

# 钎焊过程数值模拟研究进展

李红<sup>1</sup>, 张续<sup>1</sup>, 黄海新<sup>1</sup>, Wolfgang Tillmann<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100124;

2. 多特蒙德工业大学材料工程研究所, 多特蒙德 44227)

**摘要:** 综述了近年来钎焊数值模拟技术的研究进展, 并对数值模拟技术向系统化、精细化和精确化发展的趋势进行了预测。得出了以下结论: 1) 采用有限容积法和分子动力学法对钎料熔滴的润湿铺展行为进行模拟, 有助于研究多物理场耦合条件下钎焊工艺参数对钎料熔滴在基体表面的润湿、铺展和填缝的影响; 2) 有限元法可以较为准确地模拟钎焊接头应力场和残余应力分布、钎焊过程的温度场, 以及对接头力学性能进行评估。模拟结果与试验结果基本吻合。简化本构模型、引入材料性能参数、考虑界面传质和反应产物的影响等方面仍然是未来研究的难点和重点。

**关键词:** 钎焊; 数值模拟; 润湿铺展; 接头力学性能

中图分类号: TG 454

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2017)06-0956-08

doi: 10.11936/bjtxb2016080035

## Progress in the Numerical Simulation of Brazing Process

LI Hong<sup>1</sup>, ZHANG Xu<sup>1</sup>, HUANG Haixin<sup>1</sup>, Wolfgang Tillmann<sup>2</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Institute of Materials Engineering, Dortmund University of Technology, Dortmund 44227, Germany)

**Abstract:** Recent research progress of numerical simulation on brazing was summarized, while the development tendency of systematization, refinement and precision for simulation technology was predicted. It concludes that 1) the finite volume method and molecular dynamic methods have been used to stimulate the wetting and spreading behavior of molten filler droplet on basement. It is helpful to investigating the influence of parameters on the wetting, spreading and gap-filling of filler metal under multi-physical field coupled brazing processes. 2) The finite element method has been used for accurate stimulation of stress field and distribution of residual stress of brazed joints, the temperature field during brazing process, and estimation of mechanical property of brazed joint respectively. The simulation results are in good agreement with the experimental results. But some key aspects, such as the reasonably simplified constitution models, introduction of material properties parameters and consideration of the influence of interface mass-transfer and reaction compounds etc. are still difficulties and focuses of research in the future.

**Key words:** brazing; numerical simulation; wetting and spreading; mechanical properties of joint

1962年丹麦人首次用计算机有限差分法进行铸件凝固过程的传热计算, 随后更多的学者加入到

该研究行列, 并将应用逐步扩展到锻压、热处理及焊接等领域<sup>[1]</sup>。焊接热过程是一个复杂的冶金过程,

收稿日期: 2016-08-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475007)

作者简介: 李红(1977—), 女, 副教授, 主要从事轻金属精密连接和异种材料连接方面的研究, E-mail: hongli@bjut.edu.cn

通过试验进行研究需要花费很长时间和大量经费,难以适应工程实践的需要<sup>[2]</sup>。运用数值模拟软件对焊接过程进行数值模拟,可以在较短的时间内获得不同参数条件下的各项数据,从而大大降低试验成本、缩短试验周期。钎焊过程具有温度控制精确(高于钎料液相线温度 30 ~ 40 °C)、焊缝成形精密(钎缝厚度为几十  $\mu\text{m}$ )、界面传质现象复杂(钎料与母材元素扩散和溶解)的特点,尤其是近年来随着多物理场耦合条件下的钎焊技术(如超声/电场辅助钎焊、激光/电弧钎焊)的发展,以及某些特殊材料和结构(如陶瓷-金属、不锈钢换热器等)低温钎焊高温服役的工程应用,对钎焊过程润湿铺展行为、界面反应行为和接头形成机理、严酷服役条件下接头的力学性能及可靠性的研究面临新的问题和挑战,对数值模拟技术提出了迫切需求。

随着钎焊技术向数字化和智能化方向发展,钎焊过程的数值模拟研究越来越成为关注的焦点<sup>[3]</sup>。钎焊过程的数值模拟包括:1) 钎料润湿铺展行为;2) 钎焊接头应力应变场和残余应力场;3) 钎焊温度场;4) 钎焊接头力学性能的评估等。有限元模拟对于选择钎焊材料、优化工艺参数、揭示钎焊机理、控制焊接变形、合理设计接头形式、获得可靠的接头、提高钎焊质量具有重要的指导意义。因此,针对以上方面,本文综述了钎焊数值模拟技术的国内外最新研究进展,并对钎焊数值模拟技术的发展进行了展望。

## 1 润湿铺展行为的数值模拟

通过研究不同钎焊方法和工艺参数对钎料熔滴自由表面演化规律的影响,可以确定合理的钎焊规范,因此针对钎料的润湿铺展行为进行理论研究具有重要的意义<sup>[4]</sup>。球状熔滴模型的建立是钎料润湿过程数值模拟的核心要点,钎料的润湿行为是建立在流体力学模型上的,目前大多数研究人员采用有限容积法(finite volume method, FVM)进行分析<sup>[5]</sup>,它是将所计算的区域划分成一系列控制容积(如图1所示),每个控制容积都有一个节点  $P$  作代表,通过将守恒型的控制方程对控制容积做积分来导出离散方程的一种数值解法。

目前国内外学者对钎料润湿过程建立了有限元模型,通过电弧钎焊、激光钎焊、超声波辅助钎焊等方式对钎料液滴在基体表面的润湿、铺展和填缝等行为进行了深入研究,进而确定合理的工艺参数,促进激光、电弧以及超声波钎焊技术的发展与应用。

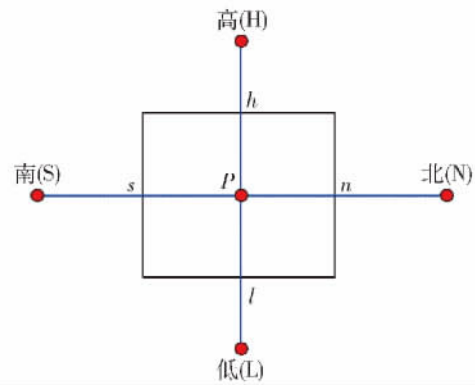


图1 控制容积示意<sup>[5]</sup>

Fig. 1 Schematic illustration of the control volume<sup>[5]</sup>

文献[5]采用TIG焊电弧作为热源,使用PHOENICS软件模拟了不同电弧钎焊参数下钎料的润湿铺展过程(见图2),并对钎料液滴自由表面内部的流场和速度场进行了研究,认为钎料液滴铺展是所受电弧压力、重力和表面张力综合作用的结果,并将数值模拟结果与实际测量值进行了对比(见图3),发现二者误差较小( $< 9.6\%$ ),都是随电流增加,熔滴铺展高度明显减小而铺展半径明显增加,从而证实了该模拟的可靠性。

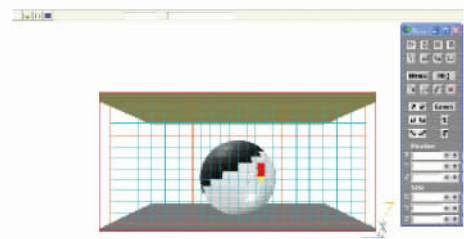


图2 PHOENICS软件前处理界面及其网格系统<sup>[5]</sup>

Fig. 2 Preprocessor interface in PHOENICS code and the meshing system<sup>[5]</sup>

Khorram等<sup>[6]</sup>研究了激光钎焊条件下银基钎料熔滴在因可镍合金和不锈钢等不同基体表面的润湿过程,并通过试验验证了数值模拟的可靠性,即使是非常复杂的熔化、铺展和流动等行为,都可以通过建立合适的有限容积模型来实现。图4是钎料熔滴在表面铺展开始和结束的形态。钎料的润湿角、漫流距离和流动长度与激光的功率、速度及脉冲宽度有关,数值模拟结果和实际测量结果较为吻合。

Hartz-Behrend等<sup>[7]</sup>采用分子动力学模拟方法对钎焊过程固/液界面的润湿及铺展行为进行了定量分析,部分结果如图5所示。分子动力学模拟能够定量反映纯铜、纯银及AgCu28钎料在铁基板上的润湿情况,与试验结果较为吻合。

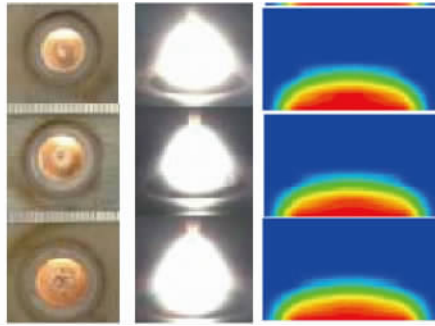


图3 电流变化时 CuSi<sub>3</sub> 钎料熔滴自由表面计算结果与试验结果对比<sup>[5]</sup>

Fig.3 Comparison of FVM analysis and test results of CuSi<sub>3</sub> filler metal droplets spreading with different current<sup>[5]</sup>

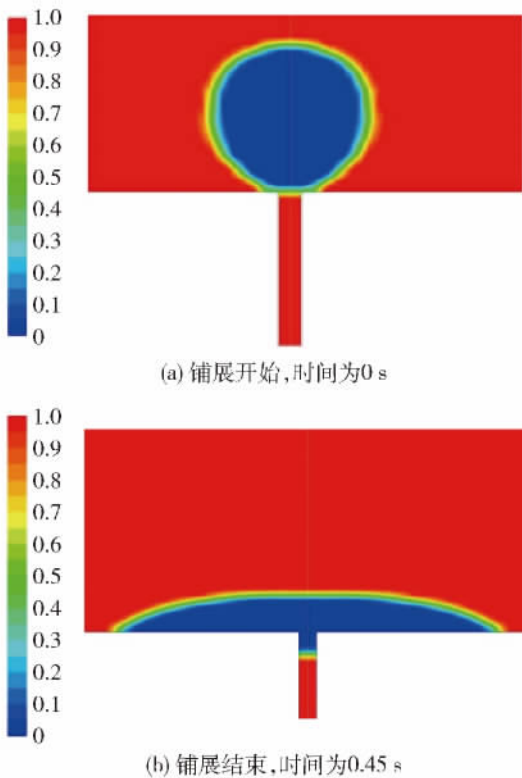


图4 激光钎焊条件下钎料熔滴的润湿铺展形态<sup>[6]</sup>  
Fig.4 Spreading and flowing of the filler metal droplet during laser brazing process<sup>[6]</sup>

文献 [8] 分别从受力角度和能量角度提出了超声波作用下钎料熔滴铺展物理模型, 随后借助 Fluent 软件模拟超声波作用下钎料熔滴的铺展过程, 并分析了其内部压强及速度矢量的变化情况. 钎料熔滴在超声波作用下的铺展随着板表面振动的强弱而呈现不同形态; 当施加振幅为 6 μm 超声波时, 钎料熔滴能够实现较大程度的铺展, 内部压强达

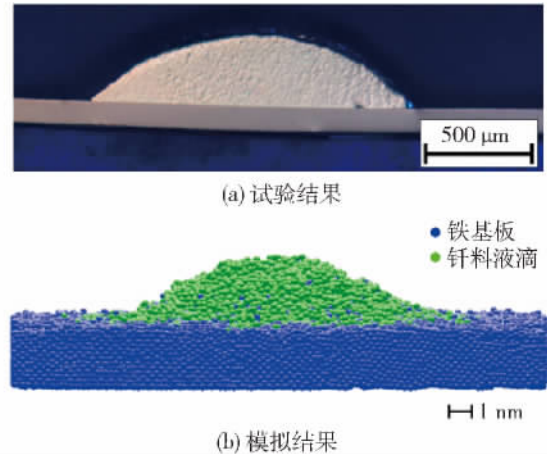


图5 温度为 1 150 °C 时纯银在铁基板铺展试验结果与模拟结果的对比<sup>[7]</sup>

Fig.5 Comparison results of Ag wetting on the Fe substrate between experiment and simulation<sup>[7]</sup>

到最大值 1.2 MPa; 钎料质点的速度矢量在一个周期内呈现向外运动以及向内运动 2 种趋势, 并交替变化.

国内外学者有关钎料润湿铺展数值模拟的研究成果表明, 有限体积法和分子动力学方法可以直观和准确地得到与试验结果相符合的结论, 但二者均有各自的缺点, 主要体现在以下方面: 有限体积法针对控制体积进行积分得到积分方程, 积分后为二阶精度, 其总体精度较低; 分子动力学方法需要科研人员具有较高的计算机专业知识, 如编写 Shell 脚本语言 awk、sed、grep 等文本处理命令; 数学模型经过简化, 采用恒定的数学公式, 没有考虑钎料与基体之间复杂的界面传质和反应行为.

## 2 钎焊接头应力应变场与残余应力场的数值模拟

20 世纪 70 年代初以日本学者上田幸雄为代表的研究人员以有限元为基础, 将弹塑性有限元法应用于焊接结构应力应变的分析<sup>[9]</sup>, 对焊接接头应力场的数值模拟研究有助于了解焊接应力的产生机制和残余应力分布状态, 找到应力集中的危险区域, 因此在实际生产和理论研究中均具有重要意义<sup>[10]</sup>.

钎焊过程中由于母材与钎料的热膨胀系数差异而导致焊后冷却过程接头出现残余应力, 异种材料的连接更是受到残余应力的困扰而导致无法形成可靠的接头<sup>[11]</sup>, 目前关于钎焊数值模拟的主要工作都集中在应力场和残余应力的研究方面<sup>[12]</sup>. 研究内容主要包括: 1) 钎焊接头应力应变场, 残余应力大



小及分布特征的研究; 2) 工艺参数如钎焊温度、压力、保温时间、钎缝间隙、接头形式, 以及钎料性能和厚度等对接头残余应力大小和分布的影响; 3) 残余应力与抗拉强度、四点弯曲强度和剪切强度等接头力学性能之间的关系等。

为了对钎焊过程及焊后冷却过程残余应力分布规律进行分析, 首先要模拟钎焊接头的应力应变场。文献[13]在相关试验的基础上, 对蜂窝壁板真空钎焊气压加压过程进行了数值模拟研究, 结合卡具气囊蒙皮的位移云图和蜂窝壁板的接触压强云图, 计算得到了给定气压与间隙条件下的蜂窝壁板变形与接触压强, 且与试验结果吻合。Barrena等<sup>[14]</sup>进行了工具钢(90MnCrV)与WC硬质合金真空钎焊接头残余应力场的有限元分析, 通过应力场分布图发现残余应力主要产生于焊后冷却阶段, 最大峰值应力出现在BAg-5钎料与WC界面位置。文献[15]研究了Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>陶瓷与42CrMo钢钎焊接头的应力场分布图, 应力集中现象主要出现在钎缝附近约5mm的区域, 并且在距离钎缝约0.3mm的陶瓷一侧处出现最大的轴向拉应力。

为了寻找到可靠的理论支撑以及更快速地应用于实际生产中, 目前研究人员最感兴趣的是钎焊材料和工艺参数对钎焊残余应力的影响<sup>[16]</sup>。Meng等<sup>[17]</sup>将常温的金刚石颗粒加入到钢基体表面熔化的NiCr钎料中进行感应钎焊, 并对接头残余应力场进行了数值模拟, 见图6。研究发现提前预热基体与钎料的复合结构可以缩短金刚石颗粒在高温(>700℃)下停留的时间, 进而减小钎料凝固后金刚石颗粒与基体之间的残余应力(压应力), 最大值出现在金刚石颗粒几何形状的最低点, 为700MPa。此外, 当金刚石颗粒表面涂覆100μm的镍基涂层时最大压应力将急剧减小。

Zhu等<sup>[18]</sup>研究立方氮化硼颗粒与工具钢钎焊时探讨了钎料种类、颗粒嵌入深度等对钎焊接头残余应力的影响。模拟结果表明, 与Ag-Cu-Ti钎料相比, 使用Cu-Sn-Ti钎料钎焊会在接头处产生更大的残余应力(拉应力)。此外, 残余应力与钎料种类和颗粒嵌入深度无关, 在颗粒连接处均为最大。Gong等<sup>[19]</sup>研究不锈钢换热器板翅结构件的钎焊数值模拟时发现钎焊间隙、加载压力和翅片厚度等都会显著影响残余应力的分布, 而翅片数量和钎焊温度的影响较小。Jiang等<sup>[20]</sup>研究了格子结构桁架钎焊接头的失效形式, 桁架节点处的强度与钎焊冷却后的残余应力存在直接关系, 有限

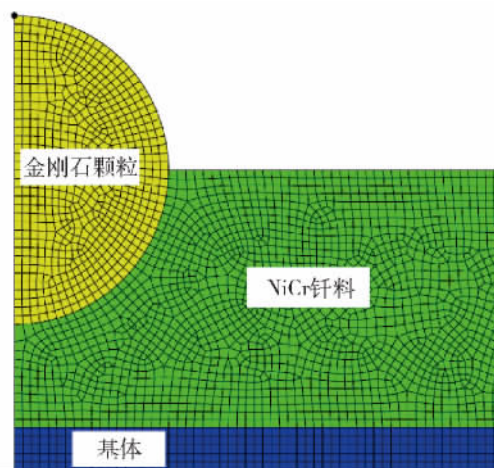


图6 在熔融钎料中添加常温金刚石颗粒进行感应钎焊的二维轴对称模型<sup>[15]</sup>

Fig. 6 Axisymmetric two-dimensional model for simulating induction brazing cold diamond grit onto steel substrate<sup>[15]</sup>

元分析发现残余应力的大小与负载、面板厚度和桁架高度等因素均有关。文献[21]模拟了金刚石与硬质合金接头的焊后应力场, 并预报出钎缝厚度对钎焊接头应力大小和分布的影响, 从而分别得出焊后金刚石层、钎料层与硬质合金区域的应力场分布, 找到了焊后应力集中的危险区域。Xu等<sup>[22]</sup>在研究用于制作质子交换膜燃料电池的不锈钢双极板时发现, 为了降低接头的残余应力、缩小双极板的变形程度, 必须严格控制钎缝间隙大小, 而预压力值对残余应力的影响较小。

钎焊接头处的残余应力与接头的强度有一定的关系, 目前国内外学者通过有限元方法试图找出它们之间的联系。Cazajus等<sup>[23]</sup>使用数值模拟方法研究陶瓷-金属装配体钎焊残余应力对接头抗拉强度的影响时, 将拉伸过程的数值模型引入了残余应力计算, 经过与实际拉伸强度测量值对比后认为, 残余应力的数值模拟结果能够估计标准试样的拉伸强度值。文献[15]也针对二者的关联进行了探讨, 得出了钎焊接头最大残余应力与试验测得的四点弯曲强度有关, 且随不同体积分数TiN<sub>p</sub>的变化均呈现不同趋势(如图7所示), 这表明可以通过钎焊接头残余应力的数值模拟间接评价接头的力学性能。

### 3 钎焊温度场的数值模拟

温度场的分布决定了焊接应力场的分布, 直接影响到焊后残余应力和焊接变形, 这对于优化钎焊工艺参数、控制焊接残余应力和变形、提高钎缝质量

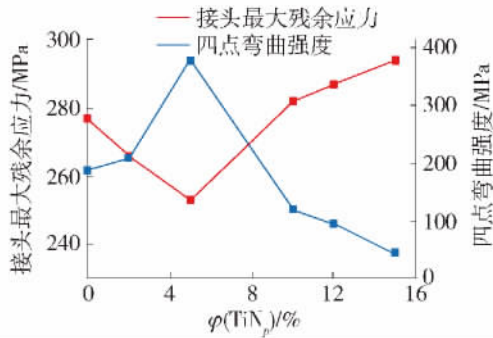


图7 随添加相  $\text{TiN}_p$  体积分数变化接头最大残余应力与试验测量的四点弯曲强度对比<sup>[15]</sup>

Fig. 7 Comparison of calculated maximum residual stress and measured 4-points bending strength with the variation of volume percent of added  $\text{TiN}_p$  phase<sup>[15]</sup>

具有重要意义. Felba 等<sup>[24]</sup> 针对氮化硼/碳化钨电子束钎焊,研究了氮化硼一侧温度场分布及电子束流随钎焊时间变化的情况.文献[25]建立了导管感应钎焊的温度场分布模拟热源模型,分析了钎焊温度的分布规律,发现导管中部的温度最高,处于感应圈内的轴向温度场分布比较均匀,温度变化较小. Wilden 等<sup>[26]</sup> 对纳米级  $\text{NiAl}$  膜与钢活性钎焊过程的温度场进行了有限元模拟.模拟结果表明,较低的反应速率会显著降低基体与钎料结合界面处的温度,此外还发现,界面温度随钎料层厚度的增加而上升.文献[27]采用有限元方法对激光钎焊温度场进行了数值模拟,在分析单、双光束激光填丝钎焊传热行为的基础上提出了激光填丝钎焊热源模型.发现单光束激光钎焊有较高的温度梯度,而 2 mm 焦点间距的双光束钎焊接头峰值温度和温度梯度低,高温区域宽,更适用于获得良好的钎焊接头.如图 8 所示. Fey 等<sup>[28]</sup> 研究了扩散焊时接头处的温度分布和载荷分布,成功预测了试样的整体温度和压力分布,对优化工艺参数起到了指导作用.

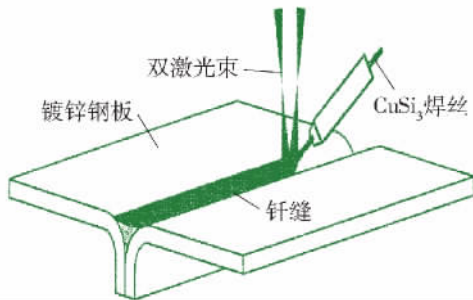


图8 双光束激光钎焊卷对接接头示意图<sup>[27]</sup>

Fig. 8 Schematic of dual laser brazing flange butt joint<sup>[27]</sup>

#### 4 钎焊接头力学性能的评估

钎焊接头力学性能的评估是钎焊数值模拟的难点,目前研究主要从空位长大模型和裂纹扩展模型入手对接头力学性能进行有限元分析,为精确预测钎焊接头性能提供了思路.

Takeshita 等<sup>[29]</sup> 为了预测使用铝钎料箔钎焊钛合金接头的抗拉强度,在有限元模型的失效方程中加入了空位长大理论,计算得到钛合金钎焊接头的抗拉强度与试验测量值相吻合.文献[30]研究了钎焊接头裂纹起裂和扩展规律,利用内聚力模型模拟三点弯曲钎焊接头裂纹扩展过程,网格划分结果见图 9.通过试验测得钎焊接头起裂时所能承受的最大载荷为 1 364.83 N,与模拟值 1 392.29 N 很接近.在裂纹扩展阶段,通过试验得到的载荷-裂纹尖端张开位移曲线与模拟结果吻合较好,说明内聚力模型可以很好地预测三点弯钎焊接头裂纹扩展过程.

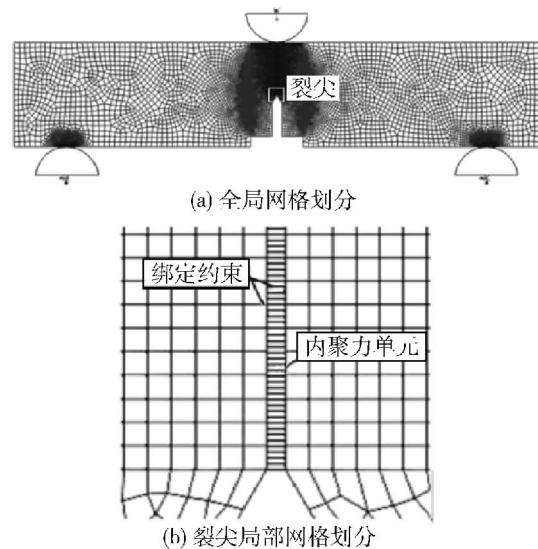


图9 三点弯曲钎焊接头网格划分结果<sup>[30]</sup>

Fig. 9 Meshing result of the brazing joint three-point binding test<sup>[30]</sup>

Magin 等<sup>[31]</sup> 在研究不同结构钎料对钎焊接头应力应变行为的影响时,将试验测得的温度-屈服应力曲线应用于有限元模型中,网格划分细节如图 10 所示.结果表明,接头应力的计算值与制造商提供的实际值相符.此外,证实了使用三明治结构的钎料有利于降低接头应力,以便保护刀具刀头处的硬质合金. Piegert 等<sup>[32]</sup> 开发了一种经济的高温钎焊工艺,采用试验和数值模拟技术来最终确定最优化

的钎焊温度和时间,最终获得了力学性能超过母材的钎焊接头。首先,根据平衡凝固的扩散方程理论,采用热力学与动力学方法研究了平衡凝固过程中不同钎焊时间下B、Si等降熔元素在接头处的分布情况;其次,通过对比钎焊接头在室温拉伸下的伸长率来确定合理的工艺参数;此外,也认为单纯靠数值模拟来预测钎焊接头的机械性能是不完全准确的。

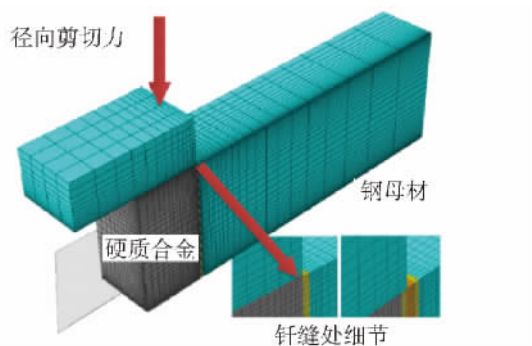


图10 接头处网格划分细节

Fig. 10 Details of the meshes at the joints

## 5 结论

有关钎焊的数值模拟的研究方向已经逐渐由建立在温度场、应力场基础上的旨在预测宏观尺度的模拟,进入到以预测和预报接头性能为目的的微观尺度的模拟阶段<sup>[33-34]</sup>,使用数值模拟方法解决钎焊过程的实际问题越来越受到重视,例如通过优化工艺参数来减少残余应力的产生,并保证获得可靠的机械性能。

主要结论有:

1) 采用有限容积法和分子动力学方法对钎料熔滴的润湿铺展行为进行模拟,有助于研究多物理场耦合条件下钎焊工艺参数对钎料熔滴在基体表面的润湿、铺展和填缝的影响。

2) 有限元法可以较为准确地模拟钎焊接头应力场和残余应力分布、钎焊过程的温度场,以及对接头力学性能进行评估,模拟结果与试验结果基本吻合。但在简化本构模型、引入材料性能参数、考虑界面传质和反应产物的影响等方面仍然是未来研究的难点和重点<sup>[35]</sup>。

需要指出的是,虽然研究人员有关钎焊的数值模拟技术取得了很大进展,但未来的研究重点应该朝着简化数学模型、设置模拟参数等方面努力。具体包括以下几个方面:

1) 在计算陶瓷-金属接头残余应力时,材料的

塑性变形、材料属性参数随温度的变化等都需要考虑;

2) 在模拟异种材料连接界面应力分布时,如果考虑到随连接温度和保温时间变化而变化的金属间化合物的组织结构和力学性能,接头断裂位置试验测试结果和模拟计算应力集中区域相对应;

3) 在模拟钎焊接头高温服役过程中的力学性能时,如果数学模型能够将固溶体的原位析出和晶界的移动同时考虑进去,就可以获得与试验结果更加相符的结果。

此外,前期试验数据的收集、数据库和专家系统的建立,以及和后期数值模拟计算的有机结合必将成为钎焊数值模拟技术向精细化、精确化发展的方向。例如,文献[36]中如果将试验测量的毛细管中液柱高度值 $h$ 直接引入优化后的杨氏方程中,数值计算结果与试验测量结果将是同一个数量级。

## 参考文献:

- [1] 吴言高,李午申,邹宏军,等. 焊接数值模拟技术发展现状[J]. 焊接学报, 2002, 23(3): 89-92.  
WU Y G, LI W S, ZOU H J, et al. Developing situation of welding numerical simulation technology [J]. Transaction of the China Welding Institution, 2002, 23(3): 89-92. (in Chinese)
- [2] 张立艳,董万鹏. 激光焊接应力场数值模拟的研究进展[J]. 热加工工艺, 2016(13): 8-10.  
ZHANG L Y, DONG W P. The research development of stress field numerical simulation for laser welding [J]. Hot Working Technology, 2016(13): 8-10. (in Chinese)
- [3] 熊华平,李红,毛唯,等. 国际钎焊技术最新进展[J]. 焊接学报, 2011, 46(5): 108-112.  
XIONG H P, LI H, MAO W, et al. The latest development of international brazing technology [J]. Transaction of the China Welding Institution, 2011, 46(5): 108-112. (in Chinese)
- [4] KAI M, ZHISHUI Y, PEILEI Z, et al. Influence of wire feeding speed on laser brazing zinc-coated steel with Cu-based filler metal [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(5/6/7/8): 1333-1342.
- [5] 李瑞峰. 电弧钎焊钎料液滴铺展过程及其流场、速度场数值模拟和分析[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2005.  
LI R F. The filler drop wetting and spreading of arc brazing and its numerical simulation of flow field and speed



- field [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)
- [6] KHORRAM A, GHOREISHI M. Numerical and experimental study of flowing and spreading of silver-based filler metal droplet on different substrates during laser brazing process [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 85 (1/2/3/4): 503-519.
- [7] HARTZ-BEHREND K, BACH F W, MÖHWALD K, et al. Classical molecular dynamics simulations (MD) of wetting phenomena in brazing processes [R]. Aachen: DVS-BERICHT 2014.
- [8] 黎华栋. 超声波作用下铝合金表面钎料液滴的动态铺展及润湿行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.  
LI H D. Dynamic spreading and wetting of solder droplet on aluminum alloy surface under ultrasonic wave. [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [9] 陈会丽, 钟毅, 王华昆, 等. 残余应力测试方法的研究进展[J]. *云南冶金*, 2005, 34(3): 52-54.  
CHEN H L, ZHONG Y, WANG H K, et al. The research development of test measures for residual stress [J]. *Yunnan Metallurgy*, 2005, 34(3): 52-54. (in Chinese)
- [10] 杨磊, 江克斌, 邵飞, 等. T型焊接接头残余应力数值模拟研究[J]. *热加工工艺*, 2016(1): 198-201.  
YANG L, JIANG K B, SHAO F, et al. The residual stress numerical simulation for T-type joint [J]. *Hot Working Technology*, 2016(1): 198-201. (in Chinese)
- [11] 张秉刚, 何景山, 刘伟娜, 等. 国内外电子束钎焊及其数值模拟研究动态[J]. *焊接*, 2007(9): 23-26.  
ZHANG B G, HE J S, LIU W N, et al. Electron beam brazing and its research trend of numerical simulation in China and abroad [J]. *Welding*, 2007(9): 23-26. (in Chinese) (in Chinese)
- [12] JOHARI MIAB R, HADIAN A M. Effect of brazing time on microstructure and mechanical properties of cubic boron nitride/steel joints [J]. *Ceramics International*, 2014, 40(6): 8519-8524.
- [13] 原瑞凝, 张田仓, 佘好学, 等. 气压加压条件下的钛合金蜂窝壁板真空钎焊试验及数值模拟研究[J]. *热加工工艺*, 2015(9): 219-220.  
YUAN R N, ZHANG T C, SI H X, et al. Titanium honeycomb panel vacuum brazing test under air pressure and its numerical simulation [J]. *Hot Working Technology*, 2015(9): 219-220. (in Chinese)
- [14] BARRENA M I, GÓMEZ DE SALAZAR J M, GÓMEZ-VACAS M. Numerical simulation and experimental analysis of vacuum brazing for steel/cermet [J]. *Ceramics International*, 2014, 40(7: Part B): 10557-10563.
- [15] 王天鹏. Ag-Cu-Ti + TiNp 钎焊 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷/42CrMo 钢组织性能和数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.  
WANG T P. Brazing of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and 42CrMo using Ag-Cu-Ti + TiNp filler and its numerical simulation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [16] BUHL S, LEINENBACH C, SPOLENAK R, et al. Microstructure, residual stresses and shear strength of diamond-steel-joints brazed with a Cu-Sn-based active filler alloy [J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2012, 30(1): 16-24.
- [17] MENG F, LIU A, SUN H, et al. Finite element analysis of thermal effects on brazed cold diamond grit [J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2015, 68(5): 829-838.
- [18] ZHU Y, DING W, Xu J, et al. An investigation of residual stresses in brazed cubic boron nitride abrasive grains by finite element modelling and Raman spectroscopy [J]. *Materials & Design*, 2015, 87: 342-351.
- [19] GONG J, JIANG W, FAN Q, et al. Finite element modelling of brazed residual stress and its influence factor analysis for stainless steel plate-fin structure [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(4): 1635-1643.
- [20] JIANG W, CHEN H, GONG J M, et al. Numerical modelling and nanoindentation experiment to study the brazed residual stresses in an X-type lattice truss sandwich structure [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(13/14): 4715-4722.
- [21] 徐超, 孙凤莲, 秦优琼, 等. 金刚石与硬质合金钎焊接头应力场分析[J]. *焊接学报*, 2003(2): 47-50.  
XU C, SUN F L, QIN Y Q, et al. Joints stress field analysis of brazing diamond and cemented carbide [J]. *Transaction of the China Welding Institution*, 2003(2): 47-50. (in Chinese)
- [22] XU S, WANG S, ZHAO Y, et al. The residual stress in a brazed joint of metallic bipolar plates of PEMFC: a numerical model [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(10): 5304-5314.
- [23] CAZAJUS V, LORRAIN B, WELEMANE H, et al. Residual stresses in ceramic metal assembly after brazing process [J]. *Advances in Science and Technology*, 2006, 45(6): 25-31.

- [24] JAN F, KAZIMIERZ P F, PETER K, et al. Electron beam activated brazing of cubic boron nitride to tungsten carbide cutting tools [J]. *Vacuum*, 2001, 62: 171-180.
- [25] 汪殿龙,王军,胡云岩,等. 导管安装感应钎焊温度场分布数值模拟 [J]. *铸造技术*, 2009(1): 73-76.  
WANG D L, WANG J, HU Y Y, et al. Temperature field distribution numerical simulation of pipe installation induction brazing [J]. *Foundry Technology*, 2009(1): 73-76. (in Chinese)
- [26] WILDEN J, JAHN S, HANNACH T. Simulation of the heat propagation during reactive joining [C]//Proceedings of 9th International Brazing & Soldering Conference. Aachen: IIW, 2010: 260-265.
- [27] 封小松,陈彦宾,李俐群. 镀锌板激光钎焊温度场的数值模拟 [J]. *金属学报*, 2006(8): 882-886.  
FENG X S, CHEN Y B, LI L Q. The temperature field numerical simulation of galvanized steel sheet's laser brazing [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2006(8): 882-886. (in Chinese)
- [28] FEY A, JAHN S, DAHMS S. Simulation of temperature and load distribution for diffusion bonding [C]//The 11th International Conference on Brazing, High Temperature Brazing and Diffusion Bonding (LÖT 2016). Aachen: IIW, 2016: 161-166.
- [29] TAKESHITA K, TERAKURA Y. A novel approach for predicting the tensile strength of brazed joints [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1998, 29(9): 135-141.
- [30] 陈兴,周帼彦,舒双文,等. 三点弯钎焊接头裂纹扩展数值模拟 [J]. *化工机械*, 2014(6): 779-783.  
CHEN X, ZHOU G Y, SHU S W, et al. Crack propagation numerical simulation of three-points bonding brazing joint [J]. *Chemical Machinery*, 2014(6): 779-783. (in Chinese)
- [31] MAGIN M, SCHNEE D, SCHIMPFERMANN M, et al. Influence of sandwich brazing filler metal compositions on hardmetal-steel joint stress and strain evolution [C]//The 11th International Conference on Brazing, High Temperature Brazing and Diffusion Bonding (LÖT 2016). Aachen: IIW, 2016: 62-67.
- [32] PIEGERT S, REINKENSMEIER I. Physical modelling of brazed joint structure forming under non-equilibrium solidification conditions [C]//Proceedings of 10th International Brazing & Soldering Conference. Aachen: IIW, 2013: 223-230.
- [33] SEKULIC D P. *Advances in brazing* [M]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2013: 189-196.
- [34] 石亦平,周玉蓉. ABAQUS有限元分析实例详解 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 35-39.
- [35] 曹金凤,石亦平. ABAQUS有限元分析常见问题解答 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 89-93.
- [36] BOBZIN K, KOPP N. A precise approach to describe wetting in brazing processes [C]//Proceedings of 10th International Brazing & Soldering Conference. Aachen: IIW, 2013: 212-215.

(责任编辑 吕小红)