

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.07.012

SIPs 中 EPS 芯材的力学性能试验

杜 强,姚星皓,吕 晶

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安,710064)

摘 要:通过对以定向刨花板(OSB)为面板、模塑聚苯乙烯泡沫(EPS)为芯材的不同厚度的结构保温板(Structural Insulated Panels, SIPs)进行抗拉、抗压和双剪切力学试验,得到 SIPs 中不同厚度 EPS 芯材的抗拉、抗压和抗剪强度,应力-应变曲线和弹性模量。得到以下结论:厚度对 SIPs 中 EPS 芯材的抗拉强度影响不显著,厚度的增加对抗压强度有一定加强作用,对抗剪强度有一定减弱作用,不同厚度试件在双剪切破坏时所受弯矩基本相同。

关键词:力学性能;试验研究;结构保温板;EPS

中图分类号:TU502

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2014)07-090-08

An experimental study on mechanical properties of EPS in SIPs

DU Qiang, YAO Xinghao, LÜ Jing

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: Tensile, compressive and double shear experimental tests are calculated on Oriented Stranded Board (OSB)skinned and expanded polystyrene (EPS)cored Structural Insulated Panels (SIPs)with various thicknesses, and mechanical properties, stress-strain curves and elasticity modulus of the core are achieved. The results are analyzed and discussed. It is found that tensile strength will not be affected by the thickness, compressive strength will be enhanced while shear strength will be weakened as thickness increases, and the failure bending moments of the specimens with different thicknesses under double shear action are almost the same.

Key words: mechanical properties; experimental study; SIPs; EPS

结构保温板(Structural Insulated Panels, SIPs)是由两片定向高性能面材黏合保温芯材组成的具有一定结构功能的“三明治式”夹芯复合板材。通过对 SIPs 的研发和推广,可以降低建筑物碳排放量,对促进节能减排、发展低碳经济具有现实意义。

SIPs 在国外起步较早。1820 年,Delau 便提出了复合材料夹层结构的概念,形成了夹芯板的早期雏形。20 世纪 40 年代起,该材料开始广泛应用于工程领域。实践方面,欧美等国家已有相关标准、构造图集指导实际工程^[1-4]。其中,木质面板(以 OSB 定向刨花板为主)SIPs 用于永久性房屋的建造已在上述国家经过长期工程实践检验。理论方面,国外学者对 SIPs 的各项性能做了大量研究,包括:不同连接方式对墙体的影响,不同面材对结构性能的影响,以及墙体门洞开口大小对结构性能的影响等^[5-14]。国内 SIPs 的研究与应用尚

收稿日期:2014-02-05

基金项目:教育部博士点基金资助项目(20110205120005);教育部中央高校科研基金高新技术研究项目(2014G2280013);陕西省国际合作重点项目(2013KW13-01);西安市建设科技项目(SJW201225, SJW201322)

作者简介:杜强(1981-),男,副教授,博士,主要从事低碳工程材料与技术研究,(Tel)029-82339228;(E-mail)qiang_du@126.com。

姚星皓(联系人),男,长安大学硕士研究生,(E-mail)yxhchd@163.com。

处于起步阶段,与传统非承重金属面夹芯保温板相比,SIPs除可用作保温围护构件外,还能作为主要结构构件应用在二至三层的永久性建筑中。哈尔滨工业大学查晓雄团队的研究较为系统,包括金属面材SIPs的温度应力以及耐火极限^[15-16],SIPs的宏观力学性能及泊松比^[17],XPS芯材SIPs统一本构关系的简化模型^[18],绝热金属面板SIPs的抗弯承载力^[19]。严帅等^[20]对SIPs的性能及优越性、创新性进行了分析,并根据试验总结分析了SIPs的抗剪性能。孙春方等^[21]选取聚甲基丙烯酸酯亚胺泡沫(PMI)为芯材,铝板为面材,组成类似于SIPs结构的夹芯板材,对其力学性能进行了试验研究。

国内外学者均对SIPs的结构性能和保温性能有所探讨,但对SIPs材料基本受力性能的研究,在国内却鲜有涉及,而这些性能往往是结构受力性能的研究基础。在实际应用中由于不同保温要求而产生的芯材厚度的差异将影响材料的整体力学性能,因此,材料厚度与受力性能之间的关系就显得尤为重要。EPS作为常用的有机保温材料,已有学者对其力学性能等方面进行了试验研究^[22-24],为便于进行性能方面的对比,本研究采用EPS为芯材,并以平整度好、不易产生板面翘曲的OSB板为面板,重点研究厚度对于该体系SIPs中EPS芯材的抗拉、压、双剪切性能的影响规律。

1 材料及试件设计

试件由面材、芯材及黏结胶3部分组成。其中,面材使用湖北宝源木业有限公司生产的12 mm厚OSB定向刨花板,板长度方向静曲强度28 MPa,宽度方向静曲强度15 MPa,内结合强度0.45 MPa;芯材使用河南新东风保温材料制品有限公司生产的50、100、150 mm 3种厚度EPS板,密度18 kg/m³;黏结胶使用河北三联过滤器材有限公司生产的PU胶,黏结强度较大,在进行抗拉及双剪切试验时,可保证所有试件不会在黏贴面破坏。

抗压、抗拉与双剪切试验分别依据BS EN 1607-1997^[25]、BS EN 826-1996^[26]、BS EN 12090-1997^[27]中的相关规定进行,试件编号、尺寸及数量见表1。

表1 试件编号、尺寸及数量

编号		ET25	ET50	ET75
抗拉	尺寸/mm	100×100×25	100×100×50	100×100×75
	数量/个	3	3	3
编号		EC50	EC100	EC150
抗压	尺寸/mm	200×200×50	200×200×100	200×200×150
	数量/个	3	3	3
编号		ES50	ES100	ES150
双剪切	尺寸/mm	200×100×50	200×100×100	200×100×150
	数量/个	6	6	6

注:编号中E代表EPS,T代表拉(Tensile),C代表压(Compression),S代表剪切(Shear),阿拉伯数字代表芯材厚度,单位mm,其中,2个双剪切试件组成一个试件组。

2 试验方法

2.1 加载设备及加载速度

试验加载设备为微机控制万能试验机,加载速度为3 mm/min。

2.2 加载方案及数据采集

1) 抗拉试验依据BS EN 1607-1997^[25]中相关规定进行。用PU胶在试件上下表面各粘贴一块100 mm×100 mm×10 mm带拉杆的钢片,拉杆位于钢片几何中心位置,试验通过电脑控制匀速加载,至芯

材被拉断后,试验结束。

2) 抗压试验依据 BS EN 826-1996^[26] 中相关规定进行。在试件上下表面各放置一块 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的钢片,并在钢片几何中心位置施加点荷载,试验通过电脑控制匀速加载,至芯材压缩变形超过 50% 后,试验结束。

抗拉和抗压试验中,钢片厚度 10 mm,在其几何中心施加点荷载时基本不产生翘曲变形,从而将荷载均匀传递到试件上下表面,使拉、压试件截面应力均匀分布。

3) 双剪切试验依据 BS EN 12090-1997^[27] 中相关规定进行。试验机上需增加如图 1 所示的双剪切试验辅助底座。该底座由导轨和两侧 L 形钢板组成,钢板竖面和底面预先穿好螺栓孔,竖面孔的位置与双剪切试件两端木板上孔的位置一致,底面孔的位置与导轨导槽位置一致。首先,将导轨固定在万能试验机上,两侧 L 形钢板底面通过高强螺栓固定在导轨上;螺栓未拧紧前,钢板可在导轨内任意滑动,以根据试件尺寸调整钢板间距;间距确定后,将试件放入钢板间,用高强螺栓固定。至此,准备工作完成。试验开始后,试验机提拉试件中部的 T 形板,芯材破坏,试验结束。



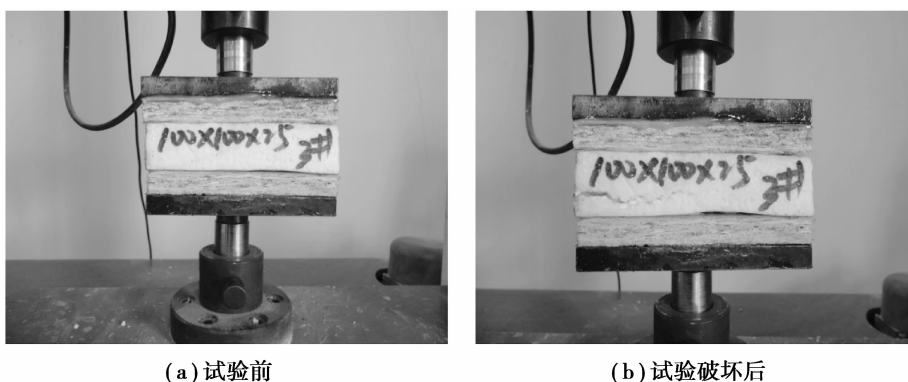
图 1 双剪切底座示意图

荷载值以及相应的变形值由电脑采集完成。由于 OSB 板变形相对较小可忽略不计,故只考虑芯材变形。

3 试验结果

3.1 破坏形态

1) 抗拉试验破坏前后形态对比见图 2。开始加载后,芯材逐渐产生微小的拉伸变形,伴随有内部空腔结构破坏的声音。当荷载达到极限时,芯材中部一角突然开裂,荷载骤然降低,整个试件从中部开裂点被整体撕开,试件破坏。



(a) 试验前

(b) 试验破坏后

图 2 抗拉试验前后形态对比

2) 抗压试验破坏前后形态对比见图 3。开始加载后,芯材逐渐产生明显的压缩变形,伴随有内部空腔结构破坏的声音。按预先规定,当压缩变形超过 50% 后,停止加载,试验结束。卸载后,试件未回弹到初始厚

度。整个加压过程中,试件纵向产生显著变形,横向变形不明显。

3)双剪切试验破坏前后形态对比见图4。开始加载后,试件从中部,即与T形板粘贴端逐渐被提起。由于试件另两端固定在L形钢板上,则整个试件从中部开始产生翻转趋势。随着荷载增大,芯材与T形板粘贴处上方,以及固定在钢板上另两端的下方首先产生开裂,随后试件沿裂缝被剪断,荷载达到峰值,T形板被从试件中部提出,试件破坏,试验结束。

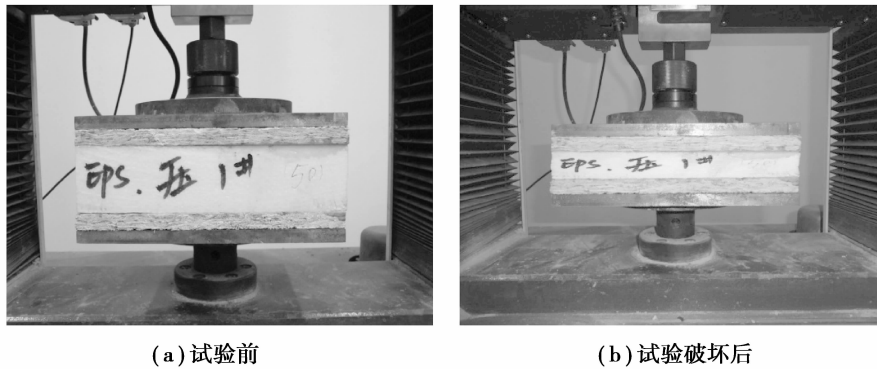


图3 抗压试验前后形态对比

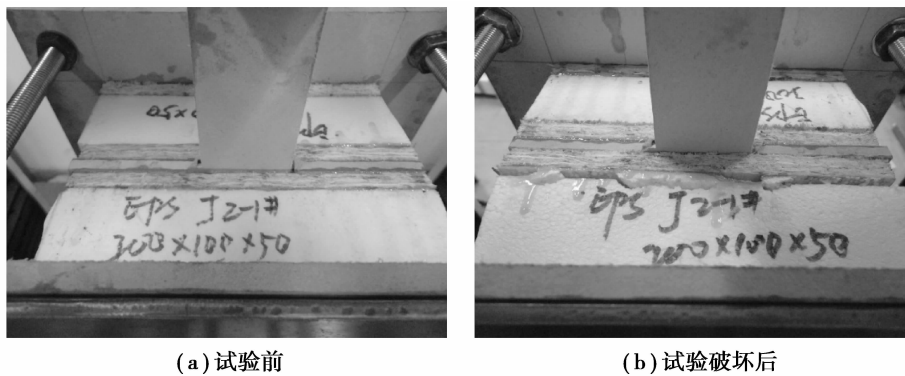


图4 双剪切试验前后形态对比

3.2 应力-应变曲线及弹性模量

应力-应变曲线能够完整、清晰地反映试件各受力阶段的变形特点及破坏过程,并且包含了重要的力学性能指标,是结构与构件设计以及非线性分析所必需的材料物理条件。SIPs中EPS芯材的抗拉、抗压和双剪切的应力-应变曲线如图5、图6、图7所示。弹性模量是工程材料重要的性能参数,是反映材料抵抗弹性变形能力的指标。

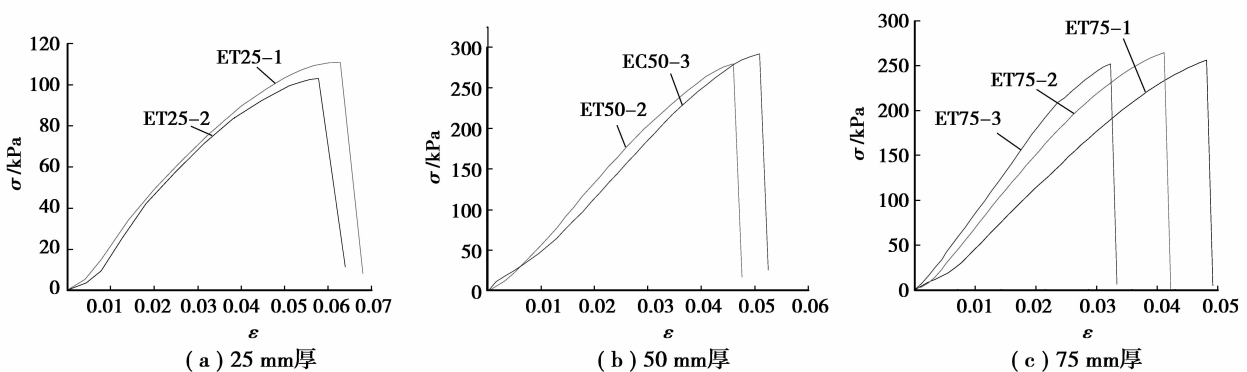


图5 抗拉试验应力-应变曲线

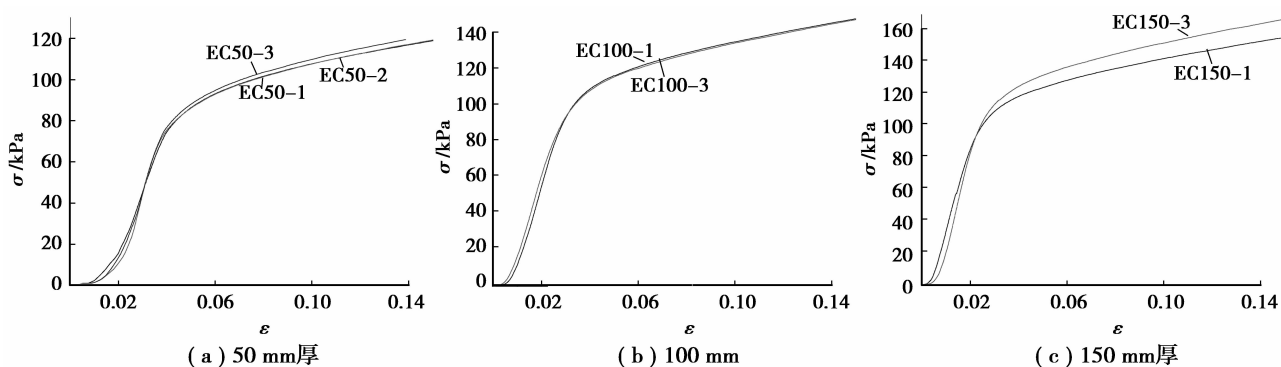


图 6 抗压试验应力-应变曲线

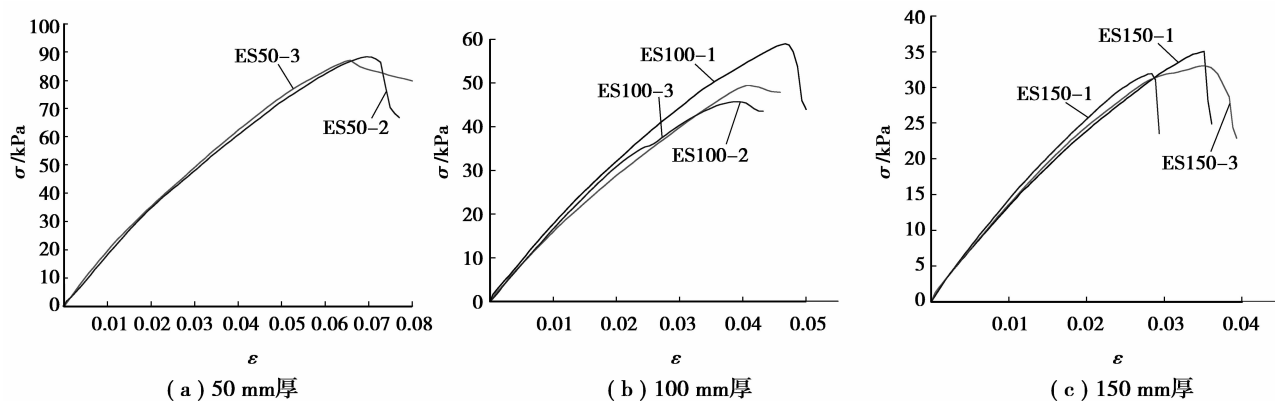


图 7 双剪切试验应力-应变曲线

各试件的破坏应力、应变及弹性模量见表 2。

表 2 破坏应力及应变

		编号	ET25	ET50	ET75
抗拉	平均 σ /kPa		268.75	286.04	258.15
	应变 ϵ_m		0.058	0.049	0.040
	弹性模量 E /MPa		7.78	7.15	8.03
		编号	EC50	EC100	EC150
抗压	$\epsilon_{0.1}$ 时 σ /kPa		108.58	136.13	147.4
	压缩模量 K /MPa		4.11	4.83	5.69
		编号	ES50	ES100	ES150
双剪切	平均 σ /kPa		87.73	51.43	33.32
	应变 ϵ_m		0.068	0.042	0.033
		剪切模量 G /MPa	1.30	1.22	1.02

4 分析与讨论

1) 由图 5 可知, 试件受拉破坏为脆性破坏, 一旦开裂, 强度随即丧失, 抗拉强度曲线有一定离散性, 破坏前, 应力-应变成线性关系。由表 2 可见, 极限应变随试件厚度的增加而减小, 应力值均大于 100 kPa, 满足技术规程要求^[28], 材料弹性模量与文献^[29]的研究结果较为吻合。分析可得, 芯材的抗拉强度与厚度无明显相关关系。

2) 由图 6 可知, 50、100、150 mm 厚芯材试件分别约在 $\epsilon_{0.04}$ 、 $\epsilon_{0.03}$ 、 $\epsilon_{0.025}$ (下标代表应变值) 之前有一段很好的弹性阶段, 该阶段应力值增长较快, 应变值增长较缓, 其压缩模量稳定; 当应变值超过以上数值之后, 应力值增长放缓, 应变值增长加快, 出现一个类屈服阶段; 这与单纯 EPS 受压过程的应变特征类似^[22-23]。分析原因: 在初始阶段, EPS 内部空腔结构较为完整均匀, 抵抗变形的能力较强, 应变值增长较缓慢; 随着荷载增大, 空腔结构逐步被破坏, 材料内部孔隙被迅速挤压密实, 应变值增长也随之加快。同时, 类屈服点(弹性阶段向类屈服阶段渐变)的 ϵ 值随着芯材厚度的增加而减小。

由表 2 得, $\epsilon_{0.1}$ 时的应力值与技术规程的要求相一致^[28]。分析可得, 随着试件芯材厚度增加, $\epsilon_{0.1}$ 时强度值也随之增大, 则厚度的增加会对芯材抗压强度有一定加强作用。

此外, 在之前学者单纯对 EPS 性能的研究中, 熊志远等^[22]的研究表明, 密度为 20 kg/m³ 的 EPS 试件, 在 $\epsilon_{0.05}$ 时, 抗压强度为 77.6 kPa。洪显诚等^[24]的研究表明, 50 mm×50 mm×50 mm 的试件在 $\epsilon_{0.05}$ 时, EPS 的抗压强度为 92 kPa。刘磊^[29]通过 10 mm/min 和 30 mm/min 两种速率, 对密度为 20 kg/m³、尺寸为 50 mm×50 mm×50 mm 的试件进行加载发现, $\epsilon_{0.05}$ 时的抗压强度分别为 83.5 kPa 和 94.5 kPa。本试验所采用 EPS 的密度为 18 kg/m³, 尺寸为 100 mm×100 mm×50 mm, 加载速率为 3mm/min, 具有一定可比性。在 $\epsilon_{0.05}$ 时, 试件的抗压强度为 83.9 kPa, 小于 100 kPa, 与其他学者所得抗压强度相近。

3) 依据 BS EN 12090-1997^[27], 本试验并非测定纯剪切行为, 而是测定在试件主要表面施加反向力时的影响, 试件破坏时会同时受到剪切应力和拉应力的作用。该受力模式能够更准确地表征材料作为墙体和楼板等构件时表面的应力分布情况。

由图 7 可知, 双剪切破坏形式接近于脆性破坏。当试件在一处开裂, 抗剪强度随即丧失。应力-应变曲线有一定离散性。

由表 2 可见, 随着芯材厚度增加, 极限应力随之减小, 应变随之减小, 两者变化均非线性变化。由此得出结论, 厚度的增加对芯材的抗剪强度有一定减弱作用, 相应的应变随试件厚度的增加而减小。

试件在整个双剪切过程中, 同时经历了一个以底座钢板端为支点、以 T 形板为受力点、以试件厚度为力臂长度的受弯过程。随着芯材厚度的增加, 试件受弯时的力臂相应增长。力臂长度为芯材厚度加两层面板厚度, 受力大小为破坏应力乘以试件截面积(0.02 m²), 由此得到各种厚度试件在破坏时所受的弯矩值, 见表 3。

表 3 双剪切试件破坏弯矩

编号	ES50	ES100	ES150
破坏应力 σ /kPa	87.73	51.43	33.32
截面积 s /m ²	0.02	0.02	0.02
力臂长度 l /m	0.074	0.124	0.174
破坏弯矩 M /(N·m)	129.84	127.55	115.95

由表 3 可见, 试件在双剪切破坏时所受的弯矩没有明显的变化。因此, 不同厚 SIPs 中 EPS 芯材双剪切破坏时所受的弯矩基本相同, 极限应力与厚度成反比例关系。

5 结 语

对 SIPs 中 EPS 芯材的抗拉、抗压、双剪切力学性能进行了试验研究, 得到以下结论:

- 1) 厚度对 SIPs 中 EPS 芯材的抗拉强度没有显著影响, 相应的极限应变随厚度的增加而减小;
- 2) 厚度的增加对 SIPs 中 EPS 芯材的抗压强度有一定加强作用;
- 3) SIPs 中 EPS 芯材的受压过程与单纯 EPS 材料受压过程相类似, 且随着厚度的增大, 材料类屈服点的应变值相应减小;
- 4) 厚度的增加对 SIPs 中 EPS 芯材的抗剪强度有一定减弱作用, 相应的极限应变随厚度的增加而减小, 且不同厚度试件双剪切破坏时所受的弯矩基本相同, 破坏弯矩为 115~130 N·m。

本试验主要研究了 SIPs 中 EPS 芯材沿材料叠加方向(即面材-芯材-面材)的力学性能。实际应用中, 可根据受力特点, 将该类 SIPs 用作楼板、地板、屋面等构件。此外, 若考虑将 SIPs 应用于墙体、柱子等构件, 其主要受力则沿垂直于材料叠加方向(即该方向的截面为面材-芯材-面材), 蒙皮效应的影响尚需进一步的试验研究。

参考文献:

- [1] NAHB Research Center. Prescriptive method for connecting SIP roofs to concrete wall systems[R]. PATH, Washington, DC, USA, 2008.
- [2] NAHB Research Center, Building Works. Prescriptive method for SIP wall systems in residential construction[R]. PATH, Washington, DC, USA, 2007.
- [3] Edward L Keith. APA report T2006P-33 standardization testing of structural insulated panels (SIPs) for the structural insulated panel association, gig harbor, Washington [R]. APA-The Engineered Wood Association, Tacoma, WA, USA, 2006.
- [4] PRS-610.1, Standard for performance-rated structural insulated panels in wall applications[S]. American National Standards Institute, USA, 2008.
- [5] Thomas W H. Bending-punching shear interaction in an oriented strand board[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(4): 341-348.
- [6] Jones S N, Fonseca F S. Capacity of oriented strand board shear walls with overdriven sheathing nails[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(7): 898-907.
- [7] Thomas W H. Concentrated load capacity and stiffness of oriented strand board; calculation versus test[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(7): 908-912.
- [8] Aremo B, Adeoye M O. Development of a roofing material from polyethylene through the Use of additives[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20(8): 516-520.
- [9] Yang J, Li Z, Du Q. An experimental study on material and structural properties of structural insulated panels (SIPs)[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, (147): 127-131.
- [10] Mullens M A, Mohammed A. Structural insulated panels: impact on the residential construction process[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2006, 132(7): 786-794.
- [11] Kermani A, Hairstans R. Racking performance of structural insulated panels[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(11): 1806-1811.
- [12] Vaidya A, Uddin N, Vadiya U. Structural characterization of composite structural insulated panels for exterior wall applications[J]. Journal of Composites for Construction, 2010, 14(4): 464-469.
- [13] Mhhammed A M, Uddin N. Experimental and analytical study of composite structural insulated floor panels [C] // Proceedings of 12th Biennial International Conference on Engineering, Science, Construction and Operations in Challenging Environments, March 14-17, 2010, Honolulu, Hawaii. [S. l.]: Earth and Space, 2010: 517-530.
- [14] Rantala J, Leivo V. Moisture design of slab-on-ground structures in Finland[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2004, 9(4): 202-206.
- [15] 王洪欣, 查晓雄, 宋瑞强. 集成房屋的抗火性能及不同板材对其抗火性能的影响[J]. 工业建筑, 2009, 39(5): 106-110.
WANG Hongxin, ZHA Xiaoxiong, SONG Ruiqiang. Fire resistance performance of modular house and the effect of different sandwich panels[J]. Industrial Construction, 2009, 39(5): 106-110.
- [16] 宋新武, 查晓雄. 建筑用绝热金属面夹芯板受火时隔热性能研究[J]. 工业建筑, 2011, 41(3): 29-35.
SONG Xinwu, ZHA Xiaoxiong. Study on the insulation performance of metal face sandwich panels under fire[J]. Industrial Construction, 2011, 41(3): 29-35.

- [17] 秦培成,查晓雄,于航.挤塑材料本构关系及其在夹芯板中的应用[J].建筑材料学报,2008,11(2):167-171.
QIN Peicheng,ZHA Xiaoxiong,YU Hang.Study on constitutive relationship model of plastic extrusion foam material and its application in sandwich panels[J].Journal of Building Materials,2008,11(2):167-171.
- [18] 秦培成,查晓雄,于航.聚氨酯硬质泡沫材料本构研究及其在夹芯板中的应用[J].工业建筑,2008,38(4):77-81.
QIN Peicheng,ZHA Xiaoxiong,YU Hang.Study on polyurethane foam material constitutive relation and its application in sandwich panels[J].Industrial Construction,2008,38(4):77-81.
- [19] 宋新武,查晓雄.建筑用绝热金属面夹芯板抗弯承载力的试验研究[J].工业建筑,2011,40(3):9-14.
SONG Xinwu,ZHA Xiaoxiong.Experimental study on the bending capacity of metal surface insulating sandwich panels[J].Industrial Construction,2011,40(3):9-14.
- [20] 严帅,刘伟庆,陆伟东,等.SIP板式结构住宅体系[J].新型建筑材料,2010(8):35-39.
YAN Shuai,LIU Weiqin,LU Weidong,et al.Study on SIP slab structure residential system[J].New Building Materials,2010(8):35-39.
- [21] 孙春方,薛元德,李文晓.铝面板PMI泡沫芯夹层材料力学性能研究[J].建筑材料学报,2007,10(3):364-368.
SUN Chunfang,XUE Yuande,LI Wenxiao.Mechanical properties of aluminium faces PMI foam core sandwich materials[J].Journal of Building Materials,2007,10(3):364-368.
- [22] 熊志远,张俊彦,毛快.密度和应变率对聚苯乙烯泡沫(EPS)准静态压缩力学行为的影响[J].材料科学与工程学报,2007,25(4):606-608.
XIONG Zhiyuan,ZHANG Junyan,MAO Kuai.Effects of density and strain rate on quas-static compressive behavior of EPS[J].Journal of Materials Science and Engineering,2007,25(4):606-608.
- [23] 伊哈卜,谢永利,赵丽娅.聚苯乙烯泡沫塑料减荷力学性能试验[J].长安大学学报:自然科学版,2010,30(3):18-23.
EHAAB N,XIE Yongli,ZHAO Liya.Experimental study on mechanical properties of expanded polystyrene (EPS) in reducing loads[J].Journal of Chang'an University:Natural Science Edition,2010,30(3):18-23.
- [24] 洪显诚,杨航宇,朱赞凌,等.EPS材料在桥头软基处理中的试验研究[J].桥梁建设,2001(4):5-7.
HONG Xiancheng,YANG Hangyu,ZHU Zanling,et al.Test study of EPS in the treatment of soft ground clay behind the abutment of bridge[J].Bridge Construction,2001(4):5-7.
- [25] BS EN 1607-1997,Thermal insulating products for building applications-determination of tensile strength perpendicular to faces[S].British Standards Institute,UK,1997.
- [26] BS EN 826-1996,Thermal insulating products for building applications-determination of compression behavior[S].British Standards Institute,UK,1996.
- [27] BS EN 12090-1997,Thermal insulating products for building applications-determination of shear behavior[S].British Standards Institute,UK,1997.
- [28] 中华人民共和国建设部.JGJ 144-2004 外墙外保温工程技术规程[S].北京:中国建筑科学研究院,2005.
- [29] 刘磊.EPS夹心墙的保温性能和力学性能研究[D].荆州:长江大学,2011.

(编辑 王维朗)