

材料力学性能对高频感应弯板成形的影响

Influence of Mechanical Properties of Materials on High Frequency Inducting Plate Bending

罗 宇¹, 江晓玲¹, 邓德安²

(1 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030;

2 重庆大学, 重庆 400044)

LUO Yu¹, JIANG Xiao-ling¹, DENG De-an²

(1 School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, shanghai 200030, China;

2 Chongqing University, chongqing 400044, China)

摘要: 采用 ANSYS 软件对低碳钢平板的高频感应线状加热弯板成形过程进行热弹塑性有限元分析, 利用相关数值结果定性分析材料模型、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, 为船板成形自动化加工提供数据支持。

关键词: 曲面成形; 固有应变; 力学性能; 变形

中图分类号: TG404 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2005) 08-0035-04

Abstract: The ANSYS software was used for thermal-elastic-plastic finite element analysis of mild carbon plate bending process using high frequency induction heating apparatus. Numerical results were used to qualitatively analyze the influences on the final shrinkage and angular distortion, which were caused by the changes of material, yield stress and Young's modulus. It can provide digital support for ship plates' automatic machining.

Key words: plate bending; inherent strain; mechanical property; distortion

船舶型面板材的加工制造是船舶制造的重要环节之一^[1-4]。现有的依赖于工人自身经验和技能的工艺方法, 难以适应高效造船的要求; 而且技术工人的老龄化, 使船用板材曲面成形自动加工装备的研制和应用成为造船界必须尽快解决的问题。

要实现计算机辅助的高频感应加热自动弯板成形过程, 就必须有加工方案的计算机辅助设计系统, 该系统是建立在充分了解高频感应加热过程中的变形规律的基础上的。目前, 船厂使用的钢板种类较多, 且同一牌号的板材力学性能也有一定的波动。因此, 探明力学性能的变化对高频感应弯板成形最终变形的影响对建立高频感应加热参数与固有应变数据库有非常重要的意义。本工作运用热弹塑性理论的有限元方法分析了材料模型、材料弹性模量和材料屈服应力对板材最终面内收缩变形和角变形的影响。

格划分后的单元为 ANSYS 的 Solid 70 单元。该类单元是 8 节点三维单元。为了节省计算时间和计算机内存, 在不影响计算精度的情况下采用不均匀网格划分。根据线性加热平板的温度场特征, 随着离加热线距离的增大, 由细网格逐渐过渡到粗网格。划分结果共有 5150 个单元, 6561 个节点。最小单元尺寸为 $12.5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 。加热热源从平板背面加热。

边界条件为: 在 $y = 0$ 的平面上施加对称条件, 点 $(0, 500, 20)$ 在 y, z 两个方向上的位移为 0, 点 $(1000,$

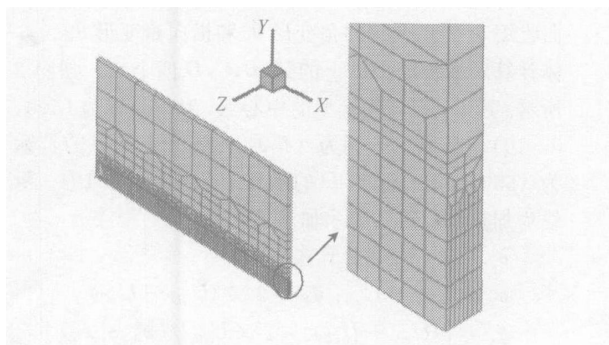


图1 有限元分析模型图

Fig. 1 Finite element model

1 研究模型

1.1 对象模型

研究对象为 $1000\text{mm} \times 1000\text{mm} \times 20\text{mm}$ 的平板。考虑对称性, 只选择其 $1/2$ 进行分析, 如图1所示。网

500, 20) 在 z 方向的位移为 0 (如图 1 箭头所示)。

1.2 材料热物理参数

所用材料为低碳钢, 考虑到材料的非线性, 其具体热物理参数包括材料密度 ρ 、热容 c 、传热系数 γ 、换热系数 λ 和线膨胀系数 α 等均与温度有关。其中密度 ρ 和换热系数 λ 随着温度的升高, 有略微的减小趋势, 而其他三个热物理参数则随温度的升高而增大^[2]。

1.3 加热热源及其特征

采用直径为 80mm 的圆形高频感应加热源对平板加热。基于理论和实验的分析, 高频感应热源有如下特征: 在感应线圈中心正下方的热流密度为 0, 随着半径增大热流密度也逐渐增大, 当半径 $R = 7.5\text{mm}$ 时热流密度增加到最大 q_m , 维持一段距离, 到 $R = 12.5\text{mm}$ 后开始逐渐衰减, 当 $R = 42.5\text{mm}$ 时热流密度衰减至 0, 而后又开始在 $R = 50.0\text{mm}$ 处出现一个

三角形的热流密度的小波峰, 该最大值为 $0.6 q_m$, 然后又逐渐减小, 直至 $R = 52.5\text{mm}$ 时热流密度为 0^[5]。而 q_m 将随着热源距平板高度的变化而变化。

2 材料模型的影响

为了研究材料模型的影响, 本工作分析比较了理想弹塑性、具有加工硬化的双线性和多线性三种材料模型, 其材料属性如表 1 所示。表中 σ_Y 为屈服应力 (即弹性阶段最大应力), σ_{YU} 为塑流阶段最大应力, σ_U 为弹塑性阶段最大应力 (即多线性模型的极限应力); E_1 为弹性阶段的弹性模量, E_2 为塑流阶段的弹性模量, E_3 为弹塑性阶段的弹性模量。

采用最常见的热输入条件: 热源移动速度为 10m/s , 热效率为 0.75, 热输入量为 6J/mm^3 。

表 1 三种材料模型属性数据表

Table 1 Data sheet of three different kinds of materials

| Temperature/ | | 0 | 500 | 750 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 | 3000 |
|--------------|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-----------------|-----------------|--------|--------|
| Ideal | E/GPa | 210×10^3 | 210×10^3 | 155×10^3 | 20×10^3 | 4×10^3 | 1×10^3 | 1 | 1 |
| | σ_Y/MPa | 240 | 240 | 10 | 10 | 4 | 1 | 1 | 1 |
| Bilinear | E_1/GPa | 210×10^3 | 210×10^3 | 155×10^3 | 20×10^3 | 4×10^3 | 1×10^3 | 1 | 1 |
| | E_2/GPa | 5212 | 5212 | 3875 | 500 | 100 | 25 | 0.025 | 0.025 |
| | σ_Y/MPa | 240 | 240 | 10 | 10 | 4 | 1 | 1 | 1 |
| | σ_{YU}/MPa | 450 | 450 | 10 | 10 | 4 | 1 | 1 | 1 |
| Multi-linear | E_1/GPa | 210×10^3 | 210×10^3 | 155×10^3 | 20×10^3 | 4×10^3 | 1×10^3 | 1 | 1 |
| | E_2/GPa | 5212 | 5212 | 3875 | 500 | 100 | 25 | 0.025 | 0.025 |
| | E_3/GPa | 521 | 521 | 387.5 | 50 | 10 | 2.5 | 0.0025 | 0.0025 |
| | σ_Y/MPa | 240 | 240 | 10 | 10 | 4 | 1 | 1 | 1 |
| | σ_{YU}/MPa | 456 | 456 | 10 | 10 | 4 | 1 | 1 | 1 |
| | σ_U/MPa | 475 | 475 | 10 | 10 | 4 | 1 | 1 | 1 |

在高频感应弯板成形过程中, 最值得注意的是面内收缩变形和面外角变形。因此, 本工作主要讨论平行于加热线方向的纵向收缩 δ_x 和垂直于该方向的横向收缩 δ_y , 以及纵向角变形 θ_x 和横向角变形 θ_y 。具体计算时取模型中面上的 A, B, C, D 四个点, 如图 2 所示。其中, 点 C 为模型的中心点, 对应坐标为 (500, 0, 10), 点 A 的坐标为 (450, 0, 10), 点 B 的坐标为 (550, 0, 10), 点 D 的坐标为 (500, 50, 10)。粗线为加热线, 箭头表示加热方向。

$\delta_x, \delta_y, \theta_x, \theta_y$ 的计算式分别为:

$$\delta_x = U_{xA} - U_{xB}; \delta_y = 2 \times (U_{yD} - U_{yC})$$

$$\theta_x = [(U_{zA} + U_{zB}) - 2 \times U_{zC}] / (x_A - x_B)$$

$$\theta_y = (U_{zD} - U_{zC}) / (y_D - y_C)$$

式中: x_A, x_B 分别为点 A, B 的 x 坐标值; y_D, y_C 分别

为点 C, D 的 y 坐标值; U_{xA}, U_{xB} 分别为点 A, B 沿 x 方向的位移; U_{yC}, U_{yD} 分别为点 C, D 沿 y 方向的位移。

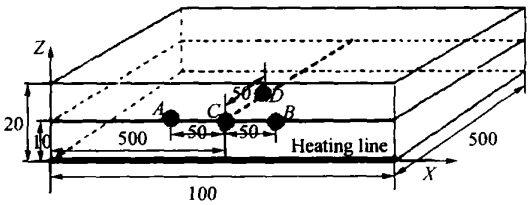


图 2 计算点示意图

Fig. 2 Attached points

三种不同材料模型的变形结果比较情况如图 3, 4 所示。图中 $\delta_x, \delta_y, \theta_x$ 和 θ_y 分别表示纵向收缩、横向收

缩、纵向角变形和横向角变形。

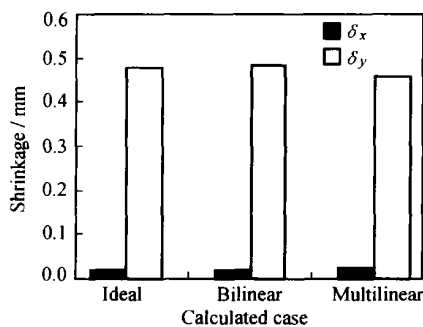


图3 面内收缩结果比较

Fig. 3 Comparing graph of skin shrinkage

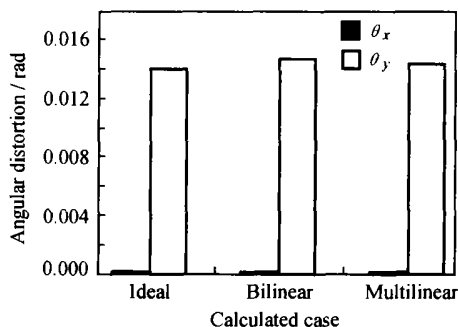


图4 角变形结果比较

Fig. 4 Comparing graph of angular distortion

三种材料模型的分析结果相当接近, 横向收缩的最大差别仅为 4.04%; 横向角变形最大差别仅为 4.30%。纵向变形 (无论是面内收缩变形还是面外角变形) 都远小于横向变形, 因此横向变形才是平板最终变形的主要影响因素。通过以上讨论, 可以认为材料模型的变化对最终变形的影响很小。

3 屈服应力的影响

为了讨论屈服应力 σ_y 的影响, 在其他条件与上述计算完全相同的情况下, 改变屈服应力 σ_y 的大小, 分析了图 5 所示的 case1, case2, case3, case4 四种情况下的变形。四种情况的低温区屈服应力分别为 240, 300, 350, 400 MPa。分析中, 材料模型为理想弹塑性。分析结果如图 6, 7 所示。可以看出, 随着屈服应力 σ_y 的增大, 横向收缩变形有较为显著的下降趋势; 而横向角变形有增大的趋势。case4 相对 case1 横向收缩变形下降 20.032%; 横向角变形增大 9.89%。由此可知, 屈服应力的影响是不能忽略的。

4 弹性模量的影响

线。屈服应力 σ_y 取第 3 节中的 case1, 其余条件不变。具体计算结果如图 9, 10 所示。

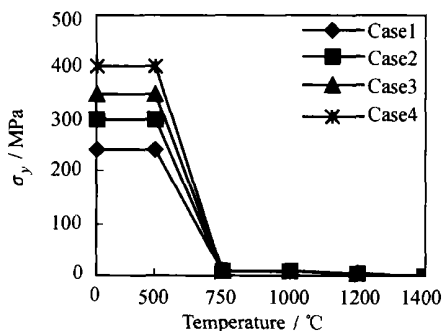


图5 屈服应力的取值情况图

Fig. 5 Sampling model of yield stress

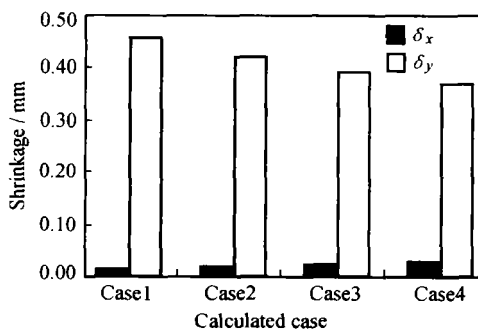


图6 屈服应力对收缩变形的影响

Fig. 6 Influence of yield stress (σ_y) on shrinkage

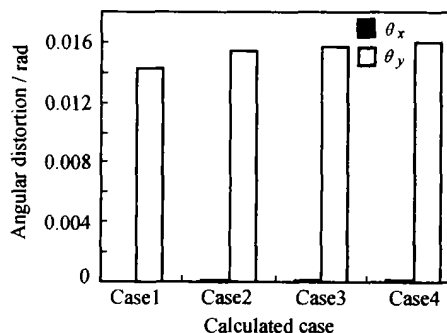


图7 屈服应力对角变形的影响

Fig. 7 Influence of yield stress (σ_y) on angular distortion

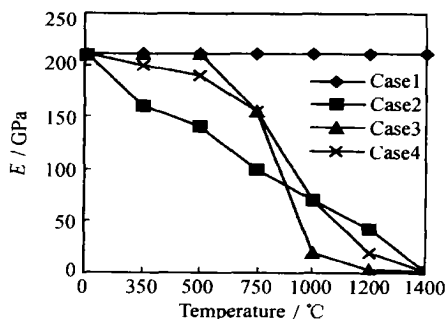


图8 弹性模量的取值模型

Fig. 8 Sampling model of Young's modulus

图 8 为四种不同弹性模量 E 随温度变化趋势曲

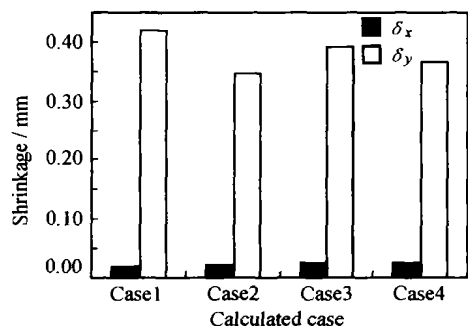


图9 不同弹性模量情况下的收缩变形

Fig. 9 Shrinkage of different Young's modulus

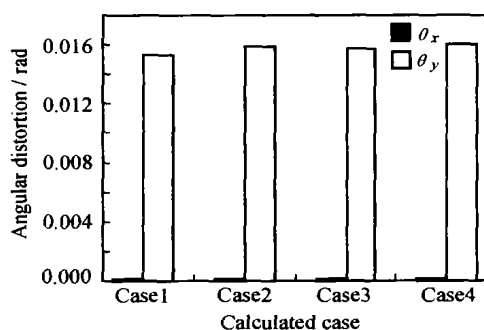


图10 不同弹性模量情况下的角变形

Fig. 10 Angular distortion of different Young's modulus

可以看到,变形的最大变化出现在 case2 与 case1 之间,其横向收缩和横向角变形变化幅度分别为 17.561% 和 4.056%。从图 8 可以看到, case2 与 case1 分别是材料的两种极限状态,实际使用的材料弹性模量 E 取值都在两者之间,因此,可以认为实际生产过程中,弹性模量 E 的不同取法对最终变形影响不大。

5 结论

(1) 横向变形是弯板成型的主要变形因素。

(2) 三种材料模型的分析结果相当接近,材料模型对最终变形影响不大。

(3) 随着屈服应力 σ_y 的增大,横向收缩变形有较为显著的下降趋势,而角变形则有增大的趋势。

(4) 尽管弹性模量 E 与温度关系的变化对最终变形有影响,但在实际材料中,这种影响可以忽略。

参考文献

- [1] 罗宇,朱积锋,鲁华益.固有应变及其在船舶建造中的应用[J].造船技术,2005,(2):35-39.
- [2] LUO Yu, ISHIYAMA MORINOHU and MURAKAWA HIDEKAZU. Study of temperature field and inherent strain produced by high frequency induction heating on flat plate[J]. Trans JWRI, 2004, 33 (1): 9-63.
- [3] LUO Yu, MORINOBU ISHIYAMA and HIDEKAZU MU-

RAKAWA. Welding deformation of plates with longitudinal curvature [J]. Trans JWRI, 1999, 28 (2): 57-65.

- [4] YUKIO UEDA, HIDEKAZU MURAKAWA, AHMED MO-HAMED RASHWA, et al. Development of computer aided process planning system for plate bending by line heating (report) [J]. Trans of JWRI, 1991, 20 (2): 129-139.
- [5] 帅克刚,罗宇,谢雷.高频感应加热弯板成型温度场的有限元模拟[J].锅炉技术,2004,(3):52-54.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50175073)

收稿日期:2005-03-14;修订日期:2005-05-16

作者简介:罗宇(1961-),男,博士,副教授,从事制造工艺力学领域的研究,联系地址:上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院(200030)。

(上接第34页)

灌封材料。经偶联剂 KH-550 处理的纳米 SiO_2 被均匀分散在环氧树脂基体中。

(2) 纳米 SiO_2 加入使环氧树脂/纳米 SiO_2 灌封材料的冲击强度和弯曲强度有显著提高,并在纳米 SiO_2 含量为 3% 时达到最大值。

(3) 灌封材料的电性能和热性能由于纳米 SiO_2 的加入而提高,线膨胀系数降低,粘度稍有增大。

参考文献

- [1] 哈恩华,寇开昌,陈立新.环氧灌封材料的研究进展[J].化工进展,2003,22(10):1057-1060.
- [2] 张立德,牟季美.纳米材料和纳米结构[M].北京:科学出版社,2002.60-64.
- [3] SOLOMON M J, ALMUSALLAM A S, SEEFELDT K F, et al. Rheology of polypropylene/clay hybrid materials[J]. Macromolecules, 2001, 34: 1864-1871.
- [4] KAWASUMI M K, HASEGAWA H, KATO M, et al. Preparation and mechanical properties of polypropylene-clay hybrids[J]. Macromolecules, 1997, 30: 6333-6338.
- [5] LAN T, PINNAVAIA T J. Clay-reinforced epoxy nanocomposites[J]. Chem Mater, 1994, 6: 2216-2220.
- [6] VAIA R A, ISSI H, GIANNELIS E P. Synthesis and properties of two-dimensional nanostructures by direct intercalation of polymer melts in layered silicates[J]. Chem Mater, 1993, 5: 1694-1698.
- [7] 蓝立文,过梅丽,雷渭媛.高分子物理[M].西安:西北工业大学出版社,1993.215-226.
- [8] CHEN Xi-chong, WU Li-min, ZHOU Shu-xue, et al. In situ polymerization and characterization of polyester-based polyurethane/nano-silica composites[J]. Polym Int, 2003, 52: 993-998.

收稿日期:2004-11-28;修订日期:2005-05-20

作者简介:哈恩华(1974-),男,硕士,工程师,研究方向为聚合物纳米复合材料,联系地址:北京市81信箱9分箱(100095)。