

# 预制轻钢骨架复合保温墙体 热桥传热有限元分析

康智强<sup>1</sup>,常志宇<sup>1</sup>,夏晓东<sup>2</sup>,李继成<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168;

2. 沈阳建筑大学建筑与规划学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 研究预制轻钢骨架复合保温墙体外挂式热桥节点的传热,分析保温层厚度对热桥系数的影响。方法 通过 Therm 软件对预制轻钢骨架复合保温墙体热桥部位有限元模拟,再根据软件模拟出的传热系数计算典型外挂式热桥节点的热桥系数,模拟外挂式柱节点保温厚度分别为 50 mm、100 mm、150 mm、200 mm 的传热及热桥计算。通过与德国被动房研究所模拟的内嵌式柱热桥节点对比,验证模拟的准确性。结果 随着保温层厚度增加柱节点的传热系数减小,热桥系数减小,模拟计算后得到内嵌式柱节点热桥系数为  $0.026 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,与德国被动房研究所模拟计算结果相差 7%,验证模拟的结果准确可靠。结论 预制轻钢骨架复合保温墙体的 6 种外挂式热桥节点除外墙阴角节点外可满足无热桥设计。

**关键词** 热桥;有限元模拟;复合保温;外挂式

中图分类号 TU761.1<sup>+</sup>2

文献标志码 A

## Finite Element Analysis of Thermal Bridge Heat Transfer for Prefabricated Light Steel Frame Composite Insulation Wall

KANG Zhiqiang<sup>1</sup>, CHANG Zhiyu<sup>1</sup>, XIA Xiaodong<sup>2</sup>, LI Jicheng<sup>1</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;

2. School of Architecture and Urban Planning, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** The aim of this paper is to study the heat transfer of external thermal bridge joint of prefabricated light steel frame composite insulation wall, and analyze influence of insulation layer thickness on thermal bridge coefficient. The heat transfer process of typical external thermal bridge joints with insulation thickness of 50 mm, 100 mm, 150 mm and 200 mm for prefabricated light steel frame composite insulation wall was simulated by thermal software, and then their thermal bridge coefficients and heat transfer coefficients were calculated. The accuracy of the simulation is

收稿日期:2021-04-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0702600)

作者简介:康智强(1980—),女,副教授,博士,主要从事建筑节能及可再生能源综合利用技术等方面研究。

verified by comparing with that of the embedded column thermal bridge node simulated by German Passive House Research Institute. With the increase of the thickness of insulation layer, the heat transfer coefficient and the thermal bridge coefficient of the column joint decrease. The thermal bridge coefficient of the embedded column joint is  $0.026 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , which is 7% different from the simulation results of the German Passive House Research Institute. The simulation result is accurate and reliable. The six kinds of thermal bridge joints of prefabricated light steel frame composite thermal insulation wall can meet the requirements of non thermal bridge design except for external wall internal corner joints.

**Key words:** thermal bridge, finite element simulation, composite insulation, plug-in

围护结构中热流强度显著增大的部位,被称为热桥<sup>[1]</sup>。热桥的存在增加了墙体的局部换热,减小了墙体的平均热阻<sup>[2]</sup>,建筑中热桥主要发生在外墙转角、墙角、阳台、柱、梁等部位<sup>[3]</sup>。室内的环境受到很大影响,比如墙角处容易产生发霉现象<sup>[4-5]</sup>。围护结构内表面的温度受热桥影响,在室内部位产生结露现象,影响室内人员居住舒适度<sup>[6-7]</sup>。热桥能耗既存在于节能建筑中,也存在于传统建筑中,但在节能建筑中占到的比例更大<sup>[8]</sup>,节能性越高的建筑,热桥部位能耗所占比例就越大<sup>[9]</sup>。被动式超低能耗建筑的发展将无热桥设计作为重要技术原则之一<sup>[10]</sup>,无热桥的设计可以最大限度地阻断墙体中局部节点的热流传递,是被动式超低能耗建筑设计中至关重要的一个环节<sup>[11]</sup>。笔者对预制轻钢骨架复合保温墙体典型热桥节点保温层进行定量数值模拟,采用 Therm 软件模拟分析预制轻钢骨架复合保温墙体中女儿墙节点、外墙转角节点、梁节点、柱节点以及外墙勒脚节点在一定保温设置工况下的热桥传热,并计算热桥系数。通过对热桥节点的计算检验预制轻钢骨架复合保温外墙系统是否满足无热桥设计原则。通过与德国被动房研究所模拟的内嵌式热桥节点模拟对比,验证模拟的准确性。

## 1 预制轻钢骨架复合保温墙体

### 1.1 墙体系统基本构造

外墙系统构造如图 1 所示。外墙采用预

制轻钢骨架复合保温体系,预制墙体轻钢龙骨采用 C90 冷弯薄壁型钢,冷弯薄壁型钢组合墙体是冷弯薄壁型钢结构住宅体系的重要构件之一<sup>[12]</sup>。镀锌钢带强度等级 Q550,厚度 0.75 mm。轻钢龙骨室外侧锚固金属结构板带,并通过机械连接式断热桥锚栓锚固 150 mm 厚石墨聚苯保温板,轻钢龙骨空格间浇筑 90 厚 A 级防火轻混凝土,形成预制轻钢轻混凝土墙体,室内侧锚固 10 mm 厚纤维水泥板和 12 mm 厚石膏板,外墙外侧施以 10 mm 厚抹面胶浆复合玻纤网,并做厚抹灰系统,外墙总厚度 290 mm,墙体系统构造层参数如表 1 所示,外墙传热系数为  $0.179 \text{ 3 W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

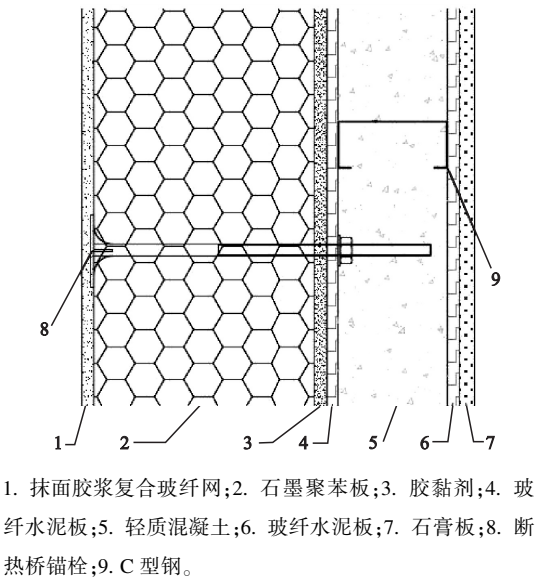


图 1 外墙系统构造

Fig. 1 Structure of external wall system

表 1 墙体构造层参数  
Table 1 Structural layer parameters of wall

材料名称	导热系数/ (W·(m·K) <sup>-1</sup> )	热阻/ ((m <sup>2</sup> ·K)·W <sup>-1</sup> )	干密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	修正系数
抹面胶浆复合玻纤网	0.930	0.005	1 500	1.00
石墨聚苯板	0.033	4.040	18	1.05
胶黏剂	0.930	0.005	1 500	1.00
纤维水泥板	0.300	0.033	1 400	1.00
轻质混凝土	0.090	0.833	450	1.20
石膏板	0.260	0.046	1 200	1.00
XPS 保温板	0.030	4.242	25	1.05
岩棉	0.042	3.104	150	1.10

1.2 墙体优势

预制轻钢骨架复合保温墙体的建筑成本低,由于预制墙板的装配程度高而且减少了施工周期,墙体传热系数小,节能效率高,可以满足人体舒适度要求的优点,并且可以广泛应用于多层框架结构建筑。

1.3 建筑无热桥设计原则

无热桥设计原则强调建筑物应采用保温性能更高的围护结构和连续完整的外保温系统<sup>[13]</sup>。无热桥的设计理念是热桥传热系数很小甚至为负数,当热桥系数小于等于 0.01 W/(m·K)时,即可满足无热桥的设计原则,热桥系数越小则墙体的传热效果越好,越节能。无热桥设计时需遵循以下规则。①避让规则:尽量不要有构件穿透围护结构的保温层。②击穿规则:在避免不了穿透围护结构保温层时,例如不采暖的地下室墙体,由于结构的支撑需要,穿透了保温层,就需要在穿透位置选用导热系数尽量低的材料,尽量避免使用金属或常规的混凝土材料,可以使用可承重的加气混凝土材料,还可以采用防腐木、发泡陶瓷等材料。③连接规则:在转角部位的保温层连接的厚度应该不低于整个建筑主体部位的保温层厚度。④几何规则:两个构件的连接处尽可能采用钝角连接,这样可以减少散热面积<sup>[14]</sup>。

2 热桥数值模拟及计算

采用 Therm 软件根据有限元分析法计算围护结构稳态下传热,计算所用公式和方法基于欧洲标准(EN IOS 10211),对围护结构材料的参数设置、边界条件的输入,可准确计算传热系数、温度分布等结果<sup>[15]</sup>。模拟假设各材料之间接触无缝隙,忽略各材料接触时产生的热阻,认为各处材料同性且均匀,保温层始终连续不断层,墙体铺设防火隔离带,不考虑太阳辐射及其他辐射换热<sup>[16]</sup>。

2.1 边界条件及计算方法

室内外温度的设置采用国内外默认的室内为 20℃,室外为-10℃<sup>[17]</sup>。室内外表面空气热阻分别为 0.11、0.04(m<sup>2</sup>·K)/W。线性热桥的计算方法为

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot l_j \tag{1}$$

式中:Ψ 为线性热桥系数,W/(m·K);L<sub>2D</sub> 为二维传热系数,W/(m·K);U<sub>j</sub> 为一维传热系数,W/(m<sup>2</sup>·K);l<sub>j</sub> 为一维传热部分长度,m。

墙体热通量的计算方法为

$$\Phi = U \cdot \Delta T \cdot l \tag{2}$$

式中:Φ 为热通量,W/m;U 为传热系数,W/(m<sup>2</sup>·K);l 为墙体长度,m;ΔT 为室内外温差,K。

2.2 墙板与柱节点不同保温厚度模拟

笔者采用有限元分析法模拟不同保温层

厚度的柱节点传热,计算各厚度下的热桥系数。

混凝土柱与外墙接触使热量从此部位传递增加,是热桥典型的节点<sup>[18]</sup>。图2为柱节点的构造,外墙保温层厚度为150 mm,材料为石墨聚苯板,混凝土柱为500 mm×500 mm,其传热系数为1.72 W/(m·K),外墙外保温的缝隙为20 mm,采用石墨聚苯板填充,而外墙轻质混凝土部位缝隙采用岩棉填充,具有防火作用。

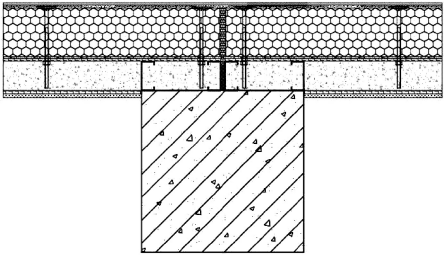


图2 柱节点构造图

Fig.2 Structural drawing of column joint  
模拟得到柱节点不同保温厚度的温度如图3所示。

图3所示。

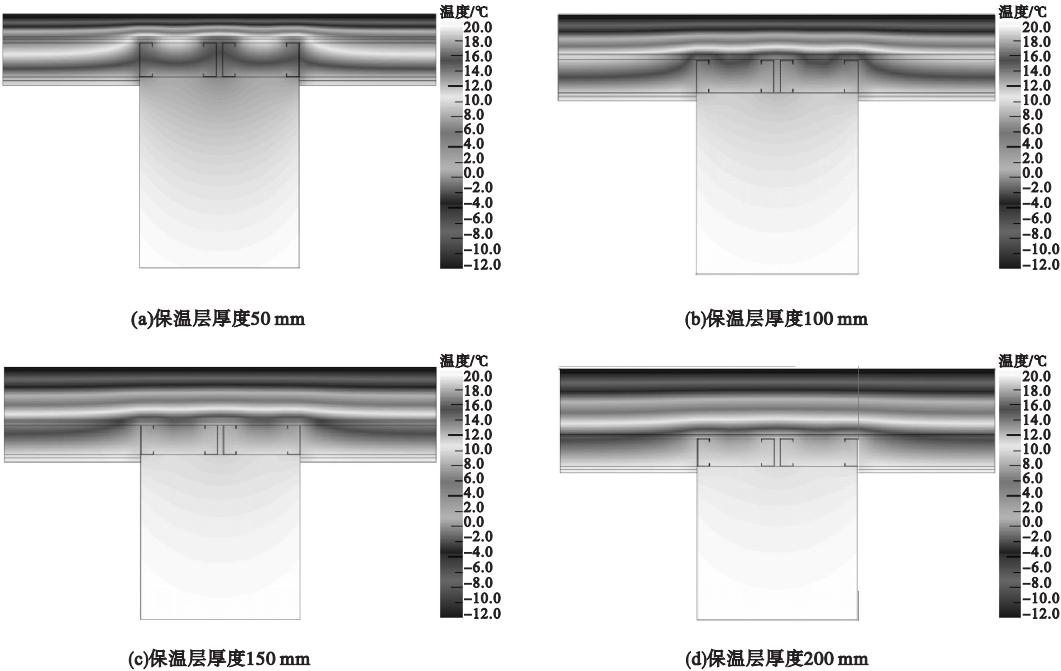


图3 柱节点保温层不同厚度温度模拟图

Fig.3 Temperature simulation of column joint insulation layer with different thickness

外挂式柱节点在保温层厚度分别为50 mm、100 mm、150 mm、200 mm时的节点二维传热系数 $L_{2D}$ 分别为0.548 W/(m·K)、0.339 W/(m·K)、0.248 W/(m·K)、0.195 W/(m·K)。

保温层厚度由50 mm到200 mm的热桥系数分别为0.017 3 W/(m·K)、0.007 2 W/(m·K)、0.006 5 W/(m·K)、0.002 W/(m·K)。绘制柱节点二维传热系数、热桥系数曲线如图4所示。保温层厚度的增加导致外墙的一维传热系数减小,热桥节点的二维

传热系数也逐渐减小,随之热桥系数也减小,所以保温层越厚的节点,热桥对传热的影响越小,但减小的趋势越来越小,说明一直增加保温层厚度并不是最合理的方式,因此选择最优的厚度,既能达到经济性要求又能满足无热桥设计成为关键。根据被动式超低能耗建筑的无热桥设计原则,当保温层厚度增加到75 mm左右,热桥系数达到0.01 W/(m·K),外挂式框架柱热桥节点就可达到无热桥的要求。

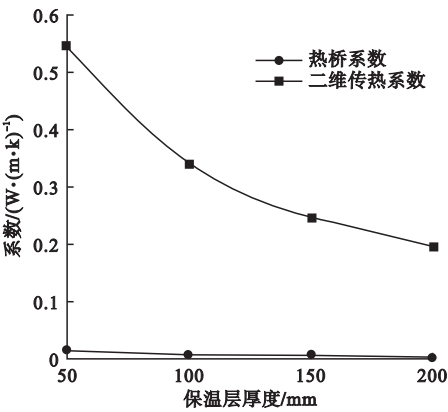


图4 柱节点传热参数变化曲线

Fig. 4 Curve of heat transfer parameters of column joints

2.3 墙板与梁节点

外墙与梁接触会导致热量传递不均匀,形成热桥。此节点的热桥处理至关重要,图5为外挂式梁节点构造图。

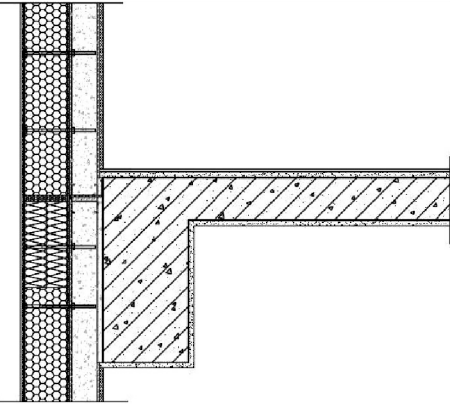


图5 梁节点构造图

Fig. 5 Structural drawing of beam joint

混凝土梁通过预埋件外挂与外墙连接,外墙通过断热桥锚栓连接,保温层材料选择石墨聚苯板,厚150 mm,保温层部位铺设宽300 mm 岩棉作为防火隔离带,保温层缝隙20 mm,采用石墨聚苯板填充。轻混凝土之间的缝隙采用无保温砂浆填充,并采用M14预埋螺母连接件连接,纤维水泥板之间采用弹性密封胶粘连,纤维水泥板与石膏板之间铺设防水气密膜,宽度不小于100 mm。

模拟得到梁节点温度如图6所示。梁节点的二维传热系数  $L_{2D}$  为  $0.274 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,

节点的最高温度  $19.78\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最低温度  $-9.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,根据式(2)计算后得到的热通量  $\Phi$  为  $8.2 \text{ W}/\text{m}$ ,根据式(1)计算后得到热桥系数  $0.0047 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,此时的热桥系数值满足无热桥的设计原则。

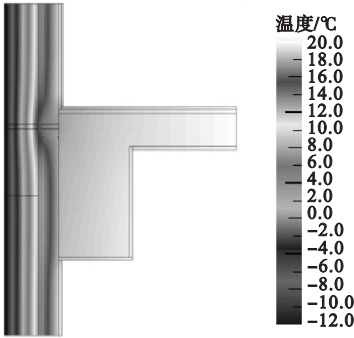


图6 梁节点温度模拟图

Fig. 6 Temperature Simulation of beam joints

2.4 外墙转角阴阳角节点

外墙转角处,内墙和外墙接触传热面积不同或因材料不同导致热量传递增加形成热桥。外墙转角处很容易产生结露,此部位的保温层必须连续。图7为外墙转角-阴阳角节点构造。外墙外保温中的缝隙都采用石墨聚苯板材料填充。C型钢通过螺母连接在轻混凝土中,起到抗冲击、抗震以及防火等作用。转角点纤维水泥板必须采用弹性密封胶粘连,且混凝土柱与墙板通过角钢连接。

模拟得外墙转角的温度(见图8),外墙阳角的整体二维传热系数  $L_{2D}$  为  $0.31 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,最高温度  $19.69\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最低温度为  $-9.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。计算后的热通量为  $9.3 \text{ W}/\text{m}$ ,线性热桥系数为  $-0.057 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。计算得到热桥系数为负,证明阳角节点的传热不但受热桥影响甚至会比常规墙体传热更好。外墙阴角的二维传热系数  $L_{2D}$  为  $0.132 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,最高温度为  $19.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最低温度为  $-9.79\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。外墙阴角的温度模拟图,计算后的热通量为  $3.95 \text{ W}/\text{m}$ ,线性热桥系数为  $0.0238 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。热桥系数大于  $0.01 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,则阴角节点并不满足无热桥设计。

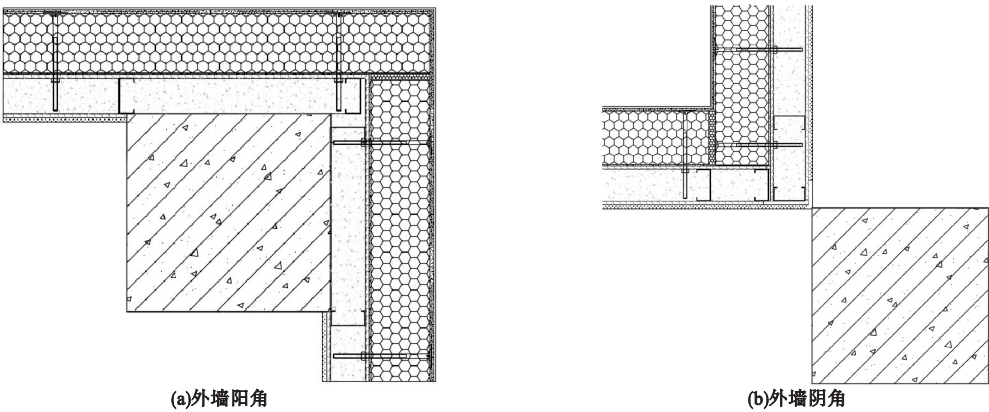


图 7 外墙转角构造图

Fig. 7 Structural drawing of external wall external corner

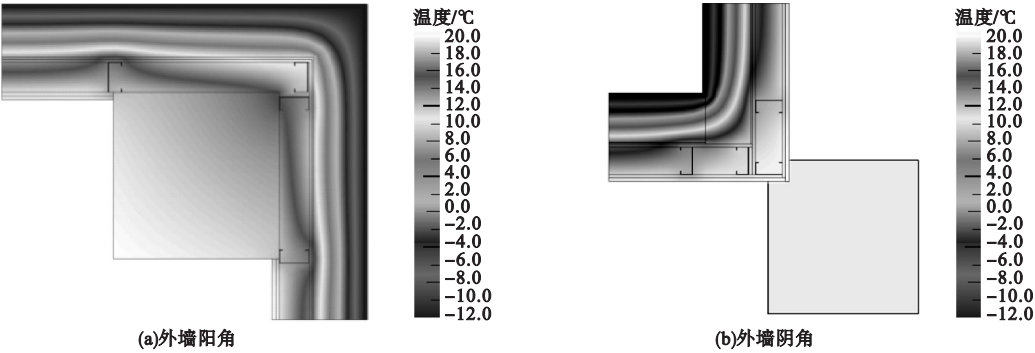


图 8 外墙转角温度模拟图

Fig. 8 Simulation diagram of external wall corner temperature

2.5 外墙勒脚节点

外墙勒脚热桥是由于外墙与地梁相接触,产生传热不均的现象,形成热桥。在勒脚位置,从地基下方向上铺设保温板,铺设高度约 900 mm,保温的材料为 XPS。墙角处采用断热桥锚栓锚固保温层,地面保温材料选用 XPS,厚度为 300 mm,以降低热桥的影响,外墙勒脚结构如图 9 所示。

模拟得到外墙勒脚温度如图 10 所示。外墙勒脚节点二维传热系数  $L_{2D}$  为  $0.223 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,最高温度  $19.72 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最低温度为  $-10.04 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。计算后的热流量为  $6.68 \text{ W}/\text{m}$ ,线性热桥系数为  $-0.0026 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。此时热桥系数为负则满足近零能耗建筑设计标准的设计要求。

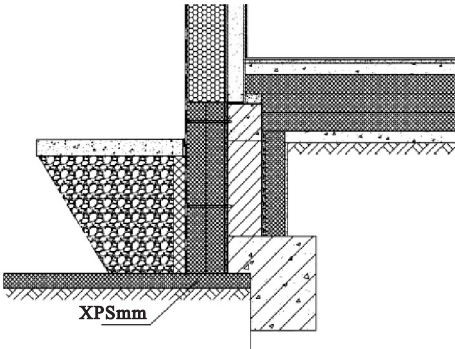


图 9 外墙勒脚节点构图

Fig. 9 Composition of external wall plinth node

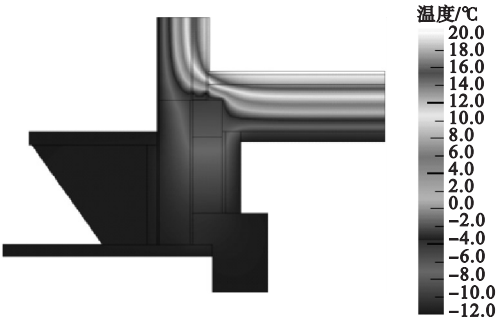


图 10 外墙勒脚节点温度模拟图

Fig. 10 Simulation diagram of external wall plinth node temperature

2.6 女儿墙节点

女儿墙热桥是典型的热桥之一,屋面外侧墙体的保温往往容易被忽略,受外界温度变化影响,室内侧温度降低,容易结露,故屋面外侧保温必不可少<sup>[19]</sup>。图 11 为女儿墙结构图,预制轻钢骨架复合保温墙体在屋面外侧铺设 200 mm 厚 XPS 保温板,采用 M12 螺栓锚固在轻质混凝土侧。所有与室外接触处都铺设保温板,采用全包裹的形式,保温层完全包裹女儿墙,突出屋面的部位保温层必须连续,铺设岩棉作为防火隔离带。

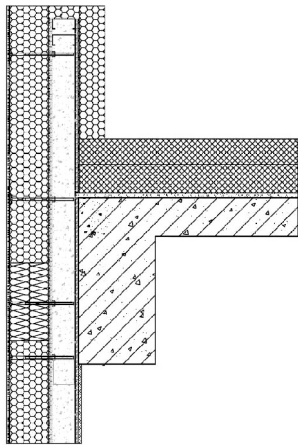


图 11 女儿墙节点构造

Fig. 11 Joint structure of parapet

模拟得到女儿墙温度如图 12 所示。女儿墙节点二维传热系数  $L_{2D}$  为  $0.204 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 最高温度  $19.68\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 最低温度为  $-10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。计算后的热流量为  $6.12 \text{ W}/\text{m}$ , 热桥系数为

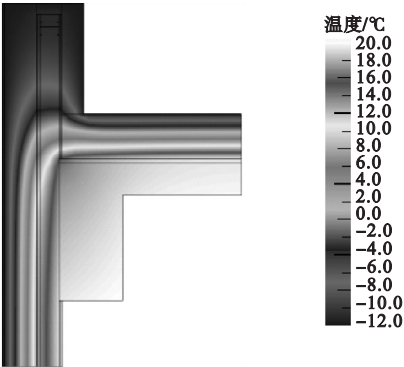


图 12 女儿墙节点温度模拟图

Fig. 12 Simulation diagram of parapet node temperature

$-0.151 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。女儿墙处热桥最小,此节点不但满足无热桥设计原则,不但没有额外热损失甚至保温隔热的效果优于常规墙体。

3 模拟验证

为证实笔者模拟结果的准确性,采用 Therm 模拟内嵌式节点热桥系数,与德国被动房研究所采用 Flixo 所模拟的内嵌式节点热桥系数对比。Flixo 是瑞士一家公司开发的热分析软件,德国被动房研究所用其研究和计算热桥<sup>[20-24]</sup>。选取框架柱节点作为对象,与外挂式柱节点不同的是,此节点柱与外墙的连接方式为内嵌式,钢柱全包裹于墙体内部,钢柱周围包裹着 50 mm 厚岩棉,保温层采用石墨聚苯板,厚度 200 mm,在防火浆料两侧铺设 10 mm 厚的 osb 板。

图 13 为 Flixo 模拟的柱节点温度图,笔者所做模拟与德国被动房研究所采用的边界条件相同,室内外温度分别为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,室内外表面积热阻分别为  $0.11(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$  和  $0.04(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$ 。图 14 为 Therm 模拟后的温度图。热桥计算的方式与德国被动房采用的计算方式相同,计算采用式(1),德国被动房研究所模拟后得到的柱热桥节点热通量为  $9.7 \text{ W}/\text{m}$ ,计算得到的热桥系数为  $0.028 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。笔者通过模拟得到的柱热桥节点热流量为  $9.9 \text{ W}/\text{m}$ ,计算得到的热桥系数为  $0.026 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,比对得到误差 7%,证明笔者模拟具有准确性。

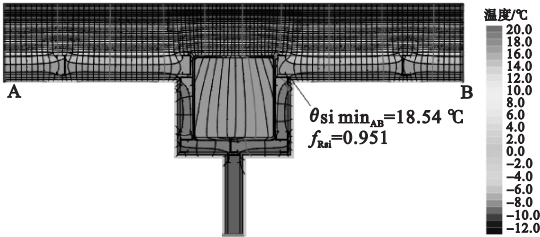


图 13 Flixo 模拟的柱节点温度图

Fig. 13 Column node temperature diagram simulated by Flixo

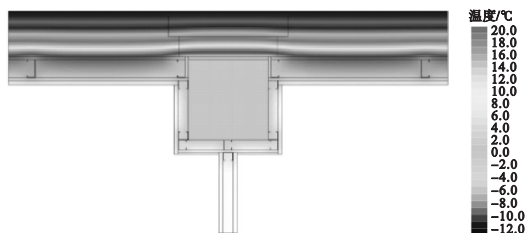


图14 Therm模拟的柱节点温度图

Fig. 14 Column node temperature diagram simulated by Therm

## 4 结 论

(1) 采用 Therm 模拟轻钢骨架复合保温墙板上挂式柱热桥节点在不同保温层厚度下的传热, 计算保温层厚度 50 mm、100 mm、150 mm、200 mm 时热桥系数分别为  $0.0173 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、 $0.0072 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、 $0.0065 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、 $0.002 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。随着保温层厚度的增加, 节点二维传热系数和热桥系数增加的趋势逐渐减小。

(2) 通过模拟预制轻钢骨架复合外保温墙板中的典型外挂式热桥节点, 计算保温层厚度为 150 mm 时各节点的二维传热系数和热桥系数。计算得到梁节点热桥系数  $0.0047 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、柱节点热桥系数  $0.0065 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、外墙勒脚热桥系数  $-0.0026 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、阳角热桥系数  $-0.057 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、阴角热桥系数  $0.0238 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、女儿墙热桥系数  $-0.151 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。除了阴角节点都可满足无热桥设计原则, 甚至外墙阳角、勒脚和女儿墙的热桥系数为负, 证明这些节点的传热优于常规墙体。

(3) 德国被动房研究所采用的 Flixo 模拟后计算得到的热桥系数为  $0.028 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , Therm 模拟后计算得到热桥系数为  $0.026 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , 误差为 7%, 验证了模拟的准确性。

## 参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建

筑热工设计规范: GB 50176—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

(Ministry of Housing and Urban Construction of the People's Republic of China. Code for Thermal Design of Civil Buildings: GB 50176—2016[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2016.)

[2] 李彦伯. 剪力墙结构温度效应与热桥效应研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.

(LI Yanbo. Shear-wall research on temperature effect and thermal-bridge effect [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009.)

[3] 韩润芳. 青岛地区农村钢结构住宅热桥的热工分析[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.

(HAN Runfang. The thermal analysis of the rural residential steel structure bridge in Qingdao area [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2015.)

[4] 李相. 装配整体式住宅热桥部位的温度效应有限元分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.

(LI Xiang. Assembled monolithic residential thermal bridge temperature effect on the finite element analysis [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.)

[5] 王晓波, 刘建伟, 陈占虎, 等. 既有建筑节能改造内保温典型热桥数值模拟优化研究[J]. 建设科技, 2020(19): 29-31.

(WANG Xiaobo, LIU Jianwei, CHEN Zhanhu, et al. Research on numerical simulation optimization of typical thermal bridge for internal thermal renovation in existing buildings [J]. Construction science and technology, 2020(19): 29-31.)

[6] 孙大明, 周海珠, 田慧峰. 建筑热桥研究现状与展望[J]. 建筑科学, 2010, 26(2): 128-134.

(SUN Daming, ZHOU Haizhu, TIAN Hui Feng. Research status and prospect of building thermal bridge [J]. Building science, 2010, 26(2): 128-134.)

[7] 范孟杰. 装配式低能耗建筑热桥部位的温度效应研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019.

(FAN Mengjie. Study on temperature effect of thermal bridge in assembled low energy building [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2019.)

[8] 谢晓娜. 建筑能耗模拟用楼地和热桥传热计算方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.

(XIE Xiaona. The calculation approach of heat transfer of underground region and thermal bridge for building energy simulation [D]. Beijing: Tsinghua University, 2006.)

[9] 刘忠鹏. 被动式节能住宅典型热桥的模拟分析及优化研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2016.

(LIU Zhongpeng. Simulation and optimization analysis of typical thermal bridges in passive houses [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2016.)

[10] 王莹珺. 河北省被动式超低能耗无热桥节能

- 设计[J].住宅科技,2019,39(10):41-44.  
(WANG Yingjun. Passive non-thermal bridge design with ultra-low energy consumption in Hebei [J]. Housing science, 2019, 39 (10): 41-44.)
- [11] 魏贺东,赵及建,高建会,等.关于被动式超低能耗建筑几何热桥效应的影响因素分析及建议[J].墙材革新与建筑节能,2019(4):22-27.  
(WEI Hedong, ZHAO Jijian, GAO Jianhui, et al. Analysis and suggestions on influencing factors of passive ultra-low energy building geometric thermal bridge effect [J]. Construction wall innovation & building energy-saving, 2019(4):22-27.)
- [12] 李国华,王权,董军,等.冷弯薄壁型钢轻混凝土组合墙体抗弯性能有限元分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(2):218-226.  
(LI Guohua, WANG Quan, DONG Jun, et al. Finite element analysis on flexural behavior of cold-formed thin-wall steel framing walls infilled with lightweight concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(2):218-226.)
- [13] 康一亭,杨亚帅,马健,等.近零能耗建筑无热桥处理措施分析[J].智能城市,2020,6(5):5-7.  
(KAN Yiting, YANG YaShuai, MA Jian, et al. Analysis on treatment measures of non thermal bridge in near zero energy consumption buildings [J]. Intelligent city, 2020, 6 (5): 5-7.)
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.近零能耗建筑技术标准:GB50135—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.  
(Ministry of Housing and Urban Construction of the People's Republic of China. Technical standard for near zero energy buildings: GB 50135—2019 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2019.)
- [15] 夏麟,卢胤龙.基于无热桥构造的围护结构热工性能对比研究[J].建筑节能,2019,47(6):13-17.  
(XIA Lin, LU Yinlong. Comparison study of thermal performance based on envelope technology without bridge [J]. Building energy efficiency, 2019, 47(6):13-17.)
- [16] 谢潇宇.夏热冬冷地区热桥对低层建筑能耗的影响研究[D].南昌:南昌大学,2020.  
(XIE Xiaoyu. Research on the influence of thermal bridges on energy consumption of low-rise buildings in hot-summer and cold-winter zone [D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.)
- [17] 杨润芳,司大雄,彭梦月.基于Flixo模拟研究被动式超低能耗建筑典型节点保温设置与热桥效应的关系[J].建设科技,2020(9):15-19.  
(YANG Runfang, SI Daxiong, PENG Mengyue. Relationship between insulation and thermal bridge effect of typical nodes in passive and ultra-low energy buildings based on Flixo simulation [J]. Construction science and technology, 2020(9):15-19.)
- [18] 戴绍斌,倪青荣,马保国,等.自保温体系外墙中柱热桥影响区域分析[J].建筑节能,2015,43(4):49-53.  
(DAI Shaobin, NI Qingrong, MA Baoguo, et al. Analysis of the influencing zone of thermal bridge about the middle column in external wall of self-insulation system [J]. Building energy efficiency, 2015, 43(4):49-53.)
- [19] 李景轩,潘玉珀,房海波,等.大型公共建筑被动式房屋无热桥设计与施工[J].绿色建筑,2019,11(4):30-33.  
(LI Jingxuan, PAN Yupo, FANG Haibo, et al. Heat bridge insulation passive design and construction in huge public building project [J]. Green building, 2019, 11(4):30-33.)
- [20] 孙红光.被动式超低能耗居住建筑的无热桥设计[J].住宅与房地产,2017(15):201.  
(SUN Hongguang. No thermal bridge design for passive ultra-low energy consumption residential buildings [J]. Housing and real estate, 2017(15):201.)
- [21] 刘梓健,廖智强,陈延超,等.建筑围护结构热桥传热及改善研究现状[J].建筑热能通风空调,2020,39(9):52-57.  
(LIU Zijian, LIAO Zhiqiang, CHEN Yanchao, et al. Research status of heat transfer and improvement of building envelope thermal bridge [J]. Building thermal energy ventilation and air conditioning, 2020, 39(9):52-57.)
- [22] 徐洪涛,马瑞江,张萍萍,等.轻钢围护结构线性热桥及传热系数研究[J].墙材革新与建筑节能,2019(8):48-53.  
(XU Hongtao, MA Ruijiang, ZHANG Pingping, et al. Study on linear thermal bridge and heat transfer coefficient of light steel envelope [J]. Wall material innovation and building energy conservation, 2019(8):48-53.)
- [23] 吴锋,曹帆,俞方英.轻质混凝土多孔砖自保温墙体热桥传热分析[J].混凝土与水泥制品,2018(12):66-69.  
(WU Feng, CAO fan, YU Fangying. Heat transfer analysis of thermal bridge of lightweight concrete perforated brick self insulation wall [J]. Concrete and cement products, 2018(12):66-69.)
- [24] 贾殿鑫.夏热冬冷地区自保温体系典型热桥传热模拟分析及优化[D].杭州:浙江大学,2013.  
(JIA Dianxin. Heat transfer simulation analysis and optimization of typical thermal bridge of self insulation system in hot summer and cold winter area [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.)

(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)