生产模式转变,还需付诸较大努力。

相对于国外发展水平,国内焊接数值模拟在焊接熔池形态、应力变形以及焊缝成形控制等领域的基础模拟研究上差距不大,但在理论研究、原创性模型建立等方面需要更大的努力,同时国内缺乏具有较大影响力的模拟应用软件,将模拟研究结果真正应用到工业生产中还需要较长一段时间。

参考文献

[1] OREPER G M, EAGAR T W, SZEKELY J. Convection in arc weld pool[J]. *Welding Journal*, 1983, 62(11): 307-312.
 [2] CHO D W, KIRAN D V, NA S J. Analysis of molten pool behavior by flux-wall guided metal transfer in low-current submerged arc

welding process[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2017, 110: 104-112.

[3] PAN J J, HU S S, YANG L J, 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.

[4] 赵朋成. 全熔透 TIG 焊接熔池形态瞬时行为的数值模拟[D]. 济南: 山东大学, 2003.

ZHAO Pengcheng. Numerical simulation of the transient behaviors of full-penetrated TIG weld Pools[D]. Ji'nan: Shandong University, 2003.

[5] 汪奇兵. Invar 钢激光-MIG 复合焊接熔池流场形态研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.

WANG Qibing. Research on flow field of Invar steel molten pool by laser-MIG hybrid welding[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.

[6] 庞盛永. 激光深熔焊接瞬态小孔和运动熔池行为及相关机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.

PANG Shengyong. A study on the transient keyhole and moving weld pool behaviors and mechanisms of deep penetration laser welding[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.

[7] WANG Q, LIU X S, WANG P, et al. Numerical simulation of residual stress in 10Ni5CrMoV steel weldments[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 240: 77-86.

[8] BONAZZI E, COLOMBINI E, PANARI D, et al. Numerical simulation and experimental validation of MIG welding of T-joints of thin aluminum plates for top class vehicles[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2017, 48(1): 379-388.

[9] GIETKA T, CIECHACKI K, KIK T. Numerical simulation of duplex steel multipass welding[J]. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2016, 61(4): 1975-1984.

[10] MA N, LI L, MURAKAWA H, et al. Residual stresses in laser-arc hybrid welded butt-joint with different energy ratios[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 220: 36-45.

[11] CAO J, GHARGHOURI M A, NASH P. Finite-element analysis and experimental validation of thermal residual stress and distortion in electron beam additive manufactured Ti-6Al-4V build plates[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 237: 409-419.

[12] 楼志文, 童云生, 闵行. 瞬态温度场和热弹塑性场的有限元分析[J]. *西安交通大学学报*, 1981(6): 5-12.

LOU Zhiwen, TONG Yunsheng, MIN Xing.

The Applications of the Finite Element Method to Transient Thermo-Elasto-Plastic Problems[J]. *Xi'an Jiaotong University*, 1981(6): 5-12.

[13] 陈楚, 汪建华, 罗宇. 轴对称热弹塑性应力有限元分析在焊接中的应用[J]. *焊接学报*, 1987, 8(4): 30-38.

CHEN Chu, WANG Jianhua, LUO Yu. Application of axisymmetric thermal elasto-plastic stress finite element analysis in welding[J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 1987, 8(4): 30-38.

[14] 李冬林. 焊接应力和变形的数值模拟研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.

LI Donglin. Numerical simulation research on welding stress and deformation[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2003.

[15] 宋奎晶. TA15 钛合金 TIG 焊热影响区组织模拟及力学本构关系研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

SONG Kuijing. Modeling of microstructure in TIG welding heat affected zone and study on mechanical constitutive relation for TA15 alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

[16] 李勇志. 低合金高强度钢焊接过程固态相变力学行为研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.

LI Yongzhi. Mechanical behavior study on solid-state phase transformation of high-strength low-alloy steel during welding[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.

[17] MI G Y, XIONG L D, WANG C M, et al. A thermal-metallurgical-mechanical model for laser welding Q235 steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 238: 39-48.

[18] 米高阳. 熔化焊热-相变-弹塑性耦合有限元模拟研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.

MI Gaoyang. The thermal-metallurgical-mechanical simulation research for melting welding[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.

[19] 肖翰林. 航空发动机机匣焊接应力模拟与工艺优化[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2016.

XIAO Hanlin. Simulation and process optimization on aero engine case shell welding stress[D]. Shenyang: Shenyang University of Aeronautics and Astronautics, 2016.

[20] BACHMANN M, AVILOV V, GUMENYUK A, et al. About the influence of a steady magnetic field on weld pool dynamics in partial penetration high power laser beam welding of thick aluminium parts[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 60: 309-321.

[21] 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.

[22] 王聪. 外加纵向磁场作用下 TIG 焊熔池温度场和流动的数值模拟 [D]. 重庆: 重庆

大学, 2014.

WANG Cong. Numerical simulation of temperature field and flow of TIG pool under applied longitude magnetic field[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.

[23] 刘政军, 王晓慧, 苏允海. 外加磁场对镁合金焊接熔池形态的影响 [J]. 焊接学报, 2016, 37(1): 103–106.

LIU Zhengjun, WANG Xiaohui, SU Yunhai. Effect of external magnetic field on weld pool morphology of magnesium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(1): 103–106.

通讯作者: 王少刚, 博士、副教授, 研究方向为先进材料的连接与金属材料工程, E-mail: sgwang@nuaa.edu.cn。

Research Progress of Multi-Field Coupling Simulation in Welding Process

SHE Lübo, WANG Shaogang, WEI Yanhong

(College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

[ABSTRACT] Welding is a complex process which couples multiple physical fields. There are many problems in the study of welding phenomena by traditional experiment methods, such as high cost, low efficiency and limitation. Numerical simulation technology solves these problems well, so the technology becomes a hot spot in the welding research and is widely used in the aerospace, automotive and marine fields. This paper introduces the influence factors of the molten pool shape and welding deformation, as well as the effect of external magnetic field on the formation of weld. Moreover, this paper focuses on the application and research status of multi-field coupling numerical simulation in aspect of the molten pool shape, stress and deformation and control of weld formation. On this basis, the development trend of multi-field coupling simulation in welding process is put forward.

Keywords: Welding; Numerical simulation; Multi-field coupling

(责编 铃兰)

(上接第49页)

Technology, 2010(18): 91–93.

[16] 董兆伟. 铝合金整体结构件铣削加工残余应力及变形研究[M]. 北京: 科学出版社, 2015.

DONG Zhaowei. Study on residual stress and deformation of aluminum alloy integral structure[M]. Beijing: Science Press, 2015.

通讯作者: 周天丰, 博士、教授、博士研究生导师, 研究方向为精密与超精密加工、玻璃微细结构成形技术和模具材料开发, E-mail: zhoutf@bit.edu.cn。

Experimental Research on Five-axis Coordinated Micromilling of Micro Integral Impeller

LIANG Zhiqiang, FANG Ya'nan, ZHOU Tianfeng, GAO Peng, ZHANG Suyan,
LIU Zhibing, WANG Xibin

(Key Laboratory of Fundamental Science for Advanced Machining, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

[ABSTRACT] As the key component of the micro engine, the machining quality of the micro integral impeller has a direct effect on the performance of the micro engine. In view of the micro integral impeller characteristics of narrow flow channel, large blade twist and long thick ratio of blade, a five axis micro milling method for machining micro complex and twisted integral impeller is studied. Aiming at the problems of deformation, over cutting and collision interference in the process of micro impeller machining, the machining process of micro impeller is planned. The constraint equation of the tool diameter selection for channel cutting is established, and the maximum theoretical tool diameter is calculated. The cutting process of the impeller is simulated by CAM software, thus, the correctness of tool selection and process planning is verified. Through five-axis micro milling experiment, a high quality 7075 aluminum alloy impeller with diameter of 10mm, 6 blades, 0.15mm minimum blade thickness, and 0.58mm minimum distance between the adjacent blades is obtained.

Keywords: Micro integral impeller; Five-axis machining; Micromilling; Tool selection

(责编 铃兰)