

焊接变形和残余应力的数值计算方法与程序

HANJIE BIANXING HE CANYU YINGLI

DE SHUZHJ JISUAN FANGFA YU CHENGXU

上田幸雄 村川英一 麻宁绪(日) 著
罗 宇 王江超 译



四川大学出版社

封面设计: Book 书装

焊接变形和残余应力 的数值计算方法与程序

HANJIE BIANXING HE CANYU YINGLI
DE SHUZHJ JISUAN FANGFA YU CHENGXU

ISBN 978-7-5614-4186-2



9 787561 441862 >

定价: 80.00元

焊接变形和残余应力 的数值计算方法与程序

HANJIE BIANXING HE CANYU YINGLI
DE SHUZHJ JISUAN FANGFA YU CHENGXU

上田幸雄 村川英一 麻宁绪(日) 著
罗 宇 王江超 译



四川大学出版社

责任编辑:李川娜
责任校对:廖庆扬
封面设计:翼虎书装
责任印制:李 平

图书在版编目(CIP)数据

焊接变形和残余应力的数值计算方法与程序 / (日)
上田幸雄, (日) 村川英一, (日) 麻宁绪著; 罗宇,
王江超译. —成都: 四川大学出版社, 2008.11
ISBN 978-7-5614-4186-2

I. 焊… II. ①上…②村…③麻…④罗…⑤王… III.
①焊接结构-变形-数值计算-计算方法②焊接结构-
残余应力-数值计算-计算方法 IV. TG404

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 176158 号

书名 焊接变形和残余应力的数值计算方法与程序

著 者	上田幸雄 村川英一 麻宁绪(日)	
译 者	罗 宇 王江超	
出 版	四川大学出版社	
地 址	成都市一环路南一段 24 号 (610065)	
发 行	四川大学出版社	
书 号	ISBN 978-7-5614-4186-2	
印 刷	郫县犀浦印刷厂	
成品尺寸	185 mm×260 mm	
印 张	13	
字 数	296 千字	
版 次	2008 年 11 月第 1 版	◆读者邮购本书,请与本社发行科
印 次	2008 年 11 月第 1 次印刷	联系。电 话:85408408/85401670/ 85408023 邮政编码:610065
印 数	0 001~3 000 册	◆本社图书如有印装质量问题,请
定 价	80.00 元	寄回出版社调换。

版权所有◆侵权必究

◆网址:www.scupress.com.cn

内容简介

作者 上田幸雄 村川英一 麻宁绪

翻译 罗 宇 王江超

焊接变形和残余应力一直是困扰工程技术人员的一大难题。本书针对工程技术人员和高校学生，深入浅出地用 3 根棒所构成的非常简单的 1 维力学模型说明焊接变形和残余应力的生成过程；同时对以固有应变为基础的残余应力、变形预测以及测定的基础理论进行简要的阐述。本书配有可以体验计算焊接变形和残余应力的程序以及基本例题的 CD。根据本书的解说，可以在个人计算机上体验焊接温度、残余应力和变形计算。本书还引用典型的计算实例介绍焊接变形和残余应力分析的方法和目的。CD 中还收录了热弹塑性计算所需的各种材料的热物理、力学性能数据和基本理论。本书是工程技术人员和高校学生学习和掌握焊接变形和残余应力基础知识的有力工具。

本书的主要内容如下：

第 1 章 焊接力学的基础知识，即绪论，焊接力学的基础知识，残余应力和固有应变的生成机理。

第 2 章 固有应变法测量和预测残余应力的基础理论，即固有应变和生成应力的关系，2 维及 3 维残余应力的测量方法，焊接残余应力的预测。

第 3 章 焊接力学模拟的基础，即焊接的温度场和应力场模拟的基础知识。

第 4 章 有限元法的基础知识，即问题的种类和基本计算式，变分原理，热弹塑性问题的分析实例。

第 5 章 关于本书程序的问与答，即程序概要，焊接热传导程序 heat2d.exe 的问与答，热弹塑性的程序 tepc2d.exe 的问与答，固有应变法程序 inhs2d.exe 的问与答，子程序 awsd.exe 的问与答，计算例题数据。

第 6 章 有限元程序的焊接热传导、焊接变形及残余应力的体验计算，即焊接热传导 heat2d.exe 的体验计算，热弹塑性 FEM 程序 tepc2d.exe 的体验计算，固有应变 FEM 程序 inhs2.exe 的体验计算，固有应变程序 inhs2d.exe 的残余应力的预测计算。

第 7 章 焊接应力及变形的各类问题和对策，即对接接头的冷裂纹和约束、减少疲劳裂纹的角焊缝焊接残余应力分析、多层焊接残余应力和焊接裂纹、极厚板多层对接接头的残余应力分析，防止管道接头的应力腐蚀的水冷式焊接，线状加热的变形预测、点焊接过程模拟、大型焊接结构的变形分析等计算实例。

序 言

众所周知,焊接应力和变形一直是困扰焊接工作者的难题。随着计算机和有限元分析技术的发展,用计算机模拟焊接过程的力学行为成为可能。早在 20 世纪 70 年代初,本书的作者——日本大阪大学焊接研究所上田幸雄教授就在世界上率先把热弹塑性有限元分析方法引入焊接领域,拉开了焊接力学行为计算机数值模拟的序幕。此后,上田的研究团队一直专注于焊接应力和变形数值模拟技术以及工程运用方面的研究,其研究水平处于世界领先地位,取得累累硕果。

本书利用非常简单的 3 根棒模型,深入浅出地分析了焊接过程中的热和力学现象,使读者能够很容易地把握焊接过程中热和力学行为的本质特征,这对于读者理解焊接应力和变形的生成机理有很大的帮助。本书还系统地讲述了焊接应力和变形数值模拟的基本理论和方法,并在附属 CD 光盘中提供了 2 维焊接应力和变形数值模拟软件以及简单的计算实例。读者可以使用这些软件进行焊接应力和变形的体验计算,直观地掌握其数值模拟技术,从而加深对焊接应力和变形数值模拟基本理论和方法的理解。本书同时介绍了一些焊接应力和变形数值模拟方法在实际工程应用中的实例。这些实例对于开阔焊接工作者的眼界,推进焊接应力和变形数值模拟技术在我国焊接工程中的应用,无疑有很大的启示作用。书中收集的一些常见材料的热物理和力学性能等数据是焊接应力和变形数值模拟中不可缺少的宝贵数据。由此可见,本书是高等学校学生以及现场的焊接工作者学习和掌握焊接应力和变形规律的有力工具。

上田教授对中国人民具有很深的友好感情,是深受中国同行尊敬爱戴的和蔼长者。他从 20 世纪 70 年代末开始就频繁来华交流讲学,他的研究室接受了大量的中国留学生和访问学者;本书的作者之一麻宁绪博士和译者罗宇教授都是他的中国学生。

本书合著者之一的村川英一教授是上田教授最得意的学生和继承人,长期从事焊接应力和变形的研究工作,是日本该领域目前公认的权威,在中国同行中享有极高声誉。

我相信,本书的翻译出版将推动焊接应力和变形数值模拟技术在我国焊接结构制造和大型焊接工程中的广泛应用。

史耀武

2008 年 10 月 25 日

前 言

从 19 世纪末电弧熔化焊接技术发明以来,焊接作为制造业必不可少的加工工艺被广泛应用。然而,焊接过程中不可避免地产生变形和残余应力。为了解决这个问题,尽管大量的焊接技术人员和研究工作者进行了长期的努力,但是至今为止,困扰生产现场工程技术人员最多的仍然是焊接变形和残余应力问题。

焊接变形和残余应力的基本理论并不复杂,但是,焊接是一个非常复杂的过程,它是电弧投入的热流、金属熔化和凝固以及收缩引起的变形和残余应力生成等因素的复合作用,因此,定量地预测焊接变形和残余应力非常困难。

计算机的出现以及有限元法的产生为解决此问题提供了可能。1971 年,作者的研究团队首次将有限元用于平板对接焊接过程中力学现象的分析^①,成为用计算机分析焊接问题的先驱。此后,作者的研究团队从极厚板多层焊接头入手,对大量的不同焊接接头的力学现象进行热弹塑性有限元分析,创立了一整套计算机模拟方法;此外,为了提高计算机模拟方法的精度,还进行了大量的焊接变形和残余应力实测实验。通过计算值和实测值的比较进一步完善了计算机模拟方法。作者的研究团队还提出了焊接残余应力的生成源——“固有应变”的概念,在此基础上开发了更加有效的焊接变形和残余应力的固有应变预测法以及 3 维残余应力测量法。

近年来,随着对焊接制品和焊接结构的安全性要求更加严格,焊接变形和应力的高精度预测成为必要,因此,结构设计和生产管理的技术人员用商业软件计算焊接变形和残余应力的机会越来越多。在使用这些软件时,必须掌握有关的基础理论以分析判断计算结果的合理性,所以不少读者希望获取相关的知识和经验。为此,作者将多年来积累的解决焊接变形与应力问题的知识和经验整理成书,奉献给读者。

为了让即使不精通焊接和有限元法的读者也能理解掌握,本书用 3 根棒构成的非常简单的 1 维力学模型为例分析残余应力的生成过程,同时对残余应力和变形的固有应变预测法以及实测法的相关基本理论进行简洁明了的解说;此外本书还用 1 维力学模型为例,对有限元法概要以及与计算程序有关的基础理论进行了说明。

本书配有计算例题和计算程序的 CD,读者可以自行运行程序,体验焊接变形和残余应力计算。程序的功能和安装方法等在第 5 章程序的问与答以及第 6 章中有详细说明,在个人电脑上就能体验焊接温度变化、残余应力以及变形计算。

^① Y. Ueda and T. Yamakawa, “Analysis of Thermal Elastic-Plastic Stress and Strain during Welding by Finite Element Method”, Trans. of Japan Welding Society, Vol. 2, No. 2 (1971), 90-100.

不言而喻，所有计算的目的是通过预测残余应力和变形，得到解决问题的方针和具体办法。要进行正确的预测以及判断，参考各种各样的计算实例是非常重要的，因此，第7章引用了一些典型的计算实例，详细介绍了计算的目的和顺序。在附属CD中还收录了热弹塑性计算所需的各种材料的热物理和力学性能数据，希望能对读者有所帮助。

本书主要以在实际生产过程中希望通过焊接变形和残余应力计算机预测来指导设计和生产的工程技术人员为对象，同时也希望更多的读者能够通过本书了解焊接变形和残余应力理论预测的可能性。在理论预测的基础上构筑新的焊接生产体系是作者以及读者的共同心愿。

最后，向多年来共同奋斗的研究室同僚致以衷心感谢，本书采用的研究成果是他们长期研究工作的结晶。此外，对为本书出版提供全面合作的产报出版（株）马场信社长以及编辑大友亮副部长表示深深的感谢。

作者

2007年10月

目 录

第 1 章 焊接力学的基础知识	(1)
1.1 绪 论	(2)
1.2 残余应力的生成过程和固有应变	(7)
1.2.1 力学模型	(7)
1.2.2 自由棒 c 加热的情况	(10)
1.2.3 两端固定的棒 c 加热的情况	(11)
1.2.4 刚体壁自由移动、只加热棒 c 的情况	(17)
1.3 用固有应变再现残余应力以及固有应变的逆推算	(22)
1.3.1 用固有应变再现残余应力	(22)
1.3.2 固有应变的逆推算	(22)
第 2 章 固有应变法测量和预测残余应力的基础理论	(25)
2.1 固有应变和生成应力的关系	(27)
2.2 测量应变与固有应变的关系	(30)
2.3 有效固有应变和非有效固有应变	(31)
2.4 有效固有应变的推定法	(32)
2.5 有效固有应变的最或然值和残余应力的测量精度	(34)
2.6 弹性响应矩阵的导出	(35)
2.7 2 维和 3 维残余应力测量的流程和测量方法	(36)
2.7.1 薄板对接接头焊的 2 维残余应力的测定	(36)
2.7.2 厚板对接接头焊的 3 维残余应力的测定	(37)
2.8 焊接残余应力的预测	(39)
第 3 章 焊接力学模拟的基础	(41)
3.1 焊接的热流和温度计算	(42)
3.1.1 热的投入、扩散和散失	(42)
3.1.2 简单的热流模型	(45)
3.1.3 不同材料性能的差异	(48)
3.1.4 温度引起的材料性能变化	(49)
3.1.5 特征温度和特征尺寸	(52)

3.1.6 简单热传导问题的解析法	(55)
3.1.7 小结	(59)
3.2 力学基础知识	(60)
3.2.1 根据问题的维数进行力学分类	(60)
3.2.2 表征力学现象的变量和公式	(62)
3.2.3 三根棒模型的变形和应力	(64)
3.2.4 三根棒模型的热弹塑性问题	(71)
3.2.5 小结	(73)
第4章 有限元法的基础知识	(75)
4.1 用途广泛的有限元法	(76)
4.2 问题的种类和基本公式	(77)
4.3 变分原理的基础知识	(78)
4.4 复数单元问题的求解法	(79)
4.4.1 一个零件的平衡方程式	(79)
4.4.2 两根串联的棒的问题	(80)
4.5 增量法求解非线性问题	(82)
4.6 基础的热弹塑性蠕变问题的解析实例	(83)
4.6.1 受热循环的约束棒	(83)
4.6.2 约束棒的热弹性问题	(85)
4.6.3 约束棒的热弹塑性问题	(85)
4.6.4 约束棒的热弹塑性蠕变问题	(86)
4.7 焊接问题的简单理论解	(87)
4.7.1 瞬间热源的温度分布	(87)
4.7.2 薄板对接焊的温度分布	(87)
4.7.3 厚板对接焊的温度分布	(90)
4.7.4 薄板焊接时的固有应变分布	(91)
4.8 焊接变形和残余应力分析的流程	(92)
4.9 正确进行数值模拟的检查项目	(94)
4.9.1 输入数据文件生成时的检查项目	(94)
4.9.2 数值模拟结果的检查项目	(96)
4.10 计算中经常遇到的问题以及解决方法	(97)
第5章 关于本书程序的问与答	(99)
5.1 程序概要的问与答	(100)
5.2 焊接热传导程序 heat2d.exe 的问与答	(103)
5.3 热弹塑性蠕变程序 tepc2d.exe 的问与答	(106)
5.4 固有应变法程序 inhs2d.exe 的问与答	(108)

5.5	后处理程序 awsd. exe 的问与答	(109)
5.6	计算例题数据的问与答	(117)
第 6 章	有限元程序的焊接热传导、焊接变形及残余应力的体验计算	(131)
6.1	焊接热传导 FEM 程序 heat2d. exe 的体验计算	(132)
6.1.1	计算目的、对象和条件	(132)
6.1.2	输入数据 heat2d. inp 的生成	(133)
6.1.3	焊接热传导的体验计算	(138)
6.1.4	计算结果 (heat2d. post) 的图示和讨论	(138)
6.2	热弹塑性蠕变的 FEM 程序 tepc2d. exe 的体验计算	(140)
6.2.1	计算目的和条件	(140)
6.2.2	输入数据 tepc2d. inp 的生成	(140)
6.2.3	温度变化过程文件 TEMP. FILE 的准备	(145)
6.2.4	焊接热变形与热应力的体验计算	(145)
6.2.5	计算结果 (tepc2d. post) 的图解和讨论	(145)
6.3	固有应变法 FEM 程序 inhs2d. exe 的体验计算	(149)
6.3.1	计算目的和条件	(149)
6.3.2	输入数据 inhs2d. inp 的生成	(149)
6.3.3	焊接变形和残余应力的体验计算	(151)
6.3.4	计算结果 (inhs2d. post) 的图解和讨论	(152)
6.4	固有应变法程序 inhs2d. exe 在残余应力测定中应用的体验计算	(154)
6.4.1	计算目的和条件	(154)
6.4.2	输入数据 inhs2d. inp 的生成	(154)
6.4.3	固有应变法程序的体验计算	(157)
6.4.4	计算结果 (inhs2d. post) 的图解	(157)
6.5	固有应变程序 inhs2d. exe 的残余应力的体验计算	(159)
6.5.1	计算目的和计算对象	(159)
6.5.2	输入数据 inhs2d. inp 的生成和固有应变的预测式	(159)
6.5.3	固有应变法程序的体验计算	(163)
6.5.4	计算结果 (inhs2d. exe) 的图解表示	(163)
第 7 章	焊接应力及变形的各类问题和对策	(165)
7.1	对接接头的初层冷裂纹和约束	(166)
7.2	Y 型坡口槽焊的初层裂纹	(168)
7.3	防止疲劳裂纹对策的 T 型角接头的残余应力解析	(170)
7.4	角接头多层焊残余应力和焊接裂纹	(173)
7.4.1	试验方法和结果	(173)
7.4.2	热弹塑性应力解析	(174)

7.4.3 对残余应力和焊接裂纹的考察	(175)
7.5 极厚板多层对接接头的残余应力解析和裂纹	(178)
7.5.1 焊接试件和热弹塑性解析条件	(178)
7.5.2 焊接残余应力分布特征和生成机理	(179)
7.6 防止应力腐蚀裂纹的水冷焊接法	(180)
7.7 线状加热中的变形预测	(181)
7.8 电阻点焊的数值模拟	(184)
7.9 大型焊接结构的变形解析实例	(186)
作者简历	(193)

CD 的目录和文件构成

-  DATA1: 1 维约束棒 50℃加热冷却热弹性计算例题
-  DATA2: 1 维约束棒 150℃加热冷却热弹性计算例题
-  DATA3: 1 维约束棒 300℃加热冷却热弹性计算例题
-  DATA4: 1 维约束棒 600℃加热冷却热弹性计算例题
-  DATA5: 1 维约束棒 600℃加热保温冷却热弹性蠕变计算例题
-  DATA6: 移动焊接源模型温度计算例题
-  DATA7: 固定焊接源模型温度计算例题
-  DATA8: 槽焊接固定焊接热源模型温度计算例题
-  DATA9: 槽焊接热弹塑性法的热应力和残余应力计算例题
-  DATA10: 槽焊接固有应变法的残余应力计算例题
-  DATA11: 对接焊接移动焊接热源模型温度计算例题
-  DATA12: 对接焊接热弹塑性法的变形应力计算例题
-  DATA13: 对接焊接固有应变法的残余应力和残余变形再现计算例题
-  DATA14: 对接焊接固有应变法的残余应力测定计算例题
-  DATA15: 对接焊接固有应变法的残余应力预测计算例题
-  DATA16: 薄板热切割移动热源模型温度计算例题
-  DATA17: 薄板热切割热弹塑性变形计算例题
-  DATA18: 薄板热切割固有应变法的残余变形再现计算例题
-  DATA19: 厚板表面堆焊焊接的固定焊接热源模型温度计算例题
-  DATA20: 厚板表面堆焊焊接热弹塑性的焊接角变形再现计算例题
-  DATA21: 厚板表面堆焊焊接的固有应变法的残余角变形再现计算例题
-  Li ense: 程序运行的许可文件

-  Manual: 程序的使用指南
-  PROG: 程序的运行文件
-  WSDP 试用版: 焊接结构变形预测 (WSDP) 软件的试用版
-  附录: 材料的热物理性能数据和 2 维热粘弹塑性基本理论
-  CD 文件构成 .pdf: CD 目录和文件构成的说明文件
-  例题表 .pdf: 计算例题 DATA 一览表

焊接力学的基础知识

1.1 绪 论

焊接是通过熔化金属进行连接的工艺过程，它必然产生热应力、残余应力和变形。从力学的观点出发解释其产生机理以及研究其对焊接结构所给予的影响的理论体系称之为焊接力学^[1,2]。以前的焊接力学主要通过实验或简单的理论公式来进行定性研究，然而随热弹塑性有限元法的普及^[3~6]，详细模拟焊接过程中的力学现象已成为可能。

如表 1-1 所示，大多数金属结构都是从钢板开始，经过切割、弯曲成型、焊接、矫形和消除残余应力等工序制作完成的。可以把这些工序按加工方法分类为热加工方法、机械加工方法和化学加工方法。焊接是通过加热熔化金属进行熔化连接的工艺方法，当然属于热加工方法。作为熔化金属的热源主要有：气体、电弧、等离子、电子束以及激光。譬如，对于压力容器这样的厚板焊接，为了提高效率采用电子束等高能密度热源，而对船和桥梁等大型结构的焊接，则多采用价廉物美、操作性能优越的电弧熔化焊接。

表 1-1 金属加工技术的分类

	切 割	曲面成型	连 接	消除残余应力	矫 形
热加工方法	熔断（气体、等离子、激光）	线状加热（气体、感应加热、激光）	熔化焊（气体、电弧、等离子、电子束以及激光、电阻焊、螺柱焊）、搅拌摩擦焊	高温退火、低温拉伸消除残余应力	线状加热（气体、感应加热、激光）
机械加工方法	锯断、剪断	压延、辊压			压延、辊压
化学加工方法	—	—	粘接	—	—

焊接过程是一个移动热源沿焊接线加热熔化、再凝固，从而实现熔化连接的加工过程，不同热源焊接过程从力学上看没有太大的差别。在此以电弧焊为例，对数值焊接力学必要的基础知识进行说明。首先介绍焊接接头的种类。在焊接结构的不同部位采用不同的接头形式，如图 1-1 所示，主要有对接接头、角接头等。此外，为了保证厚板焊透，必须开坡口，图 1-2 就是为了实现这个目的而设计的坡口种类^[7]。

	对接焊	角接焊	塞焊	槽焊
对接接头				
T字接头				
角接头				
盖板接头				
搭接接头				
卷边接头				

图 1-1 焊接接头的种类

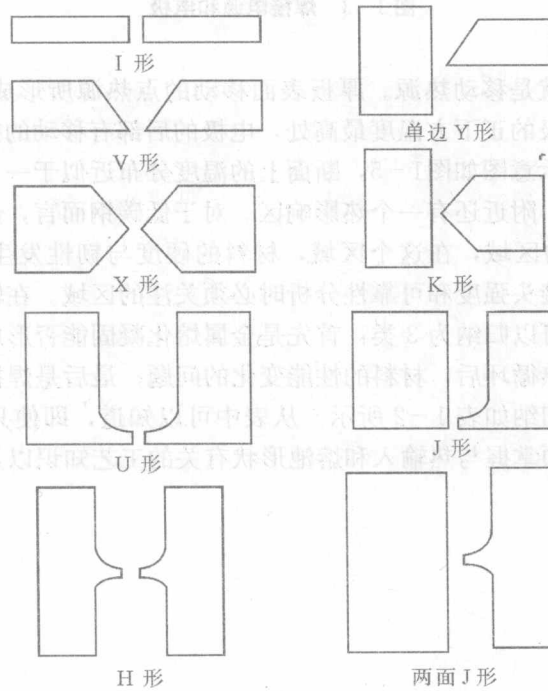


图 1-2 焊接坡口的种类