

考虑接头几何参数的 I-core 全钢三明治板的刚度分析

蒋小霞^{1,2}, 朱 亮¹, 乔及森¹, 吴毅雄³, 李铸国³, 陈剑虹¹

(1. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050;

2. 宁夏大学 机械工程学院, 银川 750021; 3. 上海交通大学 上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 201100)

摘 要: 激光焊接 I-core 三明治板常用的刚度设计公式, 没有考虑接头几何参数的影响, 在实际应用中其准确性受到影响。通过外伸三点弯曲试验, 对六种接头几何参数的 I-core 全钢三明治板的弯曲刚度和剪切刚度进行测量, 并结合有限元计算, 分析了接头几何参数对弯曲刚度和剪切刚度的影响。结果表明, 增加焊缝宽度可显著提高弯曲刚度和剪切刚度, 而焊缝宽度大于 60% 芯板厚度后, 焊缝宽度对刚度的影响减小。间隙对刚度的影响可忽略。基于此结果, 对三明治板设计时常用的刚度公式进行了修正。

关键词: 激光焊接; I-core 全钢三明治; 弯曲刚度; 剪切刚度; 接头几何参数

中图分类号: TG 404 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)11-0045-04

0 序 言

三明治板是一种由上、下面板和芯板组成的新型轻质高强结构。其特有的“夹芯效应”, 可为舰船减重 50%、节省空间 50%、降噪 20% 等。I-core 全钢三明治板是芯部结构最简单也是最具发展前景的一种三明治结构, 近年来备受国内外研究者青睐^[1-4]。

弯曲刚度和剪切刚度是三明治结构设计两个重要衡量指标。针对 I-core 三明治板的刚度, 文献[5]中 Lok & Cheng 等人分别提出了各自的计算公式。这些公式中都假设连接面板和芯板的接头在几何上是连续完整的, 即“全焊缝接头”。实际接头具有几何不连续特征, 即焊缝宽度小于芯板厚度、面板和芯板连接处存在间隙、焊缝中心偏离芯板中心。Romanoff 等人^[6]发现试验测量的剪切刚度比用上述公式计算的值小 30%~50%, 其原因认为与接头几何参数有关, 因此 Romanoff 初步提出了考虑接头几何参数的剪切刚度公式。为进一步提高刚度设计公式的准确性, 应首先分析接头几何参数对弯曲刚度和剪切刚度的影响。

文中采用外伸三点弯曲试验方法对改变接头几何参数的 I-core 全钢三明治板的弯曲刚度和剪切刚度进行测量, 并结合有限元分析, 研究接头几何参数对弯曲刚度和剪切刚度的影响。在此基础上, 对三明治板设计常用的刚度公式进行修正和简化。

1 试验及有限元模型

1.1 I-core 三明治板的制备及几何尺寸

试板如图 1 所示, 总体尺寸为 1 200 mm × 500 mm × 60 mm, 面板板厚 t_f 和芯板板厚 t_w 都为 5 mm, 芯板高度 h_c 为 5 mm, 芯板间距 s 为 100 mm。面板和芯板材料都是 BS960。试板均采用 CO₂ 激光深熔焊方法制备, 焊接功率为 12 kW, 保护气体为 99.9% 的氩气。

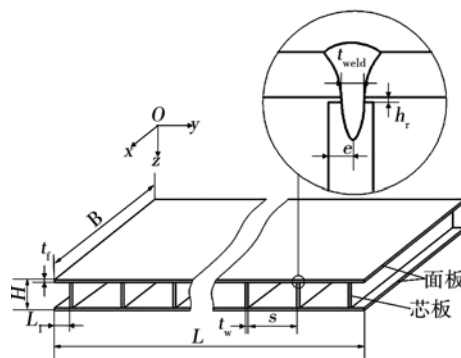


图 1 激光焊接全钢 I-core 三明治板

Fig. 1 Laser-welded I-core steel sandwich plate

为获取不同接头几何参数的三明治板, 选用 2 种焊接速度, 每种速度下采用 3 种焊前表面清理方式, 见表 1。接头典型的横截面形貌如图 2 所示。

1.2 外伸三点弯曲试验

参照国家标准 GB/T 1456—2005《夹层结构弯曲性能试验方法》, 设计了满足简支条件的三点弯曲

表 1 三明治板的焊缝宽度
Table 1 Width of laser stake welds

试板 编号	组号	焊接速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	清理 方式	焊缝宽度 $t_{\text{weld}}/\text{mm}$	间隙 h_f/mm
1	A	2 000	未处理	1.38	0.11
2	A	2 000	打磨	1.41	0.08
3	A	2 000	酸洗打磨	1.43	0.06
4	B	1 500	未处理	1.65	0.10
5	B	1 500	打磨	1.68	0.07
6	B	1 500	酸洗打磨	1.73	0.05

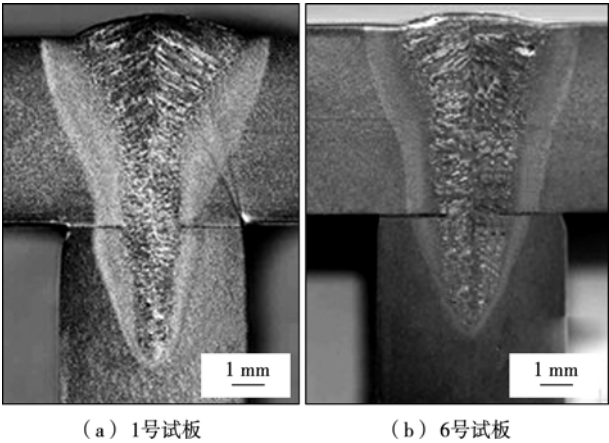


图 2 接头横截面形貌
Fig. 2 Features of laser stake welds

试验装置,示意图见图 3. 在简支条件下,通过在跨中加集中载荷,经安装在跨中和左右两外伸端的位移传感器(左右外伸端的位移传感器距支座中心的距离 a 为跨距 l 的 $1/3$),测量跨中、左右外伸端挠度. 根据载荷-挠度曲线,可计算弯曲刚度和剪切刚度,即

$$D_y = \frac{\Delta F l^3}{48 B \omega_b} \quad (1)$$

$$D_{Qy} = \frac{\Delta F l}{4 B (\omega - \omega_b)} \quad (2)$$

式中: ΔF 为载荷增量值; l 为跨距; B 为试板宽度; $\omega_b = (\omega_{b1} + \omega_{b2})/2$ 和 ω 分别是对应 ΔF 的外伸端挠度增量值和跨中挠度增量值. 对每块试板进行 3 次加

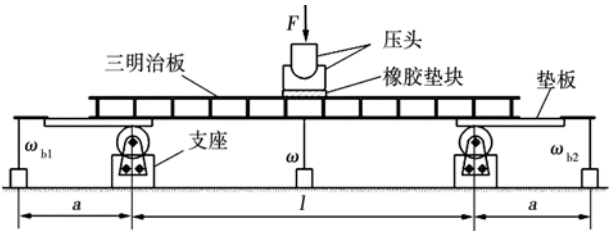


图 3 外伸三点弯曲试验装置示意图
Fig. 3 Schematic of three point bending testing

载-卸载,然后取平均刚度. 跨距 l 为 936 mm,加载速度为 5 mm/min.

1.3 有限元模型

借助 ABAQUS 有限元计算软件,分析接头几何参数对三明治板弯曲刚度和剪切刚度的影响. 根据试板几何尺寸和试验加载条件创建有限元分析用几何模型,如图 4 所示. 在网格划分时,接头处划分比较精细的网格(最小尺寸为 $0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$,最大尺寸为 $0.1 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$). 材料模型中,面板和芯板的弹性模量都为 206 GPa,泊松比为 0.3,屈服强度为 961 MPa,加工硬化指数为 0.16. 采用位移加载方式,压头施加的位移为 15 mm.

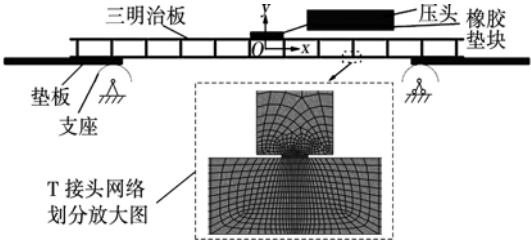


图 4 有限元模型及接头网格划分
Fig. 4 FEM Model and mesh division of T-joint

2 试验结果及分析

2.1 接头几何参数对刚度的影响

通过外伸三点弯曲试验,可同时得到载荷-跨中挠度曲线和载荷-左、右外伸端挠度曲线. 图 5 是典型的载荷-挠度曲线,其中实线为试验测定的曲线. 斜率较大曲线是载荷-左外伸端挠度曲线 ω_L 和载荷-右外伸端挠度曲线 ω_R ,斜率较小的曲线是载荷-跨中挠度曲线 ω_M . 可以看出,载荷-左外伸端挠度曲线 ω_L 和载荷-右外伸端挠度曲线 ω_R 重合,可选择其中之一与曲线 ω_M 来计算弯曲刚度和剪切刚度. 若曲线 ω_L 和曲线 ω_R 不重合,则取平均值.

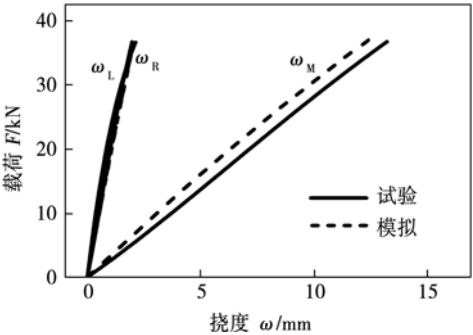


图 5 载荷-挠度曲线
Fig. 5 Load-deflection curves of sandwich plate

根据载荷-挠度曲线,经式(1)和式(2)分别计算出弯曲刚度和剪切刚度,见表 2。可以看出,从 1 号到 6 号试板,随着焊缝宽度增大,弯曲刚度和剪切刚度都增大,如 B 组试板(4 号~6 号)比 A 组试板(1 号~3 号)的弯曲刚度和剪切刚度明显大,焊缝宽度对弯曲刚度和剪切刚度有着显著的影响。随着间隙的减小,弯曲刚度和剪切刚度也会增大,但增加不明显,如 A 组试板的间隙从 0.11 mm 减小到 0.06 mm,弯曲刚度仅增加了 6%,剪切刚度仅增加了 2%。

表 2 试验测定的三明治板刚度

Table 2 Stiffness of sandwich plates

试板 编号	焊缝宽度 $t_{\text{weld}}/\text{mm}$	间隙 h_c/mm	弯曲刚度 $D_y/(\text{MN}\cdot\text{m})$	剪切刚度 $D_{Qy}/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-1})$
1	1.38	0.11	0.82	1.36
2	1.41	0.08	0.84	1.38
3	1.43	0.06	0.87	1.40
4	1.65	0.10	0.96	1.43
5	1.68	0.07	1.02	1.50
6	1.73	0.05	1.09	1.52

通过试验只得到了焊缝宽度从 1.38 ~ 1.73 mm,间隙从 0.11 ~ 0.05 mm 范围的接头几何参数对弯曲刚度和剪切刚度的影响规律。为了全面认识接头几何参数对三明治板弯曲刚度和剪切刚度的影响,对焊缝宽度在 1 ~ 5 mm,间隙在 0.02 ~ 0.20 mm 范围的三明治板进行有限元分析。分析之前,首先对有限元模型进行验证,图 6 中虚线是焊缝宽度为 1.73 mm、间隙为 0.05 mm 三明治板的有限元分析得到的载荷-挠度曲线,可以看出与试验测定曲线比较吻合。基于试验验证模型,改变焊缝宽度和间隙,得到的弯曲刚度和剪切刚度如图 6a,b 所示。可以看出,间隙对弯曲刚度和剪切刚度的影响很小,特别是当焊缝宽度大于 3 mm(60% 芯板厚度)以后,几乎没有影响。间隙对刚度的影响可忽略。焊缝宽度对弯曲刚度和剪切刚度都有显著的影响,焊缝宽度增大,弯曲刚度和剪切刚度也明显增大,只是当焊缝宽度较大(大于 3 mm)时,弯曲刚度和剪切刚度的增加变缓。

根据上述试验和有限分析结果,可分别归纳出焊缝宽度与弯曲刚度和剪切刚度的关系,见图 6c,d。其中三角形为试验结果,虚线为有限元分析结果。

2.2 I-core 三明治板常用的刚度设计公式修正

目前激光焊接 I-core 三明治板的刚度设计公式都没有考虑接头几何参数的影响,其中最常用的是 Lok & Cheng 提出的弯曲刚度^[5]。根据 Lok & Cheng

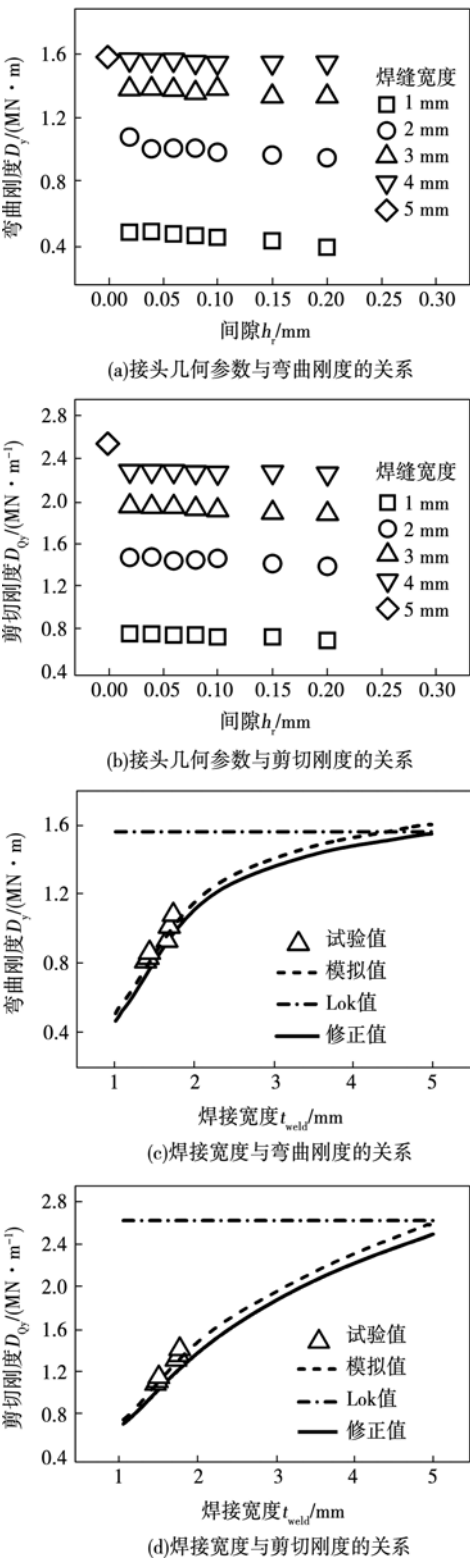


图 6 接头几何参数与刚度的关系

Fig. 6 Relationship between joint geometry parameters and stiffness

刚度设计公式计算得到的刚度(简称 Lok 值)见图 6c,d 中的点划线,与试验值比较,弯曲刚度增大 31% ~ 62%,剪切刚度增大 46% ~ 53%;与有限元计算结果比较,当焊缝宽度小于 5 mm 时,其值均大于

有限元分析结果,当焊缝宽度等于 5 mm 时,二者相符合. 可见如果不考虑接头几何参数, Lok & Cheng 刚度设计公式在实际应用中并不准确.

利用试验和有限元分析得到的焊缝宽度对弯曲刚度和剪切刚度影响规律,结合组合梁理论和材料力学的移轴公式,对 Lok & Cheng 提出的弯曲刚度和剪切刚度进行修正. 修正后的弯曲刚度为

$$D'_y = D_y - \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{t_w}{t_{\text{weld}}} \right) \cdot \frac{d^3}{12} \cdot \left(\frac{t_w - t_{\text{weld}}}{2p} \right) \quad (3)$$

式中:第一项 D_y 同 Lok & Cheng 提出的弯曲刚度;第二项是芯板和面板未焊透部分的弯曲刚度,它弱化了整体结构的弯曲刚度; E 为弹性模量; ν 为泊松比; d 为上下面板中心距; $2p$ 为相邻芯板中心距,其余参数同图 1 所示. 修正后的剪切刚度为

$$D'_{Qy} = D_{Qy} - \frac{\frac{E \cdot (t_w - t_{\text{weld}})^3}{1-\nu^2}}{s^2 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{(t_w - t_{\text{weld}})}{t_f} \right)^3 + \frac{d}{s} \right)} \quad (4)$$

式中:第一项 D_{Qy} 同 Lok & Cheng 提出的剪切刚度;第二项是芯板和面板未焊透部分的剪切刚度,它弱化了整体结构的剪切刚度.

用修正后的公式计算得出的刚度见图 6c, d 中的实线,与试验测量值比较,二者吻合很好;与有限元计算的结果比较,得到的刚度与焊缝宽度的关系与有限元计算得到的刚度与焊缝宽度的关系一致. 与 Lok & Cheng 公式计算的值相比,在焊缝宽度为 5 mm 时,即三明治板的接头是全焊接接头时,修正后值与 Lok 值几乎相等. 因此在今后 I-core 三明治板刚度设计时,若考虑接头几何参数的影响,应采用式(3)和式(4).

3 结 论

(1) 增大焊缝宽度,激光焊接 I-core 三明治板的弯曲刚度和剪切刚度明显增大,但是当焊缝宽度超过 3 mm (60% 芯板厚度) 以后,弯曲刚度和剪切刚度的增加变缓. 激光焊接 I-core 三明治板的刚度设计中应考虑焊缝宽度的影响.

(2) 间隙对激光焊接 I-core 三明治板的弯曲刚

度和剪切刚度的影响不明显,特别在焊缝宽度大于 60% 芯板厚度后. 激光焊接 I-core 三明治板的刚度设计中可忽略间隙的影响.

(3) 激光焊接三明治板刚度设计常用的公式因未考虑接头实际几何尺寸从而过高估计刚度. 经修正后的刚度公式可用于考虑焊接接头几何参数的 I-core 三明治板的刚度设计.

参考文献:

- [1] 陈杨科,何书韬,刘 均,等. 金属夹层结构的舰船应用研究综述[J]. 中国舰船研究, 2013, 8(6): 6-13.
Chen Yangke, He Shutao, Liu Jun, *et al.* Application and prospect of steel sandwich panels in warships[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2013, 8(6): 6-13.
- [2] 乔及森,苟宁年,许雪梅,等. 三明治结构中 T 形焊接接头力学性能测试分析[J]. 焊接学报, 2013, 34(5): 13-16.
Qiao Jisen, Gou Ningnian, Xu Xuemei, *et al.* Mechanical property testing of T-joint in sandwich panels[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(5): 13-16.
- [3] 静永娟,李晓红,谢棕蕻,等. 几何参数对钛合金蜂窝夹层结构比强度的影响[J]. 焊接学报, 2013, 34(9): 103-106.
Jing Yongjuan, Li Xiaohong, Xie Zonghong, *et al.* Influence of geometrical parameters on specific strength of Ti-based alloy honey unit [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(9): 103-106.
- [4] 薛志清,胡绳荪,左 迪,等. 铜铝异种金属激光焊接头组织特征及力学性能[J]. 焊接学报, 2013, 34(10): 51-54.
Xue Zhiqing, Hu Shengsun, Zuo Di, *et al.* Microstructural characteristics and mechanical properties of laser-welded copper and aluminum[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(10): 51-54.
- [5] Romanoff J, Remes H, Socha G, *et al.* The stiffness of laser stake welded T-joints in web-core sandwich structures[J]. Thin-walled Structures, 2007, 45(4): 453-462.
- [6] Romanoff J. Bending response of laser-welded web-core sandwich plates[D]. Espoo: Helsinki University of Technology, 2007.

作者简介: 蒋小霞,女,1984 年出生,博士. 主要从事金属三明治结构方面的研究. 发表论文 10 余篇. Email: jiangxiaxia402@126.com

通讯作者: 朱 亮,男,博士,教授,博士研究生导师. Email: zhul@lut.cn