

# 考虑筋/板焊趾影响的加筋板极限强度分析

李政杰<sup>1,2,4</sup>, 崔虎威<sup>5</sup>, 汪高飞<sup>2,3,4</sup>, 孔伟振<sup>2,3,4</sup>, 冯国庆<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学, 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 中国船舶科学研究中心, 江苏无锡 214082;  
3. 深海技术科学太湖实验室, 江苏无锡 214082; 4. 船舶结构安全全国重点  
实验室, 江苏无锡 214082; 5. 重庆交通大学, 重庆 400074)

**摘要:** 为了准确预报真实加筋板结构的极限强度, 从而为船体加筋板结构极限强度评估提供支撑, 本文利用非线性有限元法, 采用实体-壳板组合模型对筋/板焊趾进行模拟, 初步对比分析了焊趾对加筋板结构极限承载能力的影响, 并以扁钢加筋板模型为对象开展了焊接过程模拟, 分析了焊接缺陷对加筋板结构极限强度的影响, 可为考虑工艺影响的加筋板结构极限强度预报提供手段。计算结果表明, 焊趾主要影响局部位置的应力分布, 对整体极限状态下的应力分布影响较小; 由于焊趾的尺寸较小, 难以改变加筋板的整体失效模式, 对加筋板的极限承载特性影响有限; 焊趾对加筋板的平均应力-平均应变曲线变化不大, 对后屈曲状态稍有影响; 焊接缺陷使得扁钢加筋板模型极限强度下降 7.64%。

**关键词:** 焊趾; 加筋板; 极限强度; 非线性有限元法; 焊接初始缺陷

**中图分类号:** U661.4 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-7649(2025)18-0018-08 **doi:** 10.3404/j.issn.1672-7649.2025.18.004

## Ultimate strength analysis of stiffened plates considering the influence of the weld toe

LI Zhengjie<sup>1,2,4</sup>, CUI Huwei<sup>5</sup>, WANG Gaofei<sup>2,3,4</sup>, KONG Weizhen<sup>2,3,4</sup>, FENG Guoqing<sup>1</sup>

(1. Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China;  
3. Taihu Lake Laboratory of Deep Sea Technology and Science, Wuxi 214082, China; 4. National Key Laboratory of  
Ship Structural Safety, Wuxi 214082, China; 5. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** In order to accurately predict the ultimate strength of the real stiffened plate structure, it provides support for the ultimate strength evaluation of the hull stiffened plate structure. Nonlinear finite element method was used to simulate the welded toe of reinforcement/plate with a solid shell and plate combination model. The influence of the welded toe on the ultimate bearing capacity of the reinforced plate structure was preliminarily compared and analyzed. The welding process was simulated with the flat steel reinforced plate model as the object, and the influence of welding defects on the ultimate strength of the reinforced plate structure was analyzed. It can provide a method for predicting the ultimate strength of stiffened plate structure considering the influence of technology. The results show that the welding toe mainly affects the stress distribution in the local position, but has little effect on the stress distribution in the whole limit state. Due to the small size of the weld toe, it is difficult to change the overall failure mode of the stiffened plate, which has a limited impact on the ultimate load-carrying characteristics of the stiffened plate. The average stress-average strain curve of the welded toe on the stiffened plate has little change, and has a little influence on the post-buckling state. The welding defect reduces the ultimate strength of the flat steel stiffened plate model by 7.64%.

**Key words:** weld toe; stiffened plate; ultimate strength; nonlinear finite element method; weld initial defect

## 0 引言

由加筋板结构作为船体结构中的一个基本单元, 其极限强度决定了整体结构的承载能力。通常, 加强筋

和带板通过焊接组成加筋板结构, 焊接过程中在高温热源的作用下, 焊条和接缝处的金属熔化连接冷却形成焊缝。在焊缝与母材的交界处, 其外表面肉眼可见的交界线即为焊趾。由于焊缝成型是个复杂的凝固过

程, 其焊趾微观特征较为复杂<sup>[1-2]</sup>, 并且焊接过后焊缝表面的焊趾形貌也各式各样, 与焊接者的水平相关。因此, 有必要开展焊趾形貌对加筋板极限强度的影响研究, 从而为船体加筋板结构的强度评估提供支撑。

储玉玲等<sup>[3]</sup>采用 Abaqus 有限元仿真模拟软件, 建立了含凹坑缺陷管道环焊缝非线性有限元分析模型, 对不同载荷作用下的含凹坑缺陷管道环焊缝进行应力分析, 探讨了凹坑尺寸、焊缝余高以及热影响区材料属性等因素对应力分布的影响规律。韩云<sup>[4]</sup>设计 3 种不同的焊趾工艺优化方案, 利用有限元分析模拟了 3 种方案对 X70 管线钢对接接头周向和轴向残余应力的影响, 并采用盲孔法对仿真结果进行验证, 结果表明凹形过渡设计能有效降低残余应力, 提高压力管道的安全性和耐用性。侯国清等<sup>[5]</sup>以 Q345 钢作为试验材料, 研究了 CO<sub>2</sub> 焊的焊接电流和焊接速度对角焊缝焊趾及焊缝中心处残余应力的影响。凌立鹏等<sup>[6]</sup>针对正交异性钢桥面板顶板-U 肋焊接接头突出的疲劳问题展开了相关研究。在研究焊接对结构承载能力过程中, 非线性有限元软件以其强大的数据处理能力而得到广泛应用<sup>[7]</sup>。Peri 等<sup>[8, 9]</sup>、Peric 等<sup>[10]</sup>将焊接三维模型简化为实体-壳单元组合模型, 研究了加筋板全实体模型与实体-壳单元组合模型计算时间及残余应力应变分布情况。结果表明, 实体-壳单元组合模型缩短了计算时间。通过比较计算结果与实验结果, 验证了所提出的实体-壳单元组合模型的准确性。Paik 等<sup>[11]</sup>在轴向循环压缩载荷下, 考虑了焊接初始缺陷, 测试了一块实船全尺寸船体加筋板的极限承载性能。可知, 焊接变形与残余应力会降低船体结构的极限承载性能, 影响船体梁极限承载性能评估的准确性。2022 年 ISSC 会议报告<sup>[12]</sup>指出焊接变形与残余应力应该予以重视, 数值模拟方法获取焊接变形与残余应力较为直接。

本文利用非线性有限元法, 采用实体-壳板组合模型对筋/板焊趾进行模拟, 初步对比分析了焊趾对加筋板结构极限承载能力的影响, 并以模型开展了焊接过程模拟, 分析了焊接缺陷对加筋板结构极限承载能力的影响, 为考虑工艺影响的加筋板极限强度的预报提供手段, 从而可为考虑焊接工艺的加筋板结构极限强度评估提供支撑。

### 1 规范中筋/板焊趾形貌描述

加强筋与带板焊接, 母材和焊条融化冷却后形成焊缝, 其焊缝称为角接焊缝, 角焊缝典型焊趾形貌如图 1 所示。

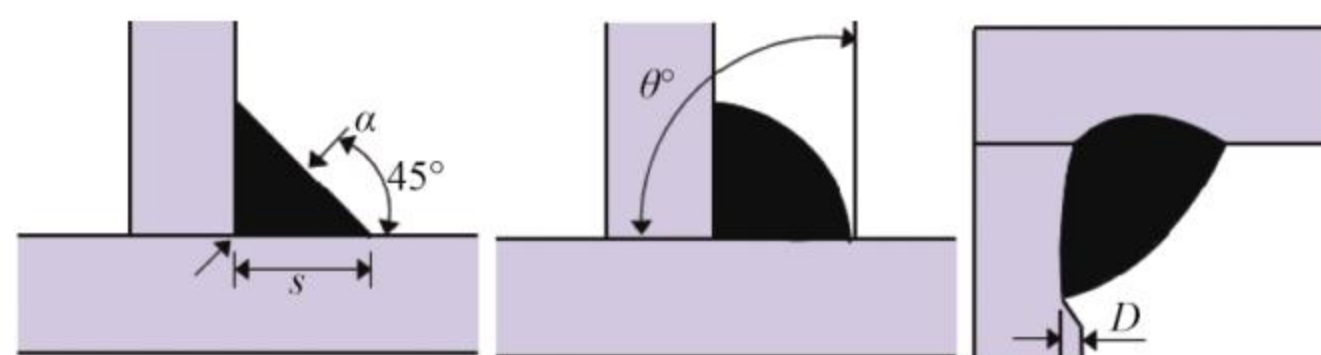


图 1 角焊缝典型焊趾形貌

Fig. 1 Typical toe morphology of fillet weld

在船体结构中, 角接焊缝通常为双面焊接, CCS 《钢质海船入级规范》<sup>[13]</sup>中, 对其角焊缝型式和使用部位进行了详细规定, 如表 1 所示。

表 1 角焊缝型式  
Tab. 1 Type of fillet weld

序号	角接焊缝名称	型式	备注
1	双面填角焊		用于一般结构, K为焊脚高度 h为焊喉厚度 t <sub>1</sub> 、t <sub>2</sub> 为焊件厚度
2	双面全熔透焊		用于高拉应力区域或认为危险的区域, alpha为坡口角度
3	双面对称坡口部分熔透焊		用于较高拉应力区域或认为危险的区域, t为焊件厚度 f为钝边宽度 alpha为坡口角度
4	双面非对称坡口部分熔透焊		用于较高拉应力区域或认为危险的区域, t为焊件厚度 f为钝边宽度 alpha为坡口角度

CCS 规范对船体结构角焊缝的尺寸进行了规定, 应符合如下要求。

1) 角焊缝的焊喉厚度  $h$  计算式为:

$$h = w_{\tau} t_p \frac{d}{l} \quad (1)$$

式中:  $t_p$  为角焊缝连接构件中较薄一块板的厚度, mm;  $d$  为焊缝节距, mm, 指间断角焊缝中, 前一条焊缝的起始处至后一条焊缝起始处的长度, 若角焊缝为连续焊缝时,  $d=1$ ;  $l$  为焊缝长度, mm, 指焊缝的连续长度, 但应不小于 75 mm;  $w_{\tau}$  为焊接系数, 船体结构的焊接系数。

2) 填角焊缝的焊脚高度  $K$  应不小于式 (2) 计算值:

$$K = \sqrt{2}h \quad (2)$$

全熔透焊接时, 无钝边要求; 部分熔透焊接时, 钝边宽度  $f$  在 3 mm 和  $t/3$  之间。应确保焊道渗透至坡口根部的坡口角度,  $\alpha$  通常在  $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$  之间, 全熔透、部分熔透的焊道应覆盖坡口根部。

“T”型角接中的竖板（如扶强材、纵骨等的腹板）厚度大于 15 mm，且大于平列板（如舱壁板、外板或甲板）的厚度时，其角接焊缝应为双面连续焊，且焊喉厚度  $h$  应不小于上式规定，且不小于式 (3) 计算结果。

$$h = 0.5Ct_v, h = 0.21t_h \quad (3)$$

式中： $t_v$ 为竖列板厚度，mm； $t_h$ 为平列板厚度，mm； $C$ 为系数，干货舱取 0.21，液舱取 0.27。

所有角焊缝的焊喉厚度，焊喉厚度的极限值应符合表 2 的规定，焊喉厚度的最小值应符合表 3 的规定。

表 2 焊喉厚度的极限值

Tab. 2 Limit value of welding throat thickness

焊缝型式	焊喉厚度的极限值/mm	
	最小值	最大值
双面连续角焊缝	$0.21t_p$	$0.44t_p$
间断角焊缝	$0.27t_p$	$0.44t_p$

当实际板厚  $t'_p$  超过 25 mm 时，表中  $t_p = 0.5(t'_p + 25)$

表 3 焊喉厚度的最小值

Tab. 3 Minimum value of welding throat thickness

板厚 $t_p$	焊喉厚度的最小值/mm	
	$\leq 7.5$	$> 7.5$
手工焊或自动焊	3	3.25
自动深熔焊	3	3

由此可知，CCS 规范为了确保实际结构满足强度要求，对角焊缝的焊趾形貌进行了比较详细的规定，以避免因焊接工艺水平差异导致结构的强度不足。因此，有必要考虑焊趾对加筋板极限承载能力的影响，为实际船体结构安全性评估提供支撑。

## 2 加筋板极限强度数值计算模型

### 2.1 加筋板有限元模型尺寸参数

选取扁钢、角钢和 T 型材这 3 种加强筋截面型式，每种型式选取 2 种尺寸，带板选取为 3 种尺寸，组合开展加筋板极限强度分析。加强筋截面型式如图 2 所示。其中， $b$  为带板宽度； $t_p$  为带板厚度； $h_w$  为腹板高度； $t_w$  为腹板厚度； $b_f$  与  $t_f$  分别代表面板宽度与厚度。加强筋与带板尺寸见表 4 和表 5。

计算模型带板尺寸为  $a \times 2b$ ，采用 AH32 理想弹塑性材料，其具体参数如表 6 所示。

### 2.2 边界条件设置

模型承受单轴压缩，加载边由横向框架支撑，采用简直边界条件。考虑纵向骨材的连续性，纵向非加

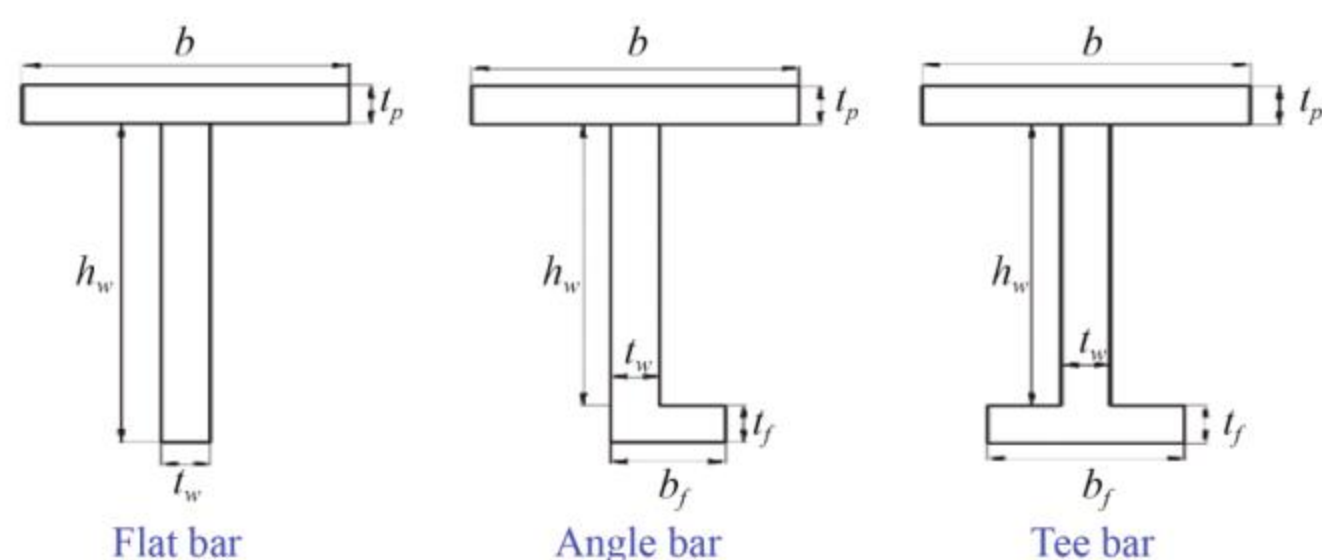


图 2 加强筋截面形式

Fig. 2 Section form of stiffener

表 4 加强筋尺寸

Tab. 4 Dimension of stiffener

尺寸	F扁钢( $h_w \times t_w$ )/mm	A角钢( $h_w \times b_f \times t_w / t_f$ )/mm	T型材( $h_w \times b_f \times t_w / t_f$ )/mm
$S_1$	150×17	138×90×9/12	138×90×9/12
$S_2$	250×25	235×90×10/15	235×90×10/15

表 5 带板尺寸

Tab. 5 Dimension of plate

尺寸	长×宽( $a \times 2b$ )/mm	厚度 $t_p$ /mm
$T_1$	2550×1700	9.5
$T_2$	2550×1700	13
$T_3$	2550×1700	16

表 6 材料模型

Tab. 6 Material model

参数	弹性模量 $E$ /MPa	泊松比 $\nu$	屈服强度 $\sigma_Y$ /MPa
数值	205800	0.3	313.6

载边采用对称边界条件。纵向非加载边中点约束  $z$  方向位移，加载端中点约束  $x$  方向位移，防止发生刚体位移。具体边界条件如图 3 所示，详细的边界条件如下：

1) 加载边，耦合  $z$  方向的位移，即  $U_z = \text{Coupled}$ ；板上约束  $y$  方向位移， $U_y = 0$ 。加强筋约束  $x$  方向位移， $U_x = 0$ ；加载边板上中心节点约束  $x$  方向位移， $U_x = 0$ 。

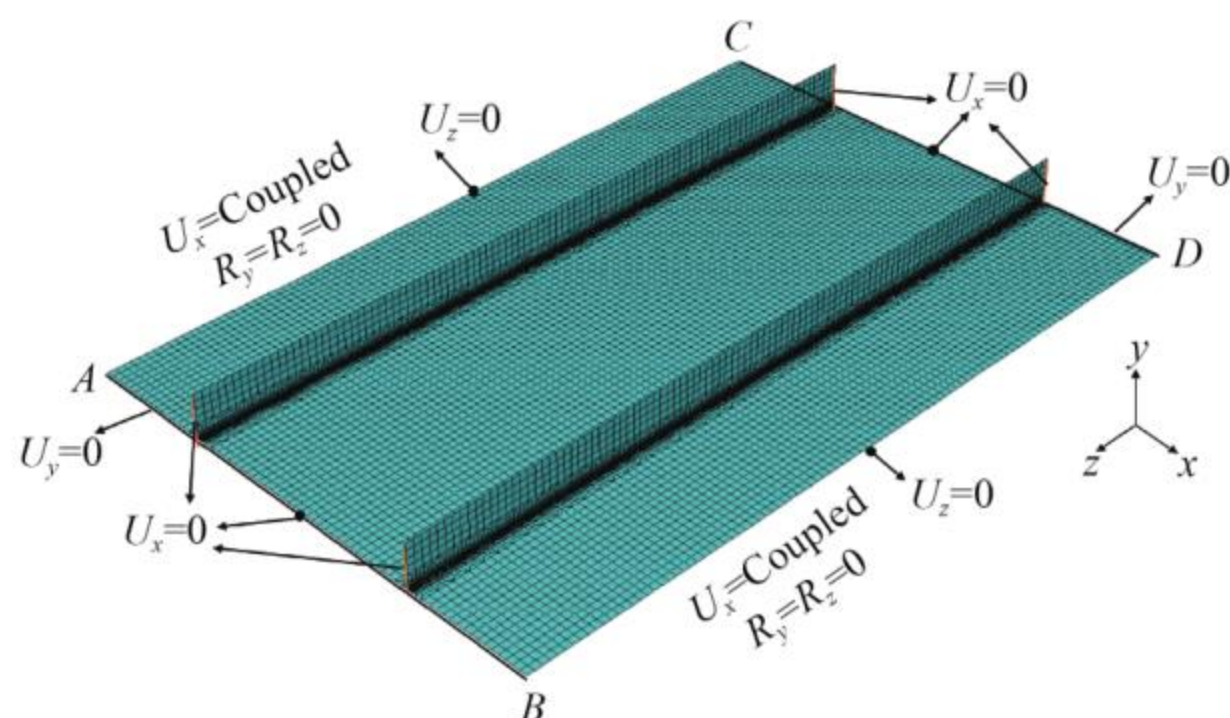


图 3 边界条件设置

Fig. 3 Boundary condition

2) 非加载边, 耦合  $x$  方向的位移, 即  $U_x=Coupled$ ; 约束  $y$ 、 $z$  方向转动,  $R_y=R_z=0$ ; 非加载边中点约束  $z$  方向位移,  $U_z=0$ 。

3) 两端加载施加位移载荷。

### 2.3 数值仿真中焊趾的模拟

假定筋/板焊趾为等边三角形, 在有限元模型中采用实体单元来模拟, 焊趾部位网格加密处理, 带焊趾加筋板模型如图 4 所示。

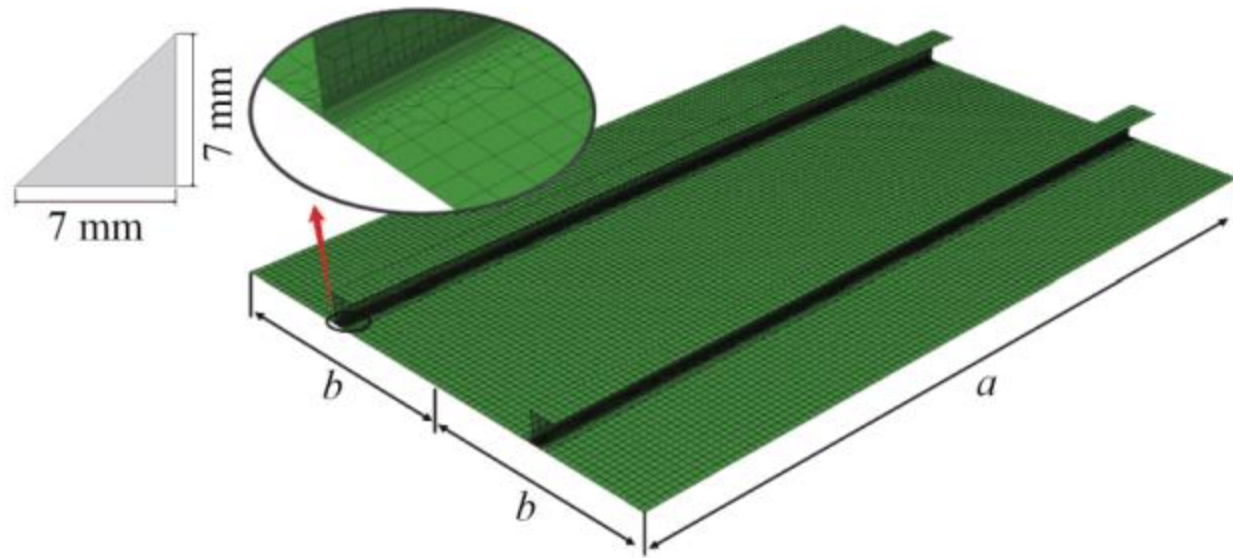


图 4 带焊趾加筋板模型

Fig. 4 Stiffened plate model with welded toes

## 3 加筋板结构非线性有限元计算结果分析

### 3.1 极限状态 Mises 应力分布

图 5 ~ 图 7 分别为 9.5 mm 带板厚度下扁钢、角钢和 T 型材加筋板极限状态的 Mises 应力分布云图。对比有无焊趾模型计算结果可知, 焊趾主要影响局部位置的应力分布, 对整体极限状态下的应力分布影响较小; 由于焊趾的尺寸较小, 难以改变加筋板的整体失效模式, 对加筋板的极限承载特性影响有限, 加筋板均由局部屈曲失效导致整体形成塑性铰屈曲失效。

### 3.2 加筋板端部平均应力-平均应变关系分析

将加载截面的支反力除以横截面面积得到模型的平均应力, 并且模型的纵向位移除以模型纵向长度得

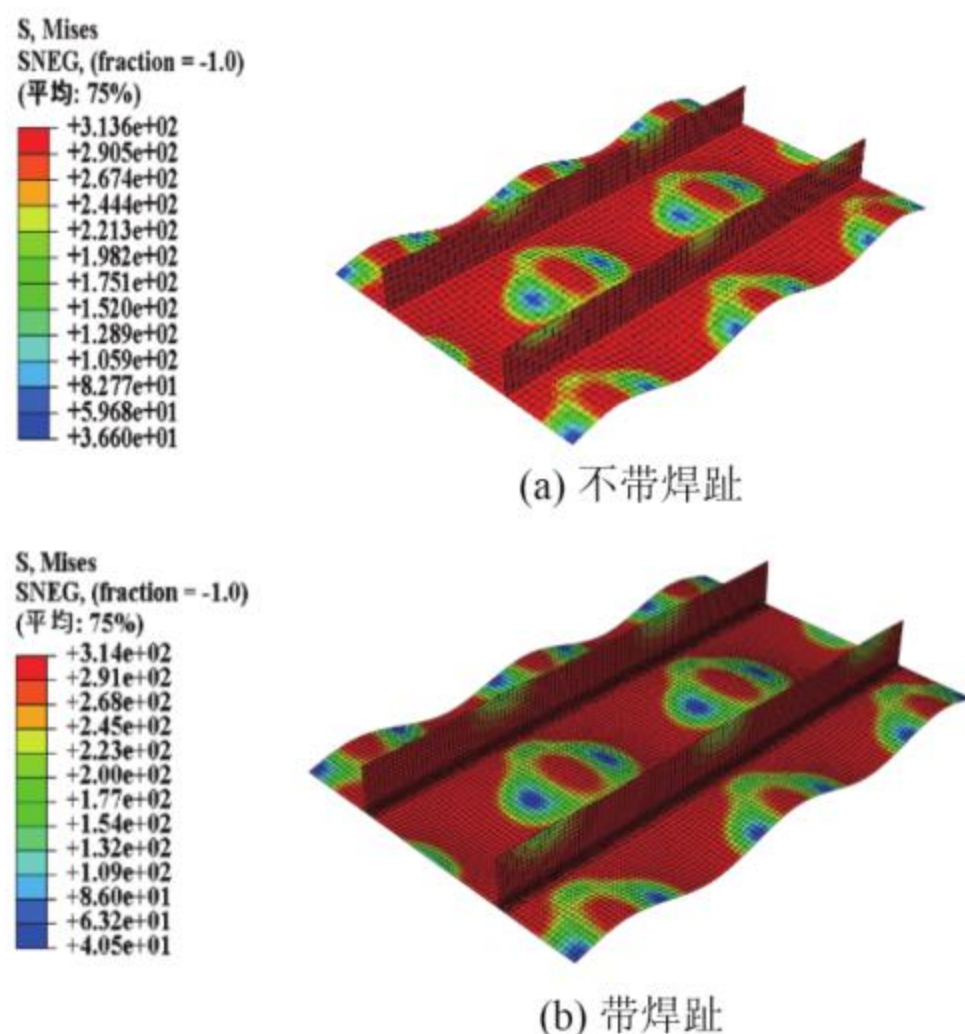


图 5 极限状态扁钢加筋板 F-T1S2Mises 应力分布

Fig. 5 Mises stress distribution of ultimate state flat stiffened plates

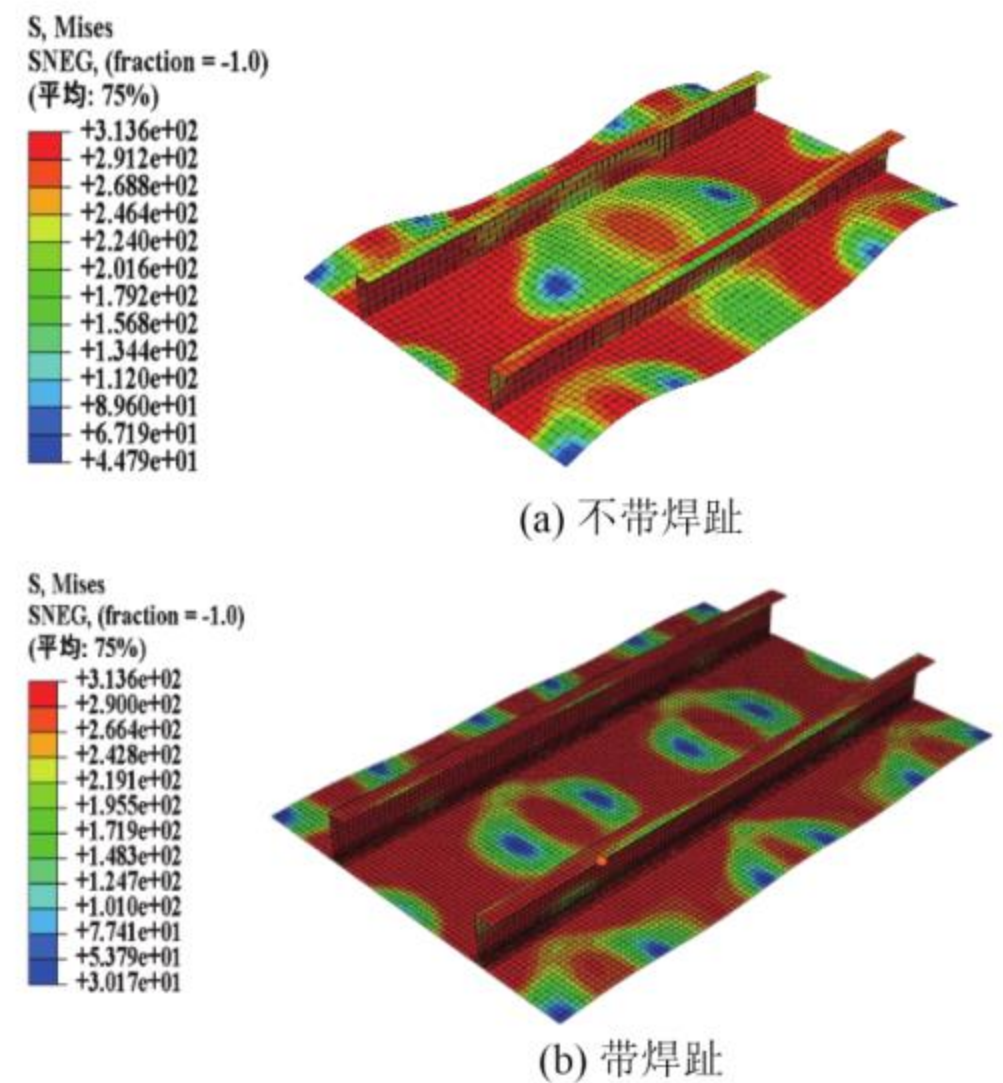


图 6 极限状态角钢加筋板 A-T1S2Mises 应力分布  
Fig. 6 Mises stress distribution of ultimate state angle stiffened plates

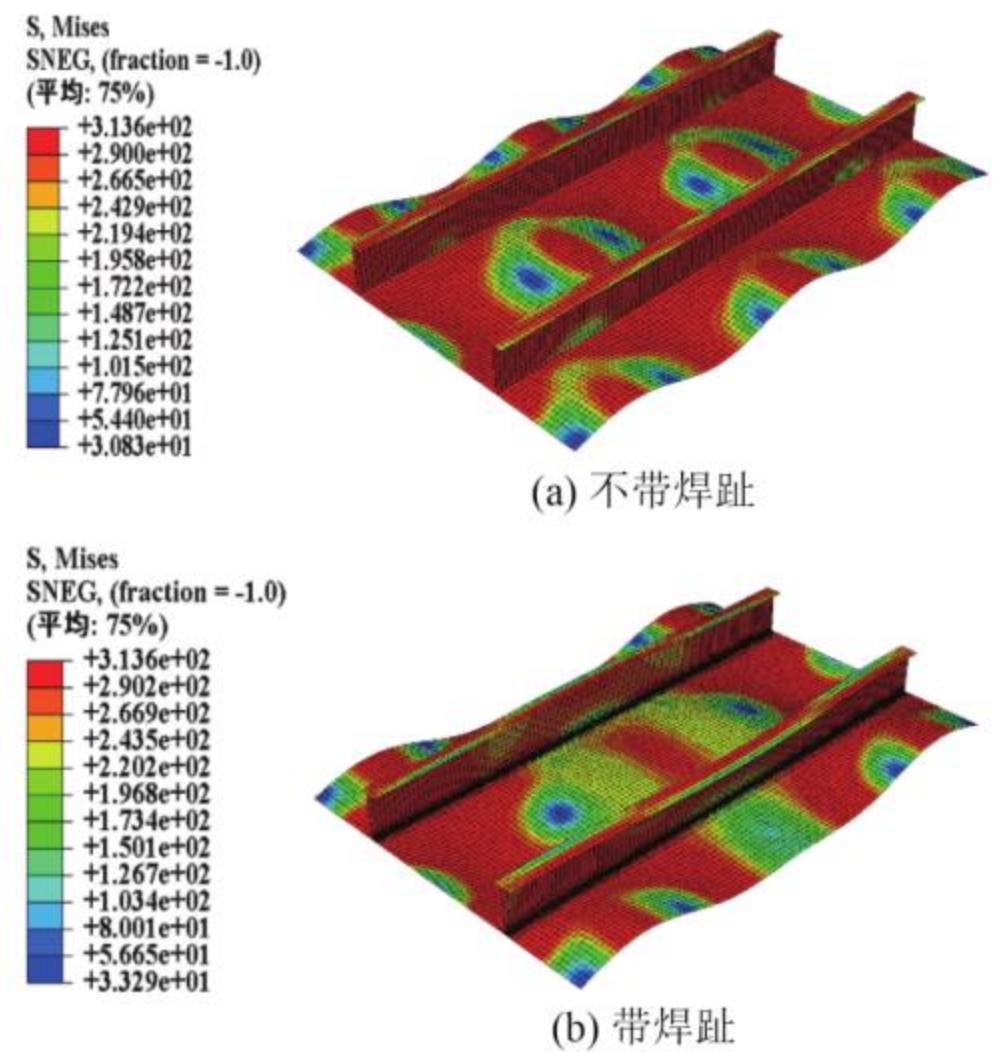


图 7 极限状态 T 型材加筋板 T-T1S2Mises 应力分布

Fig. 7 Mises stress distribution of ultimate state T-stiffened plates

到模型的平均应变, 将平均应力和平均应变针对材料屈服强度进行无量纲化, 从而可绘制加筋板端部的平均应力-平均应变关系。

图 8 ~ 图 10 分别为扁钢、角钢和 T 型材加筋板有无焊趾时的平均应力-平均应变曲线, 0 为无焊趾, 1 为有焊趾。可知, 不同带板厚度, 其平均应力-应变曲线差异较大, 这与其失效模式息息相关; 带板越薄加筋板柔度越大, 越早屈曲失效, 非线性大变形更加明显, 带板越厚加筋板刚度越大变形越小, 主要与塑性屈曲为主。有无焊趾, 平均应力-平均应变曲线变化不大, 对后屈曲状态稍有影响。

### 3.3 带板板厚对加筋板结构极限强度的影响分析

取加筋板端部的平均应力-平均应变曲线的峰值即为加筋板的极限承载能力, 各加筋板极限承载能力值

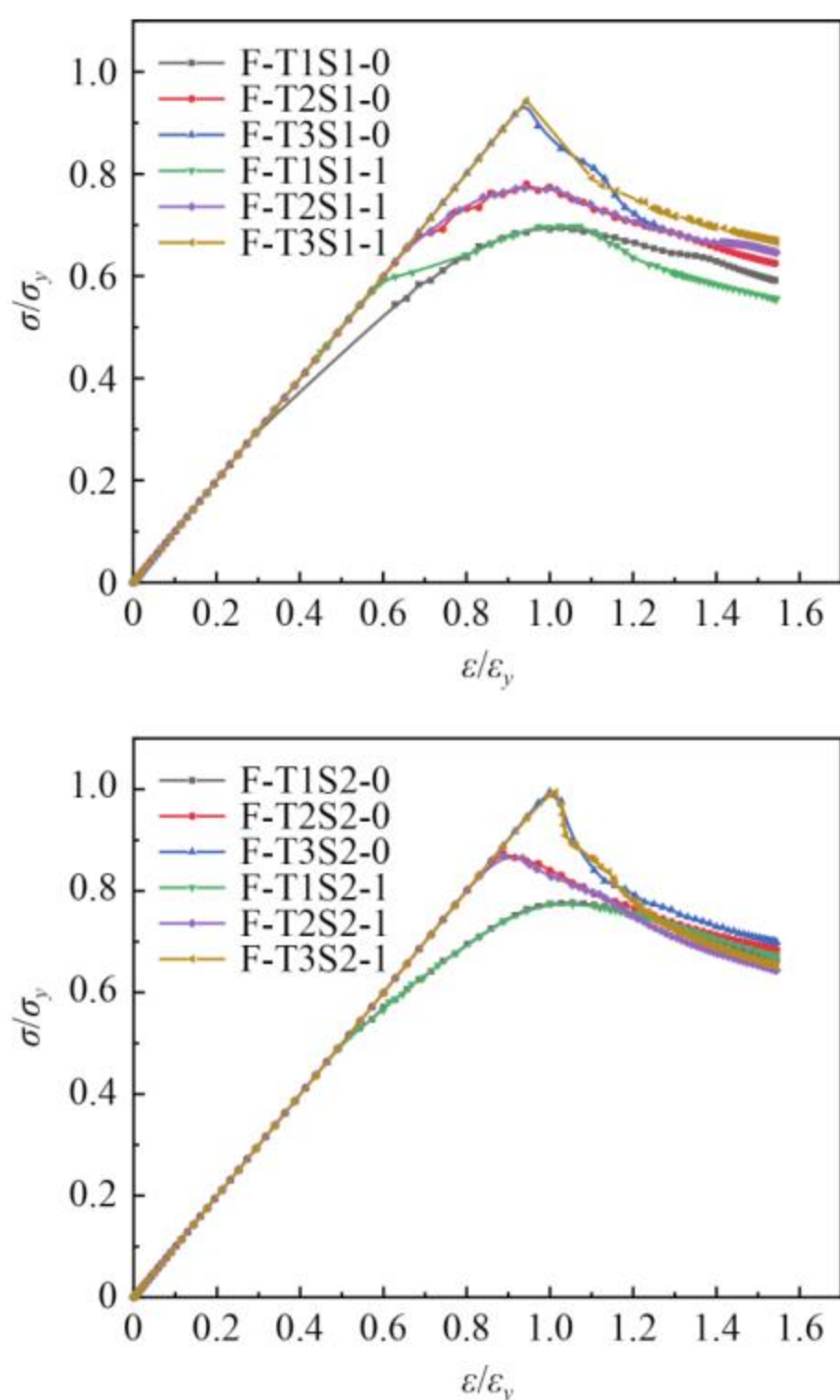


图 8 扁钢加筋板平均应力-平均应变关系

Fig. 8 The average stress-strain relationship of flat stiffened plates

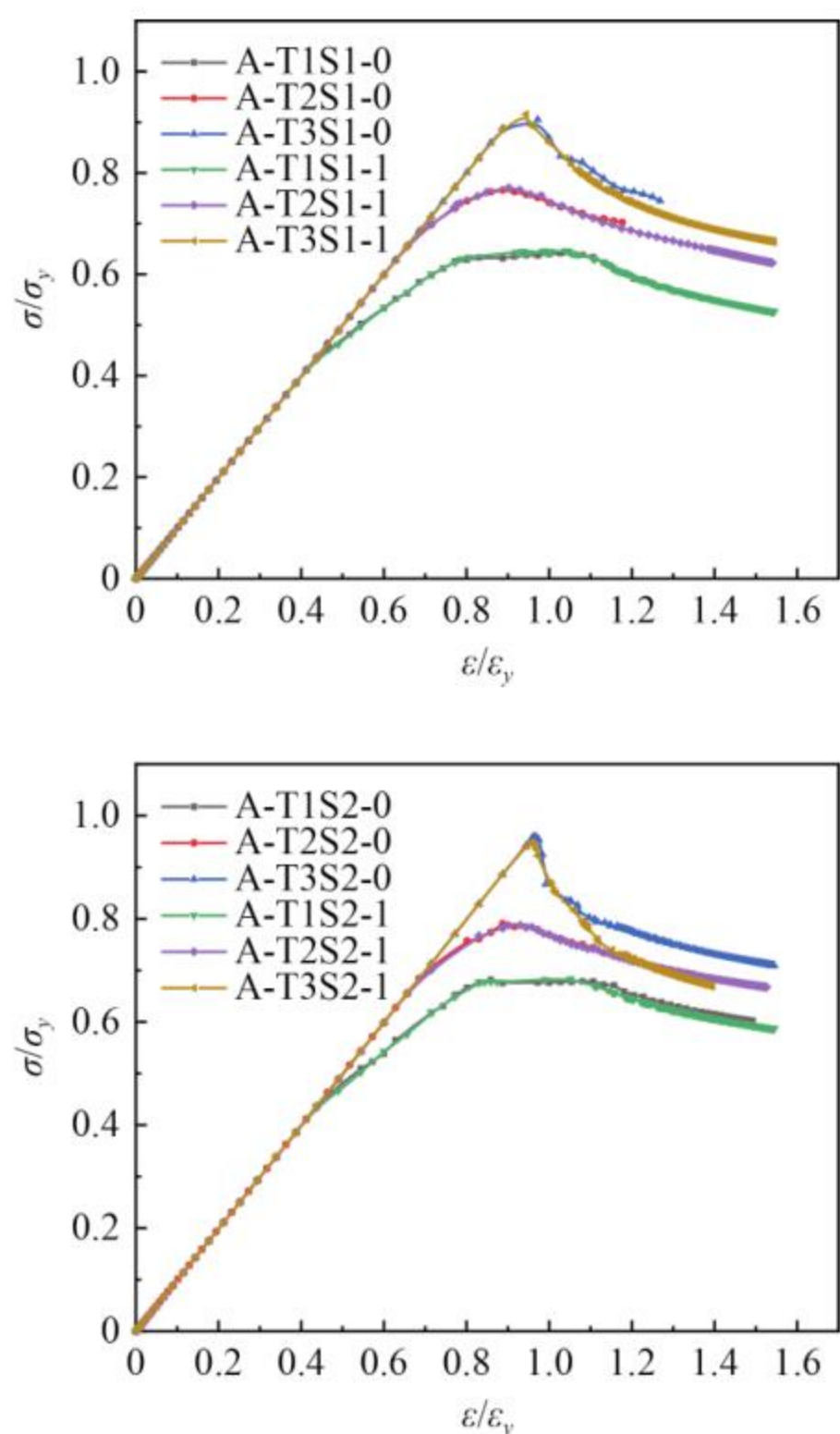


图 9 角钢加筋板平均应力-平均应变关系

Fig. 9 The average stress-strain relationship of angle stiffened plates

如表 7 所示。图 11 为扁钢、角钢、T 型材加筋板不同板厚模型有无焊趾时的对比情况。由结果可知，随带板厚度增加，加筋板极限强度增加；焊趾对加筋板的极限强度影响效果不明显，计算结果之间存在偏差可能是计算误差所致。

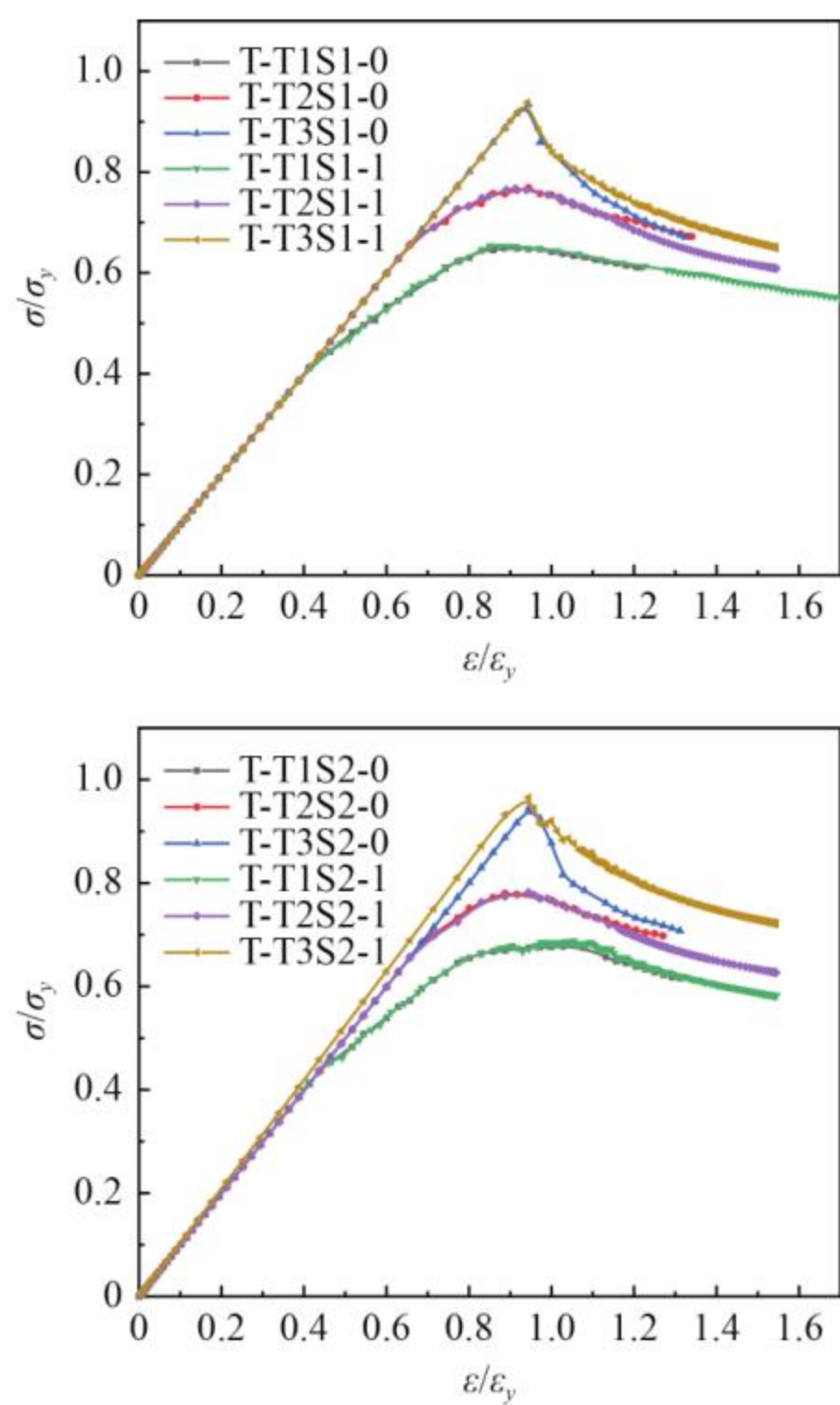


图 10 T 型加筋板平均应力-平均应变关系

Fig. 10 The average stress-strain relationship of T-stiffened plates

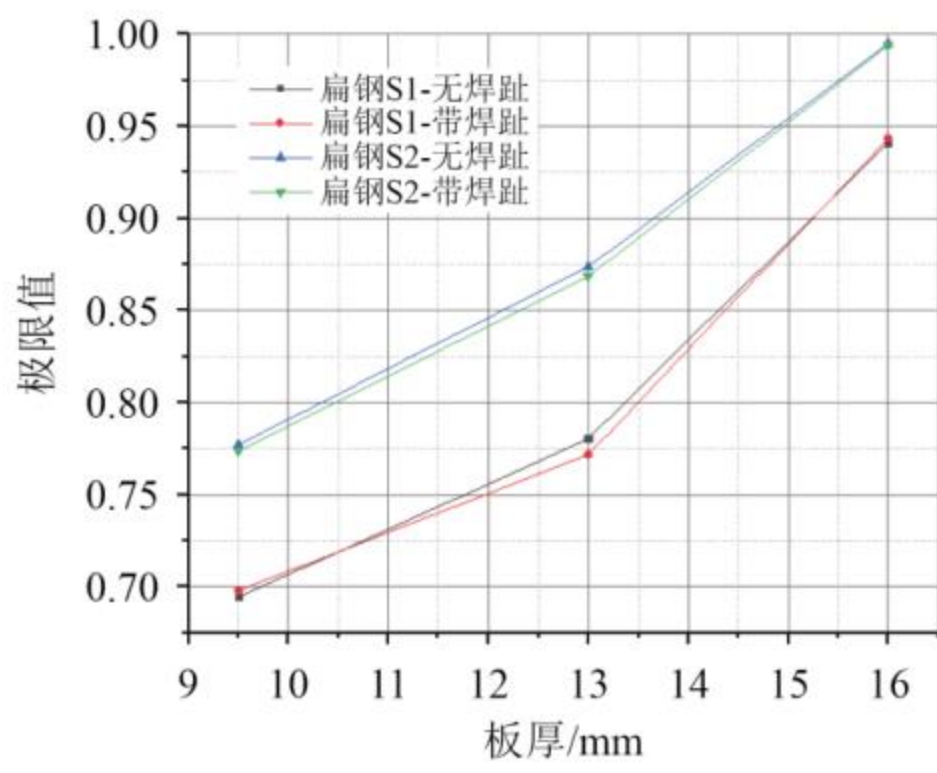
表 7 不同板厚加筋板极限强度

Tab. 7 Ultimate strength of stiffened plates with different thicknesses

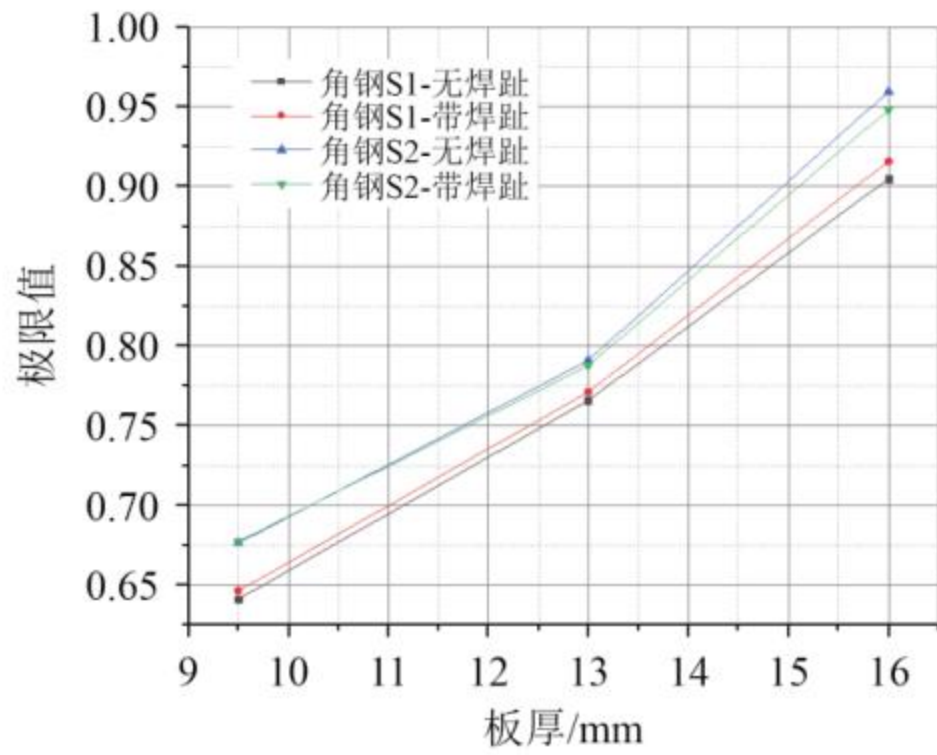
扁钢加筋板	F-S1-0	F-S1-1	F-S2-0	F-S2-1
T1	0.69441	0.69793	0.77704	0.77372
T2	0.7804	0.7718	0.8738	0.86866
T3	0.94127	0.94345	0.99486	0.99396
角钢加筋板	A-S1-0	A-S1-1	A-S2-0	A-S2-1
T1	0.64141	0.64657	0.67654	0.67748
T2	0.7659	0.77108	0.79094	0.78782
T3	0.90476	0.91564	0.95936	0.94804
T 型材加筋板	T-S1-0	T-S1-1	T-S2-0	T-S2-1
T1	0.64872	0.65371	0.67736	0.67886
T2	0.76921	0.76776	0.77991	0.78214
T3	0.9341	0.93816	0.93436	0.96567

#### 4 考虑焊接缺陷的加筋板结构极限承载能力分析

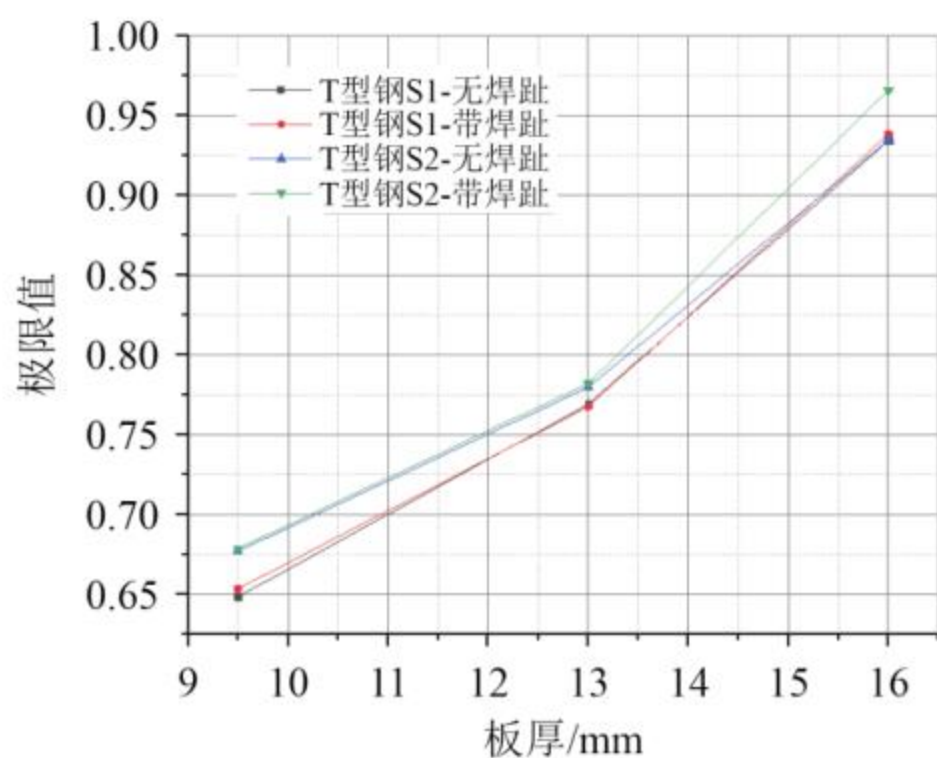
以扁钢 (150 mm×17 mm) 加筋板有限元模型为对象，开展焊接过程及极限承载能力计算，分析其考虑焊接缺陷对极限承载能力的影响。假定焊接采用 CO<sub>2</sub> 气体电弧焊，焊接电流为 I=270 A，焊接电压为 U=29 V，焊接速度为 v=8 mm/s，4 道焊缝进行同步进行，焊接路径如图 12 所示。



(a) 扁钢加筋板



(b) 角钢加筋板



(c) T型材加筋板

图 11 不同带板厚度加筋板极限强度对比

Fig. 11 Comparison of ultimate strength of stiffened plates with different thicknesses

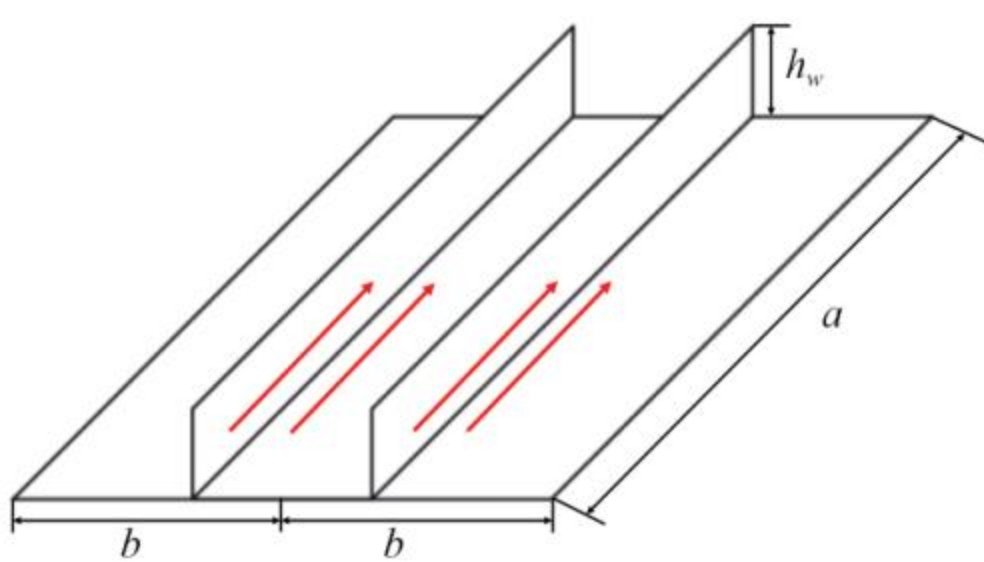


图 12 扁钢加筋板焊接路径

Fig. 12 Welding path of flat steel stiffened plate

#### 4.1 焊接过程数值仿真模型

焊接过程先进行焊接温度场分析, 再进行应力场分析。约束模型 3 个角的节点, 防止整体模型发生刚体位移。焊接数值模拟过程中, 选用双椭球形热源模型。双椭球形热源模型如图 13 所示。

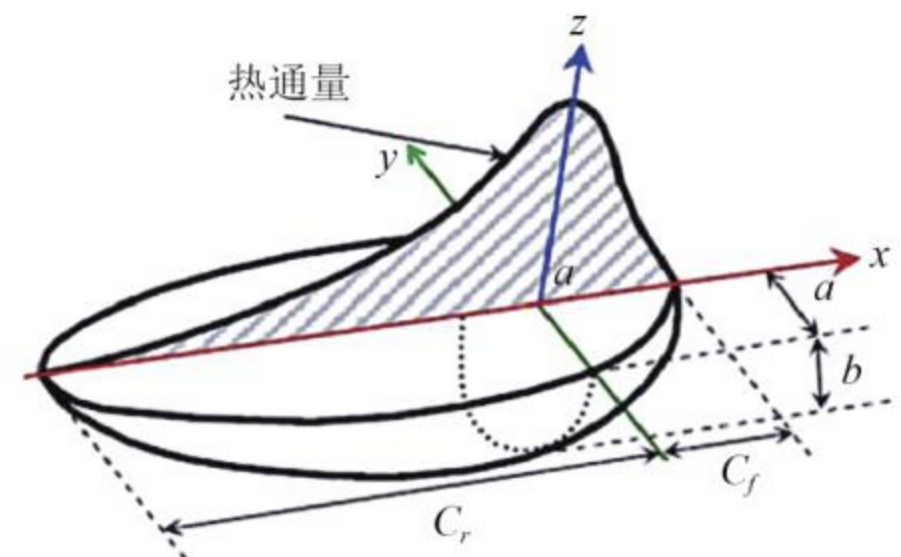


图 13 双椭球热源模型

Fig. 13 Double ellipsoid heat source model

前半段椭球热源方程:

$$q_1(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_1\eta UI}{C_f ab\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{C_f^2} - \frac{3y^2}{a^2} - \frac{3z^2}{b^2}\right) \quad (4)$$

后半椭球热源方程:

$$q_2(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_2\eta UI}{C_r ab\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{C_r^2} - \frac{3y^2}{a^2} - \frac{3z^2}{b^2}\right) \quad (5)$$

式中:  $q_1(x, y, z)$  为前半椭球的热流;  $q_2(x, y, z)$  为后半椭球的热流;  $C_f$  为前半椭球半轴长, mm;  $C_r$  为后半椭球半长轴, mm;  $a$  为垂直于焊缝表面的半长轴, mm;  $b$  为焊缝深度的半长轴, mm;  $f_1$  为前半部分的热量分配系数;  $f_2$  为后半部分的热量分配系数;  $\eta$  为热输入效率;  $U$  为焊接电压, V;  $I$  为焊接电流, A;  $v$  为焊接速度, mm/s。其中,  $f_1$  与  $f_2$  满足  $f_1 + f_2 = 2$ 。热源随时间沿焊接路线在模型上移动, 在 Abaqus 软件中通过用户子程序来实现。

考虑材料力学特征参数随温度的变化, 其钢材料的特征曲线如图 14 所示。

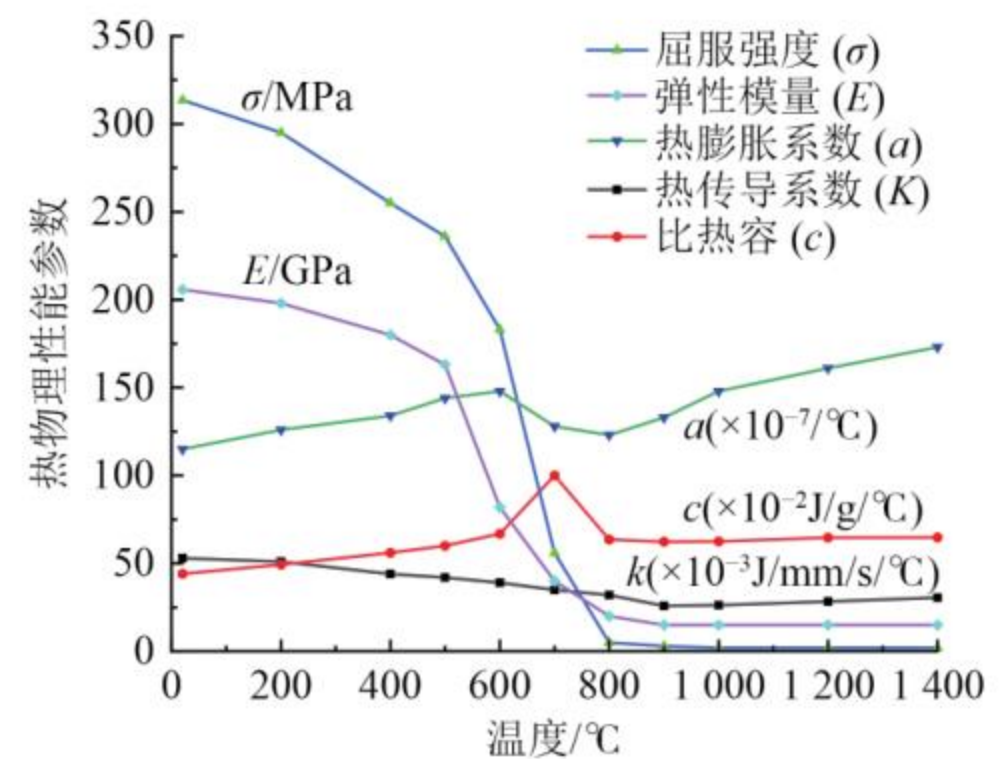


图 14 AH32 材料特征曲线<sup>[14]</sup>

Fig. 14 AH32 Material characteristic curve<sup>[14]</sup>

#### 4.2 船体加筋板焊接温度场

图 15 为带板厚为 9.5 mm 的加筋板焊接加热时间为 60 s 时刻的温度场分布云图, 图中灰色椭球部分为温度超过焊趾材料熔点温度区域。加筋板焊接过程中温度最大值出现在焊缝位置处焊趾区域, 最高温度接近 2000 °C。加筋板焊缝与焊缝相连接的船体带板与腹

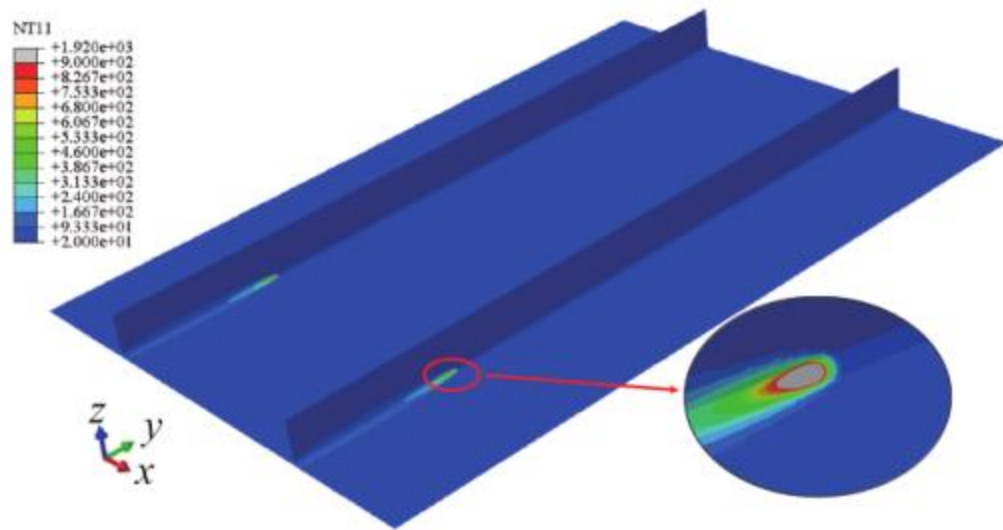


图 15 60 s 时刻加筋板模型温度场分布云图

Fig. 15 Temperature distribution of stiffened plate at 60 s

板的表面温度也均超过材料的熔点，表明加筋板焊缝金属已融化，验证焊接工艺的有效性。

### 4.3 加筋板结构焊接变形分布

图 16 为带板厚度为 9.5 mm 时的加筋板变形云图， $U_3$  为 Z 轴方向的变形，即沿着加筋板腹板的高度方向。船体加筋板变形整体上沿结构的中心线呈现对称分布，焊缝附近的变形值最大。图 17 中给出了  $Y=1275$  mm 截面不同带板厚度模型中带板所有节点的位移 ( $U_3$ ) 分布曲线，加筋板在焊缝位置处及附近区域变形达到峰值；加筋板带板厚度越小，加筋板焊接产生的变形越大，与薄板焊接更容易产生变形规律一致。

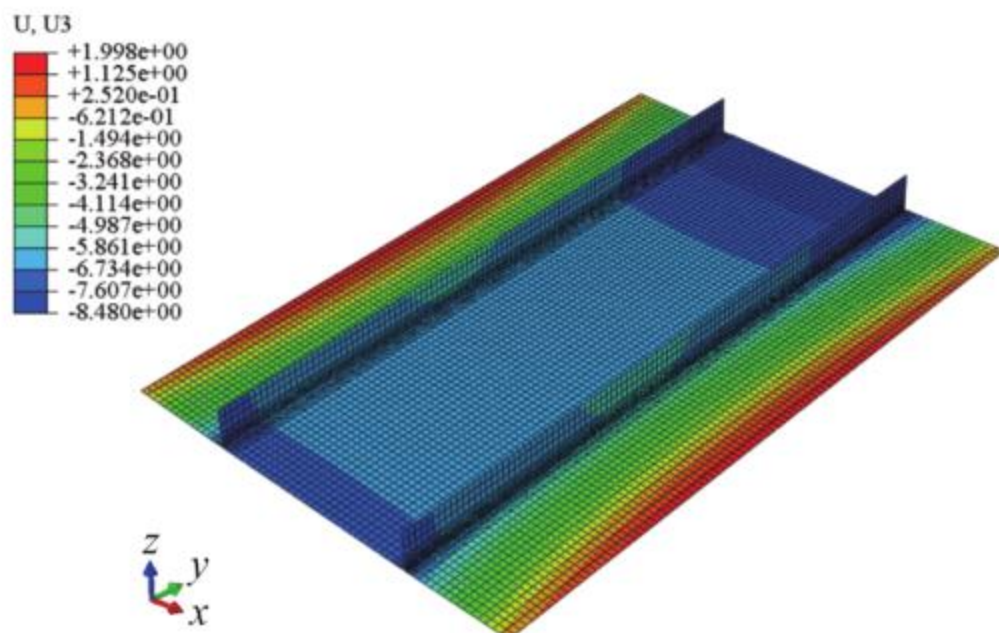


图 16 加筋板焊接变形云图

Fig. 16 Welding deformation of stiffened plate

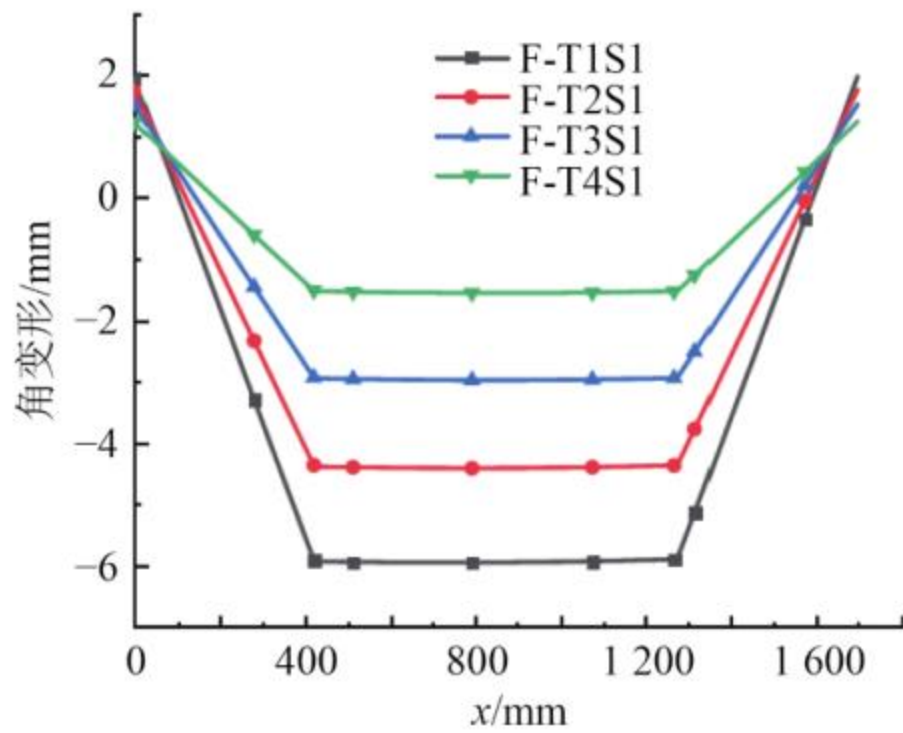


图 17  $Y=1275$  mm 截面节点位移分布

Fig. 17  $Y=1275$  mm node displacement distribution

### 4.4 船体加筋板焊接残余应力分布

图 18 为带板厚度为 9.5 mm 的扁钢加筋板焊接残余等效 Mises 应力分布云图。加筋板焊接冷却结束后，焊接残余应力主要集中在焊缝及其附近区域。扁钢加筋板的应力幅值为 311.4 MPa，接近 AH32 材料的屈服

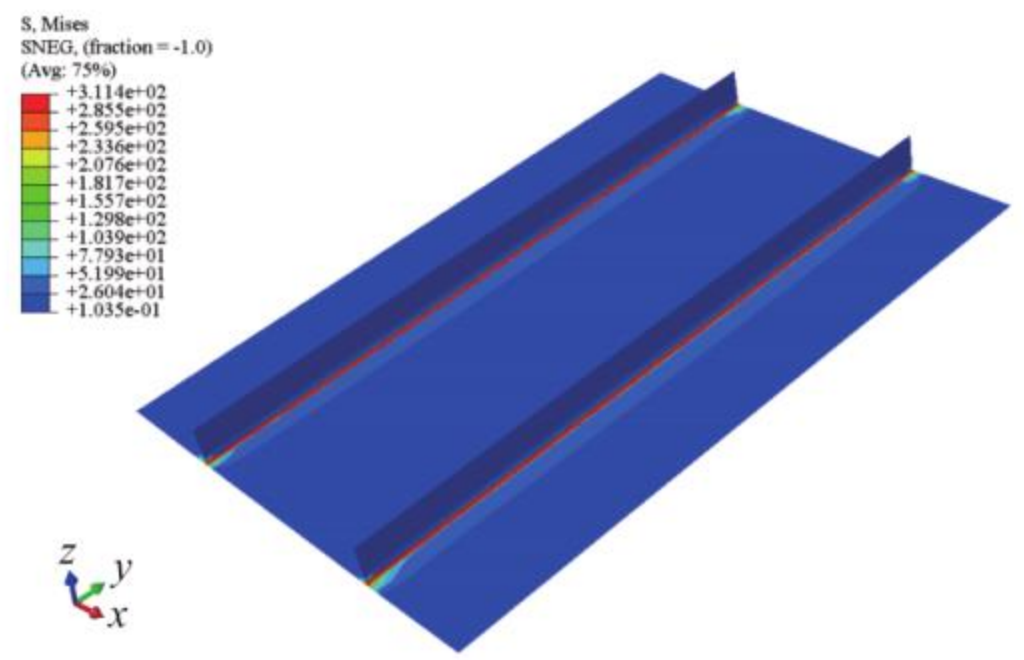


图 18 焊接残余等效 Mises 应力分布云图

Fig. 18 Welding residual equivalent stress distribution

强度为 313.6 MPa，焊缝区域焊接残余应力应力集中较为明显，远离焊缝区域处焊接残余应力小。

图 19 显示了板厚为 9.5 mm 的扁钢加筋板纵向残余应力分布云图，加筋板纵向残余拉应力主要分布在焊缝区域，纵向残余压应力主要分布在远离焊缝区域。为了更为直观的显示加筋板内部焊后残余应力分布情况，选取  $Y=1275$  mm 截面上所有节点，绘制出不同带板厚度下加筋板的纵向残余应力分布曲线，如图 20 所示。不同带板厚度加筋板的纵向残余应力特征曲线基本保持一致，均沿带板宽度方向中心截面呈对称分布，与 Paik<sup>[11]</sup> 假定的残余应力分布较为接近。

### 4.5 焊接缺陷对加筋板结构极限承载能力的影响分析

以焊接过程模拟得到的加筋板焊接变形和残余应力为初始缺陷状态，采用 2.2 节中的边界条件，开展轴向压缩极限承载能力分析，以分析焊接缺陷对加筋

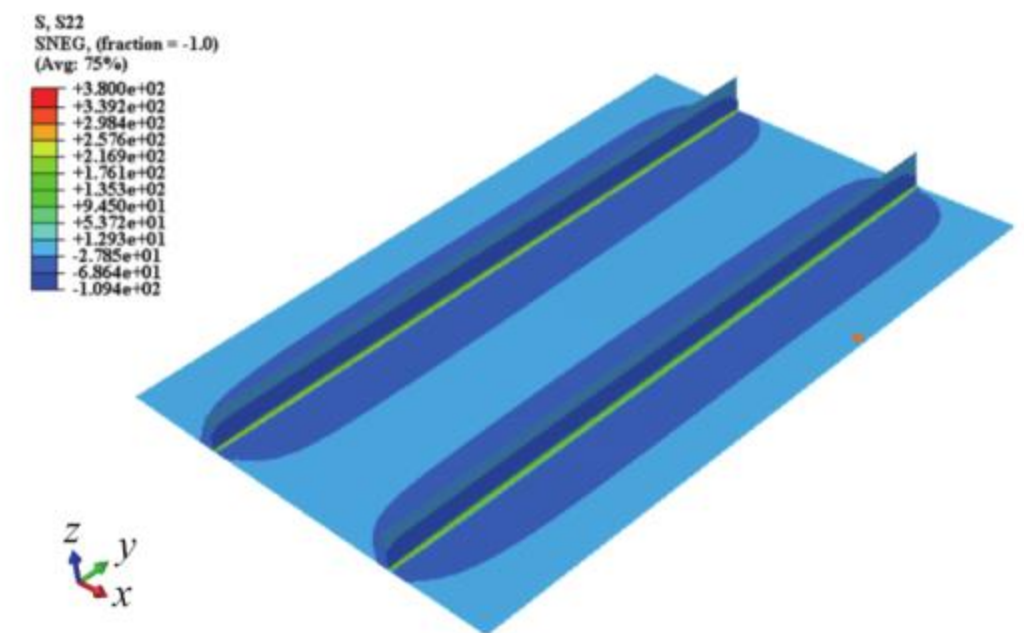


图 19 F-T1S1 纵向残余应力分布云图

Fig. 19 Longitudinal residual stress of F-T1S1

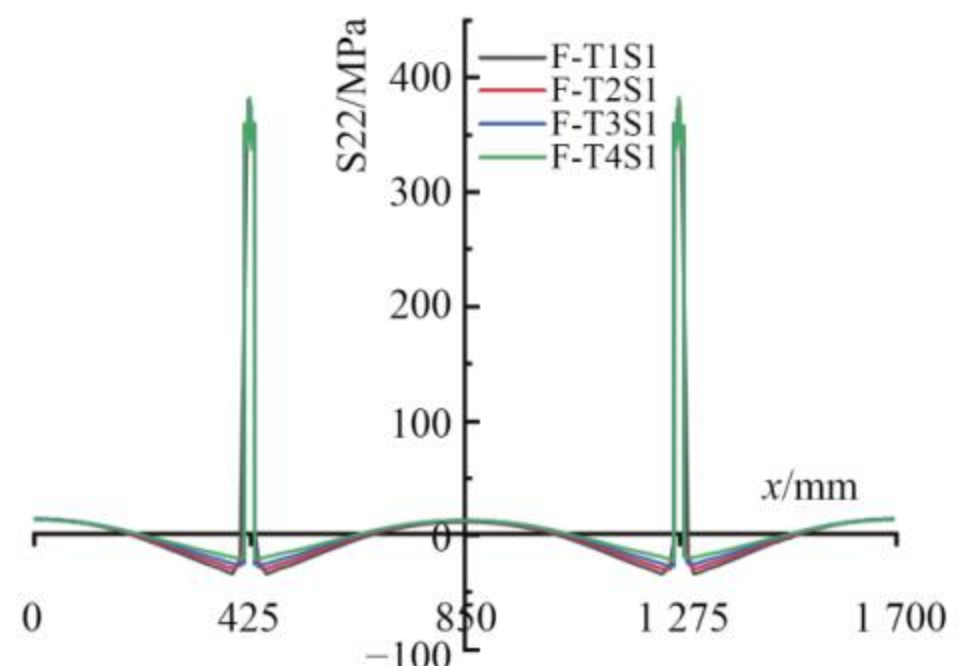


图 20 船体加筋板纵向残余应力

Fig. 20 Longitudinal residual stress of stiffened plate

板结构极限承载能力的影响。

图 21 为带板厚度为 9.5 mm 加筋板极限状态时的 von Mises 应力云图。在压缩极限状态下, 加筋板端部位置形成了塑性铰, 导致屈曲崩溃失效, 与 3.1 节中的理想加筋板应力分布差异较大, 由整体屈曲失效变为局部形成塑性铰失效, 表明焊接变形和残余应力改变了加筋板的屈曲失效模式。

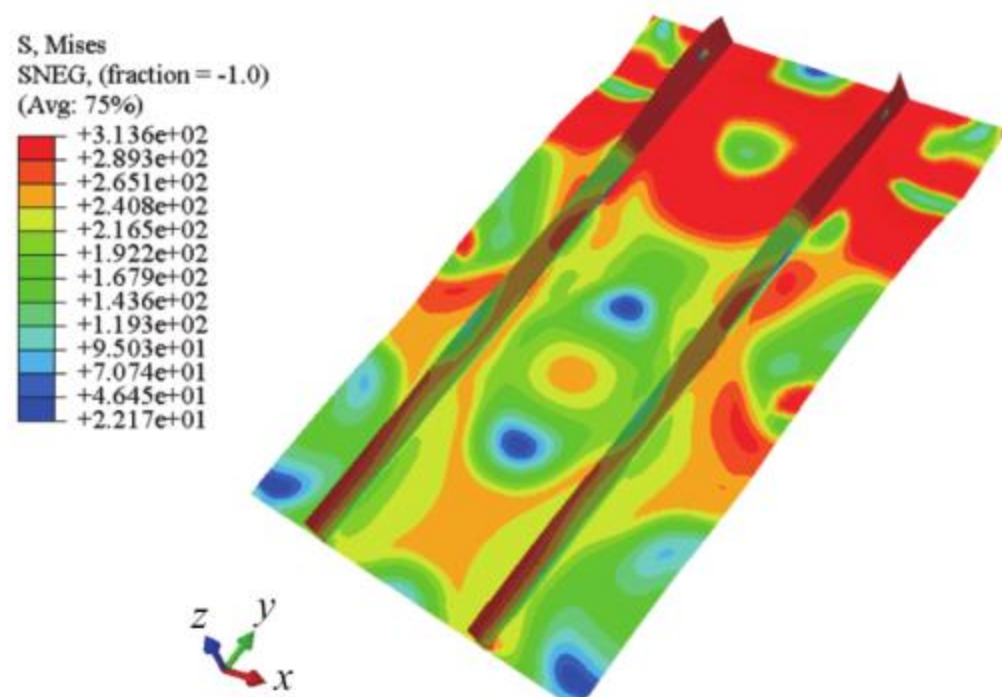


图 21 极限状态下 Von-Mises 应力云图

Fig. 21 Von-Mises stress nephogram in the limit state

图 22 为带板厚度为 9.5 mm 加筋板在有无焊接缺陷时的平均应力应变关系对比情况, 两者极值存在明显差异, 考虑焊接缺陷时加筋板极限强度为 0.641, 理想模型极限强度为 0.694, 表明焊接缺陷使得加筋板模型极限强度下降 7.64%。

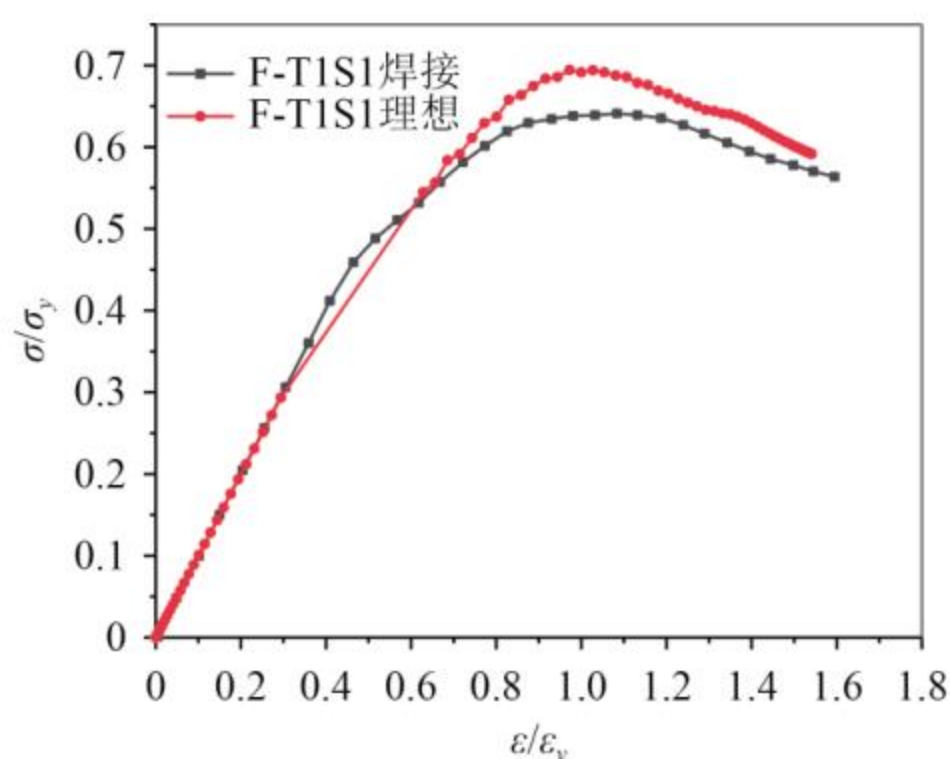


图 22 有无焊接缺陷模型平均应力应变关系对比

Fig. 22 Comparison of average stress-strain relationship in models with or without welding defects

## 5 结 语

1) 焊趾主要影响局部位置的应力分布, 对整体极限状态下的应力分布影响较小; 由于焊趾的尺寸较小, 难以改变加筋板的整体失效模式, 对加筋板的极限承载特性影响有限。

2) 带板越薄加筋板柔度越大, 越早屈曲失效, 非线性大变形越明显; 带板越厚加筋板刚度越大变形越小, 主要与塑性屈曲为主。焊趾对加筋板的平均应力-

平均应变曲线变化不大, 对后屈曲状态稍有影响。

3) 焊接产生明显的焊接变形和残余应力, 带板厚度越小, 焊接产生的变形越大; 焊缝区域焊接残余应力应力集中较为明显, 远离焊缝区域处焊接残余应力小; 焊接缺陷使得扁钢加筋板模型极限强度下降 7.64%。

## 参考文献:

- [1] 杜言, 俞健, 吴卫国, 等. 焊接工艺参数对船舶加筋板结构的声振特性影响研究 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(6): 216-225.
- [2] 李阿虎, 魏国前, 何文波. 考虑焊趾形貌的 T 形焊接接头三点弯疲劳试验 [J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(3): 16-19+31.
- [3] 储玲玉, 刘觉非, 苏林, 等. 含凹坑缺陷管道环焊缝应力有限元分析 [J]. 电焊机, 2021, 51(4): 8-13.
- [4] 韩云. 焊趾工艺优化对压力管道对接接头残余应力的影响 [J]. 电焊机, 2024, 54(6): 131-135.
- [5] 侯国清, 马蓉, 覃剑, 等. 焊接工艺参数对角焊缝残余应力的影响 [J]. 焊接技术, 2016, 45(3): 37-39.
- [6] 凌立鹏, 唐亮. 钢桥面板顶板-U 肋焊接接头热点应力的精细有限元分析 [J]. 公路交通科技, 2018, 35(4): 58-66.
- [7] 魏国前, 罗玉兵, 黄发超, 等. 考虑焊趾形貌的十字焊接接头疲劳评定研究 [J]. 机械强度, 2018, 40(2): 418-423.
- [8] PERI M, STAMENKOVI D, MILKOVI V. Comparison of residual stresses in butt-welded plates using software packages abaqus and ansys[J]. Scientific Technical Review, 2010, 60(3-4): 22-26.
- [9] PERI M, SELE K, TONKOVI Z, et al. Numerical simulation of welding distortions in large structures with a simplified engineering approach[J]. Open Physics, 2019, 17(1): 719-730.
- [10] PERIC M, TONKOVIC Z, RODIC A, et al. Numerical analysis and experimental investigation of welding residual stresses and distortions in a T-joint fillet weld[J]. Materials & Design, 2014, 5(3): 1052-1063.
- [11] PAIK J K, LEE D H, NOH S H, et al. Full-scale collapse testing of a steel stiffened plate structure under cyclic axial-compressive loading[J]. Structures, 2020, 10(2): 996-1009.
- [12] RINGSBERG J W, DARIE I, NAHSHON K, et al. The ISSC 2022 committee III. 1-Ultimate strength benchmark study on the ultimate limit state analysis of a stiffened plate structure subjected to uniaxial compressive loads[J]. Marine Structures, 2021, 7(3): 103026.
- [13] CCS. 《钢质海船入级规范》[R]. 2024.
- [14] RYU H, KANG S, LEE K. Numerical analysis and experiments of butt welding deformations for panel block assembly[J]. Applied Sciences, 2020, 10(5): 1669.