腹板开孔轻钢龙骨复合墙体传热性能试验

武 胜[1,2],张素梅[1],杨 华[1]

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院,哈尔滨 150090,jackiebessie@163.com;
2. 东北林业大学 土木工程学院,哈尔滨 150040)

摘 要: 为进一步探讨优化轻钢龙骨复合墙体传热性能的有效途径,扩大其在我国寒冷地区的应用,采用热电偶测温方法进行了腹板开孔、带外保温层腹板开孔轻钢龙骨复合墙体传热性能的试验研究,重点考察了墙体的传热系数和测点温度,并与有限元建模分析所得墙体的平均传热系数和测点温度进行细致对比. 结果表明:腹板开孔可以降低轻钢龙骨墙体的热损失,从而削弱龙骨所在部位的热桥效应,显著提高墙体的保温性能. 两种试验方案的墙体传热系数分别为0.315 W/(m^2·K)、0.250 W/(m^2·K),可以满足我国寒冷地区居住建筑围护结构节能50%的传热系数限值要求.

关键词: 轻钢龙骨复合墙体;腹板开孔;传热性能试验;有限元分析
中图分类号: TU392.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2010)04-0550-06

Experimental research on thermal behavior of light gauge steel-framed composite walls with slotted studs

WU Sheng[1,2], ZHANG Su-mei[1], YANG Hua[1]

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, jackiebessie@163.com;
2. College of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Two thermal behavior experiments of light gauge steel-framed composite walls with slotted studs and with external thermal insulation layers were carried. The method of thermocouple temperature measurement was used. The heat transfer coefficients and the temperature of measured points of composite wall were deeply investigated and were compared with the FEA model results. Results show that web slotted studs can reduce the heat loss of light gauge steel-framed composite walls, thus weaken the thermal bridge effect of the location in stud part, then significantly improve the thermal insulation properties of composite walls. The composite wall heat transfer coefficient of the two test schemes are 0.315 W/(m^2·K) and 0.250 W/(m^2·K) respectively, which can meet the residential building envelope heat transfer coefficient limit value of cold areas.

Key words: light gauge steel-framed composite walls; slotted in web plate; thermal behavior experiment; finite element analysis (FEA)

轻钢龙骨住宅体系是颇具发展前景的一种新型钢结构体系,该体系在北美、日本等发达国家应用非常广泛,主要用于单层或2~3层的别墅建筑中,在我国尚处于起步阶段. 轻钢龙骨复合墙体主要由轻钢龙骨、内外墙板、岩棉复合组成,龙骨立柱两侧通常采用定向刨花板或木纤维板做外墙板,采用纸面石膏板做内墙板,内、外墙面材料采用自攻螺钉与立柱两侧翼缘固定,墙板与龙骨间形成的空腔内填充岩棉以满足复合墙体的保温性能,有时还在外墙上粘贴聚苯乙烯板等绝热材料形成外保温体系,以便进一步增强墙体的保温性能.

轻钢龙骨复合墙体由于钢龙骨的存在而使局部热量散失显著增加,致使墙体室内表面结露和

收稿日期: 2009-03-02.
基金项目: 哈尔滨市墙体材料改革与建筑节能科研项目(2005-12).
作者简介: 武 胜(1976—),男,博士,讲师;
张素梅(1963—),女,教授,博士生导师.

墙体内部冷凝,在钢龙骨处形成严重的热桥效应. 文献[1]规定在 1980 年住宅耗能水平的基础上再节能 50%,对于哈尔滨地区而言,当建筑体形系数 >0.3 时,其墙体的传热系数应控制在 0.40 W/(m^2 · K)以下,但分析表明,不做保温处理的轻钢龙骨外墙体系达不到以上要求[2],因而不能直接用于我国寒冷地区.

欧美寒冷地区国家,对轻钢龙骨住宅体系进行了系统研究. 挪威的 Engebretsen 和 Ramstad 在 1978 年设计的建筑中首先应用了腹板开孔 C 形轻钢龙骨[3],如图 1 所示,实践证明该做法可以明显增长热量沿龙骨腹板传递的导热路径,显著降低轻钢龙骨复合墙体的局部热桥效应.

图 1　腹板开孔龙骨立柱

近年来,国外学者对腹板开孔轻钢龙骨复合墙体进行了系列理论研究. 文献[4]介绍了 AHSRAE(美国空调工程师学会)的用以计算轻钢龙骨墙体热阻的方法——分区法,并且针对钢龙骨的存在而形成的温度异常影响区给出分区法的改进方法. 文献[5]针对轻钢龙骨墙体建立起改变龙骨类型、保温材料的试验数据库,试验所得墙体热阻与平行热流法等 3 种计算方法所得热阻进行了系统比较. 文献[6]采用标定热箱试验法,模拟分析了轻钢龙骨墙体三维传热作用和二维传热、传质联合作用.

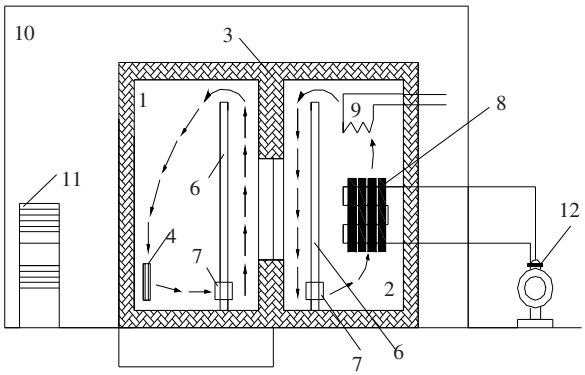
国内引进轻钢龙骨住宅体系较晚,从 2003 年开始,哈尔滨工业大学的张素梅教授及其课题组陆续对开孔轻钢龙骨复合墙体的传热和力学性能进行了系列理论研究[2,7-9].

应用哈尔滨工业大学市政环境工程学院围护结构构件综合能耗试验台,采用热电偶测温方法进行了腹板开孔、带外保温层腹板开孔轻钢龙骨复合墙体传热性能的试验研究,重点考察了墙体的平均传热系数和测点温度,并与有限元建模分析所得墙体的平均传热系数和测点温度进行了细致对比.

1　试验概况

试验采用静态热箱模拟恒定的室内、外温度,进行新型轻钢龙骨复合墙体的稳态传热模拟,并实测轻钢龙骨复合墙体所设测点的温度和热流密度,进而推算墙体的平均传热系数,从而得到轻钢龙骨复合墙体的传热性能规律.

如图 2 所示,试验台由热箱、冷箱、试件架、空气循环及测量系统、温度自动监控系统组成,可测试最大试件尺寸为:水平向 × 竖直向 × 厚度 = 2 400 mm × 2 400 mm × 400 mm.



1–热箱;2–冷箱;3–试件框;4–电暖气;5–试件;6–隔风板;7–风机;8–蒸发器;9–加热器;10–环境空间;11–空调器;12–冷冻机

图 2　围护结构综合能耗试验台示意图

该设备基于一维稳定传热原理,利用热箱模拟采暖建筑冬季室内气候条件,冷箱模拟冬季室外气候条件. 该设备可提供的恒定环境温度范围为 -30 ~ 35 ℃,控制精度为 0.1 ℃. 热箱空气温度设定范围为 18 ~ 20 ℃,温度波动幅度 ≤ 0.1 K(K 为墙体估算传热系数);热箱空气为自然对流,其相对湿度控制在 30% 左右. 冷箱空气温度设定范围为 -19 ~ -21 ℃,温度波动幅度 ≤ 0.1 K;冷箱内平均风速设定为 3.0 m/s.

根据设备的测温范围,并兼顾文献[10],确定试验设计的室内、外温度为 18 ℃、-20 ℃.

2　试件设计及测点布置

2.1　试验方案分组

如图 3 所示,方案一:腹板开孔轻钢龙骨复合墙体稳态传热试验;方案二:带苯板外保温层腹板开孔轻钢龙骨复合墙体稳态传热试验,方案二在方案一墙体室外侧石膏板上贴苯板.

2.2　试件总体设计

1) 墙体总体尺寸:如图 4 所示,取一个墙体单元的宽度(即两龙骨间距宽度)为 600 mm,试件总宽度为 1500 mm,墙体高度为 1 200 mm.

2) 龙骨尺寸:如图 5 所示,依据文献[11]的规定,兼顾轻钢龙骨承重和自承重外墙常用墙体

厚度范围,结合满足哈尔滨地区建筑节能传热系数的限值要求[1],确定本次试验轻钢龙骨腹板高度为 205 mm,龙骨的翼缘宽度、卷边宽度和截面厚度分别为 40,15,1.5 mm.

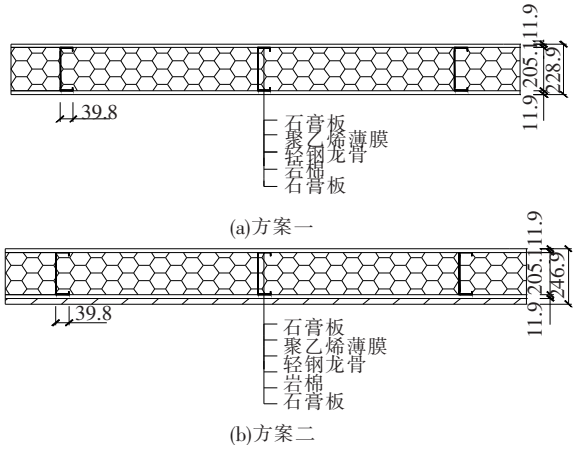


图 3 墙体构造层次剖面图(mm)

3)孔洞尺寸:依据国外工程经验,兼顾节能要求,选取开孔参数为:孔长 × 孔宽 × 孔间距长 × 孔间距宽 = 70 mm × 3 mm × 20 mm × 9 mm,并沿龙骨通长开设,实测孔洞尺寸如图 5 所示.

4)石膏板:规格通常为 3.0 m × 1.2 m,厚度取工程中较常用的 12 mm 厚纸面石膏板.

5)聚苯乙烯板:市场供应的规格通常厚度为 10 ~ 80 mm,以 10 mm 为模数,结合传热性能理论分析采用 20 mm 厚的苯板.

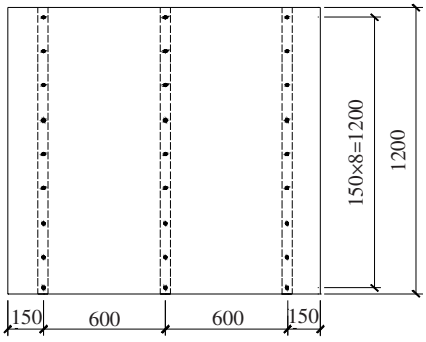


图 4 墙体试件尺寸(mm)

2.3 试验测点布置

1)墙体传热系数的测定:保证试件一维稳定传热条件下,测量电暖气发热量,减去通过热箱外壁和试件框的热损失,除以墙体面积与两侧空气温差的乘积,即可得出墙体的传热系数 K 值.

2)墙体测点温度的测定:温度由铜 - 康铜热电偶测定. 如图 6 所示,测点主要布置在墙体表面、轻钢龙骨表面及墙体中不同材料的接触处(如石膏板与龙骨交界面). 测点布置原则:为便于测试和比较,所有测点均布置于墙体高 1/2 处,并沿墙体厚度龙骨腹板传热方向集中布置测点,同时兼顾室内、外龙骨处石膏板布置测点. 龙骨是墙体热量散失主要通道,温度变化尤为剧烈,所以龙骨腹板的温度分布是本次试验测试的重点,测点布置如图 7 所示.

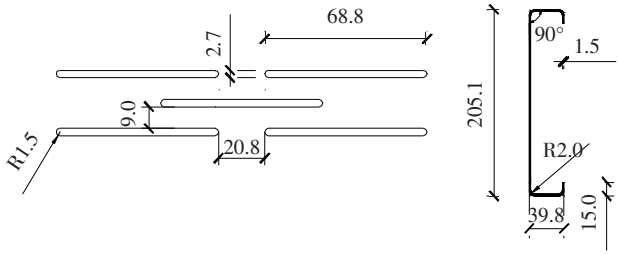


图 5 孔洞及龙骨截面实测尺寸(mm)

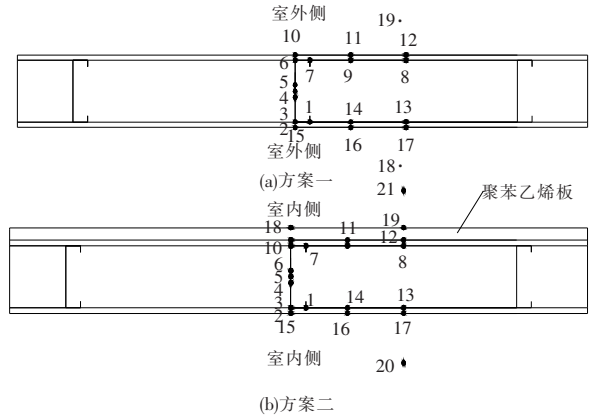


图 6 试验测点布置

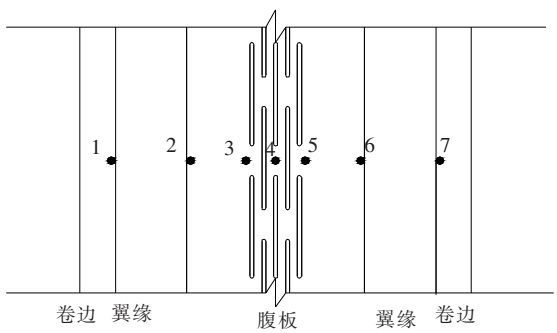


图 7 龙骨测点布置

3 试验过程

1)标定热电偶. 本次试验采用 T 型热电偶进行温度测量,共实测了 21 个热电偶的温度 - 电压对应关系,经标定,本次试验热电偶的温度与平均电压之间的关系式为

$$T = 26.84U - 0.294.$$

式中:T 为测点温度,℃;U 为平均电压,mV.

2)粘贴热电偶,并在室内侧石膏板内侧粘贴聚乙烯薄膜,作为复合墙体的防潮层.

3)固定轻钢龙骨复合墙体. 加工时特别注意了石膏板与龙骨接触面的紧密接触. 石膏板内侧热电偶固定. 铺装岩棉至墙体空腔内.

4) 将墙体安装就位. 将墙体固定至试验台试架上,墙体四周与试架的空隙用岩棉填塞密实,然后将墙体四周缝隙裱糊整齐.

5) 热电偶与测量仪器连接. 将热电偶的铜线端与数码输出电压显示仪的正极相连,将康铜线端集束放入冰、水混合物零点暖瓶,完成接线.

6) 运行试验台至稳定. 启动试验台,设定冷、热箱和环境空气温度;当冷、热箱和环境空气温度达到设定值后,监控各测点温度,使冷、热箱和环境空气温度维持稳定. 大约 4 h 后,启动电压显示仪,进行测点电压值的逐时监测输出. 如果逐时测量所得热箱和冷箱的空气平均温度变化的绝对值分别不大于 0.1 ℃和 0.3 ℃,温差逐时变化绝对值分别不大于 0.1 ℃和 0.3 ℃,且上述温度和温差变化不是单向变化,则表示传热过程已经稳定.

7) 采集试验数据. 传热过程稳定后,即可按时进行测点温度(电压)的输出,本次试验采取每隔 30 min 采集一次测点电压的方法,每个试验方案各采集 6 次试验数据.

4　试验结果分析

4.1　试验数据分析

试验方案一、二采集到的测点温度见表 1.

表 1　试验数据采集及温度转换

测点编号	方案一		方案二	
	位置	温度/℃	位置	温度/℃
1	龙骨	7.1	龙骨	10.2
2		7.6		10.5
3		4.3		7.9
4		−0.6		4.0
5		−6.6		−0.5
6		−9.9		−3.0
7		−10.7		−3.5
8	室外侧石膏板	−18.4	室外侧石膏板	−14.6
9		−18.3		−13.2
10		−16.9		−6.5
11		−18.2		−13.7
12		−18.5		−14.6
13	室内侧石膏板	17.0	室内侧石膏板	17.9
14		17.0		17.9
15		13.9		15.4
16		17.3		18.3
17		17.5		18.4
18	热箱	18.4	苯板	−17.3
19	冷箱	−18.8		−17.9
20	−	−	热箱	19.3
21	−	−	冷箱	−17.9

由于轻钢龙骨为整个墙体的热桥,并且热量集中沿龙骨腹板传递,从而可知墙体从热箱吸收热量,传入室内侧石膏板,石膏板的热量向龙骨腹板汇聚,绕腹板孔洞传递向腹板外侧,达到腹板外侧后热量流入室外侧石膏板,由龙骨、室外侧石膏板接触面向板上扩散. 由以上过程可知,温度的分布规律应为室内侧石膏板远离龙骨部位温度最高,靠近龙骨部位温度降低,室内侧龙骨翼缘点、内侧腹板至外侧腹板、外侧翼缘点温度依次降低,室外侧石膏板近龙骨部位再降低,而室外侧石膏板远离龙骨部位温度最低.

图 8 给出两方案龙骨、石膏板测点温度比较曲线. 总体来看,两试验方案测点温度变化趋势相同,但由于方案二苯板保温作用而使相应各测点温度比方案一有不同程度升高:其中对室内侧石膏板测点温度影响幅度最小,如图 8(c)所示,两方案 13 ~ 17 号测点的温度均相差 1 ℃左右;对室外侧石膏板测点温度影响幅度较大,而且离龙骨腹板热桥越近的测点温差越大,如图 8(b)所示,10 号测点位于龙骨腹板与室外侧石膏板交界处,温差达到所有测点中最大值,为 10.4 ℃,而 9、11 和 8、12 号测点温度依次降低;龙骨测点也表现为离室外侧越近温差越大,如图8(a)所示. 以上分

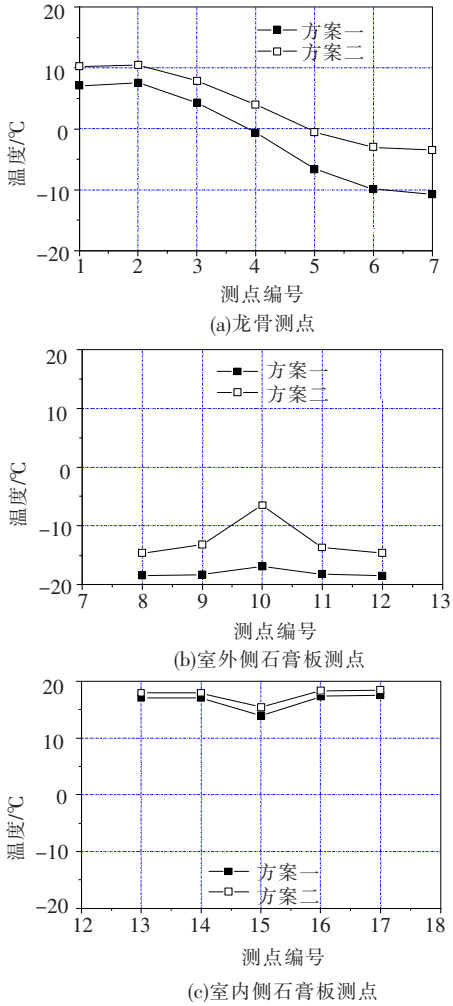


图 8　测点温度比较曲线

析说明,苯板外保温层对提高复合墙体的保温性能效果明显.

4.2 试验的有限元模拟

4.2.1 模型概述

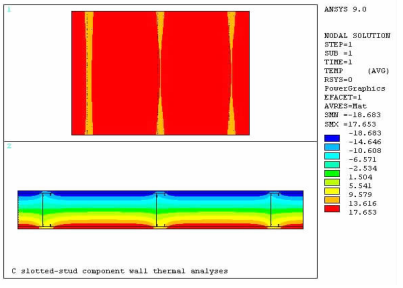
采用 ANSYS7.0 有限元程序模拟了两试验方案轻钢龙骨复合墙体的传热过程,龙骨单元采用 shell57 热壳单元,石膏板、岩棉、苯板采用 solid70 热实体单元. 根据文献[10],室内、外的对流系数分别取 8.7 W/(m^2 · K)、23.0 W/(m^2 · K). 龙骨的导热系数取 58.2 W/(m · K),岩棉、石膏板近似一维稳态导热,为求有限元模拟更接近真实,二者的导热系数取为试验实测所得热流密度、按传热学原理反推得到的数值,分别为石膏板 0.17 W/(m · K),岩棉 0.03 W/(m · K).

4.2.2 边界条件

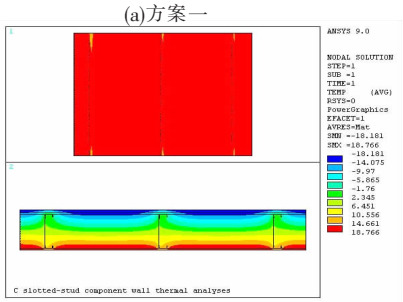
模型采用第三类边界条件,即在有限元模型中施加室内、外环境温度和室内、外的对流系数[8];在单元两端采用绝热边界.

4.2.3 有限元分析

图 9 给出两个试验方案的温度分布云图,每方案的上图为室内侧石膏板温度场,下图为墙体剖面温度场. 如 9(a)下图所示,总体而言,龙骨所在范围内岩棉温度场相对于其他位置发生了明显变化,即室内侧温度明显降低,而室外侧温度明显升高,表明龙骨的热桥效应显著,热量沿龙骨传递明显;龙骨两侧各一倍翼缘宽度区域内岩棉温度场也受龙骨影响而呈非均匀变化,此区域称为"龙骨影响区";如 9(a)上图所示,龙骨腹板开孔会使热桥效应明显减弱,龙骨中部腹板开孔处的墙体内表面高温区域明显扩大. 龙骨影响区外的岩棉温度场沿墙体厚度近似呈均匀变化,室内侧温度约为 17.7 ℃,室外侧温度为 -18.7 ℃. 如图 9(b)所示,加 20 mm 厚苯板后室内侧石膏板和龙骨腹板高温区分布面积进一步扩大,龙骨影响区内墙体内表面的温度无明显降低,表明加苯板外保温后龙骨部位墙体的热桥现象得到进一步改善.



(a)方案一



(b)方案二

图 9 温度分布云图

对比试验、有限元的墙体传热系数,如表 2 所示. 有限元墙体传热系数由墙体内、外表面热流密度的平均值与内、外表面温度平均值的温差相除近似计算. 两种方案试验、有限元所得墙体传热系数分别相差 1.9%、0.8%,吻合良好.

表 2 墙体平均传热系数对比

方案	试验 K_e / W · (m^2 · K)$^{-1}$	有限元 K_a / W · (m^2 · k)$^{-1}$	($\lvert K_e - K_a \rvert / K_e$)/%
方案一	0.315	0.321	1.9
方案二	0.250	0.248	0.8

从对腹板开孔轻钢龙骨复合墙体传热系数的分析可知,不论采用哪种方案,都会满足哈尔滨地区围护结构节能 50% 的传热系数限值要求[1].

对比试验、有限元的墙体测点温度,如表 3 所

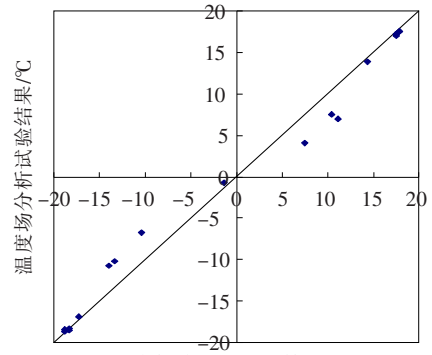
表 3 测点温度对比 ℃

测点编号	测点位置	方案一 T_e	方案一 T_a	方案一 $\lvert T_e - T_a \rvert / \Delta T$	方案二 T_e	方案二 T_a	方案二 $\lvert T_e - T_a \rvert / \Delta T$
1	龙骨	7.1	11.1	10.5%	10.2	13.8	9.5%
2		7.6	10.5	7.9%	10.5	13.4	7.6%
3		4.3	7.5	8.4%	7.9	11.0	8.2%
4		-0.6	-1.3	1.8%	4.0	4.6	1.6%
5		-6.6	-10.4	10%	-0.5	-1.9	3.7%
6		-9.9	-13.4	9.2%	-3.0	-4.1	2.9%
7		-10.7	-14.0	8.7%	-3.5	-4.6	2.9%
8	室外侧石膏板	13.9	14.3	2.8%	15.4	16.2	2.1%
9		17.3	17.8	1.3%	18.3	18.7	1.1%
10		17.5	17.9	1.1%	18.4	18.7	0.8%
11		17.0	17.5	1.3%	17.9	18.4	1.3%
12		17.0	17.5	1.3%	17.9	18.4	1.3%
13	室内侧石膏板	-18.3	-18.4	0.3%	-13.2	-14.2	2.6%
14		-18.4	-18.4	0.0%	-14.6	-15.1	1.3%
15		-16.8	-17.3	1.3%	-6.5	-6.7	0.5%
16		-18.2	-18.8	1.6%	-13.7	-14.6	2.4%
17		-18.5	-18.8	0.8%	-14.6	-15.4	2.1%
18	苯板	–	–	–	-17.9	-18.2	0.8%
19		–	–	–	-17.3	-17.6	0.8%

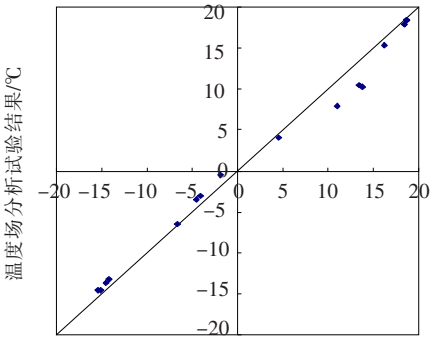
注: T_e 为试验测点温度; T_c 为有限元测点温度; ΔT 为冷热箱温差.

示. 可见,二者在内、外侧石膏板、苯板上测点温度吻合较好,温差均在 1.0 ℃以内. 而位于龙骨上的测点温度相差较大,方案一最大温差达到 10.5%、方案二最大温差为 9.5%,均发生在室内侧龙骨翼缘、卷边交线测点 1 上.

图 10 为试验、有限元测点温度的对比图. 方案一的试验、有限元龙骨测点的温度相差远大于两侧石膏板,且离翼缘越近的测点温差越大. 方案二的试验、有限元龙骨测点的温度相差远大于两侧石膏板,且室内侧石膏板温差明显高于室外侧石膏板.



(a)方案一



(b)方案二

图 10　试验、有限元温度测点曲线

由图 10 可知,二者龙骨测点温度局部差异较大,而其余位置测点温度吻合较好;试验、有限元所得墙体的传热系数吻合程度较好.

5　结　论

1)腹板开孔轻钢龙骨复合墙体试验传热系数为 0.315 W/(m^2 · K),加苯板外保温 20 mm 厚的腹板开孔轻钢龙骨复合墙体试验传热系数为 0.250 W/(m^2 · K).

2)两方案的试验、有限元所得的墙体传热系数吻合良好;测点温度总体吻合较好. 利用有限元程序进行轻钢龙骨墙体的传热性能分析简便、可靠.

3)基于试验结果并结合文献[9]可知,腹板开孔节能做法简便、经济,同时对龙骨的承载力降低可以控制在 10% 以内;与苯板外保温做法相比,腹板开孔可以明显降低墙体的造价,可以省去外贴苯板的加工工序,同时又可以减小墙体的厚度,增大室内空间,值得在哈尔滨地区推广使用.

4)推荐的轻钢龙骨节能墙体设计方案:对于腹板标准宽度为 140 mm 的龙骨墙体推荐采用腹板开孔结合 30 mm 苯板外保温做法;对于腹板标准宽度为 205,255 mm 的龙骨墙体推荐只采用腹板开孔做法. 以上做法可满足哈尔滨地区建筑围护结构节能 50% 以上的传热系数限值要求.

参考文献:

[1] 中国建筑科学研究院. JGJ 26 - 95 民用建筑节能设计标准(采暖居住建筑部分)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1996

[2] 殷大伟. 轻钢龙骨墙体传热与受弯性能分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.

[3] KOSNY J, CHRISTIAN J E. Thermal Evaluation of Several Configurations of Insulation and Structural Materials for Some Metal Stud Walls [J]. Energy and Buildings,1995,22:157 - 163.

[4] KOSNY J, CHRISTIAN J E. Reducing the uncertainties associated with using the ASHRAE zone method for R-value calculations of metal frame walls [R]. ASHRAE Transactions:Symposia. SD-95-5-3:779-788.

[5] BARBOUR C E, GOODROW J. The thermal performance of steel - framed walls [R]. ASHRAE Transactions:Symposia. SD-95-5-2:766-778.

[6] SALONVAARA M, NIEMINEN J. Hygrothermal performance of a mew light gauge steel-framed envelope System[R]. ASHRAE Transactions:Symposia. TO-98-22-2:1256 - 1262.

[7] 崔加全. 腹板开孔 C 形截面构件传热与力学性能的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2003.

[8] 贝晗. 轻钢龙骨墙体传热与轴压性能分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.

[9] 武胜. 新型冷弯构件力学性能及轻钢龙骨复合墙体传热性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学. 2008.

[10] 中华人民共和国建设部. GB 50176 - 93 民用建筑热工设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1993.

[11] 中国建筑科学研究院. JG/T 182 - 2005 低层轻型钢结构装配式住宅技术要求[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.

(**编辑**　赵丽莹)