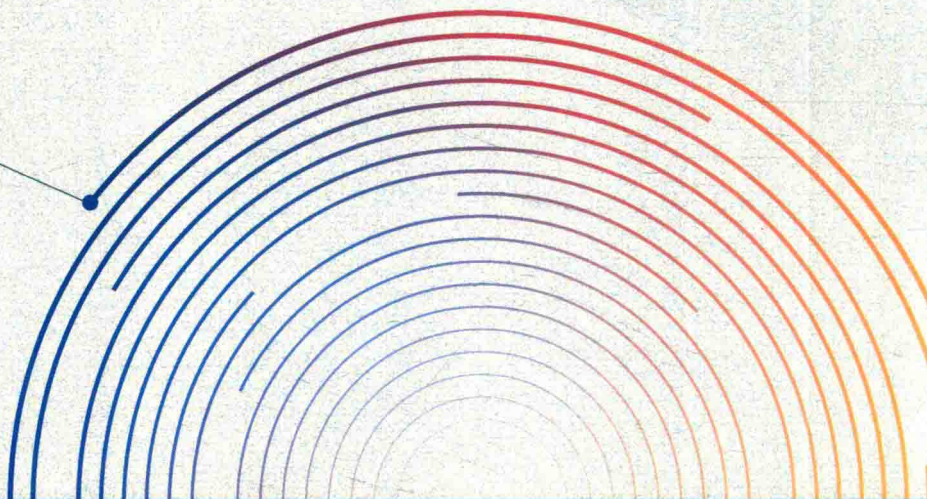


中国石油大学(华东)学术著作 出版基金重点资助

焊接残余应力的中子衍射 测试技术、计算与调控

NEUTRON DIFFRACTION MEASUREMENT,
COMPUTATION AND CONTROL
OF WELDING RESIDUAL STRESS

蒋文春 涂善东 孙光爱 著



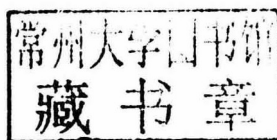
科学出版社

中国石油大学(华东)学术著作出版基金重点资助

焊接残余应力的中子衍射 测试技术、计算与调控

Neutron Diffraction Measurement, Computation
and Control of Welding Residual Stress

蒋文春 涂善东 孙光爱 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书基于中子衍射应力测试科学平台和有限元分析软件,介绍焊接残余应力的中子衍射测试技术与有限元模拟方法。全书主要内容包括中子衍射残余应力测试装置、理论与方法,焊接残余应力的计算方法、强化模型与取样尺寸对残余应力的影响、残余应力在疲劳和高温环境下的演变规律、低温马氏体相变、焊接残余应力的调控理论及模拟手段、厚板焊接残余应力的有限元简化算法等。

本书可供工程材料、机械、力学等专业相关研究人员、教师、学生及工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

焊接残余应力的中子衍射测试技术、计算与调控 = Neutron Diffraction Measurement, Computation and Control of Welding Residual Stress / 蒋文春, 涂善东, 孙光爱著. —北京: 科学出版社, 2019.6

ISBN 978-7-03-061240-3

I. ①焊… II. ①蒋… ②涂… ③孙… III. ①焊接结构—残余应力—中子衍射—研究 IV. ①TG404

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第092735号

责任编辑: 万群霞 陈 琼 / 责任校对: 王 瑞

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年6月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2019年6月第一次印刷 印张: 14 1/2

字数: 287 000

定价: 118.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

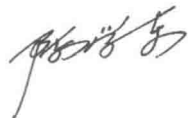
焊接是工业装备制造的关键技术，但焊接过程中不可避免会产生焊接残余应力，对应力腐蚀、疲劳、断裂、蠕变等失效模式产生重要影响。自 20 世纪 70 年代上田幸雄先生率先开发焊接残余应力热弹塑性有限元分析方法以来，焊接残余应力计算方法已得到快速发展。然而，工业装备大型化带来了大型复杂焊接结构的新挑战，传统的热弹塑性数值模拟难以完成高效率、高精度、超大规模焊接结构的分析，现有无损测试技术也无法获取结构内部焊接残余应力分布规律，导致大型装备焊接残余应力与变形调控缺乏科学理论指导，亟需发展精准的计算、测试和调控方法。

针对上述问题，在传统热弹塑性理论基础上，该书提出了温度-冶金-应力多场耦合的焊接残余应力计算方法，在焊接热源模型、强化模型、相变等方面提出了创新性的思路与方法；提出了面内集成与面外长度可变的焊接热源模型，实现了超大结构焊接应力变形高精度、高效率计算。在测试技术方面，该书系统介绍了焊接残余应力中子衍射无损测试理论与方法；在精确计算和测试基础上，提出焊接残余应力调控方法。

该书作者蒋文春教授和涂善东教授长期致力于焊接残余应力计算、测试与调控理论的研究，尤其在超大型装备高效精准计算方面形成特色，建立了基于残余应力调控的重大承压装备可靠性制造理论。孙光爱研究员参与研制了我国第一套中子衍射应力测试装置，参与制定了国家标准《GB/T 26140—2010：无损检测——残余应力测量的中子衍射方法》。三位学者长期合作研究，将中子衍射测试技术拓展应用到重大装备本质安全提升，解决了石油化工、核电厚板装备焊接残余应力的中子衍射测试难题。

该书不仅系统介绍了焊接残余应力与变形计算、测试理论方法，而且提供了焊接热源模型、组织相变、强化模型等理论计算的关键源程序，可为科学研究和工程设计人员提供参考。我相信该书的出版将有力推动焊接残余应力与变形计算及中子衍射应力测试技术在重大装备设计制造与安全保障领域的应用。

中国工程院院士陈学东



2019 年 5 月

前 言

焊接过程中不可避免会产生残余应力,降低焊接构件的强度、刚度、断裂韧性、受压稳定性,以及疲劳、蠕变及腐蚀寿命等,直接影响焊接接头的安全性与可靠性,严重时会导致重大的安全事故。对焊接结构及其焊接接头性能的特殊要求,使焊接加工产生的应力分布规律极为复杂。因此,准确评估与预测焊接残余应力对提高焊接结构的制造质量和服役性能具有极为重要的作用,对焊接结构的优化设计、焊接工艺和质量的提升、优化制造工艺和防止结构过早失效均具有非常重要的意义。

中子衍射作为非常有效的体探针和研究手段,能够准确地探测材料内部(厘米量级)的残余应力分布。当前,焊接有限元模拟技术发挥了其独特的优势,通常以部分实验验证有限元在解决某一案例上的有效性,便可再利用验证后的有限元模型来进行后续的焊接工艺的评估与调控工作。因此,采用中子衍射测试与有限元模拟技术相结合的方法已经成为研究焊接残余应力的重要手段。

15年来,笔者利用上述两种手段对焊接残余应力问题开展了持续研究。目前,国内关于中子衍射测试的书籍主要围绕中子物理学,而材料学、机械学、力学等领域研究人员对中子衍射测试尚不甚了解。本书深入浅出地阐述中子衍射残余应力测试技术的原理、实验测试方法、数据后处理方法等,以期促进中子衍射实验方法的工程应用,帮助相关研究人员迅速掌握该项技术。有限元分析是目前技术开发和科学研究的重要途径,能综合反映各物理场的演变规律,节省了应力分析的时间和成本,并且具有极大的可塑性,适用范围和计算准确度越来越高。而焊接过程涉及多种复杂的物理现象,因此有限元模拟方法仍存在较大难度与诸多问题。虽然已有大量学者利用有限元分析方法计算残余应力,但关于其影响因素、热源参数的确定、简化算法、相变及传统残余应力调控方法等方面尚未有著作进行详细系统的阐述,相关研究人员很难快速地针对所研究对象找到合适的研究方法。因此,本书对以上问题进行大量的研究和系统的归纳,重点分析几种重要工程结构焊接残余应力的分布特点,强调有限元分析方法的工程应用,希望有助于相关科研和工程技术人员快速、准确地进行焊接残余应力有限元计算分析。本书所介绍的有限元分析方法均经过实验的验证,准确性高、方法成熟,并附有实际案例,特别对难以通过实验手段进行评估的大型构件的残余应力等情况具有极为重要的意义,可以大幅度降低实验测试的工作量,为残余应力的调控提供参考。

借此契机,笔者将中子衍射测试技术的基本理论、关键测试技术进行总结,

并将多年来残余应力计算调控方面的所有有限元方法、理论与应用的成果进行系统的整理归纳,同时融入其他学者的优秀成果,著成此书。全书共 10 章。第 1 章简述焊接残余应力有限元分析和中子衍射测试技术的发展过程与研究现状,进行不同残余应力实验测试手段的比较及残余应力调控方法的概述;第 2 章通过中子衍射测试技术的基本原理、测试装置、测试方法等全面介绍中子衍射测试技术;第 3 章为焊接残余应力有限元模拟基础,主要包括温度场与应力场计算的原理和方法,重点介绍温度场热源模型参数的确定,并详述焊接模拟顺次耦合的方法;第 4 章通过强化理论与案例分析总结三类强化模型对残余应力计算精度的影响;第 5 章总结焊接残余应力在疲劳和高温环境下的演化规律;第 6 章介绍低温马氏体相变对焊接残余应力的影响;第 7 章探讨取样尺寸对不同焊接结构的残余应力的影响;第 8 章简述多种厚板焊接残余应力的有限元简化算法;第 9 章主要围绕降低残余应力的传统方法,重点介绍水射流、超声冲击技术降低残余应力的实验装备、方法及有限元模拟技术;第 10 章结合若干工程案例,举例介绍如何利用中子衍射和有限元法进行残余应力分析,讨论焊接工艺、几何尺寸及拘束效应对残余应力的影响规律,以降低焊接残余应力为目标优化焊接工艺。

本书的撰写和出版得到多方面的鼎力支持。感谢中国工程物理研究院核物理与化学研究所的研究人员李建、黄娅琳、杨钊龙、王虹,韩国原子能院的 Woo Wanchuck 博士,中国原子能科学研究院的李峻宏博士、刘晓龙博士多年来提供中子衍射测试技术支持、理论指导,感谢万娱、罗云、解学方、邓扬光、楚晶宇、陈伟、张清华、彭伟、高腾等研究生在学期间完成了本书中大量的实验、模拟及图形文字处理工作。

希望本书能起到抛砖引玉的作用,在焊接残余应力的实验与模拟领域不断有更高水平的研究成果出现。由于作者水平有限,书中难免存在一定的疏漏和不足之处,切望读者批评指正。

蒋文春(中国石油大学(华东))

涂善东(华东理工大学)

孙光爱(中国工程物理研究院核物理与化学研究所)

2019 年 3 月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 焊接残余应力的产生及影响	1
1.2 焊接残余应力的计算与测试	2
1.3 中子衍射测试技术及其应用	4
1.4 焊接残余应力的调控	6
参考文献	7
第 2 章 中子衍射测试技术	9
2.1 基本原理	10
2.2 中子衍射实验装置	12
2.3 实验方法	18
2.3.1 选择合适的衍射体积	18
2.3.2 放置样品	19
2.3.3 选择一个合适的反射面	20
2.3.4 无应力晶面间距 d_0 的确定	22
2.4 测试误差的原因分析	24
2.4.1 部分填充的衍射体积	24
2.4.2 大晶粒效应	24
2.4.3 狭缝的错误使用	24
2.5 厚板残余应力测试	25
2.5.1 厚板残余应力测试的重要性	25
2.5.2 厚板残余应力测试的难点	25
2.5.3 厚板残余应力测试方法	26
2.5.4 80mm 厚板焊接残余应力测试案例	29
参考文献	32
第 3 章 焊接残余应力计算有限元方法	34
3.1 温度场计算	34
3.1.1 焊接温度场数值模拟理论	34
3.1.2 典型热源模型及其选用	39

3.2 残余应力场计算	52
3.2.1 残余应力形成机理	52
3.2.2 焊接应力场热弹塑性基本理论	54
3.2.3 残余应力场的数值模拟——顺次耦合分析	56
3.2.4 塑性强化模型	57
3.3 焊接残余应力的有限元模拟	58
3.3.1 焊接残余应力的模拟方法	58
3.3.2 计算示例	61
参考文献	63
第4章 强化模型对残余应力计算精度的影响	66
4.1 强化模型	66
4.1.1 各向同性强化模型	66
4.1.2 随动强化模型	69
4.1.3 混合强化模型	71
4.2 有限元模型	72
4.2.1 几何模型及材料参数	72
4.2.2 结果分析	73
参考文献	78
第5章 焊接残余应力在工作环境中的演化	79
5.1 焊接残余应力在高温环境中的演化规律	79
5.1.1 高温蠕变现象	79
5.1.2 不锈钢板翅结构钎焊残余应力高温下的演化规律	80
5.2 焊接残余应力在循环载荷下的释放规律	85
5.2.1 概述	85
5.2.2 实验细节	86
5.2.3 有限元数值模型	88
5.2.4 释放规律分析	89
参考文献	98
第6章 低温马氏体相变对残余应力的影响	99
6.1 基于低温马氏体相变效应的残余应力调控原理	99
6.1.1 焊接过程的固态相变	99
6.1.2 焊接过程的固态相变效应	100
6.1.3 相变温度确定	101
6.1.4 相变过程分析	103
6.2 LTT 焊丝焊接接头组织及性能表征	104

6.2.1 中子衍射测试	105
6.2.2 焊接过程中冶金力学行为的数值模拟	107
6.2.3 残余应力数值预测结果及分析验证	109
参考文献	114
第7章 残余应力测试取样尺寸的确定	116
7.1 纵向切割方案的确定	116
7.2 横向切割方案的确定	118
参考文献	123
第8章 厚板焊接残余应力的简化计算方法	125
8.1 二维内生热源简化算法	125
8.2 焊道集成法	126
8.3 可变长度热源简化算法	129
8.4 厚板焊接残余应力的简化公式	130
参考文献	132
第9章 焊接残余应力调控	133
9.1 水射流处理	133
9.1.1 水射流处理的原理与特点	133
9.1.2 水射流处理的分类	135
9.1.3 水射流处理的数值模拟	138
9.2 超声冲击处理	145
9.2.1 超声冲击处理的原理与特点	145
9.2.2 超声冲击处理的数值模拟	146
参考文献	148
第10章 工程案例	150
10.1 案例一：不锈钢复合板补焊残余应力分析	150
10.1.1 不锈钢复合板补焊残余应力的有限元分析与试验验证	150
10.1.2 结构和工艺参数对不锈钢复合板补焊残余应力的影响	154
10.2 案例二：半管夹套焊接部位残余应力分析	165
10.2.1 半管夹套焊接部位残余应力有限元分析	165
10.2.2 结构与工艺参数对半管夹套焊接部位残余应力的影响	167
10.3 案例三：螺旋焊管残余应力分析	173
10.3.1 螺旋焊管残余应力有限元分析与试验验证	173
10.3.2 结构与工艺参数对螺旋焊管残余应力的影响	178
10.4 大型EO反应器超厚管板拼焊残余应力与变形调控	189
10.4.1 超厚管板拼焊工艺	189

10.4.2	超厚管板拼焊残余应力有限元模型.....	191
10.4.3	结果与分析.....	193
10.4.4	结论.....	200
参考文献.....		200
附录		202
附录 1	双椭球移动热源子程序.....	202
附录 2	焊接残余应力的热弹塑性耦合计算.....	203
附录 3	焊接残余应力在循环载荷下的释放子程序	211
附录 4	低温马氏体相变对残余应力影响的数值模拟子程序	213

第1章 绪 论

焊接结构中不可避免地存在残余应力,对结构的安全服役产生重要影响。因此,准确预测和评价焊接残余应力是焊接结构完整性分析的关键,对焊接结构的优化设计、焊接工艺、质量控制具有十分重要的理论意义和应用价值。中子衍射测试技术可以准确地测试焊接残余应力的分布,但由于相关实验耗时多、花费大,可采用有限元模拟方法较为快速、准确地模拟焊接过程,获得完整的焊接残余应力分布。

1.1 焊接残余应力的产生及影响

焊接残余应力是指没有外力或外力矩作用时,焊接结构中自相平衡的内应力,是焊接区域熔化、流动、扩散、凝固、热传递、组织相变、应力变形的热-力-冶金多因素行为交互的结果^[1]。焊接加热阶段,焊缝金属受热急速膨胀,这种高温膨胀受焊缝两侧低温母材区的弹性制约。随着温度的进一步升高,材料的屈服强度急速下降,当温度超过材料的塑性温度时,焊缝金属呈全塑性状态,即屈服强度几乎为零,因此高温阶段材料的热膨胀应变将全部转化为压缩塑性变形。焊后冷却阶段,熔池开始凝固,高温熔池与部分热影响区(heat affected zone, HAZ)发生收缩变形,但是此种收缩受到焊缝两侧低温弹性区域的制约。当温度降至材料的弹性温度时,焊缝金属处于完全弹性状态,原高温膨胀区域将出现拉伸弹性变形并引起残余拉应力,而两侧的低温弹性区域受压。实际的焊接制造一般都需要多次熔敷操作,焊道将经历多重热循环的叠加作用,造成焊接接头处极为复杂的温度、残余应力/应变分布^[2]。

根据残余应力相互影响的范围,可将焊接残余应力分为三类^[3]:①第一类残余应力为宏观残余应力,是穿过大量晶粒的平均应力,由宏观尺度下的变形不协调导致,与工程目的密切相关;②第二类残余应力为微观残余应力,在晶粒或亚晶粒之间平衡(为 $0.01\sim 1\text{mm}$),是各个晶粒尺度内的平均应力;③第三类残余应力作用于晶粒内部原子的范围(为 $10^{-6}\sim 10^{-2}\text{mm}$)。在工程结构中,上述三类残余应力通常共存,呈现如下特征。

(1)在不同尺度范围存在。例如,超精密切割加工尺寸已经达到亚微米级甚至纳米级,残余应力存在于数个原子层或者数百个原子层;对于钎焊结构,钎缝金属处于微米水平,而母材厚度和整体结构的几何尺寸为毫米以上尺度;在超厚板

压力容器,管板厚度达到 400mm,焊道数量多,加上微观组织和位错运动的不均匀性,导致复杂的残余应力分布。

(2)以不同表现形式存在。例如,在金属基复合材料中,由于宏观温差和塑性变形,产生宏观残余应力^[4];由于基体和增强型颗粒力学性能的差异,产生微观残余应力(包括弹性不匹配应力、热失配应力及塑性不匹配应力);基体和增强型颗粒发生化学反应,体积发生变化,产生相变残余应力。

(3)随时间和空间发生变化。例如,在高温环境下,残余应力随时间变化而释放。但对于多组元结构^[5],材料力学性能的不匹配和变形协调作用会导致局部位置产生随时间延长而增大的生长应力。

复杂的宏观残余应力分布能导致脆性断裂、氢鼓包、氢开裂、韧性破坏、疲劳破坏等不同的失效形式,会对疲劳、蠕变、应力腐蚀开裂和相应寿命,以及尺寸稳定性产生明显的影响^[6-9],直接影响焊接接头的力学性能、安全性与可靠性,对焊接结构的安全服役产生较大的威胁。在高温、高压、高腐蚀介质等服役环境下,材料的力学性能会严重下降,在叠加应力的作用下,特别是服役外载荷与焊接残余应力叠加而形成的结合力,是焊接结构局部或整体产生二次变形并引发结构刚度和尺寸精度下降的重要原因。因此准确评估与预测残余应力,对于焊接结构的质量控制及延长其服役寿命至关重要,对于优化制造工艺和防止结构过早失效具有极为关键的作用。

1.2 焊接残余应力的计算与测试

目前焊接残余应力的研究方法主要分为两类:数值模拟和实验研究。

在数值模拟方面,基于连续介质理论的热弹塑性有限元分析法已较成熟地应用于宏观残余应力计算。经过数十年的发展,目前有限元分析法已经实现了从单一到复杂、从二维到三维、从定性到定量的焊接残余应力分析^[10],能够综合考虑焊接过程中的复杂非线性问题,可以较准确地还原实际焊接过程中的各类边界条件,在焊接数值模拟领域的应用越来越广泛,尤其对厚大焊接结构的残余应力研究有明显的优势。热弹塑性有限元分析法跟踪整个焊接热力过程,因此它能够较为准确地预测焊接结构中的应力,工程人员可发挥有限元分析法的便捷性,以部分实验验证有限元分析法在解决某一案例上的有效性,其余大量的计算工作均可通过数值模拟手段来完成。尽管如此,热弹塑性有限元分析仍然具有一定的局限性,一方面是因为材料的高温热物理参数和力学参数缺乏;另一方面是因为热弹塑性有限元分析需要较长的计算时间和较大的存储空间。

在实验研究方面,目前的方法主要可分为两类:破坏性机械释放测量法(即有损法)^[11-15]和非破坏性物理测量法(即无损法)^[16-19]。有损法有钻孔法、切条法、环芯法等。无损法有压痕应变法、超声波法、磁测法、X射线衍射法、中子衍射法等^[20,21]。下面简要介绍几种常用的方法。

(1) 钻孔法(hole drilling method),是目前有损法中应用最广泛的一类方法,其原理是首先在被测构件测点附近安装应变计,然后在测点上钻一个小孔使残余应力释放,再由应变计测得释放的应变值,根据弹性力学即可算出残余应力。在钻孔法中,盲孔法和浅盲孔法对构件的破坏最小,通常不会影响被测构件的正常使用^[22]。

(2) 压痕应变法(indentation-strain method),是一种相对新型的方法,其原理是将球形压头压入被测构件表面,通过应变计测得压痕附近的弹性应变,再通过弹性力学算出构件表面残余应力。这类方法既有有损法的优点,所用设备简单且结果可靠;又有无损法的优点,对被测构件表面无明显破坏,通常将其归类为无损法^[23]。

(3) 超声波法(ultrasonic method),其原理是利用在弹性介质内,声速或频谱与内应力之间存在的线性关系来测量残余应力。因为超声波穿透能力较强,构件表面和内部的残余应力均可用此法测量,而且其设备轻巧便携,现场测试优势明显。目前超声波法发展迅速,已实现工业应用,但其技术还相对不成熟,测量精度较低^[24]。

(4) 磁测法(magnetic detection method),其原理是利用铁磁材料在应力作用下磁化状态会发生变化,通过测量磁化状态的变化来测定铁磁材料中的应力。磁测法所用设备轻巧、便于测量,但缺点是仅能测量铁磁材料,残余应力测试精度不高^[25]。

(5) X射线衍射法(X-ray diffraction method),其原理是利用在应力作用下多晶体材料的同族晶面间距随晶面方位发生有规律的变化,通过X射线测定材料的晶格应变,再依据弹性力学理论计算出相应的残余应力。

(6) 中子衍射法(neutron diffraction method),其原理和X射线衍射法类似。但是中子的穿透深度远大于X射线,因此可以用来测量构件内部的残余应力^[26]。

中子衍射法是无损法测试材料内部残余应力的理想手段,是材料性能的重要评价方式。中子具有较强的穿透能力^[27,28],可以测试材料内部的应变,甚至可以将不同组织、不同相结构引起的残余应力分离出来。然而,中子衍射法测试的是在一定规范体积内的平均应力。在细观尺度上,不同组织和相结构的无应力试样的制备也存在很大困难。目前,中子衍射测试技术必须依靠反应堆或加速器等大型中子源,因此其应用尚停留在实验室研究阶段,随着微小中子反应堆的研制成功,用于现场测试的中子衍射测试技术将有望实现。

1.3 中子衍射测试技术及其应用

中子衍射测试技术具有穿透性强、识别轻元素、分辨近邻元素和同位素、探测磁性原子磁矩、测定材料内部的动力学性质等独特优点^[29-31]，可较精确地获得材料的内应力分布和演变信息，从而准确地反映材料微观结构变形机制。理论上，中子的穿透能力允许其在材料内部选择任意的测试方向。这种技术已被证明是产品设计和开发、加工过程优化、失效评估的强有力工具^[32]。

中子衍射测试技术比较适合大工程部件的测量，如长约 1m 的线性管道、钢板或火车轨等。这些工件内部的应力都可以通过中子衍射测试技术测量并用以估计其剩余寿命。中子衍射测试的空间分辨可以很容易地与焊接应力场匹配，可提供一定深度内全部的应力信息，并且可以描绘出工件焊接内应力和氢元素的分布图，监视它们的变化行为。由于中子衍射测试的空间分辨通常可以做到与有限元模式的空间网格相匹配，中子衍射测试技术在检验有限元计算方面也具有很大优势^[26]。

中子衍射测试技术在工程部件残余应力测量中的应用始于 20 世纪 80 年代。近 10 年来，越来越多的中子散射实验室开始建立专门的中子衍射残余应力测量分析装置。如表 1-1 所示，国外众多中子散射实验室建立了中子源和中子衍射应力分析谱仪，开展残余应力测试^[33-41]。而在我国，由于受到中子源和装置建设巨大投资的限制，仅有 3 家机构具有相应的中子源和设施，能够开展中子衍射残余应力测试：中国工程物理研究院的中国绵阳研究堆 (China Mianyang Research Reactor, CMRR)、中国原子能科学研究院的中国先进研究堆 (China Advanced Research Reactor, CARR)、中国科学院高能物理研究所的中国散裂中子源 (China Spallation Neutron Source, CSNS)。

表 1-1 国内外主要中子衍射应力分析谱仪一览

谱仪名称	隶属机构
RSND	中国工程物理研究院
RSD	中国原子能科学研究院
DIANE	法国里昂-布里渊实验室 (Laboratory Leon Brillouin)
SMARTS	美国洛斯阿拉莫斯国家实验室 (Los Alamos National Laboratory)
VULCAN (TOF 模式/NRSF2 常波长模式)	美国橡树岭国家实验室 (Oak Ridge National Laboratory)
ENGIN-X	英国卢瑟福-阿普尔顿实验室 (Rutherford Appleton Laboratory)
SALSA	法国劳厄-朗之万研究所 (Institute Laue-Langevin)
STRESS-SPEC	德国慕尼黑技术大学 (Technology University of Munich)
L3	加拿大乔克河实验室 (Chalk River Laboratory)
RSI	韩国原子能研究所 (Korea Atomic Energy Research Institute)
KOWARI	澳大利亚核科学技术组织 (The Australian Nuclear Science and Technology Organization)

表 1-2 对中子与 X 射线进行了比较^[29]。与常规 X 射线衍射相比,中子衍射的独特优势是中子具有很强的穿透能力,使其在测量具有较大体积固体材料的内部残余应力方面成为一种独特的技术。在复合材料研究中,为了得到基体的应变值,其他组分区域相对于穿透深度必须足够小。如果材料组分为纤维状或晶粒,且尺度达到微米级以上,X 射线衍射结果将会强烈地受到表面效应的影响,而中子衍射不会存在这个问题。另外,中子衍射可通过测量样品的整个截面区分宏观残余应力和微观残余应力。

表 1-2 中子和 X 射线的区别

中子	X 射线
粒子波	电磁波
有静止质量	质量为 0、自旋为整数
与原子核作用	与核外电子作用
散射截面与 2θ 无关	散射截面随 2θ 增加而增大
穿透能力强	穿透能力弱
衍射体积大	衍射体积小
对轻元素灵敏,能区分相邻元素及同位素	对重元素灵敏,不能区分相邻元素及同位素
实用性低(反应堆,散裂中子源)	实用性高(实验室)
具有磁散射效应	—

然而,由于用中子衍射装置测量残余应力不能像用 X 射线衍射装置一样具有便携性,无法在工作现场进行实时测量,且该实验资源有限、消耗较大,在一定程度上限制了中子衍射残余应力分析的商业应用。中子衍射需要样品的衍射体积较大,空间分辨较差,通常为 10mm^3 ,而 X 射线衍射则为 10^{-1}mm^3 ,因此,中子衍射对材料表层残余应力的测量无能为力,只有在距表面 $100\mu\text{m}$ 及以上区域测量时,中子衍射方法才具有优势。因此,将中子衍射方法和 X 射线衍射方法结合,可对材料内部的信息得到更全面的认识。

目前,国际上中子衍射测试残余应力工作正在得到进一步的重视,在装置设计和实验技术方面已取得了较大的进展,并开展了许多工程和材料科学的应用研究。随着第三代高注量率中子源的建立,中子衍射测试技术将在无损检测工作中发挥越来越重要的作用。目前最亮中子源的注量率可达到 $10^{15}\text{n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ ^[42]。新一代散裂中子源(如美国橡树岭国家实验室的散裂中子源(spallation neutron source, SNS)和建设中的欧洲散裂源(European spallation source, ESS))的通量将提高 3 个量级,表明中子衍射测试残余应力在科学研究和工业发展中存在巨大潜力。

1.4 焊接残余应力的调控

调控焊接残余应力的措施主要分为两类：①从结构设计和焊接工艺出发，降低焊接结构的整体拘束度与温度场分布的不均性，达到控制焊接过程中残余拉应力累积的目的；②通过外加热或机械/力作用将焊后或装配使用过程中产生的残余应力以塑性变形的形式释放掉，其实质是制造新的变形抵消焊接残余应变^[43]。

对于第一类方法，通过选用低刚度的接头形式、合理选择焊接装配顺序与方向等方法可以降低焊缝的拘束度，避免焊接过程中的应力累积。对于刚度较大或具有脆硬倾向的焊接结构，可采用焊前整体/局部预热，并选择小的焊接热输入方式，降低焊接温度场分布的不均匀性，缓解由于不均匀热弹塑性变形导致的残余应力累积。

鉴于焊接过程的复杂性，仅通过焊前结构设计优化与焊接工艺改进并不能完全解决焊接残余应力的问题，构件在焊后仍可能存在较大的残余应力与焊接变形。因此，对于第二类方法，通常采用外加热或机械/力作用产生反向塑性变形，抵消接头原降温收缩区的弹性收缩变形。其中，机械/力作用法主要包括机械拉伸法、振动时效法(可消除 30%~50%的应力)、喷丸法、锤击法，这些方法不仅可以降低残余拉应力，还可以在构件表面形成稳定的压应力区域；热作用法主要包括整体高温回火与局部回火处理，高温状态下由材料屈服强度降低与蠕变松弛效应所引发的塑性变形可以使构件的残余应力得到彻底释放^[44]。但是对于大型焊接构件，热处理后不均匀冷却易产生新的残余应力。此外，焊后热处理并不能解决残余变形的问题，在热处理前必须采取相应的刚性约束措施^[45]。

上述两类残余应力调控措施往往会导致构件接头的塑性损耗，接头脆硬部位的裂纹扩展尖端与缺口处主要聚集在应力集中区域，此时拘束应力与残余应力叠加，就有产生裂纹的风险，经去应力处理的构件可能比具有残余应力的焊接态构件更接近局部破坏极限。除此之外，上述措施还受构件材质、重量、结构、形状、钢板厚度、成本、场地等因素的制约，迫切需要一种灵活方便的残余应力/变形调控方法。因而考虑利用焊接过程中焊缝金属本身的特点引入压应力，从而避免常规的消除应力操作。1998 年日本国家金属研究所的 Akihiko Ohta 教授研制出了一种化学成分为 10Cr-10Ni 的低温相变(low temperature transformation, LTT)焊条^[46]，并将其应用于 SPV490 钢(铁素体-珠光体)的焊接，结果发现低温相变所伴随的体积膨胀效应抵消了冷却过程中的拉应力，并最终形成残余压应力，同时其疲劳强度提高了 1 倍。因此，采用 LTT 焊材即可利用焊接过程中组织转变所产生的相变应力来抵消冷却过程中的热收缩应力，以降低焊件的角变形量，并在焊缝及近焊缝区引入残余压应力。开发考虑固态相变效应的高精度焊接应力计算方法将对后续的应力/应变预测和调控工作起决定性作用。

参 考 文 献

- [1] 陈伯蠡. 金属焊接性基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.
- [2] Zhang H J, Zhang G J, Cai C B, et al. Numerical simulation of three-dimension stress field in double-sided double arc multipass welding process[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 499 (1): 309-314.
- [3] 宋天民. 焊接残余应力的产生与消除[M]. 北京: 中国石化出版社, 2010.
- [4] Zhang X X, Ni D R, Ma Z Y, et al. Determination of macroscopic and microscopic residual stresses in friction stir welded metal matrix composites via neutron diffraction[J]. *Acta Materialia*, 2015, 87: 161-173.
- [5] Chen Q Q, Xuan F Z, Tu S T. Modeling of creep deformation and its effect on stress distribution in multilayer systems under residual stress and external bending[J]. *Thin Solid Films*, 2009, 517 (9): 2924-2929.
- [6] Green D J, Tandon R, Sglavo V M. Crack arrest and multiple cracking in glass through the use of designed residual stress profiles [J]. *Science*, 1999, 283 (5406): 1295-1297.
- [7] Kahn H, Ballarini R, Bellante J J, et al. Fatigue failure in polysilicon not due to simple stress corrosion cracking[J]. *Science*, 2002, 298 (5596): 1215-1218.
- [8] Xu M, Chen J, Lu H, et al. Effects of residual stress and grain boundary character on creep cracking in 2.25Cr-1.6W steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 659: 188-197.
- [9] Deng D. Influence of deposition sequence on welding residual stress and deformation in an austenitic stainless steel J-groove welded joint[J]. *Materials and Design*, 2013, 49: 1022-1033.
- [10] 杨建国, 雷靖, 周号, 等. 关于焊接结构有限元分析的思考[J]. *焊接*, 2014, (12): 10-19.
- [11] Korsunsky A M, Sebastiani M, Bemporad E. Focused ion beam ring drilling for residual stress evaluation[J]. *Materials Letters*, 2009, 63 (22): 1961-1963.
- [12] Sebastiani M, Eberl C, Bemporad E, et al. Depth-resolved residual stress analysis of thin coatings by a new FIB-DIC method[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528 (27): 7901-7908.
- [13] Winiarski B, Gholinia A, Tian J, et al. Submicron-scale depth profiling of residual stress in amorphous by incremental focused ion beam slotting[J]. *Acta Materialia*, 2012, 60 (5): 2337-2349.
- [14] Ma N, Cai Z, Huang H, et al. Investigation of welding residual stress in flash-butt joint of U71Mn rail steel by numerical simulation and experiment[J]. *Materials and Design*, 2015, 88: 1296-1309.
- [15] Yuan X M, Zhang J, Lian Y, et al. Research progress of residual stress determination in magnesium alloys[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2018, 6: 238-244.
- [16] Luo Q, Jones A H. High-precision determination of residual stress of polycrystalline coatings using optimised XRD- $\sin^2\psi$ technique[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2010, 205 (5): 1403-1408.
- [17] Chen X, Zhang S Y, Wang J, et al. Residual stresses determination in an 8mm Incoloy 800H weld via neutron diffraction[J]. *Materials and Design*, 2015, 76: 26-31.
- [18] Ligot J, Welzel U, Lamparter P, et al. Stress analysis of polycrystalline thin films and surface regions by X-ray diffraction[J]. *Journal of Applied Crystallography*, 2005, 38 (1): 1-29.
- [19] Vaidya R U, Rangaswamy P, Castro R G, et al. Use of metallic glasses in molybdenum disilicide-stainless steel joining[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2000, 9 (3): 280-285.
- [20] 董美伶, 金国, 王海斗, 等. 纳米压痕法测量残余应力的研究现状[J]. *材料导报*, 2014, 28 (3): 107-113.
- [21] 王海斗, 朱丽娜, 邢志国. 表面残余应力检测技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [22] 应杰. 钢结构焊接残余应力测试方法分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.