

船体曲面钢板加工技术研究和展望

纪卓尚, 刘玉君

(大连理工大学 船舶工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 简要叙述了国内外船体钢板水火加工技术研究的进展情况, 介绍了研究工作的初步成果. 指出应进一步研究水火弯的热弹塑性机理, 同时注重对现场加工数据的实测及分析; 把二者结合起来, 促使研究深入和实用化.

关键词: 船体曲板; 水火弯; 线加热; 机器人
中图分类号: U 671.3 **文献标识码:** A

0 引言

大中型船舶的船体一般都是由钢制成的. 把钢板加工成船体外板的曲面形状, 目前国内外船厂都采用水火弯板技术. 首先把大体为矩形形状的钢板以长边为母线用辊床、水压机或水火加工弯成筒形; 然后在其边缘(或中心)进行线状加热; 随之浇水冷却, 靠热胀冷缩作用使钢板再产生沿长边方向的弯曲, 形成所需要的三维曲面形状. 如果加工参数选择得当, 板的残余变形就恰好是所需要的形状. 这一技术自 20 世纪 50 年代末用于船厂生产以来, 已 40 余年; 至今其基本技术状态仍是依靠工人经验临场确定加工参数并由手工完成作业, 生产效率低, 加工质量差. 由于环境艰苦, 劳动条件差, 青年工人不愿从事这一工种, 有经验的老工人日见匮乏, 各船厂钢板加工都后继乏人.

目前在船体建造过程中, 钢板弯曲加工之前的船体设计、放样、展开、号料、切割均实现了计算机化, 其后的装配、焊接均实现了机械化和流水化, 只有钢板加工这一环节仍靠手工, 因此这已成了制约造船生产率提高的瓶颈.

解决这一问题的途径是, 从理论上提出工艺参数的量化计算依据, 提出设计方法, 开发出软件系统, 科学地给出工艺参数及工艺过程, 以其代替高级工人的经验; 在此基础上再进一步研制代替工人体力劳动的弯板机.

从力学角度看, 水火弯板是个变温度的弹塑性问题, 即热弹塑性问题, 确定其加工参数, 是已知变形求热源量及其分布, 是一个力学和热力学反问题. 船体钢板尺寸很大, 加热线很多, 需要确定的加热参数有几十甚至上百个, 因此加工参数确定是一个大型热弹塑性反问题, 求解难度很大.

解决水火弯板加工参数的理论预报, 摆脱对人工经验的依赖, 实现加工机械化和自动化, 是造船界几十年来的努力目标之一.

1 国外研究状况^[1~14]

自 20 世纪 50 年代末水火弯板在造船中应用以来, 对其研究工作就开始了, 但进展较慢. 80 年代以来, 随着计算机技术的发展, 水火弯板研究进入了一个明显进展时期. 研究工作是从两方面进行的: 一是从热弹塑性分析入手, 以力学手段求解; 二是在实验和实测基础上进行数值模拟, 其研究目标都是给出线加热的作业参数.

J. S. Lee 等人采用简单的力学模型提出了一个计算加热线的方法, 并用来计算了船尾钢板; Nomoto 等人提出了一个利用收缩力和收缩力矩, 基于经验的模拟方法, 开发了加热线计算程序, 并能够显示板弯曲后的形状, 其结果可以用来训练技术工人; Ueda 等人提出了一个基于三维有限元的线加热参数计算方法, 初步给出了加热线参数和收缩量, 但由于用三维有限元作热弹塑性

分析, 计算量大, 需要大量时间; C. D. Jang 等人基于简单的热弹塑性分析, 提出了一个预报线加热时变形的的方法, 能够简化计算, 缩短计算时间; C. D. Jang 和 S. C. Moon 提出了一个确定加热线位置的迭代算法, 能用做加工机器人的控制模型; G. S. Jong 等人用三维有限元法分析了温度场和应力场, 提出了加工鞍形板的算法, 并且还研究了人工神经网络在参数预报中的应用。

水火弯板的热源现在主要是氧乙炔焰或氧及其他可燃气体焰, 其他热源的应用可能性也是一个研究课题。20 世纪 80 年代到 90 年代, MIT 的 K. Masubuchi 等人系统地进行了以大功率激光为线加热热源的研究; 他们发现以激光为热源更有利于钢板自动加工系统的研制, 预报变形及热场和应力场的数学模型更易成功提出, 更方便于有限元模型在此项研究中的应用。但是其计算时间长、精度不高的问题仍需进一步的研究。

2000 年 5 月, 日本石川岛播磨重工株式会社的 M. Ishiyama 等人介绍了他们基于热弹塑性的有限元分析, 进行线加热参数预报, 研制出了自动水火弯板机。据介绍此机器能有效地加工船体上任意曲面形状的外板, 研究工作在进行之中。

2 我国研究状况^[15~18]

我国对水火弯板的研究, 主要集中在大连。大连理工大学先后与大连造船厂、大连新船重工组成联合课题组, 从 80 年代中期以来, 对水火弯板的变形机理、影响因素、加工参数确定等问题, 通过生产现场测试、实验室试验、理论分析, 进行了持续十几年的研究工作, 得到了参数设计的软件系统, 并成功地在船厂生产中应用。

课题组对水火弯板作业中加热线长度、间距、筒形板的曲率半径对总体变形的影响进行了实验分析, 研究了船体外板曲面成形时所需的局部收缩量计算方法; 在实测及实验的基础上, 经数据处理得到加工中计算实际收缩量的数学模型; 与此同时, 对水火弯板的热弹塑性机理进行了研究。在上述工作基础上, 开发出了确定水火弯板加工参数的软件系统, 1997 年开始在大连新船重工投产, 至今已在 20 多条船的建造中成功应用。

3 问题的求解思路

把船体钢板曲面看成由许多足够小的平面块连接而成, 保持每块小平面形状不变, 按一定规律把整张曲面钢板展开铺平, 则展开后小平面间必然出现裂缝, 这些裂缝就是形成曲面钢板的必要收缩量。在水火弯板时, 如果把加热线布置在裂缝处, 并且使其收缩量刚好等于裂缝宽度, 则钢板必然形成所要求的曲面。

按照这一思路, 可以把问题求解的主要步骤确定为

- (1) 研究一种曲面的精确展开方法, 求出必要收缩量;
- (2) 用热弹塑性分析方法或其他方法建立所需收缩量与加热参数之间的关系模型;
- (3) 加工参数确定软件系统的研制。

4 必要收缩量的确定^[19, 20]

如前所述, 对于船体外板这类有界曲面, 可以对其进行有限网格划分; 当网格分到足够小时, 单个网格曲面可以看做平面, 整个钢板曲面就成为空间多面体的一部分。其展开的主要步骤为(图 1)

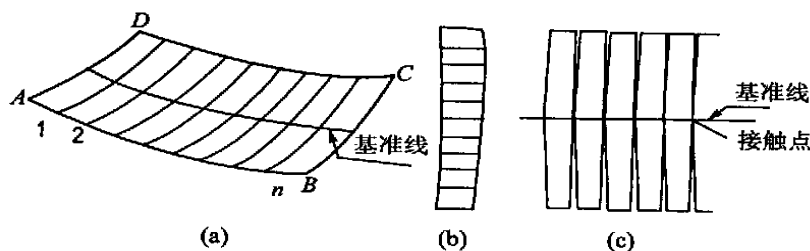


图 1 帆形板有限网格展开方法

Fig. 1 Expansion method of finite grid for sail-shaped plate

(1) 选取展开基准线: 基准线的选取直接影响曲面板展开后两长边上裂缝的大小。经研究, 以通过纵向首尾缝中点的短程线(即两点间沿板面量得的最短距离线)为基准线较为适宜。

(2) 曲面板的网格划分: 以肋骨线为界, 把曲面板划分为一个个相邻的曲面条, 再把曲面条沿条长方向划分为小块, 成为矩形网格。

(3) 展开: 以基准线为轴, 依次把每块曲面条向上、下板缝方向展开铺平。

(4) 求必要收缩量: 展开后相邻曲面条间出现的缝隙就是由平板加工成曲面板时的必要收缩量; 其面积为必要收缩面积, 在上下板缝处的最大裂口距离为最大必要收缩量。

5 水火加工参数与收缩量间的关系^[21~23]

建立水火弯板加工过程中加工参数与钢板产生的收缩量之间的关系模型, 是水火弯板研究的核心内容。大连理工大学与大连新船重工的研究是把如前所述的力学机理研究与模拟研究结合起来进行的。

5.1 热弹塑性分析

5.1.1 中厚度钢板表面受线状加热条件下准稳态温度场理论分析

(1) 控制方程

在常物性条件下, 固定坐标系($Oxyz$)选在热源起点, 动坐标系($Ox'yz'$)固定在移动的热源上, 则 Fourier 导热方程为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x'^2} + \frac{v}{a} \frac{\partial T}{\partial x'} + \frac{\partial^2 T}{\partial y'^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z'^2} = 0$$

式中: T 为温度, v 为热源移动速度, a 为材料的导热系数。

(2) 变源强线状热源条件下的中厚板准稳态温度场

在移动热源作用下, 热源强度 Q 沿板厚方向是变化的。在板厚 h 范围内, 假定热源强度由 Fourier 余弦级数定义:

$$Q(z) = Q_0 \sum_{n=0}^k A_n \cos \frac{n\pi}{h} z$$

忽略表面 $z = 0$ 和 $z = h$ 处的散热损失, 则中厚度板在二维热流作用下的准稳态温度场为

$$T = T_0 + \frac{Q(z)}{2\pi\lambda} e^{(-v/2a)x} \sum_{n=0}^k A_n \cos \frac{n\pi z}{h} \times$$

$$k_0 \left[\left(\frac{v}{2a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{h} \right)^2 r \right]$$

式中: T_0 为板内的初始温度, λ 为导热系数, $k_0(\phi)$ 为第二类零阶修正 Bessel 函数, $r^2 = x^2 + y^2$ 。

(3) 点热源条件下的中厚度板准稳态温度场应用映像法, 把 $z = 0$ 和 $z = h$ 平面作为对称面, 热流的反射作用函数 ϕ_n 可表示为

$$\phi_n = \frac{Q}{2\pi\lambda} e^{(-v/2a)x} \left[\frac{e^{(-v/2a)R_n}}{R_n} + \frac{e^{(-v/2a)R_n}}{R_n} \right]$$

式中: $R_n = \sqrt{x^2 + y^2 + (z + 2nh)^2}$,

$$R_n = \sqrt{x^2 + y^2 + (z - 2nh)^2}.$$

假定边界散热损失由下式给出:

$$\left[\frac{\partial T}{\partial z} - B(T - T_0) \right]_{z=0} = 0$$

$$\left[\frac{\partial T}{\partial z} + B(T - T_0) \right]_{z=h} = 0$$

式中: $Z = z/h$; B 为比奥数, 且 $B = ah/\lambda$, 则板内温度场为

$$T = T_0 + \frac{Q}{2\pi h \lambda} e^{-LX} \times \sum_{n=0} \left[\cos(ZU_n) + \frac{B}{U_n} \sin(ZU_n) \right] \times k_0 \left(\frac{X^2 + Y^2}{(L^2 + U^2)} \right)$$

式中: $L = 0.5hv/a$, $X = x/h$, $Y = y/h$, U_n 是下式的一个正根:

$$\tan U_n = 2BU/(U_n^2 - B^2)$$

5.1.2 求解薄板表面在线状加热条件下瞬态温度场的有限元分析

(1) 控制方程

对于薄板的二维问题, 非线性热传导方程为

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q$$

(2) 空间域的离散

对求解域单元分割, 应用加权余值法, 得上式的加权积分式:

$$\iint_{\Delta R} N_i \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + Q \right] dx dy = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

式中: N_i 为 Galerkin 法的权函数。

代入边界条件, 用 NT^e 代 T , 得

$$(K_i^e + K_i^s) T^e + C^e \partial T^e / \partial t = P_q^e + P_q^s + P_{T_0}^e$$

合并单元, 得整体方程:

$$KT + C \frac{\partial}{\partial t} T = P$$

(3) 时间域的离散

在每个时间步长 Δt 内, 对 $(t + \Delta t)$ 建立差分格式, θ 是权系数 ($0 \leq \theta \leq 1$). 利用 Taylor 展开式

$$T^{t+\Delta t} = T^{t+\theta\Delta t} + \frac{\partial}{\partial t} T^{t+\theta\Delta t} (1 - \theta) \Delta t + O(\Delta t^2)$$

$$T^t = T^{t+\theta\Delta t} - \frac{\partial}{\partial t} T^{t+\theta\Delta t} \theta \Delta t + O(\Delta t)^2$$

求出 $T^{t+\theta\Delta t}$ 和 $\partial T^{t+\theta\Delta t} / \partial t$. 同样, 可对 P 进行展开.

(4) 热源模型假定

水火弯板中, 移动的喷枪可以用点热源表达. 假定喷枪火焰垂直于钢板, 则任意半径处的热通量 $q(r)$ 由 Gauss 正态分布给出:

$$q(r) = q_{\max} e^{-\beta^2}$$

式中: q_{\max} 是热源中心点的最大热通量, β 是与热源有关的集中系数, r 是距中半径.

(5) 材料热物性随温度改变的模型假定

水火弯板过程中, 钢板内部温度变化很大, 材料的热物性随温度的变化而变化. 由于材料的热物性对于温度的变化函数不能准确地表达, 根据对低碳钢的实验结果, 假定钢板的热物性与温度的关系是分段线性的, 即:

$$y = b_0 + b_1 T$$

5.1.3 线状加热条件下钢板变形热弹塑性分析

(1) 线状加热条件下钢板变形的力学行为

在水火弯板这个热力学系统中, 材料的自由能密度不仅与应变有关, 而且与温度有关. 从能量角度分析, 输入到钢板上的大部分热能使材料内部温度上升并产生弹性变形, 另一小部分热能由于使材料塑性膨胀变形做功消耗掉了. 在整个系统中, 温度场和应力场是相互耦合作用的. 但金属焊接研究表明: 除个别情况外, 这种耦合作用很小, 远小于高温区附近由于温度变化很大引起材料热物性变化造成的影响. 所以在水火弯板热弹塑性研究中, 不考虑温度场与应力场的耦合作用.

(2) 线加热条件下钢板变形热弹塑性分析的理论假定

- 材料的屈服服从 Mises 屈服准则;
- 材料在塑性区内的行为, 服从流动法则,

显示出应变硬化;

c. 弹性应变、塑性应变和温度应变可分;

d. 与温度有关的材料的机械性能在微小的时间增量内线性变化.

(3) 线状加热条件下钢板变形的热弹塑性矩阵表达式

钢板在表面热线加热时, 钢板内各点达到最高温度的时刻不同, 各点的加载和卸载时间也不同. 故采用增量理论分析钢板变形的热弹塑性过程.

在弹性区, 应力应变关系为

$$d\sigma = D_e d\epsilon - C_e dT$$

式中: $C_e = D_e(\alpha + \partial \epsilon^{-1} / \partial T \sigma)$, D_e 是弹性矩阵.

设材料屈服函数为 $f(\sigma_x, \sigma_y, \dots)$, 在温度 T 、应变硬化指数 K 等达到 $f_0(\sigma_s, T, K)$ 时, 材料开始屈服. 在塑性区, 应力应变关系为

$$d\sigma = D_{ep} d\epsilon - C_{ep} dT$$

式中: D_{ep} 是弹塑性矩阵,

$$D_{ep} = D_e - D_e (\partial f / \partial \sigma) (\partial f / \partial \sigma)^T D_e / S;$$

$$C_{ep} = D_{ep} \alpha + D_{ep} \partial \epsilon^{-1} / \partial T \sigma -$$

$$D_e (\partial f / \partial \sigma) (\partial f_0 / \partial T) / S$$

$$S = (\partial f / \partial \sigma) D_e (\partial f / \partial \sigma) +$$

$$(\partial f_0 / \partial K) (\partial K / \partial \epsilon)^T (\partial f / \partial \sigma)$$

5.2 水火弯板模拟分析^[24~26]

(1) 模拟模型

令 L_s 为水火加工时某加热线的最大收缩量, 影响 L_s 的因素很多, 诸如加热线长度 L_h 、加热线间距 D_h 、加热速度 v_h 、钢板长度 L_p 、宽度 B_p 、厚度 H_p 、板的横向曲率半径 R_p 等都对应加热后的变形有不同程度的影响.

课题组对加工现场的实测数据和实验室数据进行处理, 得到基于经验的数学模型:

$$\text{模型 1 } y = b_0 B_p + b_1 L_p + b_2 H_p + b_3 R_p + b_4 L_h + b_5 D_h + b_6 v_h + b_7 + \epsilon.$$

$$\text{模型 2 } y = b_0 B_p^2 + b_1 L_p^2 + \dots + b_6 v_p^2 + b_7 B_p L_p + b_8 B_p L_p + \dots + b_{27} D_h v_h + b_{28} B_p + b_{29} L_p + \dots + b_{34} v_h + b_{35} + \epsilon.$$

$$\text{模型 3 } y = C B_p^{b_0} L_p^{b_1} H_p^{b_2} R_p^{b_3} L_h^{b_4} D_h^{b_5} v_h^{b_6} + \epsilon.$$

模型 1 的回归结果是

$$L_s = -0.000\,079\,859 R_p + 0.002\,458\,9 L_h -$$

$$0.000\,817\,04 D_h - 0.255\,06 v_h +$$

$$1.959\,2 + \epsilon$$

(2) 模拟模型的实验修正

上述模型是针对无厚度板建立的. 为反映板厚影响, 通过规则板在实验室变换厚度的系列实验, 得出了板厚影响曲线, 并构造出板厚影响系数, 用以修正无厚度模型.

6 水火弯板工艺参数的优化设计^[27]

水火弯板工艺参数的确定, 是以上述数学模型为理论依据, 用最优化方法求解的.

6.1 优化模型

设计变量 $X = (t_i, l_i)$

式中: t_i 是第 i 加热焰道的加热时间; l_i 是第 i 焰道的长度, $i = 1, \dots, k$, k 是焰道总数.

目标函数 以总能量消耗最小为目标

$$f(x) = \sum_{i=1}^k t_i$$

约束条件 对加热速度、焰道间距、焰道长度加以限制, 构造出约束条件. 例如对厚度为 18 mm 板的焰道间距约束条件为

$$G_1(d) = 200 - d \quad 0$$

$$G_2(d) = d - 500 \quad 0$$

式中: d 为焰道间距, mm; 即间距不大于 500 mm, 不小于 200 mm.

6.2 求解方法

用罚函数法构造成求极小值的综合目标函数, 用混合整数规划方法求解.

7 研究工作展望

当前的国内外研究成果是初步的, 现有的各种参数预报方法都还不能准确地适应各种形状的船体板. 机器人的水平也还不能全代替人工的加工作, 其智能在很多情况下尚不能与人相比.

从理论上讲, 热弹塑性分析应能解决参数预报问题, 但由于水火弯板的影响因素太复杂, 板的形状又千变万化, 分析中不得不作必要的简化, 这就使理论解出现了误差. 而基于实验数据处理的模拟分析又由于数据的局限性, 使其应用范围产生了局限. 这就是当前的研究成果不能满足生产要求的原因.

解决这一问题, 仍应从两方面入手: 一是对水火弯进行精确的热弹塑性分析, 使其更贴切实际; 二是取得更宽泛的实验数据, 并作更精确的处理, 使其具有更大的适应性. 把二者结合起来, 互相

验证, 将能得到更准确的数学模型.

在此基础上, 开发适应工厂条件的机器人, 研究在机器人上实现水火弯板加工的参数预报方法和迭代算法, 研究机器人水火弯板工艺, 实现水火弯板全自动加工.

参考文献:

- [1] MOSHAIOV A, VORUS W A. The mechanics of the plane bending process: theory and applications[J]. **J Ship Res**, 1987, **31**(4): 269-281.
- [2] SCULLY K. Laser line heating[J]. **J Ship Prod**, 1987, **3**(4): 237-246.
- [3] SHIN J G. Three-dimensional simulation of thermo-elastic plastic plate bending by the line heating method[D]. Cambridge: Department of Ocean Engineering, MIT, 1989.
- [4] NOMOTO T, OHMORI T, SUTOH T, *et al.* Development of simulator for plate bending by line heating[J]. **J Soc Naval Archit Jpn**, 1990, **168**: 527-535.
- [5] NOMOTO T, TAKECHI S, SHOUKI K, *et al.* Development of simulator for plate bending by line heating considering in plane shrinkage[J]. **J Soc Naval Archit Japan**, 1991, **170**: 599-607.
- [6] UEDA Y, MURAKAWA H, MOHAMED R A, *et al.* Development of computer aided process planning system for plate bending by line heating (1st report)[J]. **J Soc Naval Archit Jpn**, 1991, **170**: 577-586.
- [7] UEDA Y, MURAKAWA H, MOHAMED R A, *et al.* Development of computer aided process planning system for plate bending by line heating (2nd report)[J]. **J Soc Naval Archit Jpn**, 1992, **171**: 405-415.
- [8] CHIN J S, HWANG J S, KIM K H, *et al.* Experimental study on the thermal deformation of steel plate due to line heating[R]. Final year report. Ulsan: University of Ulsan, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, 1992.
- [9] LEE J S. Development of automatic marking generation system for plate forming by line heating[J]. **J Ship Prod**, 1996, **12**(4): 247-253.
- [10] JANG C D, SEUNG SEO, KO D E. A study on the prediction of deformation of plates due to line heating using a simplified thermal elasto-plastic analysis[J]. **J Ship Prod**, 1997, **13**(1): 22-27.

- [11] JANG C D, MOON S C. An algorithm to determine heating lines for plate forming by line heating method[J]. *J Ship Prod*, 1998, **14**(4): 238-245.
- [12] JONG G S, JANG H L, SUNG K P. A numerical thermoplastic analysis of line heating processes for saddle-type shells with the application of an artificial neural network[J]. *J Ship Prod*, 2000, **15**(1): 10-20.
- [13] KOICHI M, JERRY E J. Laser forming for flexible fabrication[J]. *J Ship Prod*, 2000, **16**(2): 97-109.
- [14] MORINOBU I, YOSHIHIKO T. Advanced line heating process for hull-steel assembly[J]. *J Ship Prod*, 2000, **16**(2): 121-132.
- [15] 刘玉君, 赵洪福, 王桂荣. 水火弯板影响成型因素的实验定性分析[J]. 大连理工大学学报, 1994, **34**(1): 45-49.
- [16] 刘玉君, 纪卓尚. 实船板水火加工成型数据库系统[J]. 中国海洋平台, 1996(3): 127-131.
- [17] 刘玉君, 纪卓尚. 水火弯板工艺参数对收缩量影响的实验分析[J]. 造船技术, 1996(7): 18-23.
- [18] 雷云天. 水火弯板工艺参数的实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 1997.
- [19] 刘玉君, 纪卓尚. 水火弯板局部收缩和整体变形的理论分析[J]. 中国造船, 1995(2): 90-100.
- [20] 金世良, 于文喜. 考虑加工塑性变形因素的外板展开方法[J]. 造船技术, 1994(8): 27-29.
- [21] 刘玉君, 纪卓尚, 戴寅生. 水火弯板成型参数回归分析[J]. 中国造船, 1994(1): 65-73.
- [22] 刘玉君, 张迪夫, 纪卓尚. 水火弯板局部变形的量化分析[J]. 大连理工大学学报, 1998, **38**(4): 405-409.
- [23] 纪卓尚, 刘玉君. 水火弯板模拟方法研究[J]. 中国造船, 1999(2): 81-86.
- [24] 刘玉君. 水火弯板热弹塑性机理及模拟方法的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 1997.
- [25] 刘玉君. 水火弯板热弹塑性机理研究[A]. 辽宁省第二届青年科技大会论文集[C]. 大连: 大连海事大学出版社, 1995.
- [26] 刘玉君, 纪卓尚. 水火弯板温度场的数学模型[J]. 中国造船, 1996(4): 87-96.
- [27] 纪卓尚, 刘玉君. 船体曲面钢板水火加工成型工艺的理论与应用研究[J]. 中国造船, 1998(增刊): 118-124.

Development of study of ship hull plate banding by line heating

Ji Zhuo-shang, Liu Yu-jun

(School of Naval Archit. and Mar. Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China)

Abstract: A brief introduction for the development of the study of the ship hull plate banding by line heating is given. The present research work is introduced. The authors believe that two kinds of work should be done in the following periods: 1, Advanced thermal elastic-plastic analysis for plate banding by line heating. 2, To obtain more data from the plate forming process and put forward exact simulator for heating line in the plate forming. Based on the work, the research will be done successfully.

Key words: hull curve plate; plate forming; line heating; robot