

计算机技术在钎焊领域的应用

雷睿超^{1,2}, 操齐高^{1*}, 王瑞红²

(1. 西北有色金属研究院, 西安 710016; 2. 西安理工大学, 西安 710048)

摘 要: 随着钎焊技术的发展, 研究领域和工程领域已经积累了庞大的钎焊数据, 对钎焊数据进行总结和管理将会进一步促进钎焊技术的发展, 相比于传统的工艺开发, 专家系统的运用使钎焊工艺信息得到了更高效的利用, 在工艺研究阶段可以减少试验次数, 节约开发成本, 并缩短开发周期; 同时, 在开发钎焊工艺时, 对钎焊接头残余应力场进行有限元分析可以有效地预测裂纹发生位置, 最终有针对性地对钎焊工艺进行评估和改进; 另外, 在接头服役过程的性能评估方面利用有限元对应力状态进行模拟结合相关实验, 可以较实际地模拟出真实工况下接头的应力状态与形变过程, 最终对钎焊工艺的开发提出指导意见。

关键词: 钎焊; 专家系统; 有限元; 智能钎焊

中图分类号: TB39; TG4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2019)S1-0073-05

Applications of Computer Technology in Brazing Field

LEI Ruichao^{1,2}, CAO Qigao^{1*}, WANG Ruihong²

(1. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China;

2. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: With the development of brazing technology, considerable of brazing data has been amassed in research and engineering fields, summarizing the brazing data and management will further promote the development of brazing technology. Compared to traditional development of process, through combining with expert system information of brazing process is used efficiently, and the process development assisted with expert system reduces the number of experiments, saves development cost, and shortens the development cycle. Meanwhile, during the development of brazing technology, not only can stimulating residual stress field of brazing joint by finite element method effectively predict the location of crack occurrence, but also evaluate and improve brazing technology in a targeted way finally. In addition, in terms of performance evaluation of joint service process, finite element method associating with relevant experiments is used to simulate the stress state, which can simulate the stress state and deformation process of joint under real working conditions in a more practical way. Finally, guidance is proposed for the development of brazing technology.

Key words: brazing; expert systems; finite element; intelligent brazing

由于计算机技术的飞速发展, 计算机已融入生产和研究领域的方方面面, 工业和科技界也因为计算机的发展正发生深层次的变革, 在世界范围内,

正兴起一场工业 4.0 的浪潮。这是我国由制造大国转变成成为制造强国的重大机遇, 要实现这次转变就需要在智能制造、绿色制造上实现理念与实践上的

收稿日期: 2019-09-11

第一作者: 雷睿超, 男, 硕士研究生, 研究方向: 银基钎料及有色金属钎焊。E-mail: 2044545437@qq.com

*通讯作者: 操齐高, 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 稀贵金属功能材料。E-mail: caoqigao@c-nin.com

突破^[1]。智能钎焊是智能制造的一种,包括智能化钎料设计、钎焊工艺设计、性能评估、钎焊机器机构、过程控制器、信号传感与检测、以及钎焊信息共享等等,利用智能钎焊,钎焊产业将从全局出发,实现钎焊的智能化、绿色化、柔性化、个性化和人性化,以符合当代的计算机与互联网潮流^[2]。

专家系统作为人工智能应用于工业的一个典型领域正受到越来越多的关注,目前嵌入神经网络算法的专家系统已经成为主流^[2]。另外利用有限元方法也是一种成熟和实用的研究方法^[3]。

1 钎焊工艺中的专家系统简介

专家系统属于人工智能领域,是一种计算机计算与推理模型。其模仿人类专家的思考过程解决相关专业性问题,并且得出的结论与专家的相同^[4],即通过图灵测试。当给专家系统输入一个问题或信息时,专家系统会基于知识库和推理机之间信息的交互对问题提出解决办法,或对外来信息进行加工并产生输出。随着计算机和算法的发展,专家系统从最初的基于规则发展到最近的基于神经网络,基于神经网络的专家系统基于训练样本可以自己设计算法改变推理机的推理策略,并且生成新的知识并将知识储存在知识库这个过程称之为学习。最终生成的专家系统在对训练样本有一定的符合的同时,也可以对未知的相关问题可以做出符合事实的预测,嵌入神经网络的专家系统如图 1 所示^[5]。

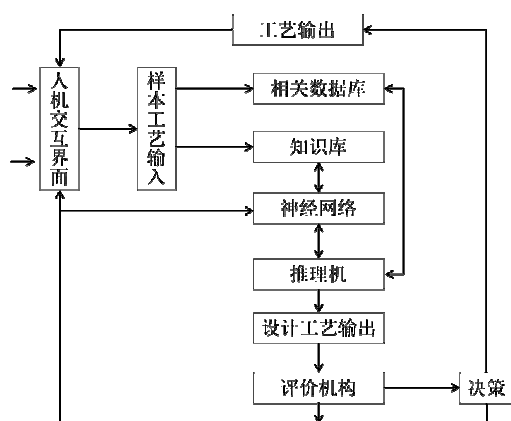


图 1 嵌入神经网络专家系统组成简图^[5]

Fig.1 Simple illustration of expert system embedded with neural network

近年来,人工智能经过一段沉寂期后迎来了爆发式发展时期。在高效处理数据的同时,数据的处理结果也更加准确。同时,在钎焊领域各种各样的钎料和工艺被不断地开发出来,因此沉积了庞大的数据与信息,对这些数据与信息进行分析与整理,一定能获得新颖的成果。

钎焊工艺的开发是一项相当耗时耗资源的过程,尤其是当今零件走向小批量化、个性非标化、更新快速化的趋势,单靠研究者按传统模式开发工艺,将无法满产业需求,企业生产需要一种提高效率的方法。人工智能不仅可以有效地处理数据特别是大数据,同时又具有人类无可比拟的处理数据速度,因此随着科技与工业的发展,人工智能将会与钎焊结合地越来越紧密。

北京航空航天大学的付荣华等^[6]利用 c++语言开发了不锈钢钎焊管理系统,基于系统性原则、有效性原则和可更新性原则将专家系统嵌入到不锈钢钎焊管理系统,使工艺开发更具智能化,开发出的工艺更有效,当用户将初始条件输入,系统经过逐步推理将会选择出合适的钎焊工艺。另外使用 SQL Server 建立钎焊知识数据库,用户可以通过人机交互界面对数据库进行管理。吴裕昌等^[7]开发了有神经网络算法的专家系统,可以对铝合金钎焊工艺进行辅助设计。该系统不仅可以对钎焊工艺知识和钎焊信息进行数字化进行管理,同时具有传统专家系统所不具有的自主学习能力,这种自主学习能力在很大程度上提高了专家系统的适应性和准确性。温净^[8]利用 Oracle 数据库服务器平台开发了交互式钎焊计算机辅助开发(CAPP)系统,并完成了多种钎焊工艺的设计,该系统包括母材库、工艺知识库、工艺参数库、工艺文件库、接头参数库和用户资料库六大子库实现了对钎焊工艺的设计和管理一体化。

对钎焊接头性能研究作为智能钎焊的关键环节,有限元方法作为一个有效的工具,上世纪就被用于研究钎焊过程,随着钎焊技术向智能化、数字化不断发展,加之有限元算法与软件平台的不断发展,利用有限元方法广泛的去研究实际钎焊过程中遇到的问题。

2 钎焊接头在钎焊过程中的有限元模拟

在钎焊过程当中，由于异种母材之间、母材与钎料之间热膨胀系数的差别，接头在冷却阶段产生残留应力，当残留应力集中到一定程度时会诱发微裂纹的产生，残留应力和微裂纹都会对接头的钎焊质量产生消极影响。对接头处残余应力场的分布状态和残余应力集中的原因进行分析，对制定更合理的钎焊工艺有十分重要的指导意义。有限元方法是一种利用变分原理和剖分插值原理求解微分方程的数值计算方法^[9]。通过对研究对象进行离散化即单元剖分，特性分析即建立线性插值函数，求解近似方程可以有效地模拟出作用在研究对象上的力、热、声、电磁场等物理量的分布，同时也可以近似模拟出研究对象的应力场，应变场等力学量的分布。在材料领域，有限元方法广泛应用于焊接后焊接区域质量检测和质量分析；塑性加工过程中应力与变形分析；凝固过程中动量、质量、热量的耦合传递；以及热处理过程中扩散场的分析等。

在钎焊领域，利用合理地有限元分析方案可以有效地分析出钎焊接头残余应力场。近年来由于钎焊技术和其他领域的发展，许多先进的钎焊技术得以飞速发展，如激光钎焊、电子束钎焊、真空钎焊、瞬态液相钎焊、超声波辅助真空钎焊等。这些技术很大程度地提高了接头地钎焊质量，促进了钎焊在其他领域进一步发展，包括磨具和刀具中金刚石与金属基体地焊接， Al_2O_3 陶瓷与金属的焊接，换热器中有金属基板与翅片的焊接，异种金属之间的连接等等。同时，钎料方面的研究也在快速发展，在对传统钎料进行深入开发与应用的同时，许多先进的钎料，如三明治复合钎料、第二相增强复合钎料，非晶态多成分箔带钎料，纳米复合钎料等等也得到了关注^[10]。对新型钎料与工艺的钎焊残余应力进行研究，对保证接头钎焊质量有非常重要的意义。

随着有限元分析软件的不断发展和完善，其计算结果逐渐准确，运算速度也逐渐加快，利用有限元对残余应力进行研究已经成为主流趋势。目前利用有限元分析残余应力的步骤一般包括：1) 从钎焊工件中划分出研究对象；2) 根据实际情况，用一些假设和简化将条件复杂的研究对象进行简化，提出简化模型；3) 分析简化模型的形状和受力状态；4) 对简化模型进行网格划分，沿着工艺路线，基于零件形状，利用各种物性参数模拟其温度场，或温

度场沿工艺路线的变化；5) 根据温度场、施加以工件上的约束、各种物性参数和应力应变之间的关系模拟出应力应变场；6) 根据材料强度理论模拟出残留应力场。其中假设与简化一般包括：忽略钎料在钎缝之间的毛细作用与流动；忽略钎料与母材之间的成分扩散和界面反应；母材的蠕变作用等。

陈虎等^[11]利用有限元法在 ABAQUS 软件平台上对真空钎焊板翅式换热器的温度场钎焊过程中的变形和钎焊后的残余应力进行分析得出换热器内部相对于外部到达钎焊温度的时间有明显的延迟，在钎焊时随工件尺寸的增大要适当延长保温时间，延缓加热速率。钎焊过程中由于热膨胀和夹具约束作用基板会膨胀而翅片竖直方向会有波形变形。接头钎角处存在最大残余应力，同时试验中裂纹出现的位置也在钎角处。证明了有限元分析具有一定的准确性。刘海汉等^[12]采用有限元方法研究了 TC4 钛合金和 YG8 异种材料的真空钎焊工艺。分析过程中取部分工件进行模拟。网格划分如图 2 所示。

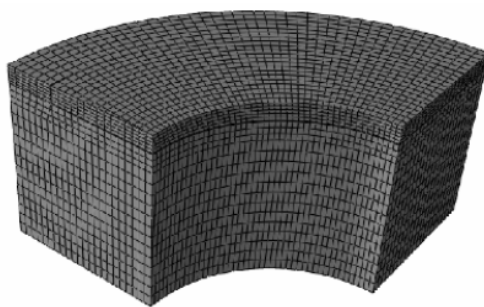


图2 TC4 和 YG8 钎焊部分工件计算模型与网格划分

Fig.2 Calculation model and mesh generation of a part of TC4 and YG8 brazing joint

试验中考虑了 TC4、YG8 基板与 Ni82CrSiB 钎料各自的屈服强度、热膨胀系数、比热容等与温度有关的物性参数，分别模拟了等效残余应力分布和径向、轴向、周向三个方向残余正应力的分布，得出接头处靠近硬质合金一侧存在较大残余拉应力，最大值为 1328 MPa，同时试验中裂纹也出现在这个位置，试验结果和有限元分析的结果相符。Jiang 等人^[13]利用有限元方法研究了板翅式换热器的残余应力分布场，在模拟过程中根据板翅式换热器的形状，将三维残余应力场简化成二维残余应力场的模拟，其有限元模型如图 2 所示，分别计算了图 3 所示 P1~P6 六个路径上 x , y 方向正应力和切应力 τ_{xy} 。结果表明在有限元分析中热膨胀系数的差异导致了

计算模拟结果中的残余应力,在基板处 x 方向正应力起到主要影响,翅片侧的残余应力状态较为复杂。在翅片侧垂直方向和平行方向有两种不同的应力分布,其中平行方向 x 方向正应力达 128 MPa 左右。Wang 等^[14]利用有限元分析了 Ag-Cu-Ti 活性钎料真空钎焊 Al_2O_3 陶瓷和 Nb 板的残余应力场,指出最大残余应力为 296 MPa,其位置并不在陶瓷与钎料的界面结合处而存在于陶瓷侧靠近界面位置。另外也研究了含 8%(质量分数)钼粉的 Ag-Cu-Ti 复合钎料钎焊后,接头处的残余应力场。得出最大残余应力仍存在于 Al_2O_3 靠近界面位置,并降低到 253 MPa。这是因为钼颗粒强化了钎料,缩小了钎料与基板间热膨胀系数的差异。

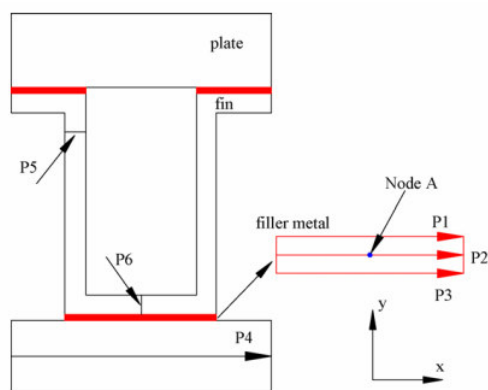


图3 板翅换热器计算模型

Fig.3 Calculation model of plate-fin heat exchanger

3 有限元在钎焊接头服役过程中的应用

在对一个材料或零件加工工艺进行应用时,需要测试材料或零件的各种性能,并制定安全指标和许用范围。在测试接头性能上,有限元方法往往与试验相结合,通过对工件服役过程中应力状态的模拟并于试验相结合可以计算出各种安全指标,比如应力强度因子、疲劳寿命等。利用有限元可以模拟出不同应力状态下接头内部或整个零件所有接头的应力分布状况,评估接头或零件失效的极限载荷。另外有限元方法不仅可以用于性能评估也可以对接头或零件的失效原因提出具有一定意义的指导。Fellinger 等^[15]利用有限元方法和试验相结合评估了 Wendelstein 7-X 上等离子体管道壁上换热不锈钢管钎焊接头在承受 25 bar 水压和 150 kW/m² 热载荷的条件下疲劳寿命。利用有限元分析了热场和应力场,试验过程中利用 CT 扫描在其中一个钎焊接头处发

现了裂纹,分析表明此时热载荷仍不超过 100 kW/m²,利用有限元又分析了热载荷为 150 kW/m² 时接头的应变场,如图 4 所示,结果表明有明显的屈服现象。

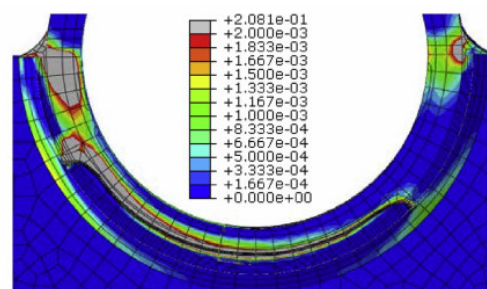


图4 热载荷为 150 kW/m² 的钎焊接头处应变场有限元分析结果

Fig.4 Finite element analysis results of strain field of brazing joint with thermal load of 150 kW/m²

Ma 等^[16]基于有限元和热弹性理论对受压力作用的板翅式换热器进行应力场分析,结果显示在钎焊接头处翅片一侧出现了应力峰值,因此这个区域最有可能萌生裂纹。随着换热器中天然气和混合制冷剂之间的温差、以及天然气和混合制冷剂各自的压力与等效应力峰值呈正相关关系。除此之外,沿天然气流动方向的温度梯度对等效应力峰值影响不大。根据有限元分析的结论,可以给板翅式换热器的设计提出了一些指导性建议。

4 结语和展望

随着智能制造浪潮的兴起,计算机与钎焊的结合越来越紧密。嵌入神经网络算法的钎焊信息管理专家系统成为钎焊信息管理与计算机辅助开发钎焊工艺的主流;过程研究和性能评估作为智能钎焊流程中的关键环节,加入了有限元分析工具可以较为贴合实际地模拟出残余应力场,判断出裂纹最可能萌生的位置;同时在性能评估环节,有限元的结果可以给出工艺设计建议。

但目前专家系统辅助开发钎焊工艺目前仍不能达到人类专家水平,有一些系统甚至让工艺开发过程更加耗时、更加繁琐;有限元分析的简化模型不能满足钎焊过程中所有问题的模拟,同时有限元分析也忽略了一些参数,未来有限元分析将会在优化简化模型、设置参数做出更多努力。

参考文献：

- [1] 赵升吨, 贾先. 智能制造及其核心信息设备的研究进展及趋势[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(1): 1-16.
- [2] 何鹏, 张玲. 智能钎焊技术进展[J]. 焊接学报, 2017, 38(4): 124-128.
- [3] 李红, 张续, 黄海新, 等. 钎焊过程数值模拟研究进展[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(6): 956-963.
- [4] 张煜东, 吴乐南, 王水花. 专家系统发展综述[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(19): 43-47.
- [5] 李航. 统计学习方法: 2 版[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.
- [6] 付荣华, 康慧, 曲平. 不锈钢钎焊管理信息系统的开发[J]. 电焊机, 2007(8): 1-4.
- [7] 吴裕昌, 康慧, 曲平. 铝合金钎焊工艺专家系统研究[J]. 电焊机, 2005(9): 30-31.
- [8] 温净. 交互式钎焊 CAPP 系统研究与开发[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2011.
- [9] 尹飞鸿. 有限元法基本原理及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [10] 熊华平, 李红, 毛唯, 等. 国际钎焊技术最新进展[J]. 焊接学报, 2011, 32(5): 108-112.
- [11] 陈虎, 巩建鸣, 耿鲁阳, 等. 板翅结构钎焊残余应力与热变形的有限元分析[J]. 焊接学报, 2006(11): 29-32.
- [12] 刘海汉, 李强, 陈小勇, 等. 有限元法在钎焊中残余应力的分析及应用[J]. 电焊机, 2018, 48(1): 5-8.
- [13] JIANG W C, GONG J M, TU S D, et al. Modelling of temperature field and residual stress of vacuum brazing for stainless steel plate-fin structure[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2008, 209(2): 1105-1110.
- [14] WANG Y, ZHAO Y T, YANG Z W, et al. Microstructure, residual stress and mechanical properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Nb}$ joints vacuum-brazed with two Ag-based active fillers[J]. Vacuum, 2018, 158: 14-23.
- [15] FELLINGER J, CITARELLA R, GIANNELLA V, et al. Overview of fatigue life assessment of baffles in wendelstein 7-X[J]. Fusion engineering and design, 2018, 136: 292-297.
- [16] MA H, HOU C, YANG R, et al. The influence of structure parameters on stress of plate-fin structures in LNG heat exchanger[J]. Journal of natural gas science and engineering, 2016, 34: 85-99.