

编者按: 中国林科院木材工业研究所承担的“十二五”国家科技支撑计划“木质复合材料制造关键技术研究”课题“结构用木质复合材料构件制造技术研究”任务, 开展了轻型木结构木质复合材料制造技术、性能评价技术及安全设计技术等研究, 目前已获得国产规格材的强度设计指标、国产木桁架和结构用木质保温板的优化工艺等多项成果。

本刊自2017年第1期起, 系列报道此项研究的成果, 为我国木质复合材料的应用研究提供参考, 为木质复合材料构件在轻型木结构建筑中的应用提供技术支撑。

结构用木质保温板(SIPs)的产业现状及发展前景

刘晓娜¹, 周海宾^{1, 2}

(1. 中国林科院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 中国林科院林业新技术研究所, 北京 100091)

摘要: 木质 SIPs 建筑体系具有优异的节能性和结构性能, 回顾木质 SIPs 的发展历程, 总结木质 SIPs 的产品优势、标准规范和国内外研究现状, 分析相关产业发展政策推动下木质 SIPs 的发展前景, 对我国绿色环保建筑的发展具有重大意义。

关键词: 结构用木质保温板; 定向刨花板; 结构胶合板

中图分类号: TS6; TU366.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-8654(2017)02-0014-05

Current Status and Future Development of Wood-based Structural Insulated Panels (SIPs)

LIU Xiao-na¹, ZHOU Hai-bin^{1, 2}

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry (CAF), Beijing 100091, China;

2. Research Institute of Forestry New Technology, CAF, Beijing 100091, China)

Abstract: A building system composed of wood-based Structural Insulated Panels (SIPs) provides excellent energy-efficiency and structural performance. Therefore, it is very important to understand characteristics and status of the system to further develop green buildings. The authors reviewed history, advantages, standards and R & D status of the wood-based SIPs and then pointed out future development prospects for reference to relevant industries in China.

Key words: wood-based structural insulated panels; oriented strand board; structural plywood

结构用木质保温板(Structural Insulated Panels, SIPs), 简称木质 SIPs, 是由两片高性能面板与芯板

粘合而成的一种夹芯结构的保温复合板, 具有轻质、高强、节能环保、安装迅速等特点。木质 SIPs 建筑体系集保温和结构为一体, 可广泛用作商业和民用建筑的墙体、楼板和屋盖等结构构件^[1-2]。SIPs 的工厂预制化程度较高, 建造木质 SIPs 住宅系统就像搭积木一样简单快捷, 大大减少建造时间, 节约建造成本。在北美、欧洲以及日本等地区, 木质 SIPs 房

收稿日期: 2017-01-06; 修改日期: 2017-02-21

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划“结构用木质复合材料构件制造技术研究”(2015BAD14B05)。

作者简介: 刘晓娜(1992—), 女, 中国林科院木材工业研究所硕士研究生。

责任作者: 周海宾, 男, 中国林科院木材工业研究所副研究员。

屋随处可见,而国内对木质 SIPs 研究起步较晚,市场应用较少。

笔者从木质 SIPs 的发展历程、产品优势和国内外研究现状等方面进行归纳和总结,为木质 SIPs 在我国的研究和推广应用提供参考。

1 木质 SIPs 诞生与发展历史

1935 年,美国林产品实验室(FPL)的研究人员发现由硬纸板和胶合板覆面的复合板,像一面墙一样能承受结构荷载,木质 SIPs 的概念由此首次被提出。之后约 30 年间,研究人员对其结构和材料不断进行研究。1947 年,有研究以瓦楞纸板为芯板,分别采用胶合板、热处理硬纸板和经过处理的纸板为面板,制作结构保温板,并用于建造试验房,至 1978 年该试验房被拆除时,大部分复合板仍保留其原有强度。

1952 年,第一个带有保温芯层的木质 SIPs 被发明^[3],直到 20 世纪 60 年代硬质泡沫保温材料才得到应用,促进了木质 SIPs 的发展。70 年代,以硬质泡沫为芯板的 SIPs 引起了更多的关注。90 年代,随着计算机辅助制造(CAM)技术的发展,将 CAD 制图导入该系统,转换成相应的代码,计算机数字控制机床(CNC)根据图纸要求,制造出相应规格的木质 SIPs,大大简化了木质 SIPs 的制造工艺^[4],提高了生产效率。

目前,木质 SIPs 的制造工艺主要有两种:

1) 预成型面板和泡沫芯法。预先制备面板和芯板,在一定压力下将面板和芯板通过结构胶粘结。该方法工艺简单,应用范围广;

2) 预成型面板法。预先制备面板,并将其固定在模具中,再将发泡材料注入到模具中,在发泡过程中面板与发泡材料紧密结合^[5]。该方法对发泡工艺技术要求较高。

木质 SIPs 的材料选择时,面板可以是 OSB 板、胶合板或其他木质板材,芯板通常采用发泡聚苯乙烯泡沫(EPS)、挤塑聚苯乙烯泡沫(XPS)和聚氨酯泡沫(PUR)等保温材料。

目前,北美等地区生产的木质 SIPs 产品,主要是以 11 mm 厚 OSB 为面板,114~310 mm 厚 EPS 为芯板。图 1 为 OSB 面板木质 SIPs 典型构造^[6]。

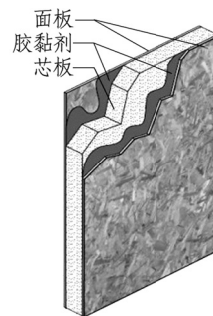


图 1 木质 SIPs 构造

Fig.1 Diagram of wood-based SIPs structure

2 木质 SIPs 产品优势

1) 轻质高强。

木质 SIPs 采用木质面板,中间粘结保温芯材,类似工字梁结构,两块面板相当于工字梁的翼缘,芯板相当于腹板,通过粘贴胶合产生了优异的复合结构性能^[7],达到了自重轻、强度高的特点,具有优异的抗震和抗风性能。研究发现,木质 SIPs 剪力墙在较大载荷下的变形,比轻型木结构胶合板剪力墙小 50%^[8]。1995 年,日本神户发生了 7.2 级重大地震,相比传统木结构建筑房屋,木质 SIPs 建筑的损失最小^[9];1998 年,美国 Clermont Georgia 的一栋木质 SIPs 房屋,在经历龙卷风之后完好无损,而周围传统建筑却出现严重倒塌现象。

2) 建造安装方便。

木质 SIPs 作为一种装配式构件,对工业化要求较高,原材料需经过质量管理体系的认证,各部件通常在专业化的工厂内进行加工、检验、装配、编号等程序,现场施工时只需根据图纸要求进行安装即可,降低了对施工人员的技术要求,比传统建筑节约 41% 的劳动力;而且施工工期比传统砌筑节省 57%^[10],材料利用率高,施工现场浪费少,便于保持清洁和安全施工,房屋的品质也更稳定可靠。

3) 优异的保温性能。

木质 SIPs 比传统木结构墙体材料具有更好的保温效果。1988 年,美国橡树岭国家实验室(ORNL)测试了 3.5 " 厚度 EPS 芯层的木质 SIPs,比同等厚度的 2' × 4' 传统建筑体系的热阻值高达 31%,可减少或取消建筑内空调和取暖设备,降低对室内环境的污染^[11-12]。由于其优异的保温性能,美国南极科考站部分建筑亦采用木质 SIPs 建造。

4) 低碳环保。

木质 SIPs 面板大多采用 OSB 板,主要原料为针、阔叶树材的小径木、速生间伐材等,材料利用率及生产效率高,游离甲醛释放量较低,芯层的 EPS、PUR 等属于环保型保温材料。木质 SIPs 在工厂预制,加工剩余物便于处理,施工现场基本无垃圾排放。

3 SIPs 相关标准规范

为了规范并促进 SIPs 产业发展,1990 年,结构保温板协会 (Structural Insulated Panel Association, SIPA) 在美国成立,作为一个非盈利行业组织,对产品制造商和房屋建造商提供技术支持和指导^[3,13]。同时,开始制定相关的标准和规范,包括 SIPs 组成材料选择、胶合强度测试、大尺寸板材性能测试方法以及 SIPs 安装操作等。

我国关于木质 SIPs 的标准相对缺乏。目前,全国木材标准化技术委员会结构用木材分技术委员会 (TC41/SC4),正组织国内相关院校编制国家标准《结构用木质覆面板保温墙体试验方法》,并计划于 2017 年编制产品标准《结构用木质保温板》,通过制定相关标准,促进我国木质 SIPs 产品的标准化规范化生产。

3.1 生产制造方面

1) ISO 22452:2011 “Timber Structures-Structural Insulated Panel Walls-Test methods”^[14]《木结构-结构保温板墙体-测试方法》

该标准由国际标准化组织木结构技术委员会 (ISO/TC 165) 制定,针对双面承重结构保温墙体,规定了拉伸、剪切、平面弯曲、垂直荷载、侧向荷载和过梁等测试方法及测试条件要求、结果报告。本标准仅是测试方法标准,不适用于质量控制测试和产品合格评定。

2) ANSI/APA PRS 610.1 “Standard for Performance-Rated Structural Insulated Panels in Wall Applications”^[6]《墙体用结构保温板的性能评定标准》

由美国工程木材协会 (The Engineered Wood Association, APA) 于 2013 年出版发行。APA 是美国国家标准协会 (ANSI) 认可的一家标准发展机构。该标准提供了木质 SIPs 墙体质量控制和产品合格评定的两种测试方法。

方法 A: 规定了木质 SIPs 组成单元 (面板、芯板和胶黏剂) 需满足的最小物理力学性能指标;

方法 B: 规定了木质 SIPs 大尺寸测试性能指标和测试方法,如轴向荷载测试、横向荷载测试、侧向荷载测试和过梁测试等。

3.2 产品应用方面

1) “Structural Insulated Panels Product Guide”《结构保温板产品使用指南》

由 APA 和 SIPA 共同制定,介绍了木质 SIPs 的幅面尺寸 (从 4' × 8' ~ 8' × 24')、厚度 (4.5~12.25") 和优点,以及木质 SIPs 住宅建造时,对地基、门窗、地板和屋顶的设计、安装细节,包括门窗的尺寸、电线槽的孔径、连接件的尺寸等。

2) “Prescriptive Method for Structural Insulated Panels (SIPS) Used in Wall Systems in Residential Construction”《住宅建筑墙体系统中结构保温板产品的使用规定》

由 SIPA、美国工程木材协会 APA 和美国住宅建筑商协会研究中心 (National Association of Home Builders Research Center, NAHBRC) 共同撰写。规定木质 SIPs 组成单元的物理和力学指标,以及木质 SIPs 墙体的设计安装细节等。该报告仅是木质 SIPs 墙体设计安装指南,并非严格的建筑规范。当建筑设计指标超过此报告中限制时,建造者可参考相应的建筑规范进行设计。

3) “International Residential Code”《国际住宅规范》

该规范规定,当木质 SIPs 用作承重墙时,房屋长、宽、高的限值分别为 18.3、12.2、10.7m,还规定所受风荷载强度值、雪荷载强度值以及承受的地震等级等限值。

同时,将 APA 研究中心测试的木质 SIPs 横向载、垂直载、侧向剪切强度以及不同过梁尺寸抗弯性能的测试数据,添加到该标准的 R614 部分。

4) “SIP Engineered Design Guide”《结构保温板产品工程设计指南》

该标准是基于国际技术协会 (National Technical Association, NTA) 提供的一系列数据,制定的一本关于 SIPs 的设计指导,给出了 SIPs 在不同使用情况下的设计计算公式。

4 国内外研究现状

4.1 国外研究现状

国外对木质 SIPs 的研究和使用较多,尤其在美、加、日等,已形成产业化和规模化生产,生产厂家主要集中在北美。结构保温板协会(SIPA)每年组织召开 SIPs 技术及产业会议,共同交流科研成果和技术创新。

木质 SIPs 的研究重点在结构性能、保温性能以及防火性能等方面。包括单元材料的性能、木质 SIPs 之间不同连接方式,对木质 SIPs 结构性能的影响以及不同力学性能下的有限元模型;通过改变面板和芯板,对不同组合的木质 SIPs 进行力学测试,得到木质 SIPs 的最优组合、弯曲蠕变模型和力学强度值,为木质 SIPs 材料的选择提供数据支持^[15-17]。

采用 OSB 面板、EPS 芯板,并在芯板中添加增强板,制备了多种木质 SIPs 并进行了系列力学性能测试,分析木质 SIPs 墙体高度对轴向承载力的影响,提出墙体抗侧力随垂直荷载的增加而增加、随洞口尺寸的增大而急剧减小的规律^[5, 7]。

为了促进交叉层积材(CLT)的发展,有研究尝试将其应用到 SIPs,研制了一种新型木质 SIPs,发现其可以应用于大型建筑物,不仅提高了 CLT 的预制化程度,而且减少木材的消耗量^[18]。

有研究测试了不同连接件和墙体的木质 SIPs 传热性能,结果表明,木质 SIPs 比传统的实木墙体性能更好^[19-20]。

表面覆盖 15 和 30mm 厚石膏板的木质 SIPs 的防火性能,均能达到 ISO834-1-1999 国际标准要求,而且其承载力并未随温度变化而产生明显波动^[21]。

4.2 国内研究现状

国内对木质 SIPs 产品的生产和使用始于 21 世纪初。近年来,随着我国绿色建筑和装配式建筑的发展,木质 SIPs 产品再次得到了工业界的重视。

国内较早的生产厂家有大连阔森特新型建材有限公司和山东龙腾实业有限公司,技术来源于国外,主要制造以 EPS 为芯层、OSB 为表层的木质 SIPs 产品。此外,国内结构用 OSB 生产企业也在开始探索开发新型木质 SIPs 产品。

在科研方面,国内对木质 SIPs 的研究处于起步阶段,局限于结构相对简单的传统木质 SIPs 进行物

理力学测试。通过对以 OSB 和秸秆板为面板, EPS 为芯板的木质 SIPs 进行力学性能测试和理论分析,得到结构绝缘板的挠度计算公式^[22],为实际工程应用提供依据。

木质 OSB、重组竹及竹帘胶合板 3 种不同覆面材料对 SIPs 传热系数影响不大,而且在稳态条件下 3 种材料传热均匀;在 3 种不同静力加载方式下, OSB 覆面的木质 SIPs 墙体的破坏部位较一致,但抗剪性能值不同。按照 ISO 22452 加载方式时,极限承载力最大;采用 E564 加载方式时,极限承载力和相应位移最小^[23-24]。

面板由木衬板、木肋、纤维增强石膏组合而成,芯板采用 EPS 的新型 SIPs 墙体,具有延性好、刚度小等特点,解决了传统木质 SIPs 防火性能差、易翘曲变形、建筑高度低等问题^[25-26],可应用于轻钢结构体系,作为钢筋混凝土框架结构填充墙和内隔墙等。

其他研究^[27-28]针对传统木质 SIPs 的制备工艺、墙体之间的连接方式,以及墙体的隔热、隔声、防火、抗震等性能进行了测试。

2015 年,国家科技支撑计划课题“结构用木质复合构件制造关键技术与示范”正式启动,重点开展以聚氨酯材料为芯层、结构人造板为表层的木质 SIPs 产品制造技术、性能评价以及预制化应用等系统研究,揭示了国内木质 SIPs 芯层材料抗弯等力学性能的变化规律,明确了芯层材料密度与力学性能的相互关系;确立了施胶面板再压贴的技术路线、最佳压力范围、加压时间以及胶黏剂施胶量,初步提出了木质 SIPs 压贴制造的关键技术。这些研究成果为木质 SIPs 的大规模推广应用,提供了重要的技术支撑。

5 发展前景

5.1 国内相关产业的蓬勃发展为木质 SIPs 制造提供了丰富的选择

我国人造板和保温材料产业的发展促进了木质 SIPs 产品的迅速发展。我国人造板产量居世界第一,其中胶合板的产量占比很大,我国被誉为世界第一胶合板生产国^[29-30]。2015 年我国 OSB 生产能力增加了 99 倍,具有代表性的 OSB 企业生产能力均在 22 万 m³/a 以上^[31]。

酚醛和聚氨酯等保温材料的发展已大大满足市场要求。2013 年我国建有酚醛泡沫全自动连续化生产线 300 条, 多家聚氨酯企业的年产量可达到 250 万 m^2 ^[32-33]。

5.2 国家装配式建筑政策的出台促进了木质 SIPs 产业的发展

国家关于大力发展装配式建筑的指导意见(国办发〔2016〕71号), 以京津冀、长三角、珠三角三大城市群为重点推进地区, 常住人口超过 300 万的其他城市为积极推进地区, 其余城市为鼓励推进地区, 因地制宜发展装配式混凝土结构、钢结构和现代木结构等装配式建筑。力争用 10 年左右, 使装配式建筑占新建建筑面积的比例达到 30%。

国家大力推广绿色建筑和装配式建筑, 并制定了相关产业政策。作为一种预制化程度较高的绿色环保建材, 木质 SIPs 建筑住宅体系实现了构件产品的工业化、标准化、体系化和装配化生产, SIPs 建造的木结构房屋, 单体预制率可达到 50%以上。该建筑体系的发展不仅可以提高我国木材资源的利用水平和应用价值, 还可以提升建筑产品品质、提高建造效率效益、减少劳动用工, 实现建筑业资源节省、节能减排、绿色环保可持续发展的目标。

参考文献:

- [1] Lstiburek J. Builder's guide to structural insulated panels (SIPs) for all climates[M]. Westford American: Building Science Press, 2008.
- [2] Michael Morley. Building with structural insulated panels (SIPs) [M]. United States of America: Taunton Press, 2000: 1-35.
- [3] Mohammad Panjehpour, Abang Abdullah Abang Ali, Yen Lei Voo. Structural insulated panels: Past, present, and future [J]. Journal of Engineering, Project and Production Management, 2013, 03(01): 2-8.
- [4] 杨娟. 浅析 SIPs 板的发展应用及前景[J]. 住宅产业, 2011(12): 42-43.
- [5] Kermani A. Performance of structural insulated panels[J]. Structures & Building 159 Issue SRI, 2006 (2): 13-19.
- [6] ANSI/APA PRS-610.1, Standard for performance-rated structural insulated panels in wall applications[S]. APA-The Engineered Wood Association, 2008.
- [7] Kermani A, Hairatans R. Racking performance of structural insulated panels[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(11): 1806-1811.
- [8] Jared Bernard Jamison. Monotonic and cyclic performance of structurally insulated panel shear walls[D]. Blacksburg, virginia: Faculty of the Virginia polytechnic institute and state university, 1997.
- [9] Yeh B, Williamson T, Keith E. Development of structural insulated panel standards[C]. Structures Congress, 2014: 1-10.
- [10] Burwell Jerry. Building system for low cost housing[C]. Proceedings of the SPI Annual Technical/Marketing Conference, 1984: 207-213.
- [11] Medina M A, King J B, Zhang M. On the heat transfer rate reduction of

- structural insulated Panels(SIPs) outfitted with phase change materials(PCMs) [J]. Energy, 2008, 33 (4): 667-678.
- [12] 王兴业, 杨孚标. 夹层结构复合材料设计原理及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 46-72.
- [13] Akay M, Hanna R. A comparison of honeycomb-core and foam-core carbon-fibre/epoxy sandwich panels[J]. Composites, 1990, 21 (4): 325-331.
- [14] ISO 22452: 2011, Timber structures-Structural insulated panel walls-Test methods [S].
- [15] Taylor S B, Manbeck H B, Janowiak J J, et al. Modeling structural insulated panel (sip) flexural creep deflection[J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123 (12): 1658-1665.
- [16] Tamami Kawasaki. Elastic moduli and stiffness optimization in four point bending of wood based sandwich panel for use as structural insulated walls and floors[J]. The Japan Wood Research Society, 2006, 52 (4): 302-310.
- [17] PrathanRunghthongkit. Structural behaviour of structural insulated panels (SIPS)[D]. Birmingham: University of Birmingham, 2012.
- [18] Léoskool L, Descamps T, Descamps T. Development of a structural insulated panel (SIP) with wood based material[C]//COST Action FP1004 Conference: Experimental Research in Timber, 2014.
- [19] Wyss S, Fazio P, Rao J, et al. Investigation of thermal performance of structural insulated panels for Northern Canada[J]. Journal of Architectural Engineering, 2015, 21 (4): 1-15.
- [20] Kayello A, Fazio P, Rao J. Investigation of the hygrothermal performance of a SIP test hut with an unventilated and ventilated attic for the Canadian North[C]// EIC 3rd Climate Change Technology Conference, 2013.
- [21] Hopkin D J, Lennon T, Rimawi J E, et al. A laboratory study into the fire resistance performance of structural insulated panels (SIPs)[C]. 6th International Conference on Structures in Fire(SIF 10), 2010: 611-618.
- [22] 张旭琛. 非金属面结构绝缘板-SIPs 力学性能实验和理论研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [23] 王雪花, 费本华, 宋莎莎, 等. 覆面材料对 SIP 保温性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2015, 42 (5): 7-71.
- [24] 王雪花, 方露, 吴智慧, 等. 不同加载方式 SIP 墙体的抗剪性能[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38 (3): 41-46.
- [25] 吴刚, 王曙光. 新型 SIP 填充墙板的制备及性能模拟研究[J]. 新型建筑材料, 2012, 39 (6): 8-11.
- [26] 王曙光, 吴桐, 刘伟庆, 等. 新型 SIP 墙板的基本性能试验[J]. 新型建筑材料, 2013, 40 (3): 72-76.
- [27] 曹海, 刘鹏飞, 严帅. SIP 墙板的综合性能分析[J]. 铜陵学院学报, 2012, 11 (1): 110-111.
- [28] 曹海, 黄龙, 严帅. SIP 墙板的选材与制备工艺[J]. 黑龙江科技信息, 2013 (3): 285-285.
- [29] 肖小兵. 我国人造板产业发展现状[J]. 木材工业, 2016, 30 (2): 11-14, 28.
- [30] 姚利宏, 赵荣军, 王戈, 等. 结构胶合板的研究现状与发展[J]. 中国人造板, 2013, 19 (08): 20-25.
- [31] 刘守华. 定向结构刨花板(OSB)发展现状和趋势[J]. 木材工业, 2016, 30 (2): 25-28.
- [32] 绿色建筑拉动保温材料发展[J]. 建材发展导向, 2014, 12 (20): 104-105.
- [33] 陈科军, 欧阳铁球, 李信仁. 新型聚氨酯外墙外保温板材生产线[J]. 建筑节能, 2008, 36 (9): 49-50, 55.

(责任编辑 向琴)