

中国焊接学会计算机应用技术专业委员会

重庆会议论文集

2002 年 10 月 重庆

中国焊接学会计算机应用技术专业委员会

中国焊接学会计算机应用技术专业委员会

2002 年重庆会议论文集目录

01 焊接生产与研究中的信息化	陈丙森	1
02 焊接工艺过程数值模拟	武传松	12
03 固有应变有限元法预测焊接变形理论及其应用	汪建华 陆皓	20
04 焊接残余应力形成机制与消除原理若干问题的讨论	汪建华 陆皓	26
05 焊接零部件工艺规划与材料及工时定额集成系统	朱志明 陈丙森 郭彦武 等	33
06 基于 Client/Server 焊接工艺评定管理系统	王敏 魏艳红 杨松 等	37
07 白车身装焊质量统计过程控制与诊断系统	朱志明 李传界	44
08 徐工集团 CIMS 的实施	路豫湘 杨勇 陈丙森 等	49
09 车身装焊质量在线控制与诊断 E-R 模型及其实现	朱志明 李传界	53
10 自动焊在线质量监测及管理平台的研究	李迪 张春华 曾安	58
11 PVWES 焊接专家系统的结构、应用及二次开发	张连伟 陈日新 杨风华	64
12 虚拟环境下轿车车身装焊工艺信息模型建立及应用	岁波 都东 翟枫 等	68
13 虚拟制造技术与轿车装焊生产线研究	吴挺 都东 韩赞东 等	72
14 数据挖掘技术在自动化焊接流水线在线质量监测及管理中的应用	张春华 李迪 赖乙宗	77
15 MAG 焊接熔池的激光频闪视觉检测	张敏 高进强 赵衍华 等	82
16 基于 MSPC 方法的 GMAW 焊在线监测	曾安 李迪 赖乙宗	86
17 焊接过程光电信号测试分析系统软件的开发及应用	李桓 胡连海 李国华 等	92

18 CO ₂ 弧焊短路过程的随机稳定性与评判	俞建荣 邹勇 蒋力培	96
19 基于 GMAW 熔滴过渡电弧光谱信息的提取	潘存海 李俊岳 杨运强 等	99
20 焊接电弧多信息数据采集分析系统的开发	薛海涛 李俊岳 张晓因 等	103
21 虚拟仪器在 CO ₂ 弧焊品质分析中的应用	蔡艳 吴毅雄	107
22 高能束焊数值模拟中热源模型参数的确定	王煜 赵海燕 吴甦 等	110
23 焊接过程数值模拟的逆问题	林健 赵海燕 蔡志鹏 等	116
24 高频感应加热温度场的有限元分析	罗宇	123
25 焊接数值模拟的网络化制造系统	刘点兵 赵海燕 蔡志鹏 等	127
26 电阻点焊中铝合金接触电阻的研究	王煜 吴甦 赵海燕 等	132
27 零压软开关单端正激弧焊逆变电源静态工作过程仿真研究	朱志明 龙轶伟	138
28 CO ₂ 焊短路过渡波控过程的计算机仿真	杨立军 李桓 李俊岳 等	144
29 双重脉宽调制脉冲弧焊机电路的计算机仿真研究	杨军伟 胡仲翔 张甲英	148
30 基于计算机视觉焊缝跟踪控制系统设计研究	毛鹏军 黄石生 薛家祥 等	151
31 基于数字信号处理器控制的气体保护焊接电源研制	华学明 吴毅雄 焦馥杰 等	155
32 脉冲 MIG 焊机数字化控制设计	李鹤歧 徐德进 李芳	160
33 高速电弧喷涂过程的计算机控制	张甲英 徐滨士 朱绍华	165
34 电弧喷涂最优控制系统研究	李鹤歧 陈克选 张志坚	169
35 基于 DSP 的电阻点焊智能控制系统	方平 林一松 黄石生	174

焊接生产与研究中的信息化

清华大学 陈丙森

摘 要:本文讨论了焊接生产与研究中的信息化的问题,介绍了国内外焊接生产与研究中的信息化现状,并对焊接过程控制、模拟与仿真;焊接生产过程管理信息化;焊接信息数据库和互联网的利用等几个方面进行了进一步的分析。

关键词:焊接、信息化、焊接控制、互联网

0 前言

信息自古以来就以语言、文字、图画等形式存在,自从计算机出现以后人们发现信息可以用数字的形式来表示,从而得以大量地存储、方便地处理、并加以利用,因此计算机技术的飞速发展推动了各行各业的信息化。

据统计,在过去 25 年中全世界已销售计算机 10 亿台,预计到 2008 年还将销售 10 亿台。现在计算机世界拥有量约 4 亿台,中国约 4 千万台。计算机性能的提高超出人们预料,25 年前 PC 机 CPU 的主频只是 8 兆 (MHz),而现在流行的主频是 1—2 千兆 (GHz),预计明年将研制出主频超过 3 千兆的 CPU 芯片。当前一般 PC 机配置的内存一般是 256 兆,甚至是 512 兆,用不着像以前那样总要担心由于内存不够程序无法运行。

现在 PC 机经常选用的硬盘容量是 40—80GB,这不仅可以存储文字、数字,还可以存储相当数量的声音、图像、动画等多媒体数据。存储一部电影的数据量绝不超过 1G,所以对于企业中作为终端用户的一般设计或工艺人员用以存储文件、图纸等数据来说,其硬盘空间是足够大了。

网络技术的发展更加促进了信息化过程。企业内部局域网建立的技术已经相当普及,软硬件的投资也不需要很大。互联网在国内发展很快,据今年上半年的统计我国互联网上网用户已达 4580 万,上网计算机共 1613 万台。网络使得信息得以集中管理、高速传输、方便共享、提高信息的利用率和安全程度。

针对各种用途的应用软件经过 20 多年的发展可以说是应有尽有:文字处理、数据处理、多媒体处理、CAX (CAD/CAE/CAM/CAPP……)、企业管理。许多软件还具有智能功能。

以上种种都为各行各业信息化提供了良好的条件。然而,每一行业的信息化,如:政府信息化、教育信息化、商业信息化、金融信息化、企业信息化…其内容各不相同,可以差别很大。

正如大家已知道的,国家从“863”和“九五”计划推进计算机集成制造系统 (CIMS) 示范工程和 CAD 应用示范工程十多年来,我国在制造业信息化方面已经取得了相当进展。在此基础上国家在“十五”期间提出了以“信息化带动工业化”的目标,加快制造业信息化的进程。“十五”期间科技部准备投入 8 亿元人民币组织实施制造业信息化关键技术研究以及应用示范工程,另外加上地方政府与企业的投资,总投资将达到 100 亿人民币。中国机械工业联合会定于 2002 年 9 月在北京召开“机械工业企业信息化会议”,以进一步推进机械行业企业信息化工作方面的工作。

信息时代有如一场风暴,企业信息化势在必行,因此我们要抓住这个历史的机遇分步骤、分层次、分领域地在焊接信息化的研究与应用方面开展工作。

1 焊接生产与研究信息化国内外发展现状

1.1 国外现状

英国焊接研究所(TWI)在1986年召开了“计算机技术在焊接中应用”(Computer Technology in Welding)国际会议,此后至2000年已召开了第10次会议。与此同时,美国焊接研究所(AWI)也组织类似的会议。自1986年以来,2001年在俄亥俄召开了第十一次。这些会议一般都包括:传感系统、模拟与仿真、制造过程自动化、管理和教育软件等内容,近两年又增加了网络应用和集成制造等方面的内容。需要特别提到的是,1988年国际焊接学会(IIW)在维也纳召开的第41届年会大会的主题就是“Computer in Welding Technology”。此后,在IIW第XII专业委员会会议上几乎每年都有世界各国计算机在焊接领域的研究、应用以及焊接应用软件发展情况的报道。1994年在北京召开的IIW第47届年会大会的主题报告的题目为“信息时代的焊接”。另外,在IIW第IX专业委员会中建立了“焊接数值分析”(Numerical Analysis of Welding)工作组。在第IX专业委员会支持下自1991年开始,每两年在奥地利Graz大学召开一次题为“Numerical Analysis of Welding”的国际研讨会(International Seminar),到2001年一共已开了6次。实际上这个会议不仅限于焊接性的数值分析,还包括了焊接接头形成过程、接头的组织和性能、焊接应力与变形等方面的数值计算与模拟。近几年我国清华大学、山东大学、华南理工大学已有教师参加过上面提到的这些会议,并发表了论文介绍自己的工作。在国内我们可以查阅到这些会议的部分论文集,从这些会议的论文中可以看出在焊接领域计算机应用和信息化方面的新进展和新动向,应该值得指出的是这些会议中的许多论文反映了这些技术已经得到了实际应用。

为了深入研究和推广焊接计算机应用和信息化技术,有的国家已经制定了专门的计划。下面介绍日本和德国的情况。

日本在2001年焊接学会志和焊接技术杂志上先后报道了国家攻关课题“高效与高可靠性焊接技术的开发(Development of welding technology with higher efficiency and higher reliability by improving welding techniques)”的情况。2000年5月,日本通商产业省启动这个国家攻关课题,准备投入经费20亿日元(约1600万美元),计划五年完成,课题的研究目的是“通过模拟改进电弧焊接技术(Improving arc welding techniques by simulation)”。该项目包括:焊接工艺过程、焊接冶金组织和焊接变形领域的数值模拟模型的开发和研究,以及它们最终的集成。这是一个由政府组织的有产、学、研参加的大型项目。参加这一项目的除大阪大学外,还有神户制钢、川崎重工等企业。

在德国许多单位从事焊接计算机应用和信息化方面的研究,例如:亚琛工业大学焊接研究所在焊接数值模拟、神经网络、遗传算法、模糊逻辑、专家系统等领域都做了许多工作,他们研究开发的电子束焊、气体保护焊和点焊模拟系统(EBSIM、MAGSIM、SPOTSIM)可以方便地通过计算将在特定焊接条件下得到焊缝的形状。这些软件有很高的实用价值。他们的研究开发工作还包括:焊接熔池模拟、焊接凝固过程模拟、焊缝及热影响区组织模拟等,其中有些工作是SFB 370“Integrative Material Modeling”(材料综合模拟)项目的一部分,这个项目是一个全国性的大项目,德国许多单位参加,亚琛工业大学焊接

研究所承担了研究电弧焊接过程中材料行为的模拟与仿真部分，其内容是从建立焊接热过程模型开始，计算温度场、熔池形状，模拟焊接接头的微观组织等，期望最终能够预测焊接接头的力学性能和使用性能。

1.2 国内现状

1986年在焊接学会中建立了“数值模拟和CAD/CAM研究组”，这个研究组后改为“计算机应用技术专业委员会”。这个专业委员会在1987、1988年先后召开过学术讨论会，以后又举办过多次活动。1989年召开了“焊接专家系统”专题学术会议。1992年、1996年、2000年先后三次承办了焊接协会和焊接学会联合召开的全国性的“计算机在焊接中的应用技术交流会”。2001年在第十次全国焊接学术会议上组织了“焊接与IT”专题讨论会。在这些会议上反映了历年来国内许多学术单位和生产企业针对焊接研究和生产中的问题所开展的计算机应用和信息化方面的大量工作。

我国在焊接应用软件研制方面，清华大学在80年代末就为中国石化总公司开发了“弧焊工艺专家系统”，哈尔滨工业大学为哈尔滨锅炉厂等单位开发了“焊接工艺专家系统”，现在他们对各自的软件系统不断地进行改版升级，扩大应用范围。太原重型机械厂作为原机械部焊接示范单位，曾经在厂内焊接处中建立了计算机应用科，开发了“数控切割自动编程套料系统”等软件，现在正和清华大学合作开发“焊接零件下料工艺、材料和工时定额制定软件系统”。清华大学还为徐州工程机械厂等单位开发了“焊接工艺CAPP系统”。上海港机厂、武汉锅炉厂等企业都曾开发过适合自己需要的焊接应用软件。

在应用计算机对焊接工艺过程、焊缝跟踪、焊接质量等领域的检测与控制方面，我国开展了许多工作，其中有的工作达到了国际水平、得到了国家级的奖励。

在数值分析方面，国内在上世纪八十年代初西安交通大学和上海交通大学等就开始了关于焊接热弹塑性理论的研究工作。后来，西安交通大学与沪东造船厂合作对单面焊终端裂纹的产生机理和防止进行了实验和数值研究，取得了显著成效。上海交通大学开发了二维平面变形和轴对称的焊接热弹塑性有限元分析程序，并在薄板、厚板和管子等焊接应力分析方面得到成功的应用，他们在九十年代又与日本大阪大学合作对三维焊接应力和变形问题进行了研究，提出了改善计算精度和收敛性的若干途径，发展了有关的三维焊接分析程序并有不少成功的应用实例。哈尔滨工业大学、山东大学等单位在TIG焊、MIG焊时熔池形成的模拟方面开展了许多工作。

另外，清华大学潘际奎院士的“现代弧焊控制”、哈尔滨工业大学吴林等的“智能化焊接技术”、上海交通大学陈楚等的“数据分析在焊接中的应用”等专著，焊接学会计算机应用技术专业委员会组织出版的“计算机辅助焊接技术”一书，都对我国焊接控制、模拟与仿真研究以及焊接计算机应用和信息化方面的工作起了很大的推动作用。

根据以上简单介绍国内外在焊接计算机应用和信息化方面的现状可以看出，焊接界所关心的信息化问题除了包括一条优质的焊缝形成过程信息化以外，还包括焊接结构生产全过程的信息化。因此焊接信息化可以大体分为以下几个方面：

焊接过程的信息检测与控制

焊接过程的模拟与仿真

焊接生产过程的组织与管理

2 焊接过程控制、模拟与仿真

2.1 焊接过程信息的检测与控制

焊接过程信息的检测与控制的内容包括：焊接设备的控制、焊接工艺过程和焊接参数的控制、焊缝跟踪方法、焊接质量的检测与控制等许多方面。这些归结起来就是利用传感技术获取信息，然后用计算机对信息加以处理和利用。

现在由于单片机性能的提高，尤其是近年来 DSP（数字信号处理器）芯片的商品化，焊接设备、焊接工艺过程和焊接参数都已经能做到数字化快速控制，并做到及时反馈。通过单片机不仅可以控制焊接电源的外特性、动特性，还可以对焊接时脉冲电流的各种特性进行精确控制，甚至可以在 MIG/MAG 脉冲焊时实现在线控制在一个脉冲中过渡一个熔滴。日本、奥地利等国已经使“数字化”焊机商品化。

由于焊接过程十分复杂，在手工焊接时熟练焊工需要用到视觉、触觉甚至听觉，因此人们探索了采用电场、磁场、可见光、激光、声波、超声、热像、图像等信息制成了专门用于焊接的传感器，还有直接利用焊接电弧本身来提取焊接过程的信息，用以控制焊接过程。当然，对于较为复杂的信息处理单片机就无能为力了，往往要求 PC 机才能进行。

2.2 焊接过程的模拟

焊接工艺由经验到科学，必须将焊接过程用科学方法描述出来。焊接工作者非常希望能够利用基础理论对焊接过程中的物理或化学现象的本质进行分析，进而对焊接过程进行模拟仿真和数值计算得到定量的结果。

焊接界最关心的焊接生产中的问题是焊接接头的质量和生产效率。人们期望通过模拟技术使得在焊接过程中使接头不出现缺陷，而且能够达到规定的性能。但是，焊接过程的模拟十分复杂，例如，对弧焊过程全面模拟就要求能够模拟焊接时的热过程、熔滴过渡时的物理化学过程、熔池行为、焊缝凝固过程、热裂纹的形成、焊缝金属固态相变、晶粒长大和偏析、热影响区（硬化或软化）、焊缝和热影响区的显微组织、焊缝中的氢扩散、冷裂纹的形成、焊接残余应力和变形等。

几十年来科学家和焊接专家针对这些问题已经建立了许多数学模型，在现代计算机硬件高度发展条件下已经能够通过有限元法、有限差分法等方法对这些数学模型做到定量求解。在有限元计算方面，现在已经有商业化的大型通用有限元工具软件 NASTRAN、MARC、ABAQUS、ANSYS 等，还有专门用于分析焊接现象的软件，如 SYSWELD（法）、HEARTS（日）以及 QUICK WELDER（日）等。MATLAB 等软件包为进行各种数值计算提供了有力工具。各国在焊接过程模拟方面已经做了大量工作，在生产中得到了许多应用成果。

现在需要进一步研究的问题是：

- （1）建立的模型能否全面地反映焊接过程的物理或化学反应的本质？如何考虑各模型间的相互影响？
- （2）能否得到模型计算时需要的各种参数和相关信息？
- （3）得到的定量结果能否达到要求的精度？如何才能简化这些模型，做到既节省时间和费用，而又不影响精度？
- （4）通过那些方法才能验证模拟结果的正确性？

正因为这样才吸引了越来越多的学者和工程技术人员对这些问题不断地进行深入的研究。

2.3 焊接机器人和生产自动化集成系统

据不完全统计全球工业用机器人已有 100 万台，其中焊接机器人占 30%—50%，无论

是点焊机器人或是弧焊机器人对焊接过程控制的内容很多,就弧焊来说,包括:焊接参数的稳定、焊枪位置和姿态的确定、焊缝实时跟踪等方面,对控制的精度要求也越来越高。对于一台焊接机器人往往配有多种形式的传感器,需要同时处理大量的数据,如遇到离线编程等复杂情况 PC 机则是必须的工具,有时还需要工作站才能完成任务。焊接过程控制的许多成果已用于生产,已经见到公开报道的如:日本用于核反应堆修复的焊接机器人、法国西雅基公司开发的 12 个自由度的双机器人协同控制焊接系统是引人注目的例子。

日本在汽车工业、船舶制造、重型机械制造、建筑钢结构制造中已大量的装备了焊接机器人。近年日本已经报道在高层建筑、桥梁等施工现场焊接时应用了焊接机器人。在一些大的工厂焊接生产已经组成了以焊接机器人为核心的自动化集成系统。例如: NKK 在上世纪 90 年代初就在桥梁箱梁腹板、翼缘、隔板的生产线上配置了机器人 26 台,在造船生产线上配置了机器人 10 台,从而取得了巨大的经济效益。

近几年,由于计算机软硬件技术的发展,提高了焊接动态过程实时检测和控制能力,三维 CAD 设计系统促进了图纸信息的数字化,离线编程软件的开发和机器人运动图形仿真技术等改变了原来必须通过停机示教编程的方式。一些智能控制方法,如:模糊逻辑、人工神经网络等也被引入焊接机器人的控制系统中来。加上高速网络数据通讯的进展,这样可以预期远程控制的智能化焊接机器人集成系统在不远的将来就能实现。

3 焊接生产过程管理信息化

3.1 概述

企业要走向现代化信息化是必由之路,但是企业要实现信息化有许多制约因数,决不可能一蹴而就。我们对企业信息化有一个全面的理解,分步实施。广义地说,凡是利用电子信息技术于企业的生产、管理、办公和商务活动的都是企业信息化的一部分。因此,可以把制造业信息化大体分为 5 个层面,即:技术的信息化、数据处理的信息、管理和办公的信息、企业生产、经营、管理一体化的信息、信息化从企业内部延伸到企业外部。具体地说,(1)技术的信息化,主要指 CAD、CAPP、CAE、CAM 等为代表的信息化,实际上这是属于自动化范畴;(2)数据处理的信息,就是使企业大量的生产、管理数据用计算机进行存储、共享、处理,进而可以加以分析、预测;(3)管理和办公的信息,要在上述基础上进行企业信息化的全面规划,并最终完成企业的管理信息系统(MIS);(4)企业生产、经营、管理一体化的信息,是指深入使用企业的信息资源,如物流、资金流等,开发 MRP II、PDM、ERP、CIMS 等系统。(5)信息化从企业内部延伸到企业外部,如:利用网络平台、数据管理平台将内部的生产经营和外部的供应、销售整合起来,实现与外部实体进行信息交换,实施供应链管理 SCM 系统、客户关系管理 CRM 系统等。此时,企业信息化并没有完结,由于企业本身和现代企业管理的理念不断发展,企业信息化也必然要不断地发展和进化。

全面的企业信息化涉及面很广,投入资金很多,因此风险也很大,在没有做好充分准备之前,通常只能采取渐进的过程。

我们这里讨论的焊接生产与研究中的信息化问题主要只限于前面提到的有些方面,即与焊接生产过程管理信息化相关的问题。

3.2 焊接生产过程管理信息化应用

尽管焊接只是一种工艺方法,但焊接生产过程管理信息化应用的方面还是有很多,下

面仅举出一些常见的例子。

3.2.1 弧焊工艺规程制定系统

在焊接施工过程中焊接工艺规程是最重要的指导性文件。制定焊接工艺规程的依据是焊接工艺指导书(WPS),对于重要焊接构件必须根据相应的标准或规范进行焊接工艺评定,WPS是在合格的焊接工艺评定报告(PQR)的基础上形成的。制定WPS之前,如果没有进行过工艺评定,工艺人员就要根据相关标准和自己的经验提出焊接工艺评定委托书,简称PPQR或PQRD。由此可见,制定一套焊接工艺规程文件要求严格,但过程繁琐,因此开发能够编制、检索焊接工艺规程文件的数据库软件系统十分必要。所以在20年前国外就开发了这种软件,例如:英国有TWI开发的Weldspec、丹麦FORCE Institute开发的WELDplan等。国内在1990年前后清华大学和哈尔滨工业大学和企业合作也开发了类似的系统。由于焊接的标准种类繁多,如:美国的ASME IX, AWS D1.1, API, 欧洲的EN287/288等,在我国有关焊接工艺评定标准则有:JB 4708(钢制压力容器焊接工艺评定), JB 4420(锅炉焊接工艺评定), JB 6963(钢制件熔化焊接工艺评定)等。这些标准不仅各国不一样,而且各行业也不相同。这类软件既要严格符合有关标准的每项规定,有时还要增加企业自己的一些特殊要求,所以很难编制一个通用的弧焊工艺规程制定系统。如果要把相关标准中的规定和要求都嵌入程序中,这就要求软件系统应该具有一定的“智能”功能,就是说在软件中包含有知识库和推理机,所以国内也把这种软件称为“弧焊工艺专家系统”。这类软件是要和特定的规范或标准紧密相连的,因而不具备通用性。这类软件经过十多年的发展,国内外都已经几次改版升级,新版本的软件程序通常是在Windows环境下用VB或VC等通用语言重新编制,采用新的数据库工具,增加了功能,提高了性能,除了在单机上运行的版本外,有的还发行了在SQL Server数据库工具软件上运行的网络版。考虑到这类软件对不同标准或规范的适应性,在有的软件中为用户提供了一些工具,使用户可以自行修改其中的某些要求,或者直接为用户提供适合特定标准或规范软件。

3.2.2 焊接结构材料用量和焊材用量计算和统计系统

焊接结构材料用量和焊材用量计算和统计系统是每一个企业针对每一个产品都需要作的工作。过去有的企业往往采取根据经验进行粗估,这当然谈不上在材料管理方面的经济效益,而且在当前市场经济的情况下,如果对产品提不出比较准确的材料预算清单,几乎无法得到用户的订单。按照现代企业管理的要求,对产品中的焊接结构材料用量和焊材用量进行准确的计算,从计算上来看,不是一件困难的事,但是如果一个产品是由上千个零件、数百条焊缝焊接而成,用手工计算起来既费时、费力,又非常枯燥繁琐。有时企业的有关人员加班计算,还赶不上前方销售订货人员的要求。采用计算机对焊接结构中每一零件的材料用量和每一焊缝的焊材用量进行计算并加以汇总就很方便了。

编制这样一个程序并不复杂,但也存在一些问题。问题首先在于焊接结构中每一零件几何形状和尺寸、每一焊缝坡口几何形状和尺寸的数据来源。如果这个企业已经实施了MRP II (Manufacture Resource Planning 制造资源计划)系统或PDM (Production Data Management 产品数据管理)系统,以上所需的数据一般都可以从中提取,由于各个系统数据存储的格式和内容不完全相同,只要适当进行改造或补充就可以了。就目前企业信息化的水平来看,大多数企业不具备这个条件,然而大多数企业已经应用了CAD软件进行设计、绘图,按说这些数据可以由CAD图中的明细表和标题栏中获得,但是在企业的设计部门往往没有对明细表和标题栏中数据输入的格式提出明确的规范要求,因此要从CAD图中的明

细表和标题栏直接取得所需的数据几乎没有可能。从长远来说这可以通过对设计部门提出要求来解决，但这因为涉及企业管理体制，要解决这个问题往往旷日持久。这个问题暂时可以采用建立“中间明细表”的方案来解决，也就是说把设计图纸上不规范、不完整的明细表（BOM Bill of Material），通过计算机程序改造为符合要求的“中间明细表”，这一明细表也可以作为将来实施 CAPP（计算机辅助工艺编制系统）时的工艺 BOM 使用。

焊接结构通常是由板材和型材组成，有了每一零件几何形状和尺寸，只要再增加一些工艺性消耗，如：切口大小等，用计算机计算其材料用量不存在问题，问题在于还要按产品、按部件对不同材质、不同规格的材料用量进行汇总，这时需要考虑材料利用率等，一般要建立专门的数据库，还要附加若干规则才能解决。焊接材料用量的计算则复杂一些，因为除了要考虑焊缝坡口几何形状和尺寸以外还要考虑到余高、焊条利用率等工艺因数。对于一条焊缝如果采用了多种焊接方法，这时需要根据具体情况分别计算不同焊接方法时的焊材用量。在每条焊缝的焊材用量计算完毕后，也要按产品、按部件对不同牌号、不同规格的材料用量进行汇总，这也需要通过建立数据库来解决。

焊接结构材料用量和焊材用量计算和统计软件应用情况国内外都有报道。这种软件可以是单独的，也可以和其它相关软件集成在一起。

3.2.3 焊工技术档案管理和焊工技能的数字化

焊接是制造业中的重要工艺环节，为了保证焊接质量，不管是手工焊工、自动焊工，甚至是焊接机器人的操作者，都要根据国家的或行业的规定进行培训、经过主管部门授权的单位考试合格后才能持证上岗。这些规定和制定弧焊工艺规程的标准相类似，不仅各国不一样，而且各行业也不相同。一个焊工只有通过特定项目的考试、持有特定的证件，才能焊接在资格认可允许范围内的产品。因此，一个焊工需要经过多种培训和考试，持有若干合格证书，才能适应工作的需要。在相应的标准中都对这种资格证书规定了有效期，有效期满后必须重新考试。按照标准中的规定，授权单位可以根据焊工的焊接工作的业绩延长焊工证件的有效期或者终止其资格认可。所以，焊接工程管理人员需要随时掌握所管部门内的焊工各种资格认可以及平时业绩的情况。英国 TWI 早在 20 年前就开发了 Welderqual 软件对焊工技术档案管理。其它国家也有类似的软件。我国也有一些单位开发了这类软件，但是也是因为所依据的标准不一，加上主管部门或地区的要求也不完全相同，这类软件没有通用化、商业化。现在国际标准组织 ISO 正通过国际焊接学会 IIW 建立了统一的国际焊工考试标准，这样就可以大大简化了焊工考试的内容，焊工按照国际标准进行了考试，取得了相应项目的资格认可，就不再需要按照其它标准重新考试，因而今后焊工技术档案管理软件也有可能统一起来了，不过这有可能需要经过一个漫长的过程。

上面提到的只是对焊工焊接资格认可的评定，在当前信息化时代，人们想到设法将焊工的技术定量化、数字化。例如：日本溶接技术 2002 年第 2 期报道了对手工（TIG）焊工技术数字化研究的成果。具体的方法首先是对焊工操作状态进行详细的检测，这包括 4 个方面：（1）通过微型 CCD 摄像机采集焊工观察熔池情况的信息，（2）焊工对焊枪操作数据的检测（包括：焊丝摆动情况、送丝送进速度、焊接丝送入位置等数据），（3）焊炬与焊丝之间的距离、角度等数据的检测，（4）用摄像机获取焊接熔池全面情况的信息（熔池面积、焊接速度等）。然后对这些数据进行处理、分离特征量，提出焊工熟练程度指标分析。

3.2.4 焊接结构件焊接装配 CAPP 系统

CAPP (Computer Aided Process Planning), 即通过计算机来辅助工艺人员进行工艺过程设计, 提高工艺过程设计规范化、标准化水平, 使得企业中的工艺经验和信息资源可以共享, 减少工艺人员的重复劳动, 提高工艺编制的效率和质量。企业的生产过程要全面信息化就离不开 CAPP 系统。早期研制的 CAPP 系统主要集中在机械加工方面, 近年来人们日益认识到 CAPP 系统的重要性, 许多软件开发公司已经将 CAPP 系统应用的范围扩大到各种工艺过程, 但是由于焊接工艺的特殊性, 以焊接结构件生产过程为主的 CAPP 系统还有待开发。

应该说, 前面提到的焊接工艺规程制定等软件都可以属于焊接结构件生产的 CAPP 系统的一部分, 但是这主要是针对每条焊缝焊接时工艺参数的确定, 并没有涉及到焊接结构件生产的全过程。焊接结构件生产的全过程应该包括: 焊接结构件中每一零件生产工艺路线的确定, 零件和部件在装配焊接时工序和工步的安排和技术要求, 最后形成完整的焊接结构件。

焊接结构件生产的 CAPP 系统可以简单地概括为, 在计算机辅助下编制焊接结构件零(部)件工艺路线表、焊接装配工艺过程卡、焊接装配工序卡等。

编制焊接结构件零(部)件工艺路线表, 首先要根据产品图纸列出产品中的零部件的明细表(BOM), 其中的数据最好由 CAD 或 PDM 系统的明细表和标题栏中直接提取, 然后根据企业的零部件的具体情况、企业的生产习惯、企业中现有设备的加工能力等条件制定零部件的工艺路线, 例如: 板材的下料可以是剪切或气割, 气割又可以选择数控切割或手工切割等, 下料后要不要打磨、开坡口、校正等。计算机辅助编制焊接结构件零(部)件工艺路线表系统的功能可以因企业要求的不同而不同, 最简单的 CAPP 系统只要计算机给出结构件零(部)件工艺路线表的模板, 其中的内容完全由工艺人员输入。稍微完善一些的 CAPP 系统, 可以在系统中存储有若干典型的焊接结构件零部件工艺路线以便工艺人员直接选用, 再进一步还可以根据企业的具体条件在系统的程序中写入一些规则, 使系统具有一定的智能化的功能。当然要使系统完全智能化不太可能, 系统可以为用户提供自行编制或修改工艺路线的能力, 这样系统就具有了一定的柔性和开放性。焊接结构件零(部)件工艺路线表中既然已经列出了产品的每一零部件的明细表和工艺路线中的每一道工艺, 所以往往将每一零部件的材料用量和工艺路线中的每一道工艺所需的工时也一并填入表中。有了这张内容比较完整的表, 其中的数据存入数据库中, 这样不仅便于修改和检索, 而且使得工艺数据得以共享、企业制定工艺路线的经验得以继承。

焊接装配工艺过程卡、焊接装配工序卡等工艺卡片的内容和格式, 因企业生产习惯和生产规模等不同而不同。为了能由计算机辅助编制焊接装配工艺过程卡、焊接装配工序卡等工艺卡片也可以开发和上面编制焊接结构件零(部)件工艺路线表类似的软件。

这些软件智能化和网络化的程度要根据企业的要求和信息化发展的具体情况来决定, 总之这些软件只有在企业中得到应用才能产生价值。

3.2.5 其它焊接应用软件

国际焊接学会第XII专业委员会自上世纪 80 年代开始经常报道世界各国开发的焊接应用软件的情况。除了上面讨论过的一些软件系统外, 国外还开发了其它的焊接应用软件, 常用的有: 焊接方法和焊接材料选择软件、焊接预热和焊后热处理要求软件、焊接裂纹分析专家系统、焊接结构断裂评定分析系统、焊接结构疲劳性能分析系统、焊接工程技术人员和焊工的教育与培训多媒体软件等, 我们在此不作一一介绍。近几年在 Welding & Metal

Fabrication、Welding Journal 等杂志上设立了专栏刊登有关焊接应用软件的报道和文章, 也对我们有所启发。

4 焊接信息数据库和互联网的利用

4.1 焊接数据库

许多国家自从上世纪 80 年代以来就建立了一些和焊接有关的数据库, 例如: 焊接母材化学成分和性能数据库, 焊接材料化学成分和性能数据库、焊接 CCT 图库以及与焊接相关的标准和法规库等, 这些数据库不断在更新、扩充。例如: 日本金属研究所编制的焊接 CCT 图库中已经收集了 200 多种材料的 CCT 图。这些数据库大部分免费通过互联网就可以查阅。由于建立数据库需要投入较多的人力物力, 直接的经济效益不明显, 在我国焊接方面的数据库基本上没有。

4.2 焊接互联网站的利用

在上世纪 90 年代全世界互联网技术飞速发展, 发达国家互联网的使用已经相当普及, 计算机和互联网技术不仅影响到企业的经营、政府的管理等社会的各个方面, 而且深入到家庭, 所以已经形成了一种独特的“计算机和互联网”文化。为了利用互联网这种可以高速传播信息的工具, 国外一些大的焊接学术、研究单位从上世纪 90 年代初期开始, 纷纷建立了自己的网站, 如: 美国焊接学会 AWS (www.aws.org), 英国焊接研究所 TWI (www.twi.co.uk), 德国焊接学会 DVS (www.dvs-ev.de) 等。随后焊接方面不管是生产焊接设备, 还是生产焊接材料的企业也先后建立了自己的网站。现在可以检索到的有关焊接的网站数以千计。这些网站可以提供我们丰富的焊接信息资源。例如, 在 AWS、TWI 网站上都设有 FAQ (Frequently Asked Question 常见技术问题解答), BBS (Bulletin Board System 电子公告系统), 在 BBS 中可以根据用户所关心的问题设立许多专题组, 用户可以在上面进行讨论、交流经验。

我国在 1999 年, 中国焊接协会、焊接学会联合主办的“中国焊接信息网”(www.weldnet.com.cn) 和成都电焊机研究所主办了“中国焊接资讯网”(www.weldinfo.net) 先后开通, 两个网站各有特色。中国焊接信息网定期发行网上刊物“焊接快讯”, 到现在为止已出版了 43 期, 发行量约 1500 份。中国焊接信息网最近版面更新后, 内容有了很大变化, 还增加了英文的内容, 这样更便于和国际交流。这几年, 我国有的焊接企业也建立了网站。但总的来看我国各网站内容还有待充实, 更新也不够及时。

5.3 通过互联网获取焊接文献资料

近几十年科技文献数量以几何级数膨胀, 尽管如此, 现在计算机海量储存技术把这些文献都储存在文献库中已不成问题, 但要查找一篇需要的资料则有如大海捞针, 花费大量时间。由于网络技术的发展, 在高速网上数据通讯速度达到每秒 10—100 兆比特的技术已经十分成熟, 所以通过文献检索软件系统, 查找到需要的文献, 再由互联网上下载到本地计算机上, 几乎是唾手可得。

工程技术人员最常用的文献检索工具是 SCI 和 Ei。SCI (Science Citation Index 科学引文索引) 是美国科学情报研究所编制的, 内容包括了数千种期刊, 也收集了一些图书, 侧重于基础科学, 工程技术方面的报道很少, 但具有权威性。Ei (The Engineering Index 工程索引) 是由美国工程情报公司根据美国工程学会图书馆所收藏的工程技术文献编制的,

其内容包括了科技期刊、会议论文集、大学学报,还选择了一部分图书和标准,所以很适合工程技术人员使用。

SCI、Ei 涉及学科的范围过于广泛,我们希望能够有如过去“焊接文摘”一类的电子检索工具,如果直接能够从网络上把原文全文本下载并打印出来就更理想了。实际上从国外焊接有关机构的网站上就可以查阅到与本专业密切相关的资料。这些资料一部分是免费的,其它的需要收费或者只对本机构的成员开放。例如:在 AWS 网站上查阅到美国焊接杂志 Welding Journal 从 1922 年创刊以来的所有文章。另外,特别要提到 JoinIT 焊接资料库,这是英国 TWI 收集编制的,由于其在线交互式的性能,所以也可以被看作是一个和焊接相关的知识库。在 JoinIT 库中汇总了 TWI 多年来积累的报告、论文、数据等资料。更重要的是通过 JoinIT 网站 (<http://joinit.gratapark.com>) 还可以连接到焊接专题的文献资料库 Weldasearch,它收集了从 1967 年以来的焊接和连接相关的各类文献,几乎就是一个全面的焊接和连接相关文献资料的电子图书馆。Weldasearch 原来挂靠在 DIALOG 信息检索系统中,现在已形成一个独立的系统,当然由 TWI 网站也可以链接过去。

对于焊接方面的中文文献资料可以通过中国焊接信息网和中国焊接资讯网检索。另外,通过中国期刊网、万方数字化期刊网、中文全文电子期刊网都可以检索到焊接有关期刊中的全文资料,包括:焊接学报、焊接、焊接技术、中国焊接(英文版)、电焊机、焊管等杂志上的文章,只不过由于录入更新等原因,在网上只能看到半年或一年前的文章。

通过以上这些文献检索库查找资料,通常要收取一定的费用。对于一些较大的因为已经购买了使用权,这些单位中的人员就能在一定范围内免费使用。例如:清华大学的教师和学生就可以通过清华大学图书馆链接到相关的文献库上,只是如果链接到国外网站要根据数据流量收取一些费用。

5 结束语

焊接生产与研究中的信息化是企业信息化的一部分,但也涉及面很广,上面只从几个方面作了简要的介绍。实施企业信息化的任何一部分都会牵涉许多方面,包括经费的投入、管理体制的调整、人员习惯的改变等,因而困难都会很大,所以不能求大、求全、求快。在任何情况下把提高效益作为信息化的根本目的,经济效益的提高是可以计算的,社会效益则难以估量,还有一些间接效益是无形的,例如提高了企业对市场的反应速度,从而抓住了机遇,其效益可能是巨大的。

焊接学会计算机应用技术专业委员会十多年来努力推动信息技术在焊接中的应用,我们希望今后能继续促进焊接生产和研究的信息化,迎接新世纪的挑战。

参考文献

- 1 陈丙森. 计算机辅助焊接. 机械工业出版社, 1999
- 2 潘际奎. 现代弧焊控制. 机械工业出版社, 2000
- 3 潘际奎. 弧焊过程控制. 第八届全国焊接会议论文集(第一册), 机械工业出版社, 1997, 35-50
- 4 赵熹华. 焊接方法与机电一体化. 机械工业出版社, 2001
- 5 溶接技术编辑部. Current Explanation/Welding in Japan 1999-2001, 溶接技术 2002 June: 99-109
- 6 陈强, 孙振国. 焊接视觉传感. 焊接与 IT 题论文集, 天津: 焊接学会, 2001, 3-14

- 7 殷树言, 刘嘉, 等. 电焊机的数字化, 焊接与 IT 题论文集, 天津: 焊接学会, 2001, 15-22
- 8 陈丙森. 焊接手册 (第 3 卷). 机械工业出版社, 2001
- 9 林尚扬. 焊接机器人及其应用. 机械工业出版社, 2000
- 10 陈丙森. 计算机辅助焊接技术 (CAW) 与焊接工程软件. 第八次全国焊接会议论文集 (第 1 册). 机械工业出版社, 1997, 90-108
- 11 Hale G, et al. JointIT-An Interactive On-Line Knowledge Base. Denmark; 10th International Conference; Computer Technology in Welding Manufacturing, 2000, 4-53/4-59
- 12 Pedersen T. The Next Generation Software for Welding Specification Management. Denmark; 10th International Conference; Computer Technology in Welding Manufacturing, 2000, 4-39/4-43
- 13 Bernasek M. A Fabricators Use of An Intellegent Welding Procedure Mahagement System. Denmark; 10th International Conference; Computer Technology in Welding Manufacturing, 2000, 4-31/4-37
- 14 Kranedonk A. Robot Integrated Welding Technology. The 7th International Symposium of Japan Welding Society; Today and Tomorrow in Science and Technology of Welding and Joining, 2001, 39-48
- 15 Kanjo Y, et al. Multi-Robot Welding System for Heavy Industry. The 7th International Symposium of Japan Welding Society; Today and Tomorrow in Science and Technology of Welding and Joining, 2001, 57-62
- 16 Dilthey U, et al. MAGSIM and SPOTSIM-Simulation of GMA and Spot Welding for Training and Industrial Application. The 7th International Symposium of Japan Welding Society; Today and Tomorrow in Science and Technology of Welding and Joining, 2001, 57-62
- 17 Kim D, Rhee S. Optimization Arc Welding Process Parameters Using Genetic Algorithm. Welding Journal, 2001, July, 184s-189s
- 18 Brightmore A. Computerising Your Welding Information. Welding & Metal Fabrication, 2001, April, 12-14
- 19 Campell D. The Future Factory is Digital. Welding & Metal Fabrication, 1998, July, 12-16
- 20 Quinn T, et al. A Welding Cell with Its Own Web Site. Welding Journal, 2000, Jun. 46-48
- 21 编辑部. Construction of Arc Welding Data Base. 溶接技术. 2002, 6, 111-114
- 22 野城清. National Project for Welding Simulation 溶接学会志 2001, 2, 42
- 23 野本敏治等. Expectation for Virtual Engineering in Innovative Production Technology. 溶接技术. 2001, 3, 62-67
- 24 松山钦一. Joining Technology in the Era of IT. 溶接技术 2001, 6, 58-82,
- 25 浅井知. IT Welding Factory. 溶接技术 2002, 5, 66-79

焊接工艺过程数值模拟

山东大学 武传松

摘要 本文介绍了焊接工艺过程数值模拟的国内外研究概况、日本和德国在该领域攻关课题的情况,并综述了熔池形态数值模拟和焊接热传导模型的研究结果。

关键词: 焊接工艺、熔池形态、焊接热传导、数值模拟

0 前言

焊接是先进制造技术的重要组成部分。先进制造技术的一个重要发展趋势是工艺设计由经验判断走向定量分析,将数值模拟应用于铸造、锻压、焊接、热处理等工艺设计中,并与物理模拟和人工智能技术相结合来确定工艺参数,优化工艺方案,预测加工过程中可能产生的缺陷及采取的防止措施,控制和保护加工工件的质量^[1]。

数值模拟技术通过一组描述焊接基本物理过程的偏微分方程及其定解条件来模拟焊接过程,采用数值方法求解以获得对焊接过程的定量认识。采用科学的模拟技术和少量的实验验证相结合的方法,以代替过去一切都要通过大量重复性实验的方法,不仅可以节省大量的人力和物力,而且还可以通过数值模拟解决一些目前尚无法在实验室里进行直接研究的复杂问题。在制造业,数值模拟与仿真可以增加材料利用率 25%,节约生产成本 30%,产品设计至实际投产的时间缩短 40%^[2]。

国际上有关焊接过程数值模拟的研究和学术交流十分活跃。国际焊接学会第 IX 专业委员会和奥地利格拉茨工业大学主办的国际专题研讨会“Numerical Analysis of Weldability”,每两年举行一次。2001 年 10 月 1-4 日举行了第 6 届会议,表 1 是该次会议的主题和大会报告题目,从中可以看出该领域的新进展和新动向。尤其值得指出的是,这次国际会议 10 篇主题报告中,有 4 篇是来自大公司和大企业的科研人员撰写的,这说明工业界已经十分重视数值模拟技术的实际应用。本文仅从焊接工艺过程数值模拟这一个侧面介绍近年来国内外的一些发展情况。

表 1 第 6 届焊接性数值分析国际会议主题与大会报告(2001 年 10 月,奥地利格拉茨)

序号	主题	大会报告题目	论文数目
1	熔池现象	① 复杂工业应用环境中的电弧现代模型(瑞典 ABB 公司, Kaddani) ② 熔池传热与流体流动在研究气孔夹杂特征、相图和焊件几何形状方面的应用。(美国宾州大学, DebRoy)	13
2	组织与力学性能		2
3	焊缝和热影响区的组织模拟	数值模拟在工业中的应用(美国 Caterpillar, Juika)	16
4	残余应力与变形	① 焊接温度场、残余应力与变形的数值分析(德国保时捷—奔驰公司, Radaj) ② 焊接残余应力与变形的模型化(瑞典 Lulea 工业大学, Lindgran)	21
5	裂纹与试验方法		12
6	氢	焊接金属中氢的控制(乌克兰巴顿焊接研究所, Pokhodnya)	3
7	特种连接过程的模拟	① 搅拌摩擦焊的模拟(英国剑桥大学, Shercliff) ② 激光焊的模拟(俄罗斯图拉州立大学, Sudnik) ③ TIG 焊接过程的数值模拟(日本大阪大学, Ushio)	12

1 日本国家攻关课题五年计划简介

2000 年, 日本经济产业省启动一个计划五年完成、投入经费 20 亿日元 (2 千万美元) 的国家攻关课题“高效与高可靠性焊接技术的开发 (Development of welding technology with higher efficiency and higher reliability by improving welding techniques)”, 其研究目的是“通过数值模拟改进电弧焊接技术 (Improving arc welding techniques by simulation)”^[1]。为了实现这一目标, 成立了三个分委员会, 分别主持焊接工艺过程、焊接冶金组织和焊接变形领域的数值模拟研究工作。Ohji 指出, 焊接工艺过程数值模拟的研究目标是累积起电弧焊工艺过程的数值模拟与仿真的技能; 建立起焊接技术人员可用的决策支持系统; 涉及的工艺方法以 TIG 和 MAG 为主^[1]。

焊接工艺过程数值模拟分委员会有两项主要任务:

(1) 任务一: 建立用于电弧焊数值模拟的熔池对流模型。研究电弧等离子体与熔池相互作用和熔池中的对流传热机理。第一阶段, 分别建立电弧等离子体模型和熔池对流模型。第二阶段, 将两个模型耦合起来。

(2) 任务二: 建立描述实际焊接过程数值模拟的热传导模型。以 TIG 和 MAG 焊接为研究对象, 不考虑熔池中的对流传热, 使问题得到简化。但要考虑非稳态问题, 以能够处理多层焊、摆动焊、焊接起弧和熄弧阶段以及成形缺陷 (如咬边和驼峰) 等。对于 MAG 焊, 要涉及角接接头、对接接头; 对于 TIG 焊, 要研究管子焊接时圆周焊缝的热传导。

图 1 是焊接工艺过程数值模拟分委员会的研究计划。

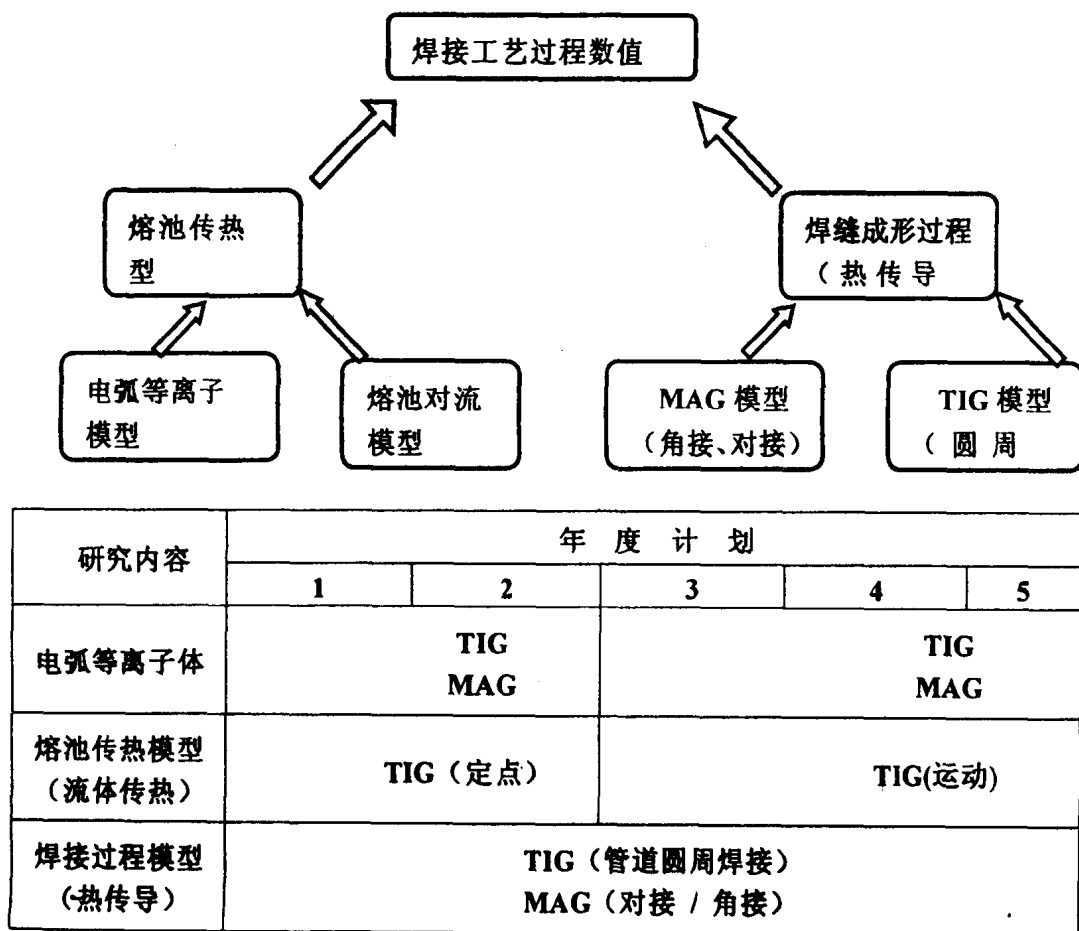


图 1 日本国家攻关课题五年计划 (焊接工艺过程数值模拟)^[1]

2 德国 SFB - 370 项目和 GTAW 焊接熔池模型

德国亚琛工业大学承担的科技攻关项目 SFB-370 “材料的集成模拟 (Integrated Modeling of Materials)” 中的重要子项目是研究电弧焊接过程中材料工件行为的模拟与仿真^[4]。在一系列的完整的模型中, 起点是建立焊接热过程模型, 提供准确的有关熔池形状和温度场的信息, 终点是预测焊接接头的力学性能和运行性能。

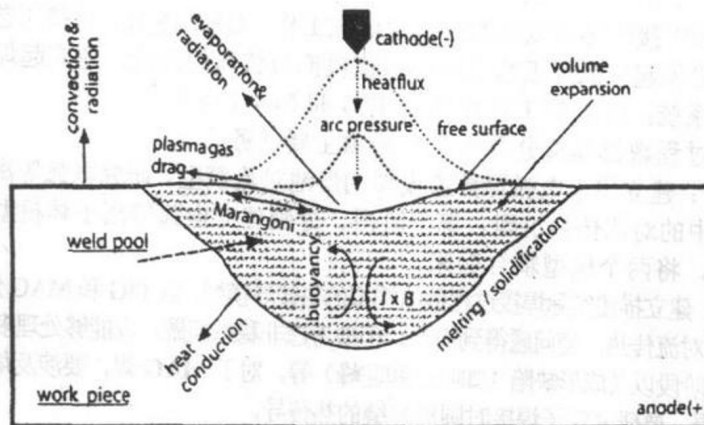


图2 TIG 熔池形态的物理作用机制^[4]

图2表示出了TIG焊接熔池传热的物理作用机制。作用在熔池上的力有: 电弧压力、等离子流力、电磁力、浮力、表面张力等。熔池表面上作用有分布的电弧热流密度, 熔池的表面产生变形, 工件并发生熔化、凝固结晶、流体流动、对流传热、热传导、蒸发、体积膨胀等各种现象。为了得到熔池形状尺寸和工件上的温度分布, 必须联立求解能量、动量和质量守恒方程以及描述自由表面的方程, 同时利用合适的边界条件描述TIG焊接过程。

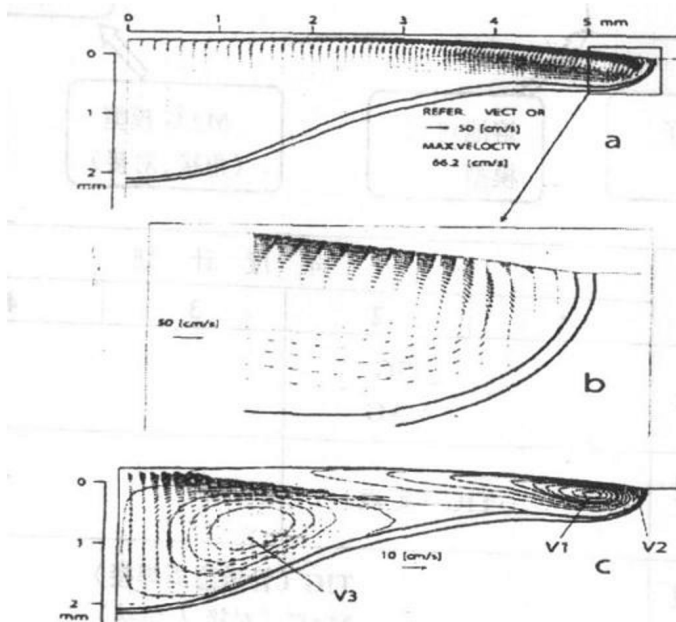


图3 TIG 熔池中的流场 (a, b) 和流线图 (c) ^[4]