

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.070



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 螺栓布置对钢-木组合梁弯曲性能的影响试验研究

吴珍珍<sup>1</sup>, 唐盛华<sup>1</sup>, 王解军<sup>2</sup>, 刘瑞越<sup>2</sup>

(1. 湘潭大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 中南林业科技大学 土木工程学院, 长沙 410004)

**摘要:**为推广直径 10 mm 以内的螺栓紧固件在钢-木组合结构中的应用,研究了螺栓的横向排数、直径和纵向间距对钢-木组合梁弯曲性能的影响。通过设计一种下部为工字钢梁、上部为木板、上下部由螺栓连接的组合梁,对 8 根试验梁进行三分点弯曲荷载试验,分别观察其破坏模式、跨中挠度变化、跨中截面应变和梁端部钢-木交界面滑移效应,分析不同螺栓参数对钢-木组合梁抗弯力学性能的影响。结果表明,钢-木组合梁的主要破坏模式为:组合梁跨中挠度达到跨度的 1/27 时,发生变形破坏;组合梁具有较大的抗弯承载力与位移延性系数,各试件钢-木交界面最大相对滑移为 2~6 mm;螺栓布置参数中,螺栓纵向间距对组合梁跨中钢-木交界面的应变差影响最大,螺栓直径的影响较小;提出了钢-木组合梁螺栓面积比的概念,即螺栓总面积与木板受压面积的比值,随着螺栓面积比的增加,位移延性系数减小,但试件抗弯承载力明显增长,交界面最大滑移逐步减小。通过合理的螺栓面积比范围能快速计算出螺栓的用量范围,为此类钢-木组合梁的实际应用提供设计参考。

**关键词:**钢-木组合梁;螺栓连接;交界面滑移;抗弯承载力;螺栓面积比

**中图分类号:**TU375.4 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2025)04-0109-12

## Experimental study on influence of bolt arrangement on bending behavior of steel-wood composite beam

WU Zhenzhen<sup>1</sup>, TANG Shenghua<sup>1</sup>, WANG Jiejun<sup>2</sup>, LIU Ruiyue<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, P. R. China)

**Abstract:** In order to promote the application of bolt fasteners with diameters of up to 10 mm in steel-wood composite structures, the effects of the number of transverse rows of bolts, bolt diameters and longitudinal spacing of bolts on the bending performance of steel-wood composite beams were investigated. By designing a composite beam with a I-steel beam at the lower part and wooden board at the upper part, the upper and lower parts connected by bolts. A three-point bending load test was carried out on 8 test beams, to observe the failure mode, mid-span deflection variation, mid-span section strain and slip effect at the steel-wood intersection at the end of the beam respectively, to investigate the effect of different bolt parameters on the flexural mechanical

**收稿日期:**2023-03-03

**基金项目:**湖南省教育厅项目(20K126);国家国际科技合作专项(2014DFA53120)

**作者简介:**吴珍珍(1996-),女,主要从事结构工程研究,E-mail:1223940096@qq.com。

唐盛华(通信作者),男,博士,副教授,E-mail:tshtangshenghua@163.com。

**Received:** 2023-03-03

**Foundation items:** Project of Educational Commission of Hunan Province of China (No.20K126); National International Science and Technology Cooperation Project of China (No.2014DFA53120)

**Author brief:** WU Zhenzhen (1996-), main research interest: structural engineering, E-mail: 1223940096@qq.com.

TANG Shenghua (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: tshtangshenghua@163.com.

properties of the steel-wood composite beam. The test results showed that the main damage mode of the steel-wood combination beam is the mid-span deflection up to 1/27 of the calculated span, resulting in deformation damage; Composite beams had high flexural capacity and ductility coefficient. The maximum relative slip at the steel-wood interface of each specimen was 2-6 mm; Among the parameters of bolt arrangement, the longitudinal spacing of bolts had greater influence on the strain difference at the steel-wood interface in the span of the composite beam, while the bolt diameter had less influence. The concept of bolt area ratio of steel-wood composite beam was proposed, i.e. the ratio of total bolt area to compressive area of wood board. With the increase of the bolt area ratio, the flexural load capacity of the specimen increases significantly and the maximum slip at the intersection decreases gradually, although the displacement ductility coefficient decreases. The range of bolt could be quickly calculated by optimum the reasonable range of bolt area ratio, which provides design reference for practical application of such steel-wood composite beam.

**Keywords:** steel-wood composite beam; bolt connection; interfacial slip; flexural bearing capacity; bolt area ratio

钢材是一种轻质、高强且可回收材料,能显著提高结构的强度和韧(塑)性。木材是一种天然的可再生材料,相较于钢材,尽管存在刚度低、强度退化、易出现裂缝等力学性能缺陷,但在抗震<sup>[1]</sup>、节能环保<sup>[2]</sup>等方面有较大优势。近十年来,广泛的数值分析和试验研究证实了木材在工程建筑中的优越性,同时,钢-木组合柱、钢-木组合梁等钢-木组合构件的结构性能也受到了广泛关注。褚云朋等<sup>[3]</sup>、Hu等<sup>[4]</sup>及 Xu等<sup>[5]</sup>对钢-木组合柱进行了试验,研究了钢-木组合柱承载力的影响因素。刘朋等<sup>[6]</sup>提出了一种木方外包在十字钢骨周围的组合柱形式,对其进行了轴心受压试验及有限元分析,研究表明,组合柱主要由钢骨承受轴压力,钢骨周围的木块可对钢材提供一定的屈曲约束,钢材厚度是影响组合柱承载力的主要因素。Bradford等<sup>[7]</sup>、Li等<sup>[8]</sup>和 Jasieńko等<sup>[9]</sup>设计了冷弯薄壁型钢或热轧钢与木材制成的组合梁,对其抗弯性能进行了试验研究。Pan等<sup>[10]</sup>运用有限元软件建立了1组钢悬臂梁和3组钢木悬臂梁模型,并比较分析了其承载能力和延性。张也等<sup>[11]</sup>对以钢材代替工字木梁腹板部分的钢-木组合梁进行了三点弯曲试验,结果表明,钢-木组合梁的抗弯刚度比相同截面尺寸的矩形木梁高 201%。Duan等<sup>[12]</sup>对3根落叶松木粘合在热轧H型钢腹板两侧的组合梁和1根纯钢梁进行了弯曲承载力试验,结果表明,H型钢-落叶松组合梁整体性能良好,在钢梁腹板两侧粘接木板可以提高承载力,构件形式合理有效。因此,作为一种新型结构,钢-木组合结构可以充分利用两种材料的优点,提高现有木结构的利用率。

钢-木组合梁是钢-木组合结构的主要构件之一,为确保其受力协调、提高组合梁的整体力学性能,剪切连接件发挥着关键性作用,按照变形能力可分为刚性连接件和柔性连接件。胶接是一种常见的刚性连接,但由于钢-木交界面之间胶黏剂存在

脆性断裂的风险,很少单独用于组合梁。柔性连接件一般为螺钉和螺栓等金属紧固件,而螺栓连接件因具有较好的经济性、易操作性和可靠性,应用较为广泛<sup>[13]</sup>。近年来,对螺栓连接组合结构的研究已取得一些进展,陈爱军等<sup>[14]</sup>设计了36根钢夹板螺栓连接胶合木梁并进行试验,讨论了螺栓不同的顺纹间距以及并列、错列两种布置方式对试件抗弯性能的影响,结果表明:螺栓顺纹间距显著地影响了钢夹板螺栓连接胶合木梁的抗弯性能,并且随着螺栓顺纹间距的增大,试件的初始抗弯刚度和抗弯承载力明显提高,而螺栓并列、错列布置方式对其影响较小。金许奇等<sup>[15]</sup>以螺栓间距和螺栓尺寸为研究参数,对钢-木组合梁进行了有限元分析,认为螺栓间距对钢-木组合梁力学性能影响较小,其余螺栓尺寸影响较大,螺栓直径越大,钢-木组合梁的承载力越高。方超<sup>[16]</sup>研究了螺栓对工字型钢-木组合构件力学性能的影响,结果表明,螺栓直径对初始刚度、屈服荷载和极限荷载有一定影响。Jing等<sup>[17]</sup>研究了钢-混凝土组合梁高强度螺栓连接的剪切性能,通过有限元模型验证了其有效性,认为增大螺栓直径会降低高强度螺栓接头的抗剪承载力。李霞镇等<sup>[18]</sup>设计了16组重组竹-钢夹板螺栓节点试件,采用螺栓直径、端距及主构件厚度为试验考虑的分析因素进行单轴压缩试验,研究表明:螺栓直径对屈服荷载存在显著影响,而构件厚度与端距产生的影响较小。由此可见,螺栓的间距、直径均对组合梁的力学性能有影响。但目前研究仍存在如下问题:现有螺栓连接组合结构的研究结论是否适用于钢-木组合梁、螺栓布置参数对钢-木组合梁的影响尚不明确。

鉴于此,为探究螺栓在钢-木组合梁中的合理设计方式,基于现有螺栓连接的组合梁研究,笔者设计了一种下部为工字钢梁、上部为木板,上下部通过螺栓连接的组合梁,并进行三分点加载弯曲试

验。研究螺栓间距、直径和横向排数对钢-木组合梁弯曲性能的影响,并将3种螺栓参数进行综合量化,提出将螺栓面积比作为螺栓设计参数。在实际钢-木组合梁应用中,根据有效螺栓面积比,在众多螺栓布置方案中能快速选出合理的螺栓布置方式,对促进钢-木组合结构发展具有重要意义。

1 试验方法

1.1 材料性能

钢-木组合梁试验所用的木材为兴安落叶松木板,钢材为 Q235 工字钢,螺栓为 4.8 级普通螺栓。为测得木材横纹抗拉、顺纹抗拉、顺纹抗压、顺纹抗剪强度等力学性能,依据《木结构试验方法标准》<sup>[19]</sup> 和美国 ASTM 标准<sup>[20]</sup>,分别制作 15 个标准木材试块进行材性试验,并根据木材缺陷(木节、裂缝等),参

考《木结构设计手册》<sup>[21]</sup>对试验结果平均值进行折减换算,得到木材力学性能参数。木材强度折减系数计算见式(1),木材强度折减表达式见式(2),木板顺纹弹性模量取自文献[22];工字钢与螺栓力学性能参数参考《钢结构设计标准》<sup>[23]</sup>。各材料材性参数分别见表1、表2和表3。

$$K_Q = K_{Q1} K_{Q2} K_{Q3} K_{Q4} \tag{1}$$

$$f = (K_P K_A K_Q f_K) / \gamma_R = K f_K \tag{2}$$

式中: $K_{Q1}$ 为木材天然缺陷折减系数; $K_{Q2}$ 为木材干燥缺陷折减系数; $K_{Q3}$ 为木材长期受荷强度折减系数; $K_{Q4}$ 为尺寸折减系数; $K_P$ 为方程精确性影响系数; $K_A$ 为尺寸误差影响系数; $K_Q$ 为构件材料强度折减系数; $f_K$ 为材性试验强度值; $\gamma_R$ 为抗力分项系数; $K$ 为总折减系数。式(1)中各项参数值见表4。

表 1 木材材性参数  
Table 1 Wood property parameters

指标	顺纹抗压强度/MPa	顺纹抗拉强度/MPa	顺纹剪切强度/MPa	横纹抗拉强度/MPa	含水率/%	弹性模量/MPa
试验值	67.71	131.58	21.28	5.08	13.6	13 320
换算值	26.00	20.79	7.00	1.56		

表 2 钢材力学性能参数  
Table 2 Mechanical property parameters of steel

屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	剪切强度/MPa	弹性模量/MPa
235	375	141	206 000

表 3 螺栓力学性能参数  
Table 3 Mechanical property parameters of bolts

屈服强度/MPa	剪切强度/MPa	抗拉强度/MPa
320	141	400

表 4 木材强度折减系数  
Table 4 Wood strength adjustment factors

受力状态	$K_{Q1}$	$K_{Q2}$	$K_{Q3}$	$K_{Q4}$	$K_Q$	$K_P$	$K_A$	$\gamma_R$	$K$
顺纹抗压	0.80		0.72		0.58	1.00	0.96	1.45	0.384
顺纹抗剪		0.82	0.72	0.90	0.53	0.97	0.96	1.50	0.329
顺纹抗拉	0.66	0.90	0.72	0.75	0.32	1.00	0.96	1.95	0.158
横纹抗拉	0.66	0.90	0.72	0.75	0.32	1.00	0.96		0.307

1.2 试件设计

由于目前没有钢-木组合梁的相关设计规范,因此,以《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)<sup>[23]</sup>、《木结构设计标准》(GB 50005—2017)<sup>[24]</sup>和《组合结构通用规范》(GB55004—2021)<sup>[25]</sup>为试件设计基础,参考《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)<sup>[26]</sup>中组合梁持久设计时承载力计算方法进行设计计算。试验设计了8根钢-木组合工字简支梁,试验梁总长度均为1.5 m、跨度均为1.35 m,如图1所示。8根梁截面尺寸相同,截面高度与宽度分别为130、145 mm,顶部木板厚度为30 mm,工字钢高度为100 mm,工

字钢底板与腹板厚度为4 mm、顶板厚度3 mm,试件截面尺寸如图2所示。试验梁的木板和工字钢采用4.8级普通螺栓连接,根据不同螺栓直径,将8根试验梁分为TS1、TS2和TS3三组,为增强工字钢上缘板的纵向稳定,在上缘板外侧布置4 mm×10 mm的纵向加劲肋。

参考《钢结构设计标准》<sup>[23]</sup>和欧洲规范 EN 14545<sup>[27]</sup>,TS1、TS2和TS3组试验梁螺栓直径分别设计为5、6、8 mm;基于对螺栓横向排布数量和纵向螺栓间距的考虑,仅TS1组中TS1-1试验梁横向布置2排螺栓,其余各组试验梁均横向布置4排螺栓,并且纵向螺栓间距采用两端密、中间疏的原则,左右两端部螺栓纵向间距为56 mm。TS1组5根试验梁的纵向螺栓间距分别为210、210、140、70、70 mm;TS2组试验梁的纵向螺栓间距为70 mm;TS3组两根试验梁的纵向螺栓间距分别为70、140 mm,试件的螺栓参数见表5,TS1-4与TS1-5为两根参数相同的试件,用于分析试验梁的离散性。本文主要探究螺栓布置参数对组合梁抗弯性能的影响,避免试验梁受其他因素影响,做了以下工作:1)为减小木板吸水性引起的收缩,从而影响组合梁的相对滑移,在木板表面抛光打磨后涂抹桐油。2)为减小钢-木交界面的摩擦系数对相对滑移的影响,在试件螺栓装配前对木板表面进行抛光处理,并均匀涂抹环氧树脂作为过渡层,同时,对钢梁表面进行渗碳处理。3)为利于荷载传递并防止局部应力过大,在试



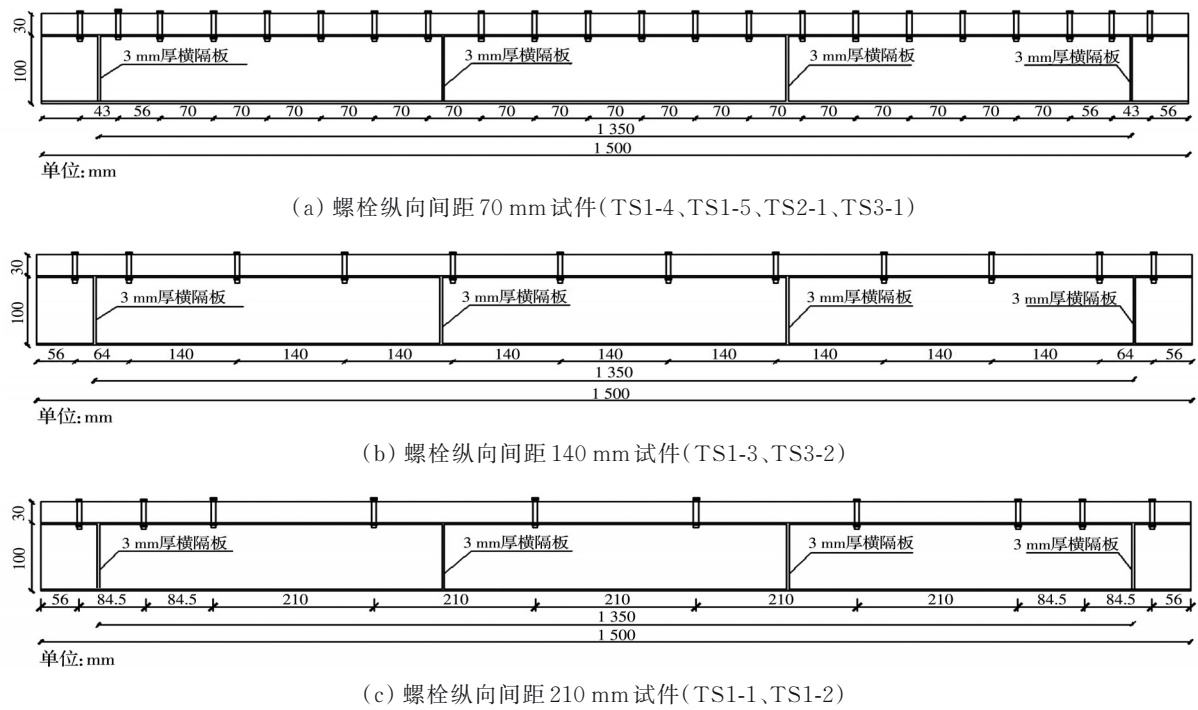


图 1 各试件立面构造布置  
Fig. 1 Elevation layout of each specimen

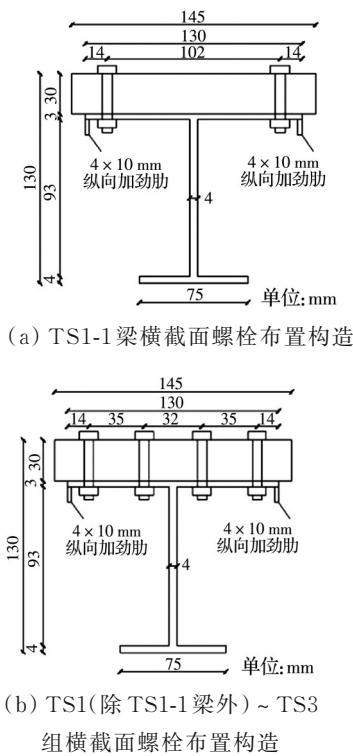


图 2 TS1 ~ TS3 组试验梁横截面螺栓布置构造  
Fig. 2 Arrangement and construction of bolts in cross section of TS1-TS3 test beams

件加载位置和支座处焊接 3 mm 厚的钢横隔板。各组试件横截面螺栓布置构造及螺栓纵向间距立面图分别如图 1、图 2 所示。

1.3 加载方案及测点布置

使用液压千斤顶和分配梁对钢-木组合梁进行

表 5 各试件螺栓布置参数

Table 5 Bolt layout parameters of each test piece			
试件编号	水平排布数量	直径/mm	纵向间距/mm
TS1-1	2	5	210
TS1-2	4	5	210
TS1-3	4	5	140
TS1-4、TS1-5	4	5	70
TS2-1	4	6	70
TS3-1	4	8	70
TS3-2	4	8	140

三分点加载,并通过量程为 30 t 的荷载传感器进行荷载同步测量,加载装置如图 3(a)所示。采用力和位移加载联合控制,参照欧洲规范 EN 14545<sup>[27]</sup>,为确保试验仪器正式加载时正常工作,对复合梁进行正式加载前将试件预加载至预估极限承载力的 15%。正式试验前期采用分级加载方式,在 40 kN 之前,每级加载 5 kN 并保持 30 s;在 40 kN 以后,每级加 3 kN 并保持 15 s;加载期间观察试验梁变形的发展,当荷载-跨中挠度曲线出现非线性变化时,改为位移控制进行加载,直至试件破坏。

使用 DH3861 静态应变采集系统测量应变,百分表测量位移。在梁两端横截面对称轴上距离钢-木交界面竖向约 10 mm 处的木板和工字钢上各安装一个百分表,测量梁端部木板与工字钢之间交界面的相对滑移,百分表 1、4 测量木板位移,百分表 2、5 测量工字钢位移。梁左端百分表的具体安装如图 3(b)所示。在梁的跨中底部布置百分表 3,测试梁

的跨中挠度(图3(c))。应变片布置如图3(d)~(g)所示。跨中截面布置15个纵向应变片测试纵向应变,其中:木板顶面沿横向布置5个纵向应变片(1~5号);木板侧面高度方向布置3个纵向应变片(6~8号);工字钢腹板高度方向布置4个纵向应变片(9~12号);工字钢下翼缘布置3个纵向应变片(13~15号)。

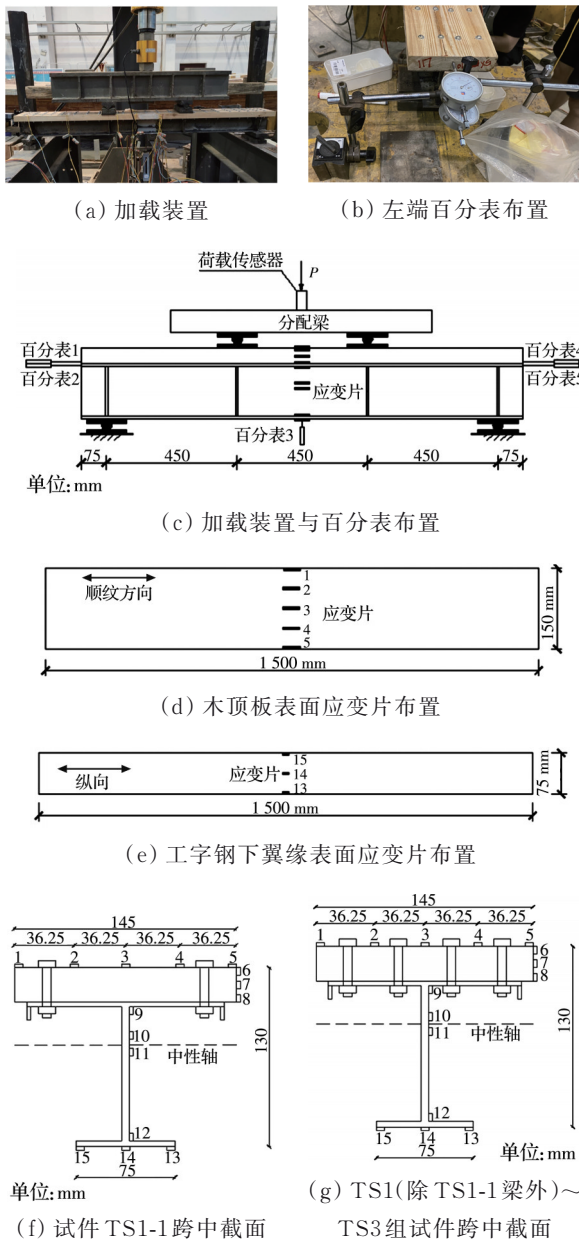


图3 仪器及应变片布置

Fig. 3 Instrument and strain sheet arrangement

## 2 试验结果与分析

### 2.1 试验现象及机理分析

试验中各组钢-木组合梁加载时并未出现承载力骤降的现象,但随着荷载的增加,跨中挠度会过大,不符合实际工程应用要求。参考陈伯望等<sup>[28]</sup>的研究,对于变形过大的组合梁,跨中挠度限定值应

取跨度的1/27。本研究中钢-木组合梁的跨度为1350 mm,即当组合梁最大跨中挠度值为50 mm时,定义其失效,不适于继续进行加载试验,并将此时的最大荷载视为极限荷载。

#### 2.1.1 试验现象

在受弯试验加载过程中,各组试件具体破坏现象(图4)如下:

TS1组试件中,试件TS1-1加载到40 kN(约占

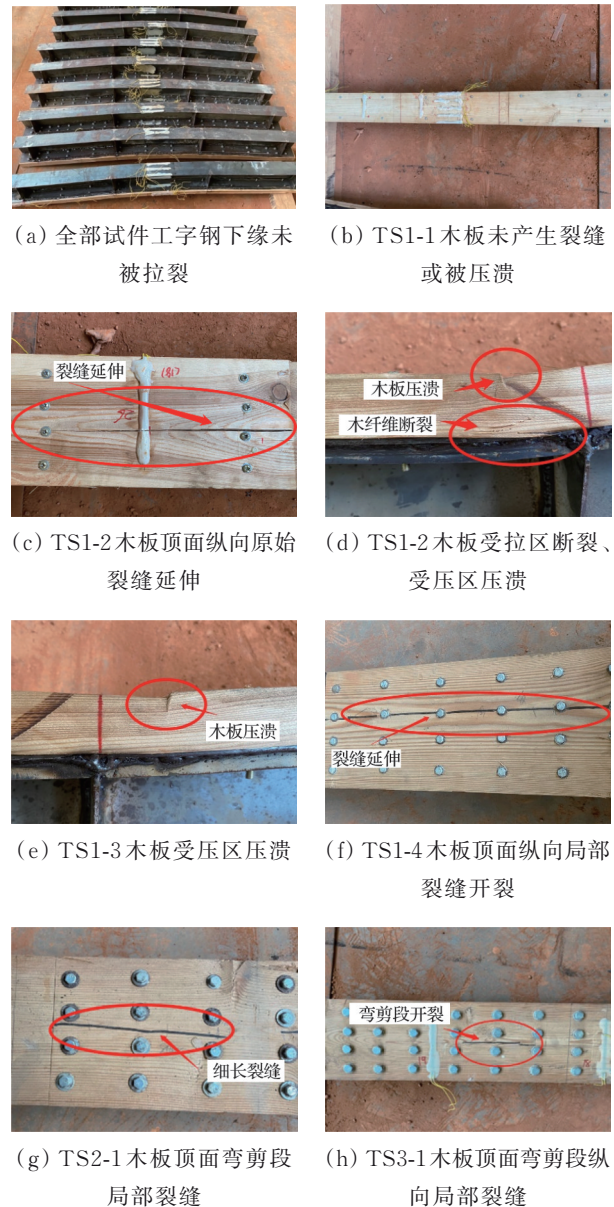


图4 试件破坏现象

Fig. 4 Test spece failure phenomenon

极限荷载的 54%)时,木板因滑动与螺栓挤压,从而产生轻微声响,但直到加载结束,除跨中挠度过大之外,试件并没有产生强度破坏现象(图 4(b));试件 TS1-2 荷载达到 71 kN(约占极限荷载的 74%)时,试件弯剪段木板顶面的裂缝在原始基础上产生较长延伸(图 4(c)),当达到极限荷载时,随着一声脆响,加载点下方的木板受拉区木纤维纵向断裂,并且木板受压区出现明显压溃现象(图 4(d));试件 TS1-3 加载过程中木板顶面无裂缝产生,但当荷载达到 76 kN(约占极限荷载的 96%)时,试件加载点下方的木板受压区出现轻微压溃现象(图 4(e));当试件 TS1-4、TS1-5 荷载分别达到 82、80 kN(各占极限荷载的 92%、90%)时,试件弯剪段木板顶面出现纵向裂缝(图 4(f))。

TS2 组试件中,从开始加载到加载至 84 kN 的过程中,试件 TS2-1 木板因滑动与螺栓挤压而产生的声响逐渐剧烈,但木板未出现裂缝和压溃等现象;当加载达到 84 kN(约占极限荷载的 97%)时,试件弯剪段木板顶面出现细长纵向裂缝(图 4(g))。

TS3 组试件中,试件 TS3-1、TS3-2 顶部木板产生的声响随着荷载的增加而逐渐变大,但此时木板未发生裂缝和压溃;随着荷载的继续增加,试件 TS3-1、TS3-2 荷载分别达到 88、86 kN(约占极限荷载的 96%、95%)时,试件弯剪段木板顶面出现纵向裂缝(图 4(h)、(i))。

## 2.1.2 破坏模式

钢-木组合梁在荷载作用下产生的跨中挠度达到跨度的 1/27(试验梁跨中挠度达到 50 mm)时,可视为组合梁破坏。

## 2.1.3 机理分析

1)试件 TS1-1 的螺栓布置较少,连接较弱、刚度小且承载力低,当跨中挠度达到规定限值时,材料强度未能充分发挥。

2)其余组合梁试件受弯时,跨中截面顶部木板和工字钢下翼缘分别承受较大的纵向压应力与拉应力。在弯曲压应力与螺栓局部挤压应力共同作用下,顶部木板产生较大的横向拉应力,而木材横纹抗拉强度较低;随着荷载的增加,当木板最大横向拉应力超过木材横纹极限抗拉强度时,木材横向拉裂,形成局部纵向裂缝(劈裂);顶部木板局部劈裂后,组合梁整体抗弯刚度显著降低,梁的跨中挠度急剧增加。由于钢材极限抗拉强度较高,工字钢下缘虽承受较大拉应力,但直至试件挠度超出限值,下缘钢材未受拉破坏。

## 2.2 荷载-跨中挠度曲线

8 根钢-木组合梁的荷载-跨中挠度曲线如图 5(a)所示,各组试件跨中挠度达到 50 mm 时停止加载。由试验过程及结果可知,试验梁的受力状态可分为弹性阶段和塑性阶段。弹性阶段,各组试件荷载-跨中挠度曲线变化趋势一致,且刚度相对较大,跨中挠度随荷载增加较缓;塑性阶段,结构刚度明

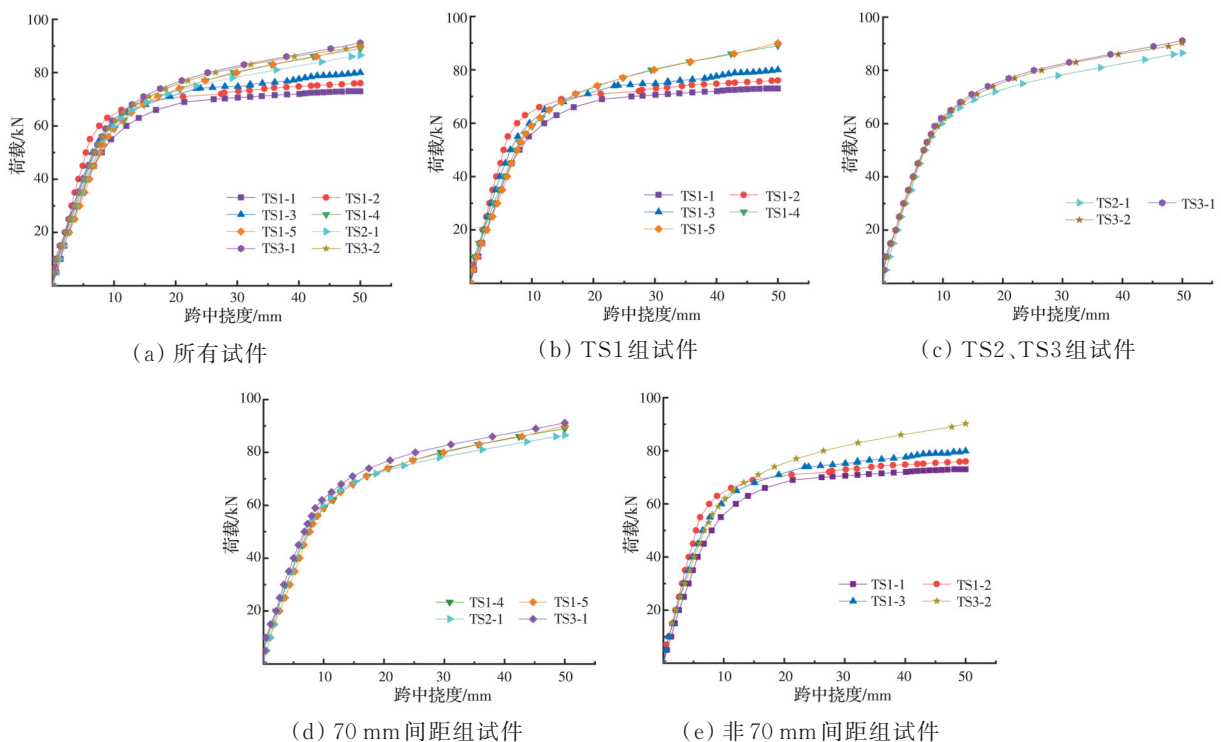


图 5 荷载-跨中挠度曲线

Fig. 5 Load-midspan deflection curve



显下降,荷载挠度曲线的斜率显著下降,逐渐接近水平,但直至停止加载,荷载挠度曲线未出现下降段,试件表现出较好的延性性能。结合图5和表6对比分析。

表6 试件的力学性能试验数据

Table 6 Mechanical properties test data of specimens

试件编号	$P_y/\text{kN}$	$\Delta_y/\text{mm}$	$P_u/\text{kN}$	$\Delta_u/\text{mm}$	$\mu_\Delta$
TS1-1	57.08	10.63	72.50	50	4.70
TS1-2	60.09	8.15	76.50	50	6.13
TS1-3	61.26	10.18	79.90	50	4.91
TS1-4	66.01	13.38	89.00	50	3.73
TS1-5	67.68	14.08	90.00	50	3.55
TS2-1	64.99	12.18	90.00	50	4.10
TS3-1	68.45	12.88	91.14	50	3.88
TS3-2	67.39	12.76	90.25	50	3.91

注: $P_y$ 、 $\Delta_y$ 分别为屈服荷载、屈服荷载对应的跨中挠度值; $P_u$ 、 $\Delta_u$ 分别为极限荷载、极限荷载对应的跨中挠度值; $\mu_\Delta$ 为位移延性系数。

图5(b)、(c)分别为螺栓直径5 mm和非5 mm的试件在考虑其他螺栓布置参数时的荷载-跨中挠度曲线对比。由图5(b)可知,相同螺栓参数布置的试件TS1-4、TS1-5的荷载-跨中挠度曲线高度重合,说明研究中相同构件测得的试验数据较为稳定,误差较小,具备一定代表性;试件TS1-2(纵向间距为210 mm)的极限荷载为76.5 kN,缩小螺栓纵向间距,试件TS1-3(纵向间距为140 mm)的极限荷载(79.9 kN)相比试件TS1-2提高了4.44%,试件TS1-4、TS1-5(纵向间距为70 mm)的极限荷载(平均值89.5 kN)相比试件TS1-2提高了16.99%;减少螺栓横向排数,试件TS1-1(横向排数为2排)的极限荷载(72.5 kN)相比试件TS1-2(横向排数为4排)的极限荷载(76.5 kN)降低了5.23%。说明缩小螺栓纵向间距能提高钢-木组合梁的承载力,减少螺栓横向排数能降低组合梁的承载力。

如图5(c)所示,在加载的整个过程中,TS3组试件螺栓间距为70、140 mm的试件荷载-跨中挠度曲线相近;对比试件TS2-1(螺栓直径6 mm)和试件TS3-1(螺栓直径8 mm)可知,加载前期,试件TS2-1、TS3-1的荷载-跨中挠度曲线接近一致,达到极限荷载时,试件TS3-1(螺栓直径8 mm)的极限荷载相比试件TS2-1提高了5.34%。

图5(d)、(e)分别为螺栓间距为70 mm和非70 mm的试件在考虑其他螺栓布置参数时的荷载-跨中挠度曲线对比。由图5(d)可知,试件TS1-4与TS1-5(5 mm螺栓直径)的极限荷载(平均值)为89.5 kN,增大螺栓直径,试件TS2-1(6 mm螺栓直径)、TS3-1(8 mm螺栓直径)的极限荷载相比试件TS1-4和TS1-5分别提高了0.56%和1.83%,说明

试件的螺栓纵向间距均为70 mm时,改变螺栓直径对试件的极限荷载影响不大。由图5(e)可知,试件TS1-1(横向2排螺栓)的极限承载力(72.5 kN)比螺栓横向排数为4排的试件TS1-2(76.5 kN)降低了5.23%,说明试件螺栓横向排数和螺栓直径参数相同时,增加螺栓横向排数能够提高试件的极限承载力;在螺栓纵向间距(140 mm)和螺栓横向排数(4排)相同时,试件TS3-2(螺栓直径8 mm)的极限承载力(91.14 kN)相比试件TS3-3(螺栓直径5 mm)的极限承载力(79.9 kN)提高了14.07%,说明在试验范围内螺栓横向排数相同且间距为140 mm时,螺栓直径8 mm的组合梁承载能力比螺栓直径5 mm的组合梁更好。

屈服点是工程结构从弹性向塑性过渡的关键点,根据冯鹏等<sup>[29]</sup>对屈服点的定义方法,采用如图6所示Park法<sup>[30]</sup>对屈服点进行定义,并引用位移延性系数 $\mu_\Delta$ 来量化构件的延性性能,计算式为

$$\mu_\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (3)$$

式中: $\Delta_y$ 为屈服荷载对应的挠度值; $\Delta_u$ 为极限荷载对应的挠度值; $\mu_\Delta$ 为位移延性系数,即极限挠度与屈服挠度的比值。

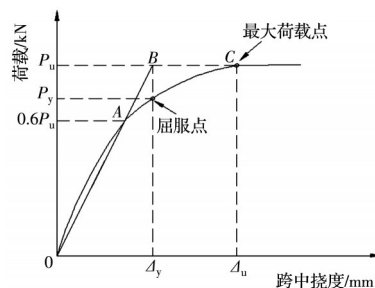


图6 Park法

Fig. 6 The Park method

由表6中各试件力学性能数据可知,在加纵向肋条的情况下,螺栓布置参数(螺排数、纵向螺栓间距、螺栓直径)对组合梁位移延性系数的影响也各有不同。改变螺栓横向排数,对比试件TS1-1(横向2排)和试件TS1-2(横向4排)可知,试件TS1-2的位移延性系数相比试件TS1-1提高了23%,说明螺栓排数的增加将提高试件的延性;改变螺栓纵向间距,试件TS1-4、TS1-5的位移延性系数(平均值3.64)相比试件TS1-2降低了41%,相比试件TS1-3降低了26%,说明螺栓纵向间距的增加会导致位移延性系数减小;改变螺栓直径,试件TS3-1的位移延性系数相比试件TS2-1降低了5%,试件TS1-4、TS1-5的位移延性系数(平均值3.64)相比试件TS2-1降低了11%。表明改变螺栓直径对组合梁位

移延性系数有一定影响。

综上,螺栓纵向间距变化对抗弯承载力的影响较大,这是由于改变螺栓间距对组合梁的整体刚度影响较大,说明螺栓间距较佳的试件刚度较好,更能充分发挥组合梁的抗弯承载力。

2.3 跨中横截面应变曲线

8根组合梁跨中截面应变随截面高度的变化情况较为相似,以试件TS2-1为例,其跨中截面应变曲线如图7所示。其中,坐标原点取截面初始中性轴位置;木板顶面的纵向应变为横向5个测点(1~5号)的平均值;工字钢下翼缘的纵向应变取3个测点(13~15号)的平均值。底部钢材的屈服应变为 $1\,500\times 10^{-6}$ ,当荷载达到43.63 kN时,试件开始进入弹塑性阶段,为方便观察,以43.63 kN荷载为界限,将试件分为弹性和塑性两个阶段。

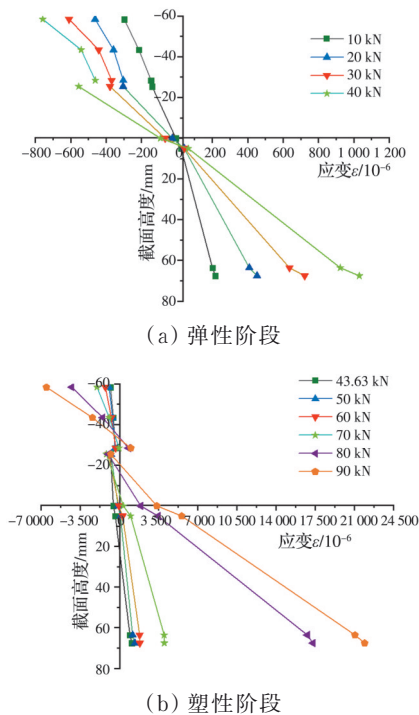


图7 试件TS2-1跨中截面正应变  
Fig. 7 Positive strain of mid-span section of TS2-1

由图7可知,加载前期(20 kN之前),组合梁交界面位置的木材与钢材纵向应变连续,试件的正应变沿高度方向基本呈直线分布,符合平截面假定;荷载超过20 kN后,组合梁交界面处开始发生一定滑移,此时木材与钢材的纵向应变不再连续,但受螺栓剪切件的影响,滑移前期木板底部和工字钢上翼缘之间的应变差较小,说明螺栓有效地减小了组合梁交界面之间的相对滑移,从而充分发挥了钢-木协同工作性能。

为了进一步量化螺栓连接对钢-木组合梁交接面之间的协同工作性能,表7给出了不同螺栓布置

试件加载到极限荷载时跨中钢-木交界面正应变差值(简称应变差)。

表7 跨中钢-木交界面应变差  
Table 7 Strain difference at the steel-wood interface in the span

试件编号	承载力/kN	跨中交界面应变/ $10^{-6}$
TS1-1	72.50	3 012.6
TS1-2	76.00	2 315.8
TS1-3	79.90	1 921.6
TS1-4	89.00	1 501.3
TS1-5	90.00	1 561.3
TS2-1	90.00	1 441.2
TS3-1	91.14	1 201.1
TS3-2	90.25	1 801.5

由表7可知,组合梁螺栓布置参数(横向排数、直径、纵向间距)的改变对试件跨中钢-木交界面应变差的影响也各不相同,具体分析如下:

1) 螺栓横向排数

试件TS1-1(横向2排)的钢-木交界面应变差为 $3\,012.6\times 10^{-6}$ ,增加横向排数,试件TS1-2(横向4排)的应变差( $2\,315.8\times 10^{-6}$ )相比试件TS1-1降低了23.13%,说明增加螺栓横向排数能降低钢-木交界面的应变差,即最大滑移量得到很好的控制,钢-木协同工作性能得到更好的发挥。

2) 螺栓直径

试件TS1-4、TS1-5(直径5 mm)跨中钢-木交界面的应变差(平均值)为 $1\,531.3\times 10^{-6}$ ,增大螺栓直径,试件TS2-1(直径6 mm)的应变差( $1\,441.2\times 10^{-6}$ )比试件TS1-4、TS1-5降低了5.88%,试件TS3-1(直径8 mm)的应变差( $1\,201.1\times 10^{-6}$ )比试件TS1-4、TS1-5降低了21.56%。说明增大螺栓直径会降低组合梁跨中钢-木交接面的应变差。

3) 螺栓纵向间距

试件TS1-2(纵向间距210 mm)跨中钢-木交界面的应变差为 $2\,315.8\times 10^{-6}$ ,缩小螺栓纵向间距,试件TS1-3(纵向间距140 mm)的应变差( $1\,921.6\times 10^{-6}$ )比试件TS1-2降低了17.02%,试件TS1-4、TS1-5(纵向间距70 mm)的应变差(平均值 $1\,531.3\times 10^{-6}$ )比试件TS1-2降低了33.88%。说明缩小螺栓纵向间距能降低组合梁跨中钢-木交接面的应变差。

根据上述分析可知,螺栓各布置参数对试件跨中钢-木交界面的应变差的最大降低率(表8)。由表8可知,螺栓布置参数中纵向间距的改变对组合梁跨中钢-木交接面应变差影响最大,横向排数次之,直径影响最小。这3个螺栓布置参数中,采用缩小螺栓纵向间距的方式能够更充分发挥钢-木组合梁的协同性能。



表 8 应变差最大降低率  
Table 8 Maximum reduction rate in strain

螺栓布置参数	应变差最大降低率/%
横向排数	23.13
直径	21.56
纵向间距	33.88

2.4 梁端部钢-木交界面滑移效应

在加载受弯过程中,组合梁螺栓连接件会因为交界面纵向水平剪力而发生一定变形,导致组合梁试件端部钢-木交界面发生相对滑移,致使组合梁抗弯承载力下降。钢-木组合梁相对滑移如图 8 所示,滑移过程中,木板外伸为正,钢腹板内缩为负,为了提高试验中相对滑移值的精度,采用百分表进行测量。百分表 1、2、4、5 某荷载时刻读数与初始读数的差值记为  $S_{P1}$ 、 $S_{P2}$ 、 $S_{P4}$ 、 $S_{P5}$ ,则组合梁端部工字钢与木板某荷载时刻的相对滑移值为

$$\delta_P = \frac{|S_{P1} - S_{P2}| + |S_{P4} - S_{P5}|}{2} \quad (4)$$

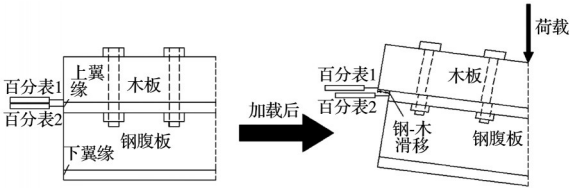


图 8 滑移示意图  
Fig. 8 Slip diagram

图 9 为各试件的荷载-滑移曲线,由图 9 可知,当荷载较小时,相对滑移随荷载线性增加;当受力达到屈服阶段,滑移随荷载增加而非线性增加,并且荷载增加较小,滑移增加较大。各试件最大滑移值约位于 2~6 mm 之间,其中,试件 TS3-1 滑移峰值最小,试件 TS1-1 滑移峰值最大。

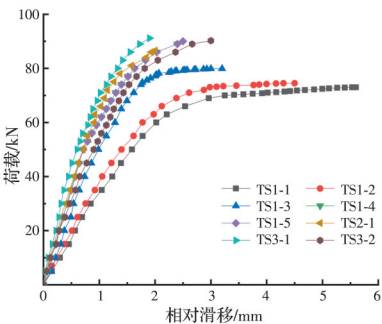


图 9 荷载-滑移曲线  
Fig. 9 Load-slip curve

为了量化 3 种螺栓布置参数(横向排数、直径、纵向间距)对组合梁滑移的影响,提出螺栓总面积的概念,如表 9 所示,由试样顶面的螺栓数量与单个螺栓切割面积的乘积除以木板顶面总面积计算得到。图 10 为试件交界面最大滑移与螺栓总面积的

关系,由图 10 可知,随着螺栓总面积增加,交界面最大滑移值逐步减小。当螺栓总面积小于 1 800 mm<sup>2</sup> (螺栓面积比  $k=8\times 10^{-3}$ ) 时,滑移曲线下降较快,随后缓慢下降。考虑螺栓用量与抗滑移性能,在选取直径 10 mm 以内的螺栓紧固件进行装配时,螺栓面积比可取  $k=8\times 10^{-3}$ ,此时对应的最大滑移约为 2.5 mm,对应的试件为 TS1-5(表 9),其螺栓直径为 5 mm、纵向间距为 70 mm、横向 4 排布置。

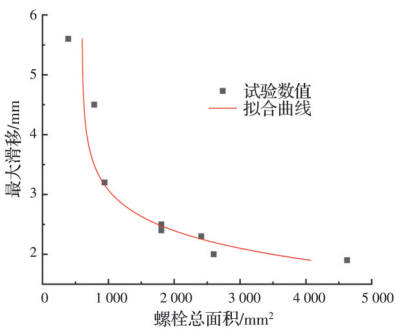


图 10 交界面最大滑移-螺栓总面积变化曲线  
Fig. 10 Maximum slip-bolt area change curve at interface

表 9 组合梁承载力、滑移及螺栓参数  
Table 9 Bearing capacity, slip and bolt parameters of composite beams

试件 编号	$P_u$ /kN	$\delta_u$ / mm	螺栓个 数 $n$	$S_w$ /mm <sup>2</sup>	$S_t$ /mm <sup>2</sup>	$k/10^{-3}$
TS1-1	73.00	5.8	20	392.70	225 000	1.75
TS1-2	75.00	4.4	40	785.40		3.49
TS1-3	79.90	3.2	48	942.48		4.19
TS1-4	89.00	2.5	92	1 806.42		8.03
TS1-5	90.00	2.6	92	1 806.42		8.03
TS2-1	86.52	2.1	92	2 601.24	4 624.42	11.56
TS3-1	91.14	2.0	92	4 624.42		20.55
TS3-2	90.25	3.0	48	2 412.74		10.72

注: $P_u$ 、 $\delta_u$  分别为承载力、承载力所对应的最大相对滑移值; $S_w$ 、 $n$ 、 $S_t$  分别为木板顶面螺栓总面积、木板顶面的螺栓个数、木板顶面总面积; $k$  为螺栓总面积与木板面积的比值,简称螺栓面积比。

由图 11 可知,组合梁极限承载力随交界面相对滑移的增大而近似线性减小;为了得到极限承载力与螺栓总面积之间的关系,将图 10 与图 11 结合,得到极限承载力-螺栓总面积曲线(图 12)。由图 12 可知,随着螺栓总面积的增加,最大承载力值逐渐增加。当螺栓总面积小于 1 800 mm<sup>2</sup> (螺栓面积比  $k=8\times 10^{-3}$ ) 时,承载力曲线上升较快,随后上升变缓慢。考虑螺栓用量,综合经济与承载力性能,在选取直径 10 mm 以内的螺栓紧固件进行装配时,合理螺栓面积比可取  $k=8\times 10^{-3}$ ,此时对应的最大滑移约为 2.5 mm,对应的试件为 TS1-5(表 9)。

钢-木交界面相对滑移位移延性系数的相关性见图 13。图 13 表明,在相对滑移值小于 4.5 mm

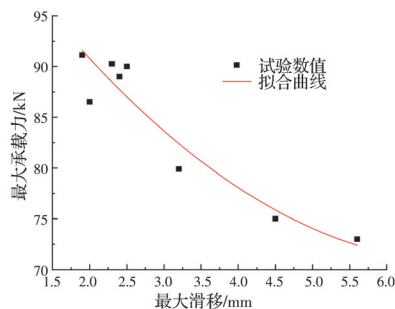


图 11 最大承载力-界面最大滑移曲线

Fig. 11 Maximum bearing capacity-maximum slip curve at interface

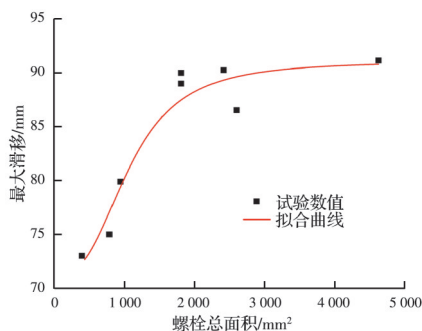


图 12 最大承载力-螺栓总面积曲线

Fig. 12 Maximum bearing capacity-total bolt area curve

时,位移延性系数随滑移增大而增大;当相对滑移值大于 4.5 mm 时,位移延性系数随滑移增大而减小。表明在合理螺栓面积比范围内增加螺栓总面积,尽管会减小位移延性系数,但可有效减小组合梁界面滑移,提高其抗弯承载力。

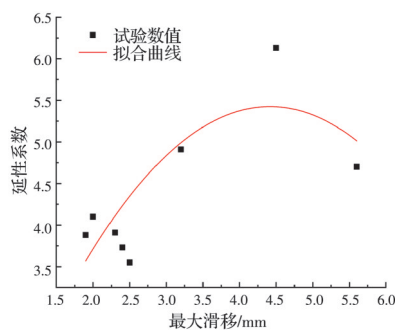


图 13 位移延性系数-界面最大滑移曲线

Fig. 13 Displacement ductility coefficient-maximum slip curve at interface

### 3 结论

通过三分点加载,对 8 根不同螺栓横向排数、螺栓直径和螺栓纵向间距的等截面尺寸钢-木组合梁进行抗弯承载力试验,研究不同螺栓布置参数对钢-木组合梁弯曲性能的影响。通过试验研究分析,得出以下结论:

1) 8 根钢-木组合梁跨中挠度达到跨度的 1/27 时,部分试验梁顶面木板纵向局部劈裂、压溃,工字

钢无明显材料破坏。

2) 达到极限承载力时,除试件 TS1-1 外,其余试件出现了木板顶面因受压而产生纵向局部裂缝(劈裂)以及木板被压溃的现象,但荷载均未出现下降。

3) 组合梁的荷载-跨中挠度曲线呈跨中挠度随着荷载的增加而增加的趋势,表现为弹性和塑性阶段构件受力具有较好的延性,最小的位移延性系数为 3.55。

4) 弯曲试验加载前期,组合梁界面位置的木材与钢材纵向应变连续,整体试件的正应变沿高度方向基本呈直线分布,符合平截面假定;继续加载,组合梁界面处开始发生滑移,对应的木板底部和工字钢上翼缘之间开始产生应变差;加载过程中,螺栓有效地减小了组合梁界面之间的相对滑移,从而充分发挥了组合梁中工字钢与木板协同工作的性能。螺栓布置参数中,纵向间距的改变对组合梁跨中钢-木交接面的应变差影响最大,横向排数影响次之,直径影响最小。

5) 各试件钢-木界面最大相对滑移为 2~6 mm。随着螺栓面积比的增加,尽管位移延性系数减小,但界面最大滑移逐步减小,试件抗弯承载力明显增加。综合螺栓用量、经济与受力性能,在选取直径 10 mm 以内的螺栓紧固件进行装配时,合理螺栓面积比可取  $k = 8 \times 10^{-3}$ 。

### 参考文献

- [1] 杨庆山. 古建筑木结构的承载及抗震机理[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(2): 1-9.  
YANG Q S. Load-bearing and aseismic mechanism of traditional wooden structures [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(2): 1-9. (in Chinese)
- [2] 何恩霞, 徐伟涛, 李英洁, 等. 木结构建筑节能保温性能研究[J]. 林产工业, 2019, 46(1): 40-42, 52.  
HE E X, XU W T, LI Y J, et al. Study on energy saving and thermal insulation performance of wood structure building [J]. China Forest Products Industry, 2019, 46 (1): 40-42, 52. (in Chinese)
- [3] 褚云朋, 姚勇, 杨东升, 等. 冷弯薄壁方钢管木组合柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构, 2017, 47(4): 75-80.  
CHU Y P, YAO Y, YANG D S, et al. Experimental study on axial compression behavior of cold-formed thin-walled square steel tube-timber composite long columns [J]. Building Structure, 2017, 47(4): 75-80. (in Chinese)
- [4] HU Q B, GAO Y, MENG X M, et al. Axial compression of steel-timber composite column consisting of H-shaped steel and glulam [J]. Engineering Structures, 2020, 216: 110561.
- [5] XU F Y, XUAN S Q, LI W, et al. Compressive perfor-

- mance of steel-timber composite L-shaped columns under concentric loading [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 48: 103967.
- [6] 刘朋, 钱哲, 王浩然, 等. 钢-木组合柱轴心受压性能试验研究[J]. *工程力学*, 2021, 38(增刊1): 159-166.  
LIU P, QIAN Z, WANG H R, et al. Experimental study on behavior of steel timber columns under axial load [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(Sup 1): 159-166. (in Chinese)
- [7] BRADFORD M A, HASSANIEH A, VALIPOUR H R, et al. Sustainable steel-timber joints for framed structures [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 172: 2-12.
- [8] LI G D, ZHANG W, LI X A, et al. Flexural behavior of cold-formed thin-walled steel-glulam composite beams [J]. *Wood Material Science & Engineering*, 2023, 18(1): 289-302.
- [9] JASIEŃKO J, NOWAK T P. Solid timber beams strengthened with steel plates: Experimental studies [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 63: 81-88.
- [10] PAN F T, WANG Y, HUANG C X, et al. Analysis of flexural performance of steel-timber composite cantilever beam [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 964(1): 012002.
- [11] 张也, 徐飞扬, 杨鸿达, 等. 集中荷载下钢木组合梁试验研究及有限元分析[J]. *北京林业大学学报*, 2021, 43(8): 127-136.  
ZHANG Y, XU F Y, YANG H D, et al. Experimental and numerical investigation of steel-timber composite beams under concentrated load [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, 43(8): 127-136. (in Chinese)
- [12] DUAN S W, ZHOU W Z, LIU X L, et al. Experimental study on the bending behavior of steel-wood composite beams [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 1-12.
- [13] 卫星, 肖林, 温宗意, 等. 钢混组合结构桥梁2020年度研究进展[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2021, 43(增刊1): 107-119.  
WEI X, XIAO L, WEN Z Y, et al. State-of-the-art review of steel-concrete composite bridges in 2020 [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(Sup 1): 107-119. (in Chinese)
- [14] 陈爱军, 彭润勃, 贺国京, 等. 钢夹板螺栓连接胶合木梁抗弯性能研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2022, 19(2): 500-510.  
CHEN A J, PENG R B, HE G J, et al. Study on bending behavior of glued wood beams connected with steel splints and bolts [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2022, 19(2): 500-510. (in Chinese)
- [15] 金许奇, 柏亚双, 徐国林. 基于螺栓连接的薄壁钢-木组合梁承载力影响因素分析[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2018, 38(4): 167-172.  
JIN X Q, BAI Y S, XU G L. Analysis of influencing factors on bearing capacity of thin-walled steel-wood composite beams connected by bolts [J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)*, 2018, 38(4): 167-172. (in Chinese)
- [16] 方超. 钢-木组合连接静力性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.  
FANG C. Study on static performance of steel-wood composite connections [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [17] JING X Y, ZHOU D C, LU S Q. Finite element Analysis on Shear Performance of Bolt connectors of Assembled Composite beams [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 634(1): 012117.
- [18] 李霞镇, 任海青, 李贤军, 等. 重组竹螺栓连接节点承载能力计算分析[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022, 44(4): 78-86.  
LI X Z, REN H Q, LI X J, et al. Calculation on bearing capacity of bolted connections for bamboo scrimber [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(4): 78-86. (in Chinese)
- [19] 木结构试验方法标准: GB/T 50329—2012 [S]. 北京: 建筑工业出版社, 2012.  
Standard for methods testing of timber structures: GB/T 50329—2012 [S]. Beijing: Building Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [20] Standard test methods for small clear specimens of timber: ASTM D143-14 [S]. ASTM International, West Conshohocker, US, 2014.
- [21] 《木结构设计手册》编写委员会. 木结构设计手册[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.  
Editorial Committee of Design Handbook for Timber Structures. Design handbook for timber structures [M]. 4th edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese)
- [22] 卢迎. 钢-木组合工字梁与胶合木工字梁抗弯性能对比研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021.  
LU Y. Comparative study on bending performance of steel-wood composite I-beam and glued woodworking I-beam [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2021. (in Chinese)
- [23] 钢结构设计标准: GB 50017—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.  
Code for design of steel structure: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [24] 木结构设计标准: GB 50005—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.  
Standard for design of timber structures: GB 50005—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)



- [25] 组合结构通用规范: GB 55004—2021 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.  
Code for construction of steel-concrete composite structures: GB 55004—2021 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021. (in Chinese)
- [26] 组合结构设计规范: JGJ 138—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.  
Code for design of composite structures: JGJ 138—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [27] Timber structures: Connectors requirements: BS EN 14545-2008 [S]. Britishh: Comité Européen de Normalisation, 2009.
- [28] 袁平, 雷婧, 陈伯望. 侧压竹集成材梁长期受弯性能试验研究[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2020, 29(4): 6-10.  
YUAN P, LEI J, CHEN B W. Experimental study on long-term bending behavior of bamboo laminated beams under lateral pressure [J]. Journal of Hunan City University (Natural Science), 2020, 29(4): 6-10. (in Chinese)
- [29] 冯鹏, 强翰霖, 叶列平. 材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论[J]. 工程力学, 2017, 34(3): 36-46.  
FENG P, QIANG H L, YE L P. Discussion and definition on yield points of materials, members and structures [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(3): 36-46. (in Chinese)
- [30] PARK R. State of the art report ductility evaluation from laboratory and analytical testing [C]// WCEE. Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo: WCEE, 1988: 605-616.

(编辑 王秀玲)