



交通运输行业博士文库

*Research on the Mechanical Behavior of Typical Thermal
Processing Technology for Ship Construction*

造船热加工工艺力学 行为研究

周 宏◎著



人民交通出版社
China Communications Press



交通运输行业博士文库

*Research on the Mechanical Behavior of Typical Thermal
Processing Technology for Ship Construction*

造船热加工工艺力学 行为研究

周 宏◎著



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书基于热弹塑性有限元法,定量分析了船体建造典型热加工工艺过程中的残余应力和变形产生的机理、分布规律及影响因素,研究成果为系统地掌握船舶热加工工艺的应力和变形规律,进而判断工艺的科学性和合理性提供理论和试验依据。

本书可供从事船舶设计和制造的工程技术人员学习参考,也可供高等学校船舶与海洋工程专业师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

造船热加工工艺力学行为研究 / 周宏著. — 北京 :
人民交通出版社, 2013. 12

ISBN 978-7-114-11068-9

I. ①造… II. ①周… III. ①造船-热加工-工艺学
-力学-研究 IV. ①U671.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 297438 号

书 名: 造船热加工工艺力学行为研究

著 作 者: 周 宏

责任编辑: 赵瑞琴

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门内大街斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 化学工业出版社印刷厂

开 本: 880 × 1230 1/32

印 张: 6.5

字 数: 166 千

版 次: 2013 年 12 月 第 1 版

印 次: 2013 年 12 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-11068-9

定 价: 19.80 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

船舶建造是个复杂的生产过程,热加工工艺伴随着船舶整个建造过程,热加工工艺力学行为引起的结构内部残余应力及变形对船舶制造质量具有重要的影响。而这些力学问题与其他工程领域的力学问题不同,且与设计时考虑的力学问题也不相同,问题的性质及求解方法都有着其专业特殊性,解决这些力学问题对提高工艺水平和建造质量具有重要的意义。

本书基于热弹塑性有限元分析法,针对船舶建造过程中的热点和难点问题:高频感应弯板成型、船体总段船台合拢焊接装配、船体结构背水焊接及高强度大厚度海洋平台桩腿板材切割等四个典型热加工工艺过程开展力学行为研究,从力学的角度分析建造工艺的科学性和合理性,进而为施工工艺的改进提供理论依据及数据支持。

全书由周宏著,罗宇教授及其科研团队对本著作提出了许多宝贵意见和建议,蒋志勇教授审阅了书稿,并提出了具体的修改意见。在此表示衷心感谢。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 课题研究的科学依据与工程意义	1
1.1.1 船体曲面高频感应弯板成型工艺力学行为研究	2
1.1.2 基于固有应变理论的船体总段船台合拢焊接 变形预测研究	2
1.1.3 船体结构背水焊接温度场及应力应变场 数值模拟计算研究	3
1.1.4 高强度大厚度海洋平台桩腿板材切割工艺 力学行为研究	3
1.2 国内外研究现状	4
1.2.1 高频感应弯板成型技术的研究现状	4
1.2.2 基于固有应变理论的焊接变形预测研究现状	6
1.2.3 背水焊接研究现状	10
1.2.4 板材切割研究现状	11
1.3 主要研究内容	15
1.4 本章小结	16
第 2 章 船体曲面高频感应弯板成型工艺力学行为研究	17
2.1 引言	17
2.2 板材热物理性能对温度场及弯板成型的影响	20
2.2.1 研究模型	20
2.2.2 模型表面换热系数对温度场及弯板成型的 影响	25

2.2.3	板材导热系数对温度场和弯板成型的影响	34
2.2.4	板材线膨胀系数对温度场和弯板成型的影响	41
2.3	板材边界条件对弯板成型的影响	44
2.3.1	应力分析比较	44
2.3.2	位移和残余塑变分析	47
2.4	板材几何尺寸对弯板成型的影响	50
2.4.1	研究模型	50
2.4.2	三块方板的比较	51
2.4.3	单一变化板宽或板长的比较分析	56
2.4.4	板厚对弯板成型影响的实验研究	61
2.5	加热功率、热源移动速度、扫描次数及扫描路径 与弯板成型的关系	63
2.5.1	加热功率与弯板成型的关系	63
2.5.2	扫描速度对弯板成型影响的数值计算及实验 验证	69
2.5.3	扫描次数与弯板成型的关系	71
2.5.4	扫描路径对弯板成型的影响	73
2.6	本章小结	75
第3章	基于固有应变理论的船体总段船台合拢焊接 变形预测研究	77
3.1	引言	77
3.2	典型船体结构焊接接头固有应变影响因素研究	78
3.2.1	T型焊接接头固有应变的影响因素研究	78
3.2.2	对接焊接接头固有应变的影响因素研究	87
3.3	基于 Weld_sta 的船体总段船台合拢焊接变形预测	92
3.3.1	基于固有应变理论焊接变形预测专用软件 Weld_sta 的介绍	92
3.3.2	船体双层底结构焊接变形预测及实验验证	97
3.3.3	基于 Weld_sta 的船体总段船台合拢焊接 变形预测	101

3.4 本章小结	107
第4章 船体结构背水焊接温度场及应力应变场数值模拟	
计算研究	109
4.1 引言	109
4.2 背水焊接数值模拟的边界条件	109
4.2.1 空气—钢板自然换热系数	110
4.2.2 水—钢板强对流系数	112
4.3 背水焊接预热数值模拟	113
4.3.1 计算模型	114
4.3.2 预热结果及分析	116
4.4 平板背水焊接温度场与组织分析	119
4.4.1 计算模型	119
4.4.2 背水焊接温度场分析	122
4.4.3 背水焊件取样点的热循环曲线	126
4.4.4 焊接组织分析	128
4.5 背水焊接的应力场与变形分析	130
4.5.1 背水焊接应力场计算	130
4.5.2 焊接过程中应力场与变形分析比较	131
4.5.3 冷却后残余应力、变形比较	134
4.6 本章小结	135
第5章 高强度大厚度海洋平台桩腿板材切割工艺力学	
行为研究	137
5.1 引言	137
5.2 氧乙炔火焰切割复合热源模型	138
5.2.1 热源模型	138
5.2.2 移动线热源和移动高斯热源双热源温度场	138
5.2.3 热源模型中的参数确定	140
5.3 平板直线氧乙炔火焰切割的数值计算及实验验证	141
5.3.1 材料的温度性能参数	141
5.3.2 平板切割的温度场计算	148

5.3.3 平板直线氧乙炔火焰切割的应力应变场计算 及实验验证	157
5.4 齿条板氧乙炔火焰切割的数值模拟计算	162
5.4.1 自升式海洋平台桩腿齿条	162
5.4.2 齿条板的有限元模型	162
5.4.3 齿条板切割温度场计算	164
5.4.4 齿条板切割应力应变场计算	168
5.4.5 切割工艺参数的优化	171
5.5 本章小结	175
第6章 结论与课题展望	176
6.1 结论	176
6.2 课题展望	180
参考文献	183

第1章 绪 论

1.1 课题研究的科学依据与工程意义

船舶建造是一个包含切割、构件热加工及分段总段焊接装配等热加工工艺的复杂生产过程,通过开展船舶建造过程中的热加工工艺力学问题研究,理解建造过程中的力学行为,对于改进建造工艺,提高船舶建造质量和建造水平具有重要的理论研究意义和工程应用价值。

热加工工艺力学行为的研究不是力学理论的研究,而是以力学理论为依据,以实现提高建造水平,改进工艺措施为目的。作为船舶建造过程中的研究热点和难点,船体曲面弯板成型、焊接以及氧气切割的热加工工艺力学问题具有典型的热弹塑性特征和规律,由于热加工建造工艺的复杂性,热弹塑性问题的求解非常复杂,而且利用有限元求解时,载荷施加及边界条件的确定也非常困难,因此只有解决这些难题,才能系统掌握热加工工艺的应力及变形的规律,进而判断工艺的科学性及合理性,发现问题,找出改进措施,提高造船工艺水平。

本著作基于热弹塑性有限元分析法,围绕船舶建造过程中船体曲面弯板成型、船体总段船台合拢焊接装配、船体结构背水焊接及平台桩腿齿条板切割等四个典型的热加工工艺开展力学行为研究,深入分析热加工工艺过程中残余应力及变形生产的机理、分布规律以及影响因素,从而为施工工艺的改进提供理论依据和数据支持。

1.1.1 船体曲面高频感应弯板成型工艺力学行为研究

船体外板曲面的成型加工是船舶制造的关键环节之一。一艘万吨级的船舶,超过二分之一的船体外板都要经过曲面成型加工工艺进行加工。目前国内在船体建造过程中,船体外板曲面成型加工之前的工艺已实现了计算机化,其后的装配、焊接均实现了机械化和流水线化,只有船体外板曲面成型加工这一环节仍靠手工。

因此船体外板曲面成型加工过程已经成为造船工业中影响造船速度和质量,实施流水线作业的一个“瓶颈”。目前实现水火弯板成型的自动化已经成为造船界的共识,而高频感应加热则是船厂实现曲面加工成型自动化的最佳选择之一。据国外统计资料表明自动加热系统的使用至少比人工加热成型提高3~4倍生产效率。然而高频感应加热自动弯板成型技术目前在国外只有很少几家大公司掌握,而且还不成熟,要在我国推广该项新技术必须做大量的基础研究工作。

为达到船体曲面弯板自动化这个目标,掌握高频感应弯板成型的复杂机理及影响因素至关重要。由于船体曲面高频感应弯板成型是一个复杂热弹塑性变形过程,影响板材局部收缩的参数较多,如热源移动速度、加热线的长度及间距、板材尺寸、冷却方式、热源功率、板材材质及加工钢板的边界支撑条件等^[1],因此深入开展这些参数对船体曲面弯板成型影响的研究,对于探明高频感应弯板成型机理,界定加工工艺参数范围,制定合理的工艺规程具有重要的作用。

1.1.2 基于固有应变理论的船体总段船台合拢焊接变形预测研究

焊接作为一种灵活高效的连接方式现已广泛运用于船舶制造业。焊接过程不均匀的加热和冷却将造成材料的局部非协调塑性应变以及焊接残余应力的存在,致使船舶结构产生各种复杂的焊接变形^[2],而焊接变形的存在不仅将造成焊接结构形状变异、承载能力降低及焊接结构尺寸精度下降。同时在工作荷载作用下引起

的应力集中和附加弯矩现象将造成焊接结构的早期失效和焊接结构疲劳强度降低,至今仍然是船舶结构生产中迫切需要解决的重要课题和技术难题。

实际生产中虽然可以通过选择合理的焊接工艺参数、焊接方法及焊缝的尺寸和形式等方法减少焊接变形,但是在焊接结构的焊接工艺参数已经确定的情况下,焊接变形能够调整的范围非常有限,甚至还会出现不满足设计要求的焊接变形。要解决船舶结构建造的焊接变形问题,研究确定补偿余量,施加反变形量是最佳的选择之一。由于焊接过程的复杂性,实际建造过程中,大型复杂船体结构(如船体总段船台合拢)的焊接残余应力及变形的变化规律是难以掌握的,常依靠经验预留焊接收缩量,往往达不到产品的建造精度要求,因此探索大型复杂船体结构焊接变形预测的新方法和新理论,解决大型复杂船体结构焊接试验高成本、高风险的难题十分必要。

1.1.3 船体结构背水焊接温度场及应力应变场数值模拟计算研究

背水焊接是焊接的一种特殊工况,是在钢板的一面与水接触,在另一面实施焊接的一种焊接工况。背水焊接在船舶自修、船坞外维修及海上抢修有着广泛的应用背景。由于在实际生产中背水焊接的效果并不理想,一般情况下应该避免背水焊接,即使必须使用,也要得到船级社的许可,需要制定详细的焊接工艺规程。因此深入开展背水焊接时温度场及应力应变场变化规律的研究,从而提出达到船级社质量要求的工艺方案,必然会给修船业带来巨大的效益。

1.1.4 高强度大厚度海洋平台桩腿板材切割工艺力学行为研究

随着世界各国经济的飞速发展,对能源的需求越来越大,世界各国对海底油田的开发已从浅海向深海、冰海区域拓展,因而对海洋平台制造的材料和技术要求也越来越高,特别是海洋钻井平台桩腿已采用屈服强度 690MPa 以上的 Z 向钢制造,最大厚度达到

210mm^[3]。对于这种高强度大厚度板材的切割过程是一个复杂热加工过程,涉及传热学、材料冶金学、固体力学和流体力学等众多学科以及材料和切割气体之间的复杂作用。

目前,从切割设备及切割成本来看,切割厚度大于100mm的高强钢板主要还是靠氧乙炔气体来切割。切割后的边随着钢板的自然冷却产生收缩应力,严重时将产生较大的复杂变形,同时作为焊接生产的第一道加工工序,引起的残余应力和应变将直接影响下一道工序——焊接装配的质量,因此进行平台桩腿制造过程中切割工艺力学行为的研究对于提高海洋平台的安全可靠性和装配精度具有重要的现实意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 高频感应弯板成型技术的研究现状

日本大阪大学焊接研究所对计算机辅助线状加热薄板成型做了大量的研究,取得了很多成果,发表了一系列论文^[4-7]。Imatani等^[8]利用高频电感器研发了产生具有复杂曲面的厚板弯曲机,实验研究和数值模拟了速度和板厚度对温度场的变化影响。Bae^[9]提出三角形高频感应加热热源,采用有限元数值分析,数值模拟了钢板在不同加热尺寸和板厚情况下的角变形,并得到实验验证。Lee通过电磁热耦合分析的数值方法,确定了SS400碳钢板高频感应加热过程中的温度分布^[10],数值模拟和实验验证了基于线加热的高频感应加热下的SS400厚钢板的变形行为,结果表明:温度梯度随输入功率的增大而急剧增加,且输入功率越高,变形越大^[11]。Lee^[12]提出了基于固有应变法和弹性变形分析法的钢板高频感应加热弯板预测的有效方法。

国内学者也针对感应加热的数值模拟进行相关的研究。Jang^[13]提出了经实验验证的基于三维瞬态电磁热耦合的高频感应加热数值计算模型,并在此基础上研究了板的厚度、加热速度和输

入功率对弯板成型的影响。Chen^[14]等在建立基于相似性的温度分布分析模型的基础上,数值模拟了钢板的弯曲角度,分析结果与实验结果吻合较好。Zhang^[15]建立了重力作用下的高频感应弯板成型有限元模型,数值模拟了不同厚度的船用钢板的温度场、应力应变场及冷却后的残余应力和弯曲角度,结果表明:加热温度是随着厚度的增加逐渐降低,弯曲角度逐渐减小。在加热条件下,薄板和毫米厚的板的变形效果最好。Zhang^[16]研究了船体板的高频感应加热成形,实验验证了静态的大型供热有限元模型。帅克刚^[17]针对高频感应加热的特点,建立了感应加热热源的有限元模型,利用计算的高频感应加热温度场,与实验结果的比较验证了模型的有效性,并运用确定的热源模型对高频感应蛇形移动加热的温度场进行了有限元模拟计算。罗宇^[18]等基于 ANSYS(有限元)软件数值模拟分析了低碳钢平板的高频感应线状加热弯板成型过程,根据相关数值计算结果定性分析了材料模型、材料屈服应力和弹性模量对最终面内收缩变形和角变形的影响。鲁华益^[19]利用热弹塑性有限元方法分析了船板在高频感应加热过程中的力学行为,研究了高频感应加热过程中固有应变的生成机理,研究讨论了拘束度、几何尺寸、机械性能及热物理常数等因素对固有应变的影响,并讨论了高频感应加热的规范与固有应变之间的内在联系。朱枳锋^[20]采用 MS Access 构建了高频感应加热参数和固有应变关系数据库,其参数包括板厚、热源移动速度、横向收缩、纵向收缩、横向角变形及纵向角变形等,建立了高频感应加热过程的热弹塑性有限元计算模型,为通过热弹塑性有限元计算充实高频感应加热参数和固有应变关系数据库奠定了基础。柏劲松^[21]数值模拟分析了不同参数组合的钢板温度场,探讨了不同的加热方式及参数对钢板局部变形规律的影响,并在大量数据基础上建立了钢板局部收缩量的回归方程。李敢^[22]完成了基于固有应变理论的高频感应加热弯板成型计算机辅助系统的总体设计及开发,并探讨了冷却方式对高频感应加热弯板成型的影响^[23]。范平^[24]等依据热应力成型所用加热方式的不同,详细论述了高频感应热应力成型的机理、

特点和应用,并在分析水火成型和激光热应力成型研究工作基础上,选择钛板作为研究对象,使用设计的试验装置对高频感应热应力成型进行了试验研究,得到了感应加热工艺参数、冷却方式和材料性能等因素对板料弯曲变形的影响规律。张雪彪^[25]等基于钢板感应加热的磁热耦合理论,利用 ANSYS 软件数值模拟了钢板感应加热过程,得到钢板感应加热过程中的电磁场分布规律和温度随时间的变化规律,数值计算结果符合感应加热的特征,且与实验结果一致。张继祥^[26]等应用 ANSYS 软件建立高频感应自由弯曲有限元模型,研究了船板高频感应成型中板厚对可加热温度、变形角度、应力、变形及冷却后的残余应力的影响。

综上所述,国内外学者均针对高频感应成型技术展开了研究,并提出了相关的模型及算法,但是完全推广应用还有一定的差距。在工程实践中,追求的是已经知道板的目标形状、板厚等参数时,如何确定热源移动速度等工艺参数和工艺过程,从而得到所需要的板材最终形状。因此只有板材热物理性能、板材边界条件、板材几何尺寸及加工工艺参数等对弯板成型的影响得到充分地研究,高频感应弯板成型自动化才能成为可能。

1.2.2 基于固有应变理论的焊接变形预测研究现状

日本研究学者最早从 20 世纪 90 年代开始就在结构热加工过程应力和变形的研究中引入固有应变的理论,并在船板的线状加热弯曲成型和船体结构焊接变形的控制等领域取得了突破性的进展^[27,28],在组装有纵横加强筋的结构焊接变形预测中,将焊接部位生成的局部变形也就是固有变形作为结构物变形的主要因素,并且考虑组合过程中的根部间隙、错边等以及矫正这些间隙和错边过程中产生的变形,预测结果和实验值吻合较好^[29-34],为日本船舶工业的自动化装备水平和制造工艺技术的进一步提高提供了理论指导和数据支持。Cao^[35]等在固有应变理论研究的基础上,提出了一种反转计算方法去构建残余应力,跟传统的固有应变方法相比较在预测焊接变形方面更加有效。Jang 等^[36-38]基于固有应变

理论对固有应变区进行了数值模拟预测,明确了固有应变与材料拘束度和材料熔点温度之间的关系,并通过基于该方法的船板变形预测,验证了基于固有应变理论研究方法的结论可行性和有效性。G. H. Jung 等^[39,40]通过利用 PDA 法确定固有应变分量与角焊缝角变形之间关系的研究过程中,得到如下结论:直角变大的变形效果主要来源于横向固有应变分量,垂直焊缝方向平面内的固有剪切应变将使得最终直角变小,该结论完全不同于角变形是由焊缝处沿厚度方向上不均匀的横向收缩引起的传统思维。Jang^[41]等基于固有应变理论提出等效载荷的方法并成功应用于加筋板焊接变形的预测。Asifa^[42]利用固有应变理论对平板堆焊和角接焊焊缝附近的等效收缩力进行了计算,预测了焊接变形,计算结果跟实验值吻合较好。Murakawa^[43]等针对目前在大型复杂焊接变形预测的局限性,提出基于固有应变的热弹塑性分析和弹性有限元方法。Mochizuki^[44]等基于固有应变理论提出一种新的焊接变形预测方法,该方法利用小型焊接接头和部件的热弹塑性的分析结果经过弹性分析能得到大型焊接结构的焊接变形,并将该研究成果成功应用于管件的焊接变形预测中^[45]。Hill^[46]探讨了三维亚表面残余应力的固有应变确定方法,并通过了实验验证。Terasaki^[47]等对比了焊后热处理过程中的固有应变数值模拟结果与实验数据。Itoh^[48]等基于热弹塑性有限元及固有应变法对焊接接头进行了数值模拟,结果与实测吻合较好。Hata 等^[49]提出了采用理想的显式固有应变分析法,并应用于船体分段的焊接变形预测,模拟结果与实测吻合较好。Kim^[50]提出了基于固有应变理论与有限元法的预测加筋弯曲板焊接变形的有效方法。通过将固有应变分量在附近的热影响区,确定了等效荷载,并与弹塑性有限元分析结果进行了比较。Takeda^[51]利用固有应变法对曲面壳板焊接变形进行了预测,并通过与实测数据对比说明固有应变法比瞬态热弹塑性分析更加实用和有效。

国内学者基于固有应变理论也开展了一定的研究。丁振斌^[52]等运用热弹塑性法预测了典型结构的焊接变形,得出典型船体分