

数值模拟技术在焊接中的应用

Application of Numerical Simulation Technology in Welding

天津大学材料科学与工程学院 曾 志 王立君



曾 志

天津大学材料科学与工程学院博士研究生, 研究方向为焊接数值模拟及焊接结构疲劳与断裂。

焊接是一个涉及电弧物理、传热、传质、冶金和力学等多学科交叉的复杂过程。随着计算机软硬件技术的发展,数值模拟技术已经渗透到焊接的各个领域,在航空航天、军工、能源、动力等领域,关键部件焊接过程仿真技术的实现,对于优化工艺过程,提高产品质量和清除安全隐患起着日益重要,甚至不可替代的作用。已有的数值研究成果使我们对焊接的本质和规律有了进一步的了解,为解决焊接过程中存在的问题带来了

随着计算机软硬件技术的发展,数值模拟技术已经渗透到焊接的各个领域,在航空航天、军工、能源、动力等领域,关键部件焊接过程仿真技术的实现,对于优化工艺过程,提高产品质量和消除安全隐患起着日益重要,甚至不可替代的作用。

新思路和新方法。然而即使如此,目前对焊接过程的仿真,尤其是三维结构的仿真仍存在很大困难。

焊接数值模拟的数学方法

数值模拟是根据具体对象建立相应的数学模型,然后采用数值分析方法计算求解。常用的数值方法包括解析法、差分法、蒙特卡罗法、有限元法等^[1]。

解析法用在原函数难以找到的微积分计算中。最简单的解析法是求积节点(积分点)等间距的两点公式(梯形法则)及三点公式(辛普生法则)。此外还有五点求积公式和变步长的梯形法则等。

差分法的基础是用差商代替微商,相应地用差分方程代替微分方程来求解。对于具有规则的几何特性和均匀的材料属性问题,程序设计和计算简单,然而这种方法往往局限于规则的差分网格,灵活性较差。焊接数值模拟研究中差分法常用于焊接

热传导、熔池的传热传质,焊接接头的氢扩散等问题的分析。

蒙特卡罗法也称随机模拟,是对某一问题作出一个适当的随机过程,把随机过程的参数用由随机样本计算出来的统计量的值来估计,从而由这个参数找出最初问题中未知量的方法。蒙特卡罗法在多重积分计算中得到广泛应用。

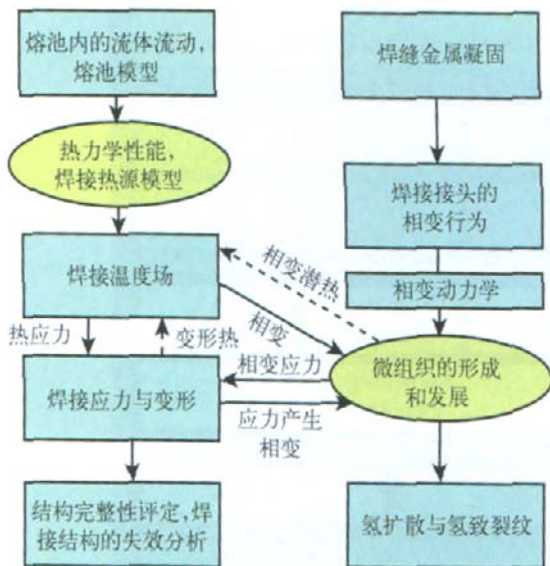
有限元法是为适应使用计算机而发展起来的一种比较新颖而有效的数值方法,是将连续体简化为由有限个单元组成的离散化模型并对离散模型数值求解的过程。有限元法起源于结构分析,然而由于其理论的普遍性,已经成功地用于求解如传热、电磁场,流体力学等领域的问题。目前,常用的有限元软件有ANSYS、LS-DYNA、ABAQUS等。

工程应用中,上述数值方法常相互交叉和渗透,在焊接数值模拟过程中往往要综合运用多种数值方法以提高计算效率和精度。

焊接数值模拟现状

1 焊接熔池流动及变形

为了精确地计算焊接热过程,必须考虑熔池内的流体流场及流体流动对焊接热过程的影响。熔池内液态金属的剧烈运动极大地影响着熔池中热量和质量的传输,从而决定了熔池内一系列物理化学反应进行的程度。熔池的形状,结晶,气体和夹杂物的吸收、聚集、溢出,化学成分的均匀性以及化学反应动力学等与熔池的流动也是密切相关的。此外,对焊接熔池流场和焊件上热场的精确计算也是进行焊接冶金分析、焊接应力应变塑性变形分析的基础。熔池的循环流动受到各种驱动力(主要有浮力、电磁力、表面张力和气体剪切力)的影响。假定电弧弧柱区处于



焊接数值模拟的主要内容及相互影响

局部热动态平衡状态,符合磁流体动力学守恒方程,但需要对阴极区和阳极区做特殊处理。60年代中期,熔池中液态金属在表面张力梯度、电磁力等力的作用下剧烈运动的概念就已被人们逐渐接受。1983年,MIT的G.M.Oreper^[2]首次对熔池中流体在表面张力梯度、电磁力和浮力共同作用下所产生的流动及传热传质过程建立了数学模型。近年来,一些学者分别用不同方法建立了接近实

际情况的电弧作用下的焊接熔池流动的数学模型。Zacharia等^[3]曾经建立了运动电弧GTAW熔池的三维瞬态模型,但是这些模型或者只涉及未熔透熔池,或者在熔透情况下考虑熔池背面变形和下塌。日本政府2000年投入20亿日元开展了高效与高可靠性焊接技术课题的研发,其最初的研究计划就是建立运动GTAW焊接电弧作用下流体流动与传热模型。山东大学材料研究所从统一、整体的观点来全面描述和解决运动电弧、三维流场与热场、瞬态、全熔透以及上下表面变形,为焊接工艺优化设计、焊接熔透控制提供了重要的基础数据。武传松等^[4-7]对电磁力、电弧力、焊接热输入、熔滴热焓量分布模式以及表面活性元素对熔池流动和变形做了大量分析。

2 焊接温度场及焊接热源

焊接温度场分析包括焊接热源的大小及分布形式、热物性性能随温度变化的影响分析以及各种实际焊接接头形式、工艺方法的边界条件处理等。利用数值方法计算焊接热过程,为合理选择焊接方法和工艺参数以及进一步进行冶金分析和动态应力应变分析奠定了基础。焊接温度场采用的数学模型基于傅立叶热传导方程。早期的温度场模拟都基于以下假设:

热源为点热源、线热源或面热源;材料为固态,无相变发生;材料的热物性性能不随温度变化;焊接构件为无限体或半无限体。这些假设与焊接实际情况有很大出入,因此模拟结果会出现较大偏差^[8]。随着对电弧物理的深入研究,焊接热源模型不断得到完善。Eagar和Tsai^[9]提出了将焊接加热斑点热流密度的分布近似地用高斯数学模型来描述的方法,这种热源分布函数在早期使用有

限元方法计算焊接温度场时应用较多,在二维导热方程计算时常将纵向热流忽略。由于高斯热源函数未考虑电弧的穿透作用,Goldak^[10]提出了双椭球热源模型,将焊接熔池的前半部分作为一个1/4椭球,后半部分作为一个1/4椭球,焊接不同材质时,也可将双椭球分成4个1/8的椭球瓣,对于电弧冲击力效应较大的焊接方法,如MIG等一般采用这种热源模型。随着焊接温度场数值模拟技术和计算机技术的发展,对焊接热过程的分析进一步深入。A.Trivedi^[11]采用了表面高斯热源和内部双椭球热源结合的自适应热源模型对激光点焊的角焊缝温度场进行了模拟,效果较好。Zhang等^[12]对GMAW角焊的温度场、熔池变形进行了详细描述。边界条件,如对流、辐射等对焊接温度场的结果也有很大影响。郑振太等^[13]综合考虑了多种对流和边界条件,对Q235A钢板CO₂气体保护焊的温度场进行了模拟研究,计算结果与红外测温结果吻合较好。此外,焊速、热输入、能量分布对焊接温度场也有很大影响^[14]。

3 焊接残余应力及变形

焊接应力和变形的存在,是导致焊接裂纹和接头强度与性能降低的重要原因,对焊接应力和变形的研究一直是焊接数值模拟过程中的重要问题。研究焊接应力和应变的数值方法有热弹塑性有限元分析、固有应变法和粘弹塑性分析,考虑应变与热应力耦合效应等。20世纪70年代以来,上田幸雄和村川英一^[15-16]提出了考虑材料力学性能与温度有关的二维和三维焊接热弹塑性有限元法,并发展成为一门新兴学科——“计算焊接力学”,包括焊接热弹塑性基本理论、焊接应力发生机制和残余应力分布状态、退火热处理消除应力、焊接裂纹及其力学性能、固有应变理论、焊接变形的预测、焊接残余应力和变形对焊接结构的影

响等。1986年, Leblond^[17]对相变钢的塑性、相变、热应力三者之间的耦合效应进行了研究,并在此基础上发展了SYSWELD焊接专用软件。随后, Rybicki等人根据热弹塑性基本理论提出了环焊缝对接焊管残余应力与变形的有限元模型,模型中考虑了材料力学性能参数的非线性,多道焊后几何形状的改变对应力分布的影响等,并成功预测了304不锈钢多道焊环焊缝的残余应力。加拿大的Goldak教授等对从熔点到室温时的焊接热应力进行了分析研究,提出了各个温度段的本构方程。天津大学单平等^[18]用ABAQUS对薄壁球形结构焊接残余应力与变形进行了数值模拟,清华大学机械工程系^[19]对三峡工程用特大型桥式起重机主梁焊接变形进行了计算和控制,表明大型结构焊接过程的三维数值模拟已变得现实可行。

4 焊接结构的疲劳和失效分析

目前对焊接结构的失效评定基于“合于使用”原则,徐玉冰等^[20]对香港青马大桥和江苏的润扬长江公路大桥的疲劳过程中焊缝焊趾附近的应力集中情况做了分析,并研究了焊缝的疲劳特性。任晓波等^[21]对电厂典型压力容器各部位的应力分布状态进行了有限元模拟,建立了缺陷评定专家系统,并在某电厂压力容器安全性评价中得到了初步应用。以某型SUV轿车为对象,上海交通大学的杜中哲等^[22]在MSC.Fatigue软件中对车身结构和焊点的疲劳寿命进行了分析研究,对结构和焊点寿命较低的部分分别进行了初步的优化改进。Tveiten等^[23]对铝合金焊接接头在机械和热多重载荷作用下的疲劳寿命进行了数值模拟,提出了多种解决方案。各种有限元软件也不断推出面向疲劳失效分析的仿真技术平台,如PERA Global开发了ANSYS FE-SAFE平台,既支持基于疲劳试验测试应力和应变信号的

疲劳分析技术,也支持有限元分析计算的疲劳仿真设计技术,并已成功应用于整车路谱疲劳分析、高周疲劳及低周疲劳的寿命计算等。

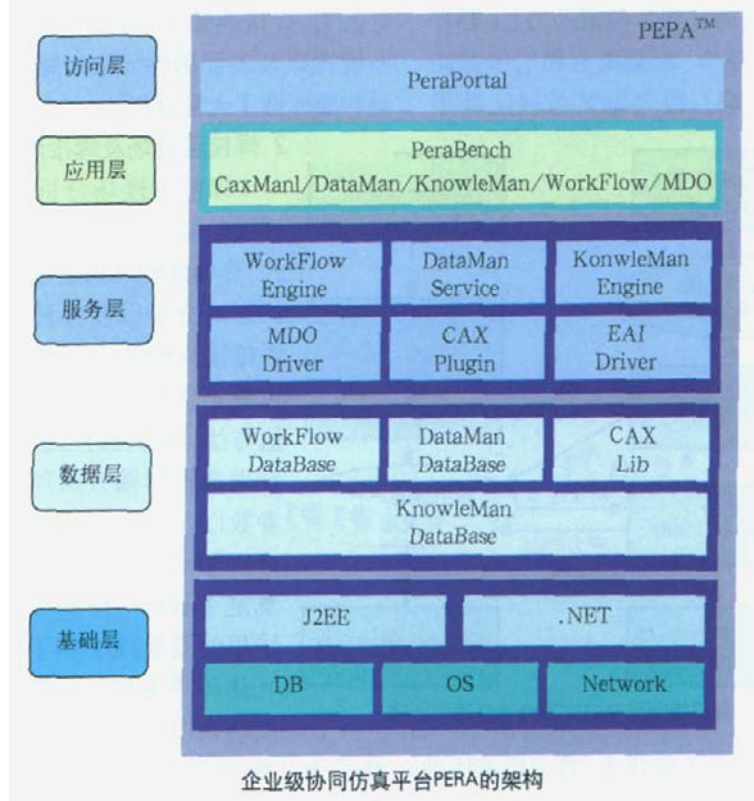
5 焊缝金属凝固和焊接接头相变过程

焊接凝固裂纹是焊接构件中危害最大的缺陷之一,主要受冶金因素和力学因素影响。长期以来,业界对凝固裂纹形成机理提出了各种各样的理论,如强度理论、液膜理论、综合作用理论和“愈合作用”理论等^[24]。一般在模拟二维模型焊接凝固裂纹时采用两种方法来处理凝固结果,一种采用动态单元再生技术,另一种采用修改凝固温度区间的材料

素——焊接熔池变形、初始温度的变化和凝固收缩的影响,并对固液态金属的流变性能做了研究。文献[28]以ADINA & T为中心计算软件,利用VB 6.0为主要编程语言,借助MATLAB及MatrixVB矩阵运算函数库,建立了焊接凝固裂纹数值模拟后处理系统,效果显著。

6 焊接接头和热影响区的氢扩散、氢致裂纹

焊接接头组织转变对氢扩散和聚集行为均产生影响。焊接区组织转变是一个复杂的冶金过程,通过相变热力学计算可确定铁素体、珠光体、贝氏体等形核孕育时间及转变开始温度,通过相变动力学计算,可确



本构关系来处理凝固效果^[25]。Dye、D等^[26]对镍基合金的二维模型焊接性进行了深入的研究,认为凝固过程中如果在脆性温度区间内焊缝中心金属受到正的横向拉伸应力作用,凝固裂纹就会产生。魏艳红等^[27]采用二维和三维的模型对不锈钢的凝固裂纹问题进行了研究,采用单元再生方法解决了焊接凝固过程的三个因

定新生相晶粒生长速度并计算最终的百分含量。目前,在焊缝金属组织模拟方面,H.K.D.H.Bhadeshia^[29]对焊缝金属中的铁素体组织做了大量的基础性研究工作。ORNL(美国橡树岭国家实验室)的S.A.David^[30]在焊缝组织模拟上也作了一定工作,其主要成果是在焊接温度场分析基础上,预测焊接HAZ局部脆性区尺

寸及组织。作为焊接氢致裂纹最重要的影响因素,关于氢扩散的计算可分为在均匀介质中和非均匀介质中两种情况。Takahashi^[31]采用有限差分法计算了氢在 2.25CrMo 钢的厚板多道焊接接头中的分布情况。Yurioka 等^[32]在氢扩散的驱动力的基础上采用有限差分法计算了三向应力条件下不均匀组织焊接接头中氢的扩散和聚集行为。我国学者在该领域也做了大量的研究工作,张显辉等^[33]对氢在不均质焊接接头的扩散进行了数值模拟计算,得到了焊接接头随时间延迟,焊缝金属中氢的浓度逐渐降低,而熔合区以外区域的氢浓度经历了一个峰值变化过程的结论,该结论可用于指导焊接热过程中的工艺制定。

未来发展趋势

近年来,随着焊接结构的大型化、复杂化和对焊接物理过程研究的深入,焊接数值模拟技术不断向深度、广度发展。未来焊接数值模拟的发展仍然面临着几个问题,首先在建立科学而精确的物理模型方面还需要做大量的基础性研究工作,其次对模拟结果的验证也有待加强。

1 单元技术开发和网格技术优化

单元技术和网格划分技术一直是有限元技术的核心问题之一。焊接过程中随着热源的移动,整个焊件的温度、应力应变随时间和空间急剧变化,并且同时存在着加热和冷却、加载和卸载等现象,这种不平衡加热使得焊缝附近的材料并非在焊接全过程中都会经历复杂的温度和应力变化,而仅仅在热源经过的瞬间温度很高。为减少计算时间和提高计算效率,根据焊接热过程的这个特点,可以通过开发新型单元技术和改进网格划分技术来实现。

焊接时所用的热源大多是移动热源,较理想的网格划分方法为自适应网格技术,即随着热源的移动,加

密的网格也随之移动。该技术允许根据自适应误差准则自细化网格,在误差减小到一定程度后,自动回到细化前的较稀疏的网格状态。文献[34]提出了一个与有限元分析和自适应网格管理前后串联的误差分析方法,可用来计算许多标量(如温度等),并重点研究了此方法在焊接的热分析中的应用;P. Durantou 等^[35]采用了自适应网格和网格局部加密技术对 316L 不锈钢管道的多道焊过程进行了数值计算,有效减少了计算时间,并保证了较高的计算精度。

2 并行技术和网络技术

由于物理上的极限和工程实际上的困难,单机速度很难满足高科技领域的要求(如大型的数值分析对计算机性能的要求)。并行计算技术是目前有限元分析中缩短计算时间的主要手段之一,但由于并行程序编制的复杂性及其与硬件的相关性,目前这一方面的进展一直较慢。目前商业化的有限元软件一般采用多指令、多数据平行法和区域分解方法。清华大学鹿安理等^[36]在 SGI 公司的 Origin2000 服务器上,应用商用软件 Marc 对并行计算效率以及选用求解器的种类在各种不同匹配下的计算时间进行了分析对比,结果表明,随着 CPU 数的增加,并行计算的优越性会更加明显。

网络技术的兴起使商用 CPU 和网络作为计算资源可能起到很重要的作用。“Web 上的计算”就是指将并行和分布式计算、专用和通用网络互连、Intranet 和 Internet 的概念合并起来,其目的是利用一组各具特色的由网络连接起来的计算机资源来协作求解一个问题。在大规模仿真领域,可以将问题中不同类别的并行计算行为分为 4 类:数据并行性、功能并行性、对象并行性和元级问题。近年来,协同仿真概念的提出使原本离散的 CAE 技术、数据、流程和知识可以综合起来,形成协同优势,

支持复杂产品的优化与创新。安世亚太已推出了 PERA——企业级协同仿真平台,该平台通过集成各类研发工具和数据接口,实现数据与工具间的关联,实现对整个研发过程中产生的大量信息的可溯性管理,并与企业其他系统进行无缝集成,目前已应用在航空航天领域。

3 相似理论的应用

由于焊接过程的复杂性,在提高焊接效率和精度的同时,有必要引入相似理论。运用相似理论可以将模型试验和数值模拟方法结合起来,按照相似关系对焊接构件进行一定转换,减小复杂性后再进行数值计算,从而减少运算量。蔡志鹏等^[37]研究了相似理论在焊接温度场、应力应变场以及焊接变形预测等方面的应用,推导了温度场和高斯热源的相似准则,并得到模型与实际构件焊接残余变形的相似关系式。在实际生产中,因受到焊接条件的限制,模型与实物间的相似准则很难同时满足,且对两者之间准确的对应关系还缺乏足够的研究,因此应用受到了较大限制。

结束语

未来,计算机分析、数值模拟、自动化控制技术将广泛应用于焊接领域。发展焊接数值模拟技术,应十分重视试验验证工作,并充分考虑有关现象的所有知识,使建立的数学模型能真实反映焊接物理现象的本质和规律。同时,计算机技术的迅速发展和对焊接过程的进一步深入了解将极大地提高焊接数值模拟的计算速度和精度,而焊接数值模拟技术也必将有更广阔的发展前景,从而推动航空航天、机械制造等领域的科学化、现代化、自动化进程。

注:本文有参考文献 37 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向编辑部索取。

(责编 魏凉)