

# 严寒地区开孔龙骨复合墙体热工性能试验研究

徐立新<sup>1,2</sup>, 魏顺利<sup>1</sup>, 敖斌<sup>3</sup>, 杨志坚<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 国网内蒙古东部电力有限公司, 内蒙古 呼和浩特 001020; 3. 安徽华电工程咨询设计有限公司, 安徽 合肥 230022)

**摘要** 目的 研究龙骨腹板开孔对开孔龙骨复合墙体热工性能的影响, 以便为其在我国严寒地区使用时提供设计参考. 方法 通过标定热箱法对其进行试验, 测得墙体的传热系数  $K$ , 研究龙骨厚度、腹板开孔参数及龙骨间距对开孔龙骨复合墙体保温性能的影响. 结果 建议在实际工程中, 龙骨腹板高度可根据实际需要进行取值, 开孔排数取 5~7 排, 开孔长度取为 70~80 mm, 开孔横向间距取为 6~8 mm, 龙骨厚度取为 1 mm, 龙骨间距取为 600 mm. 结论 龙骨腹板开孔可有效减小热桥效应, 提高开孔龙骨复合墙体的保温性能.

**关键词** 开孔龙骨复合墙体; 热工性能; 传热系数; 热桥效应; 热量传递路径

中图分类号 TU352.59

文献标志码 A

## Experiment on Thermal Performance of Slotted Light Steel-Framed Composite Walls in Cold Areas

XU Lixin<sup>1,2</sup>, WEI Shunli<sup>1</sup>, AO Bin<sup>3</sup>, YANG Zhijian<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. State Grid East Inner Mongolia Electric Power Supply Co. Ltd., Hohhot, China, 010020; 3. Anhui Huadian Engineering Consultation & Design Co. Ltd., Hefei, China, 230022)

**Abstract:** In order to study the influence of the web-perforated on the thermal performance of slotted light steel-framed composite wall, so as to provide a design reference for its use in cold regions of China. The heat transfer coefficient  $K$  of the wall was measured by calibrating the hot box method, and the effects of stud metal thickness, perforated parameters of the stud web and stud spacing on thermal insulation performance of slotted light steel-framed composite wall were studied. The relationship between the wall heat transfer coefficient and each parameter is obtained through analysis, and reasonable suggestions are given. It is recommended that in actual engineering, the web height of stud can be determined according to actual needs, rows of slots are 5~7 rows, the length of slots is 70~80 mm, and the distance between slots in the transverse direction is 6~8 mm, the stud metal thickness is 1 mm and the stud spacing is 600 mm. Web-

收稿日期: 2020-03-08

基金项目: “十三五”国家重点研发项目(2017YFC0703807)

作者简介: 徐立新(1966—), 男, 高级工程师, 主要从事装配式钢结构建筑等方面研究.

perforated can effectively reduce the thermal bridge effect and improve the thermal insulation performance of slotted light steel-framed composite wall.

**Key words:** slotted light steel-framed composite wall; thermal performance; heat transfer coefficient; thermal bridge effect; heat transfer path

伴随着我国经济进入高质量发展阶段,我国的能源短缺问题也变得越来越严重,能源消耗中高达 20% 是用于建筑物的运营<sup>[1]</sup>. 建筑物中能量损失主要是通过外墙围护结构,因此有必要在建筑物建造过程中使用高热阻的墙体<sup>[2]</sup>. 开孔龙骨复合墙体作为一种新型轻质保温墙体,因其具有装配化程度高、节能环保及保温材料无机化等优点被广泛应用建筑物中. 特别是我国严寒地区,为保证建筑物居住的舒适性,往往需要采取许多保温措施,故而保温墙体在严寒地区更是备受青睐.

近年来,国内外学者对腹板开孔型轻钢龙骨复合墙体的热工性能展开一系列研究. M. Salonvaara 等<sup>[3]</sup>通过标定热箱法对腹板开孔轻钢龙骨墙体的热工性能进行了研究,结果表明腹板开孔有效降低了热桥效应,增大了墙体的隔热性能. J. Kosny 等<sup>[4-5]</sup>介绍了分区法计算轻钢龙骨墙体热阻,并计算分析了龙骨比重对墙体热阻的影响,研究表明龙骨比重越大,墙体热桥效应愈发严重,墙体保温性能越差. S. Lassue 等<sup>[6]</sup>在对轻钢龙骨复合墙体进行热箱试验时,通过红外测温仪实时监测墙体热桥处温度,并与有限元对比分析,提出新的测量热桥处热量损失方法. Marco 等<sup>[7]</sup>采用试验与数值模拟结合的方法研究了螺栓对轻钢龙骨墙体钢框架内部保温系统的影响. 宋力等<sup>[8-10]</sup>对腹板开孔轻钢龙骨墙体的龙骨截面参数、开孔参数、窗墙面积比等因素进行有限元分析与试验研究,并结合墙体力学性能,提出了合理的开孔参数及龙骨间距,进而提出腹板开孔轻钢龙骨墙体传热系数简化计算公式. 姜伟等<sup>[11]</sup>对轻钢龙骨复合墙体进行数值分析及现场测试,研究

表明轻钢龙骨存在会导致墙体传热系数增大. 武胜等<sup>[12-14]</sup>采用热箱电偶测温方法对带保温层开孔龙骨复合墙体进行了试验研究,并研发了新型 HF1、HF2 型轻钢龙骨,对腹板开孔 HF1、HF2 型轻钢龙骨复合墙体进行了保温以及节能设计研究,结果表明腹板开孔可有效提高墙体的保温性能. 陈鸣<sup>[15]</sup>采用试验与有限元模拟结合对轻钢龙骨混凝土组合外挂墙板进行热工性能研究,分析了组合墙板在防护热箱试验下的温度分布规律. 刘振岐<sup>[16]</sup>改龙骨截面形状 C 型为 S 型,采用试验与有限元结合的方法,对装配式 S 型轻钢龙骨保温复合墙板进行保温及抗弯性能研究.

目前所研究的开孔龙骨复合墙体均是以石膏板、OSB 板等板材为覆面板,而以纤维水泥压力板 (FCP 板) 为覆面板的墙体研究较少. 基于此,笔者通过标定热箱法对面板采用 FCP 板的开孔龙骨复合墙体进行试验,改变腹板开孔参数、龙骨厚度及龙骨间距对其保温性能进行研究,研究表明龙骨腹板开孔可有效降低热桥效应,确定了龙骨腹板合理开孔参数及竖龙骨布置方式,为实际工程提供参考.

## 1 试验

### 1.1 试件设计

试验共设计了 11 个试件,具体参数见表 1. 根据前期有限元分析研究,龙骨腹板开孔宽度均取为 2 mm、开孔纵向间距均取为 20 mm. 为减小开孔端部处应力集中,在端部作倒圆角处理. 天地龙骨与竖龙骨腹板各开孔参数相同,龙骨厚度相同. 试件长宽为 1 450 mm × 1 450 mm,试件的加工制作在工厂完成.

表 1 试件参数

Table 1 Specimen parameters

试件编号	龙骨腹板高度 $H$ /mm	龙骨厚度/mm	开孔排数	开孔长度/mm	开孔横向间距/mm	龙骨间距/mm
TFCP-1	150	2.0	7	70	8	600
TFCP-2	150	1.5	7	70	8	600
TFCP-3	150	1.0	7	70	8	600
TFCP-4	150	1.0	7	50	8	600
TFCP-5	150	1.0	7	90	8	600
TFCP-6	150	1.0	7	70	6	600
TFCP-7	150	1.0	7	70	10	600
TFCP-8	150	1.0	7	70	8	400
TFCP-9	150	1.0	不开孔	—	—	600
TFCP-10	100	1.0	4	70	8	600
TFCP-11	200	1.0	9	70	8	600

取竖龙骨腹板之间距离为龙骨间距,试件设计如图 1 所示. 龙骨腹板开孔布置如图

图 2 所示.

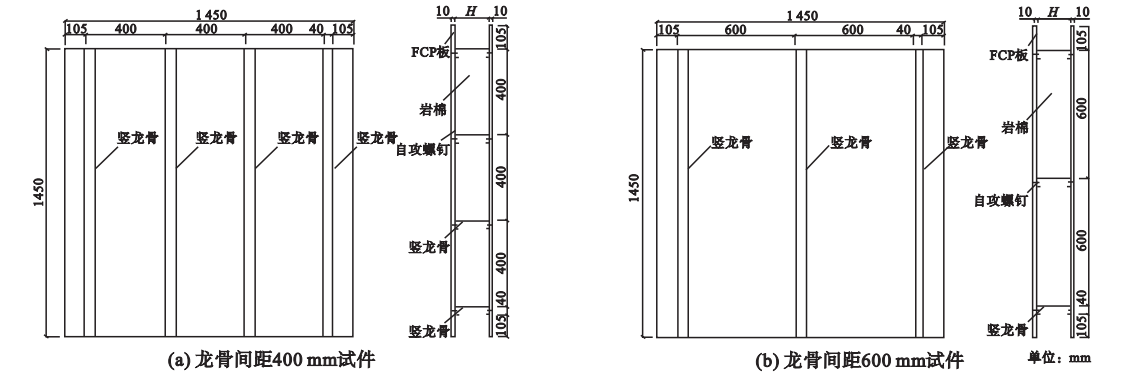


图 1 试件设计示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test piece design

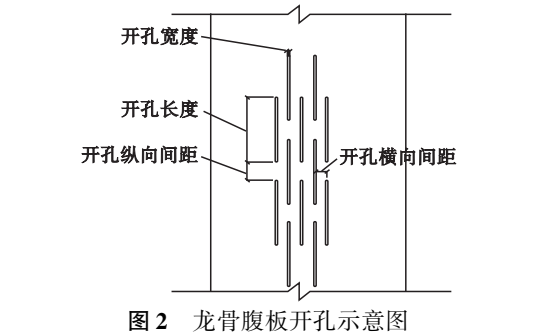


图 2 龙骨腹板开孔示意图

Fig. 2 Schematic diagram of web-perforated

因 FCP 板宽度为  $1\ 200\text{ mm} < 1\ 450\text{ mm}$ ,需在端部拼接长度为  $250\text{ mm}$  板带. 龙骨与两侧 FCP 板采用自攻钉连接,其中竖龙骨与板连接自攻钉间距为  $300\text{ mm}$ ,在端部拼接处适当加密. 天地龙骨与板连接自

攻钉间距为  $150\text{ mm}$ ,覆面板拼接如图 3 所示.

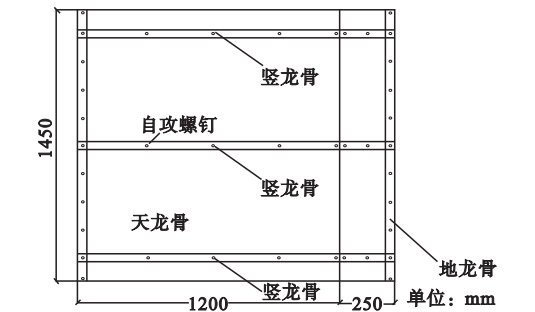


图 3 覆面板拼接示意图

Fig. 3 Schematic diagram of panel splicing

1.2 试验装置

采用标定热箱法对开孔龙骨复合墙体进行稳态传热模拟,测得墙体传热系数. 试验装

置如图4所示,设备包括自动控制系统、制冷系统和箱体;其中自动控制系统又包括操作台、电气系统、工控机、温度采集系统和温度控制执行系统.可测得试件长度×宽度×厚度为1 500 mm×1 500 mm×300 mm.

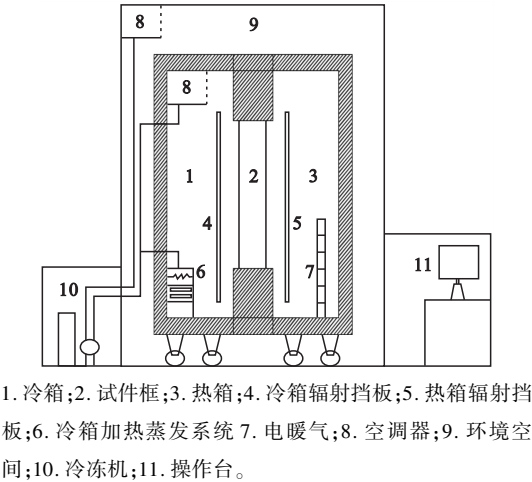


图4 检测装置  
Fig. 4 Detection device

1.3 试验原理

该装置基于一维稳态传热原理,试件一侧为冷箱,模拟冬季室外气温和气流速度;另一侧为热箱,模拟冬季采暖期室内气候条件.使试件两侧空气温度、气流速度和辐射条件保持稳定的条件下,对热箱中加热量进行测量,然后减去试件框和热箱外壁处的热损失量,除以试件面积与冷热室温差的乘积,计算得到墙体传热系数,计算式如下:

$$k = \frac{Q - M_1\Delta\theta_1 - M_2\Delta\theta_2}{A(t_b - t_c)}$$
 (1)

式中:Q为加热器加热功率,W;M<sub>1</sub>为热箱外壁热流系数,W/K;M<sub>2</sub>为试件框热流系数,

W/k;Δθ<sub>1</sub>为热箱外壁内、外表面面积加权平均温度之差,K;Δθ<sub>2</sub>为试件框热侧冷侧表面面积加权平均温度之差,K;A为试件面积,m<sup>2</sup>;t<sub>b</sub>为热箱空气平均温度,℃;t<sub>c</sub>为冷箱空气平均温度,℃.

1.4 设备标定

采用已知导热系数的苯板对设备进行标定试验.苯板导热系数为0.038 W/(m·K),长度×宽度×厚度为1 500 mm×1 500 mm×200 mm.经标定试验测得式(1)中M<sub>1</sub>=5.087 18,M<sub>2</sub>=0.172 708,以供计算墙体传热系数.

2 标定热箱法试验

2.1 测定内容

对墙体传热系数进行检测,以此衡量墙体的保温性能,研究墙体随龙骨腹板开孔变化的规律.试验依据《建筑外门窗保温性能分级及检测方法》(GB/T 8484—2008)及《绝热稳态传热性质的测定标定和防护热箱法》(GB/T 13475—2008)中相关规定进行<sup>[17-18]</sup>.

该试验装置中共有105个温度传感器,分别布置于冷热室框口、冷热室内壁、冷室、热室及环境空间,用于实时监测各部分温度变化,每间隔10 s进行一次行数据记录.冷热室内分别有13个传感器粘贴在试件两侧,在粘贴温度传感器时,将其相对均匀的贴于试件两侧,采用锡箔纸胶带进行固定(见图5).测量得到加热器加热功率及冷热室平均温度,即可通过式(1)计算得到墙体传热系数.

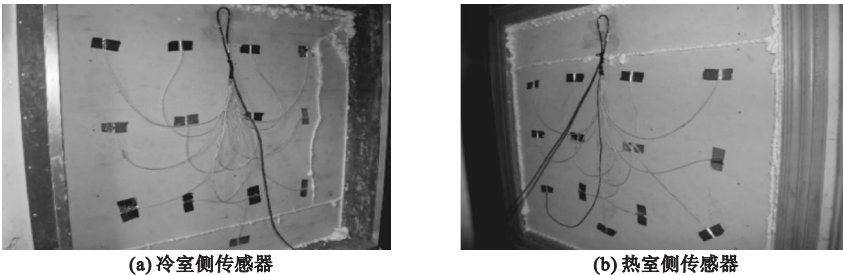


图5 温度传感器设置  
Fig. 5 Temperature sensor settings

## 2.2 试验过程

开孔龙骨复合墙体采用标定热箱法进行检测,试验过程如下.

(1)对装备完成的试件进行填充检查,对岩棉间、岩棉与龙骨间存在明显缝隙处,采用聚氨酯发泡胶进行填充处理,减小因岩棉填充不实,内部存在空气对墙体保温性能的影响.

(2)将墙体放入试件框中,试件与试件框壁间隙采用岩棉条、聚氨酯发泡胶进行填缝,并两面覆以石膏板进行密封处理.由于纤维水泥压力板易断裂,不易切割成条,且石膏板与纤维水泥压力板导热系数接近,故采用石膏板进行密封处理.板材拼接处用发泡胶密封处理.

(3)粘贴试件两侧温度传感器,贴完传感器后,将试件框推入冷、热室之间,然后对装置密封固定.关闭环境空间外侧门,保证环境空间封闭密实.

(4)启动操作台,设定热箱温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,冷箱温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,环境温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,开始墙体检测.在各部温度达到误差范围后,试件基本进入稳态阶段,最终在达到稳态阶段 $11\ 000\text{ s}$ 后,检测结束.

## 3 试验结果及分析

### 3.1 试验结果

对墙体进行检测时,外部初始环境温度会对墙体传热系数检测结果产生影响,故试验过程中对各试件进行两次检测,且两次检测时冷热室、环境空间初始温度不同,分别测得墙体传热系数,取两者平均值作为墙体的传热系数 $K$ ,以此来减小初始环境温度对 $K$ 值的影响.试验结果见表2.

### 3.2 典型试件分析

对标准试件TFCP-3试验过程分析后可知,检测开始后,试件两侧温度分别向目标温度值靠近,通过加热器与制冷系统两者平衡,将冷室温度保持在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近,热室温度保

表2 试验结果

Table 2 Test Results

试件编号	传热系数 $K/(W\cdot(m^2\cdot^{\circ}C)^{-1})$		
	试验值 1	试验值 2	平均值
TFCP-1	0.511	0.541	0.526
TFCP-2	0.471	0.513	0.492
TFCP-3	0.411	0.444	0.428
TFCP-4	0.424	0.443	0.434
TFCP-5	0.299	0.359	0.329
TFCP-6	0.404	0.444	0.424
TFCP-7	0.494	0.516	0.505
TFCP-8	0.460	0.457	0.459
TFCP-9	0.699	0.696	0.697
TFCP-10	0.639	0.637	0.638
TFCP-11	0.356	0.347	0.351

持在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近,试验过程中试件两侧温度变化曲线如图6所示.根据式(1)中 $K$ 与 $Q$ 的关系可知,两者呈正相关.在检测开始后,加热器加热功率急剧增加,热室温度开始升高,墙体传热系数也随之急剧增加,在热室温度超过目标值后,加热器加热功率急剧减小,使墙体传热系计算值出现负值情况.实时墙体传热系数变化曲线如图7所示.通过加热器加热功率调节,试件检测逐渐趋于稳态.当传热过程达到稳定后,每隔 $30\text{ min}$ 测取一次有关参数,共测6次,取6次墙体传热系数平均值为墙体的传热系数.

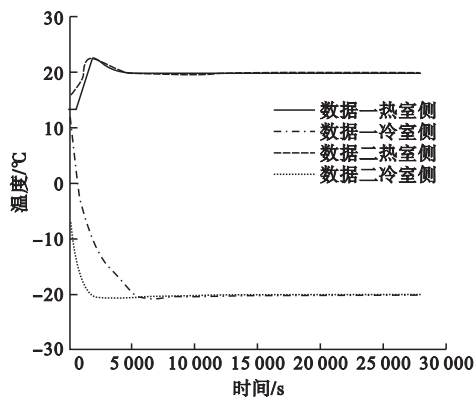


图6 试件两侧温度变化曲线

Fig. 6 Temperature change curves on both sides



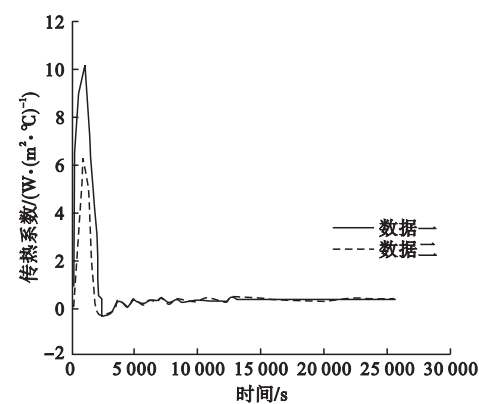


图7 传热系数随时间变化曲线

Fig.7 Curves of heat transfer coefficient with time

3.3 试验结果分析

3.3.1 龙骨厚度影响分析

墙体传热系数随龙骨厚度变化曲线如图8所示.从图中可以看出,随着龙骨厚度增加,墙体传热系数增大.分析原因为龙骨厚度增加,钢材在墙体中所占比例增大.由于钢材导热系数远大于岩棉导热系数,从龙骨部分传递热量增加,致使墙体两侧热量传递加快,龙骨厚度增加,墙体保温效果也随之变差.龙骨厚度为1 mm时相比龙骨厚度为2 mm时, $K$ 值降低18.63%,可见降低龙骨厚度可有减小热桥效应.建议在实际工程中取龙骨厚度为1 mm.

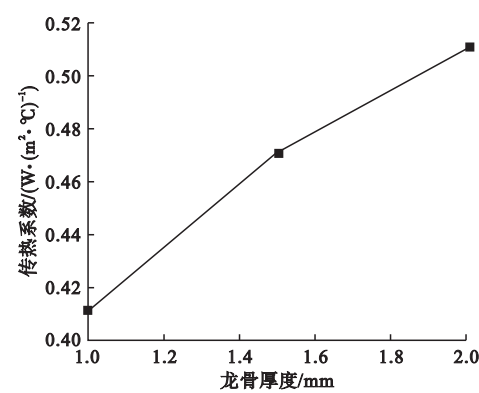


图8 龙骨厚度-传热系数曲线

Fig.8 Keel thickness heat transfer coefficient curve

3.3.2 腹板开孔参数影响分析

墙体传热系数随开孔排数变化曲线如图9所示.从图中可以看出,腹板高度150 mm、竖龙骨开设7排孔相比未开孔时,其 $K$ 值降

低38.59%,可见龙骨腹板开孔可有效改善轻钢龙骨墙体的热桥效应.由于龙骨腹板开孔墙体传热路径增加,在开孔处热量传递发生阻滞,热量散失减缓,所以墙体保温性能得以显著提升.建议实际工程中取开孔排数为5~7排.

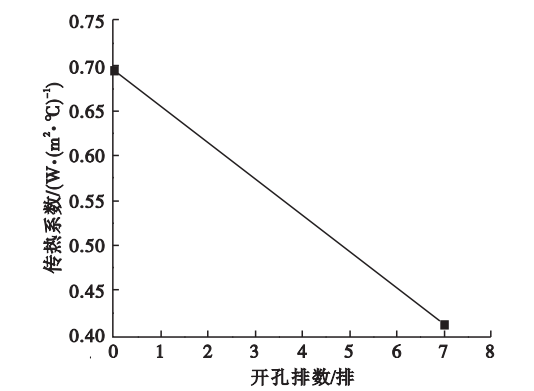


图9 开孔排数-传热系数曲线

Fig.9 Rows of slots-heat transfer coefficient curve

图10为墙体传热系数随开孔长度变化曲线,从图中可以看出,墙体传热系数降幅明显,孔长为90 mm时相较孔长为50 mm时,其 $K$ 值最大降低24.19%.孔长增加,墙体热量传递路径增长,对改善墙体保温性能有良好的效果.建议实际工程中取开孔长度为70~80 mm.

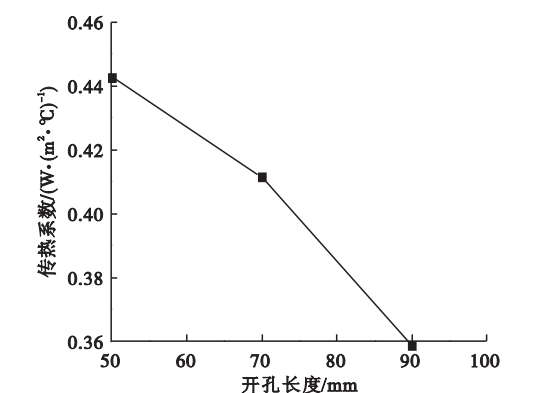


图10 开孔长度-传热系数曲线

Fig.10 Length of slots-heat transfer coefficient curve

图11为墙体传热系数随开孔横向间距变化曲线.从图中可以看出,开孔横向间距为10 mm相比开孔横向间距为6 mm时, $K$ 值

提高了 19.10%, 由于开孔横向间距增大, 孔间未开孔龙骨面积增大, 导致热桥效应增加明显, 墙体保温性能变差. 建议实际工程中取开孔横向间距为 6 ~ 8 mm.

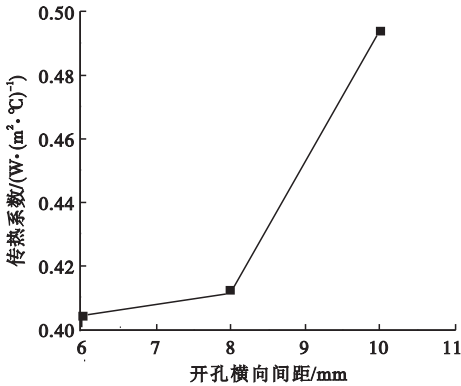


图 11 开孔横向间距 - 墙体传热系数曲线

Fig. 11 Distance between slots in the transverse direction-heat transfer coefficient curve

图 12 为墙体传热系数随龙骨腹板高度变化曲线. 从图中可以看出, 随着龙骨腹板高度增加, 龙骨腹板间填充岩棉量增加, 岩棉导热系数较低, 对墙体保温效果有明显提升作用. 龙骨腹板高度应根据实际需要, 综合考虑墙体受力性能及建筑经济效益进行取值.

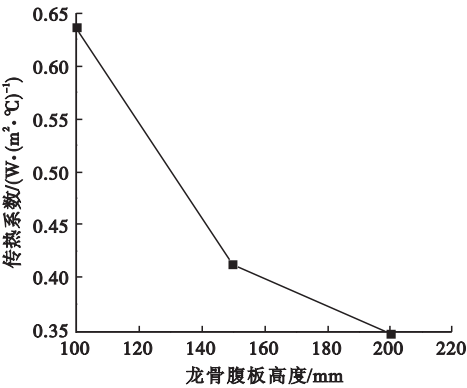


图 12 龙骨腹板高度 - 传热系数曲线

Fig. 12 Web height of stud- heat transfer coefficient

3.3.3 龙骨间距影响分析

墙体传热系数随龙骨间距变化曲线如图 13 所示. 从图中可以看出, 随龙骨间距增大, 墙体传热系数减小, 保温效果提高. 龙骨间距为 600 mm 相比龙骨间距为 400 mm 时,  $K$  值

降低了 6.75%. 因为对于一定长度的墙体, 龙骨间距的大小直接反映了墙体中龙骨所占比重, 龙骨间距越小, 墙体中龙骨热桥也就越多, 墙体的保温性能随之变差. 考虑纤维水泥压力板的模数, 以方便其与龙骨连接, 建议实际工程取龙骨间距为 600 mm.

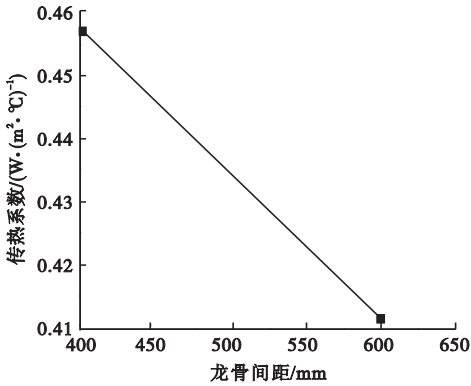


图 13 龙骨间距 - 传热系数曲线

Fig. 13 Stud spacing-heat transfer coefficient curve

4 结 论

(1) 龙骨腹板开孔可有效降低热桥效应, 从而获得良好的保温效果, 使墙体在严寒地区应用时, 可减少其他保温措施.

(2) 随孔长、龙骨腹板高度增加, 墙体传热系数减小, 保温效果提高; 随开孔横向间距增加, 墙体传热系数增大, 保温效果变差.

(3) 龙骨厚度及龙骨间距均是改变一定墙体中龙骨所占比重, 龙骨比重增加, 热量散失加快, 热桥效应加剧, 使墙体保温效果变差. 在实际应用中, 应取龙骨厚度为 1 mm, 龙骨间距为 600 mm.

参考文献

[1] 秦贝贝. 中国建筑能耗计算方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.  
(QIN Beibei. Research on China's building energy consumption statistical method [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.)

[2] ZHAI X, WANG Y, WANG X. Thermal performance of precast concrete sandwich walls with a novel hybrid connector[J]. Energy and buildings, 2018, 166: 109 - 121.

[3] SALONVAARA M, NIEMINEN J. Hygrothermal performance of a new light gauge steel-

- framed envelope system [J]. Journal of building physics, 1998, 22(2): 169–182.
- [4] KOSNY J, CHRISTIAN J E. Reducing the uncertainties associated with using the ASHRAE zone method for R-value calculations of metal frame walls[J]. ASHRAE transaction symposia, 1995, 5(3): 779–788.
- [5] SYED A M, KSONY J. Effect of framing factor on clear wall R-value for wood and steel framed walls[J]. Journal of building physics, 2006, 30(2): 163–180.
- [6] ZALEWSKI L, LASSUE S, ROUSSE D, et al. Experimental and numerical characterization of thermal bridges in prefabricated building walls [J]. Energy conversion and management, 2010, 51(12): 2869–2877.
- [7] MARCO M, EZIO Z D Z, WALTER L. Numerical simulation and sensitivity analysis of a steel framed internal insulation system[J]. Energy and buildings, 2018, 158: 1703–1710.
- [8] 宋力. 腹板开孔轻钢龙骨墙体的传热性能[J]. 低温建筑技术, 2007(2): 101–102.  
(SONG Li. Heat transfer performance of light gague steel-framed composite walls with slotted studs [J]. Low temperature architecture technology, 2007(2): 101–102.)
- [9] 王昭俊, 崔永旗, 张素梅. 轻钢龙骨腹板开孔参数对复合墙体传热的影响[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2007(1): 67–70.  
(WANG Zhaojun, CUI Yongqi, ZHANG Sumei. Analysis on perforated parameters for heat transfer of light steel-framed composite wall [J]. Journal of Harbin university of commerce (natural sciences edition), 2007(1): 67–70.)
- [10] 颜於滕. 腹板开孔轻钢龙骨围护墙体保温性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.  
(YAN Yuteng. Thermal insulation performance of light-gague slotted steel stud enclosing walls [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.)
- [11] 姜伟, 杨正宏, 牛艳芳, 等. 轻钢龙骨保温复合墙体传热系数的数值计算与分析[J]. 建设科技, 2015(11): 31–33.  
(JIANG Wei, YANG Zhenghong, NIU Yanfang, et al. Numerical calculation and analysis on heat transfer coefficient of light steel-framed composite wall [J]. Construction sciences and technology, 2015(11): 31–33.)
- [12] 武胜, 张素梅, 杨华. 腹板开孔轻钢龙骨复合墙体传热性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(4): 550–555.  
(WU Sheng, ZHANG Sumei, YANG Hua. Experimental research on thermal behavior of light gague steel-framed composite walls with slotted studs [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2010, 42(4): 550–555.)
- [13] 武胜, 韩彪. 新型腹板开孔 HF1 轻钢龙骨复合墙体传热性能研究[J]. 太原理工大学学报, 2017, 48(6): 984–990.  
(WU Sheng, HAN Biao. Heat transfer performance analysis of slotted light steel-framed HF1 composite wall [J]. Journal of Taiyuan university of technology, 2017, 48(6): 984–990.)
- [14] 吴雁冰, 武胜. HF2 轻钢龙骨复合墙体传热分析[J]. 低温建筑技术, 2017, 39(3): 127–130.  
(WU Yanbing, WU Sheng. Heat transfer analysis of HF2 light steel keel composite wall [J]. Low temperature architecture technology, 2017, 39(3): 127–130.)
- [15] 陈鸣. 轻钢龙骨混凝土组合外挂墙板热工及抗火性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.  
(CHEN Ming. Study on thermal performance and fire resistance performance of light-gague steel stud concrete composite external wall panel [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.)
- [16] 刘振岐. 装配式 S 型轻钢龙骨保温复合墙板性能研究[D]. 长春: 长春工程学院, 2020.  
(LIU Zhenqi. Research on the performance of assembled S-type light steel keel insulation composite wall panel [D]. Changchun: Changchun Institute of Technology 2020.)
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑外门窗保温性能分级及检测方法: GB/T 8484—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.  
(General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Thermal insulation performance classification and testing methods for exterior doors and windows: GB/T 8484—2008 [S]. Beijing: China Standard Press, 2009.)
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 绝热稳态传热性质的测定标定和防护热箱法: GB/T 13475—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.  
(General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Adiabatic determination of steady state heat transfer properties calibration and protective hot box method: GB/T 13475—2008 [S]. Beijing: China Standard Press, 2009.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)