

文章编号:1007-9629(2021)06-1300-07

建筑外墙外保温做法对结构安全性影响分析

刘玉章¹, 张 君¹, 王家赫², 么传杰³

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084; 2. 中国铁道科学研究院集团有限公司
铁道建筑研究所, 北京 100081; 3. 聊城市铁路投资发展有限公司, 山东 聊城 252000)

摘要:以无锚栓薄抹灰聚苯板外保温、钢锚栓薄抹灰聚苯板外保温和钢丝网插丝聚苯板外保温做法为计算案例, 对外保温墙体的温度场进行模拟计算, 根据计算结果, 通过有限元方法计算高低温条件下不同外保温做法墙体各功能层的法向位移, 分析不同外保温做法对结构安全性能的影响。结果表明: 外墙外保温体系的法向位移主要表现为夏季膨胀, 冬季收缩, 其主要来源于保温层; 设置钢锚栓、钢丝网等锚固构件可显著降低外保温系统墙体各功能层的法向位移, 提高外保温系统的稳定性与安全性; 钢丝网插丝聚苯板保温墙体面层的最大法向位移小于无锚栓薄抹灰聚苯板保温墙体和钢锚栓薄抹灰聚苯板保温墙体。

关键词:混凝土外墙; 外保温; 温度场; 钢丝网; 法向位移

中图分类号: TU761.12

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2021.06.023

Analysis on Influence of External Thermal Insulation on Structural Safety

LIU Yuzhang¹, ZHANG Jun¹, WANG Jiahe², YAO Chuanjie³

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100081, China; 3. Liaocheng Railway Investment Development Co., Ltd., Liaocheng 252000, China)

Abstract: Taking the external thermal insulation method of plastered polystyrene board without anchor bolt, plastered polystyrene board with steel anchor bolt and polystyrene board with inserted steel wire mesh as the calculation cases, the temperature field of the external thermal insulation wall was calculated. According to the temperature field, the normal displacement of the wall with different external insulation methods under the condition of high and low temperature was calculated by finite element method, and the influence of different external insulation methods on the safety performance of the structure was analyzed. The results show that the normal displacement of external wall insulation system presents expansion in summer and contraction in winter, and the primarily normal displacement source is the insulation layer. The normal displacement of each functional layer of the external insulation system wall can be significantly reduced, and the stability and safety of the external insulation system can be improved as the result of setting steel anchor bolt, steel wire mesh and other reinforcement components. The maximum normal displacement of the surface layer by the polystyrene board with inserted steel wire mesh is smaller than the plastered polystyrene board with and without anchor bolt.

Key words: concrete external wall; external thermal insulation; temperature field; steel wire mesh; normal displacement

收稿日期: 2020-07-20; 修订日期: 2020-09-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878380)

第一作者: 刘玉章(1996—), 男, 天津武清人, 清华大学博士生. E-mail: liuyuzha18@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者: 张 君(1962—), 男, 内蒙古通辽人, 清华大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: junz@tsinghua.edu.cn

采用高热阻材料作为保温层的外墙保温形式,按照保温层和结构体基层的相对位置关系可分为外墙内保温、外墙夹心保温和外墙外保温^[1].其中外墙外保温系统因其外侧保温层的物理隔离和热传导特性具有增强结构体基层耐久性的特点,成为目前中国应用最多的建筑外围护结构节能措施,同时也对防护层的耐久性和安全性提出了更高的要求^[2-3].

通过对不同保温形式墙体温度场的计算可知,外保温防护层的温差变化较高,会产生较大的温度应力,进而导致防护层空鼓、开裂,甚至脱落^[1-5].其中,夏季高温条件下,防护层受压应力作用,易出现与其他功能层部分脱离的空鼓现象;冬季低温条件下,防护层受拉应力作用,易出现开裂现象,并发展为较宽的裂缝^[2],甚至导致防护层脱落,这不仅对保温体系的耐久性产生不利影响,还会产生较大的安全隐患.

针对外保温技术问题,Zhang等^[6-7]开发了带预制纤维增强延性水泥面层的钢丝网插丝聚苯板外墙保温系统.该系统采用高韧性低收缩纤维增强水泥基复合材料(LSECC)代替普通水泥砂浆,解决了面层材料的开裂问题;利用钢丝网斜插腹丝,将各功能层连接为整体,实现外墙外保温系统的一体化,并通过预制防护面层解决了现场施工困难的问题^[8].

本文基于上述新型外墙外保温做法,构建计算模型,对墙体温度场进行模拟计算,并分析了外保温做法温度场特点.根据温度场计算结果,通过有限元方法对保温墙体的法向位移进行了计算.为与该模型进行比较,同时构建了无锚栓薄抹灰和钢锚栓薄抹灰聚苯板外保温做法的计算模型,根据最大墙体法向位移结果,分析了不同外保温做法对结构安全性能的影响.

1 外保温墙体温度场计算

1.1 温度场计算模型

1.1.1 温度场有限差分方程

为分析保温墙体基于热效应的结构耐久性与安全性,需要对保温墙体在环境温度变化、对流和辐射等条件下的温度场进行计算与分析.常用的温度场计算方法主要包括有限差分法、有限元法等^[1,9-11].本节基于有限差分法来建立温度场计算模型.模型假定墙体为分层连续体,各层之间物理性质不同、连接紧密且忽略层间的热阻作用.

对于保温墙体,由于其内部温度在长度和宽度2个方向上的温度变化很小,仅在厚度方向上温度变化剧烈,所以通常条件下建筑墙体的热传导方程可

简化为沿墙厚方向的一维热传导微分方程^[1]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中: T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; t 为时间, s ; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; c 为比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; ρ 为密度, kg/m^3 .

根据保温墙体结构,可将有限差分节点分成内部节点、内表面节点、外表面节点和材料间节点共4类.用于温度场计算的墙体节点如图1所示.

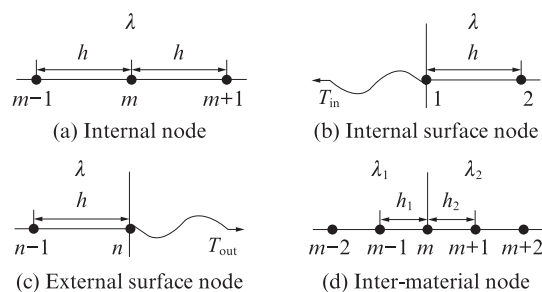


图1 墙体节点

Fig. 1 Wall node

对于内部节点,根据有限差分法,代入基本微分方程,得到节点 m 经过时间间隔 Δt 后的温度表达式:

$$T_{m,t+\Delta t} = T_{m,t} + \frac{\lambda\Delta t}{c\rho} \left(\frac{T_{m+1,t} + T_{m-1,t} - 2T_{m,t}}{h^2} \right) \quad (2)$$

式中: $T_{m,t+\Delta t}$ 为节点 m 在 $t+\Delta t$ 时刻的温度, $^{\circ}\text{C}$; $T_{m,t}$ 、 $T_{m+1,t}$ 、 $T_{m-1,t}$ 分别为节点 m 、 $m+1$ 、 $m-1$ 在 t 时刻的温度, $^{\circ}\text{C}$; h 为节点间距, m .

对于内表面节点,根据有限差分法与能量平衡原理,代入基本微分方程,得到节点 1 经过 Δt 后的温度表达式:

$$T_{1,t+\Delta t} = T_{1,t} + \frac{\lambda\Delta t}{c\rho} \left(\frac{2T_{2,t} - 2T_{1,t}}{h^2} \right) + \frac{2\beta_{in}\Delta t}{c\rho h} (T_{in} - T_{1,t}) \quad (3)$$

式中: $T_{1,t+\Delta t}$ 为节点 1 在 $t+\Delta t$ 时刻的温度, $^{\circ}\text{C}$; $T_{1,t}$ 、 $T_{2,t}$ 分别为节点 1、2 在 t 时刻的温度, $^{\circ}\text{C}$; β_{in} 为内表面对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; T_{in} 为室内温度, $^{\circ}\text{C}$.

对于外表面节点,根据有限差分法与能量平衡原理,代入基本微分方程,得到节点 n 经过 Δt 后的温度表达式:

$$T_{n,t+\Delta t} = T_{n,t} + \frac{\lambda\Delta t}{c\rho} \left(\frac{2T_{n-1,t} - 2T_{n,t}}{h^2} \right) + \frac{2\beta_{out}\Delta t}{c\rho h} (T_{out} - T_{n,t}) + \frac{2\alpha_s\Delta t}{c\rho h} I_n \quad (4)$$

式中: $T_{n,t+\Delta t}$ 为节点 n 在 $t+\Delta t$ 时刻的温度, $^{\circ}\text{C}$; $T_{n,t}$ 、 $T_{n-1,t}$ 分别为节点 n 、 $n-1$ 在 t 时刻的温度, $^{\circ}\text{C}$; β_{out} 为外表面对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; T_{out} 为室外温度, $^{\circ}\text{C}$;

I_n 为太阳总辐射量, W/m^2 ; α_s 为太阳辐射的吸收系数.

对于材料间节点, 由于节点两侧为不同材料, 根

$$T_{m,t+\Delta t} = \frac{\frac{\lambda_1}{h_1}(4T_{m-1,t+\Delta t} - T_{m-2,t+\Delta t}) + \frac{\lambda_2}{h_2}(4T_{m+1,t+\Delta t} - T_{m+2,t+\Delta t})}{3\left(\frac{\lambda_1}{h_1} + \frac{\lambda_2}{h_2}\right)} \quad (5)$$

式中: λ_1, λ_2 分别为材料1、2的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; h_1, h_2 分别为材料1、2的节点间距, m ; $T_{m-2,t}, T_{m+2,t}$ 分别为节点 $m-2, m+2$ 在 t 时刻的温度, $^{\circ}\text{C}$.

1.1.2 温度场计算参数

以钢丝网插丝聚苯板外保温做法为例, 构建计算温度场的建筑墙体模型, 墙体构成如图2所示, 各层材料物理与力学计算参数如表1所示.

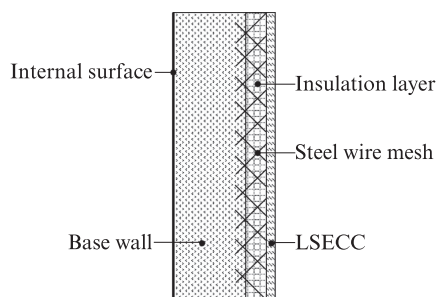


图2 钢丝网插丝聚苯板外保温墙体

Fig. 2 Polystyrene board with inserted steel wire mesh external thermal insulation wall

表1 钢丝网插丝聚苯板外保温计算参数

Table 1 Calculation parameters of polystyrene board with inserted steel wire mesh external thermal insulation

Function layer	d/mm	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
Base wall	150	2 400	920	1.74
Insulation layer	50	30	1 380	0.04
Steel wire mesh	2	7 850	450	36.00
LSECC	10	2 400	1 000	1.50

Note: d —Thickness.

选择北京市为保温墙体温度场计算的代表性城市. 根据建筑气候区建筑设计数据, 得到北京市各季节室外最高温度($T_{\max}$)、最低温度($T_{\min}$)和室内温度(T_{in}), 将其作为外墙温度场计算的基本参数, 如表2所示^[1]. 各季节室外温度在最大值和最小值之间, 由于昼夜交替和天气影响等因素, 室外温度(T_{out})的变化呈现出一定的周期性. 采用正弦函数对日气温变化进行模拟, 其表达式为:

$$T_{\text{out}} = -\sin\left(\frac{2\pi(t_d + 2)}{24}\right)\left(\frac{T_{\max} - T_{\min}}{2}\right) + \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2}\right) \quad (6)$$

据有限差分法, 代入基本微分方程, 得到节点 m 经过 Δt 后的温度表达式:

式中: t_d 为当前时间, h .

表2 室内外温度参数

Table 2 Parameters of indoor and outdoor temperature^[1]

Season	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\min}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{in}}/^{\circ}\text{C}$
Spring	25.8	4.4	23.0
Summer	39.0	20.1	25.0
Autumn	26.5	9.7	23.0
Winter	1.5	-11.5	20.0

考虑到建筑外墙表面受太阳照射作用, 本文在计算中所需的各季节建筑内外表面对流换热系数($\beta_{\text{in}}, \beta_{\text{out}}$)与太阳常数(I_0)如表3所示^[4].

表3 对流与辐射参数

Table 3 Parameters of convection and radiation^[4]

Season	$\beta_{\text{in}}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	$\beta_{\text{out}}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	$I_0/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$
Spring	8.7	21.0	1 365
Summer	8.7	19.0	1 316
Autumn	8.7	21.0	1 340
Winter	8.7	23.0	1 392

1.2 温度场计算结果分析

根据钢丝网插丝聚苯板外保温墙体各层构造参数、室内外温度参数和对流与辐射参数, 利用有限差分法, 即可计算不同季节、不同时刻、不同朝向建筑外墙的完整温度场^[1]. 下面以夏冬两季西向墙体为例, 分析温度场计算结果.

外保温墙体典型层由内至外分别为: 墙体内表面、保温板内表面、保温板外表面和墙体外表面, 计算得到的各典型层温度随时间变化曲线如图3所示. 由图3可见, 墙体内温度变化在第4、5个周期已比较稳定, 说明从此开始, 由初始条件造成的影响可以忽略. 在后续分析中采用第5个周期的数据作为稳定的计算结果.

由图3还可见, 墙体内温度随室外大气温度的周期性变化而变化, 变化幅度与墙体内位置有关. 保温材料的使用使室内温度受室外变温影响明显减小, 越靠近墙体外表面, 墙体温度受大气温度的影响程度越大, 越靠近墙体内表面, 墙体温度受大气温度的影响程度越小. 因此, 墙体外表面温度随时间的变化幅度最大, 墙体内表面温度随时间的变化幅度最小.

此外, 墙体保温对墙体温度场的影响将更明显

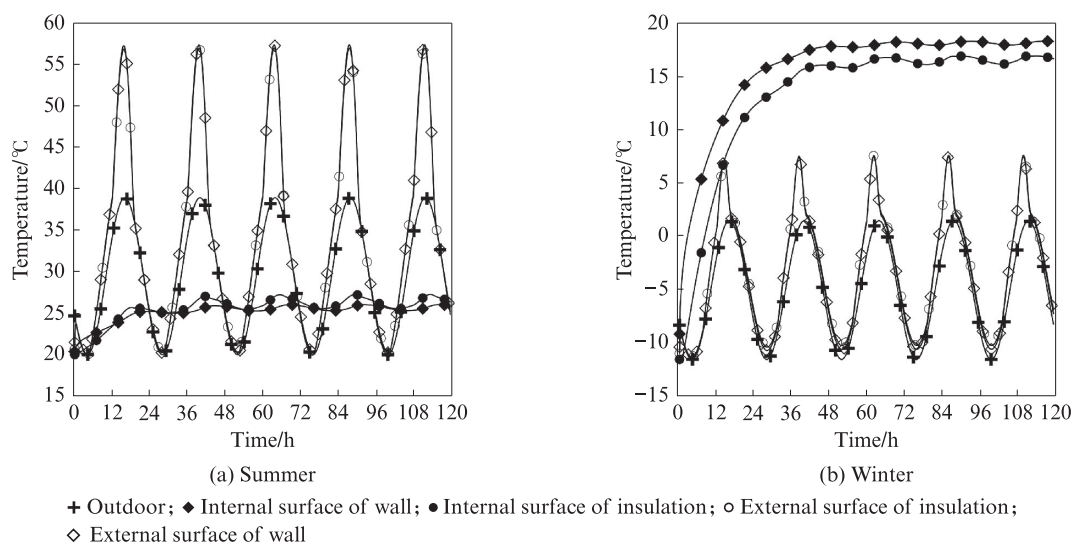


图3 外保温墙体各典型层温度-时间曲线

Fig. 3 Temperature-time curves of typical layers of external thermal insulation wall

地体现在给定时刻温度沿墙体厚度的分布上.图4为钢丝网插丝聚苯板外保温西墙夏季和冬季温度稳定变化后,墙体外表面温度在最高和最低时刻沿墙体厚度方向的温度分布.保温墙体在任意时刻沿墙体厚度方向的温度分布都将落在同季节的2条边界线之内.由图4可以看出:在温度最值方面,夏季墙体外表面最高温度为57.4℃,冬季墙体外表面最低温度为-10.6℃.周期内墙体典型层温度的变化幅度与其在墙体内部的位置有关,靠近墙体外表面的各层周期内温度变化大,夏季最大温差达37.1℃,冬季最大温差达18.1℃;靠近墙体内表面的各层周期内温度变化小,保温材料的使用有效减小了内部环境与外部环境的热量传递.保温层内外表面温度差值为各功能层中内外表面温度差值的最大值,夏季最

大温差30.0℃,冬季最大温差26.0℃.与之相比,结构体基层夏季最大温差1.3℃,冬季最大温差1.8℃.结构体基层的全年温度均保持在0℃以上,无冻融现象发生.

2 外保温墙体功能层法向位移计算

2.1 计算模型与参数

外保温墙体在使用过程中,由于内外温差的存在,会出现垂直于墙体平面方向的法向位移.通过计算外保温墙体各功能层的法向位移,可以分析外墙外保温做法对墙体法向温度变形的影响,进而对不同做法的外墙外保温墙体的结构稳定性与安全性做出评价,总结出对结构安全性更有利的外墙外保温锚固措施.本节基于有限元方法,根据温度场计算结果,对保温墙体的在温度作用下的法向位移进行求解.计算墙体采用薄抹灰聚苯板涂料饰面外墙外保温做法和带预制纤维增强水泥面层的钢丝网插丝聚苯板外墙外保温做法.2种保温做法构造如图5所示.由图5可见,钢丝网插丝聚苯板保温系统由内至外主要由基层混凝土墙体、钢丝网插丝聚苯板(由钢丝网、倾斜钢腹丝和膨胀聚苯板组成)、外表面防护层3部分组成.其中,钢丝网插丝聚苯板和外表面防护层共同组成一体化预制保温构件,并通过倾斜钢腹丝将各功能层连接为整体^[8,12].根据钢丝网插丝聚苯板保温系统的面层材性试验和钢丝拉拔试验结果,确定钢丝网插丝聚苯板的材料和布置方案^[12].钢丝网采用镀锌钢丝,钢丝直径2 mm,钢丝间距50 mm,钢丝网平面与聚苯板外表面的距离为5 mm,钢丝采用焊接方式以正方形网格状排布

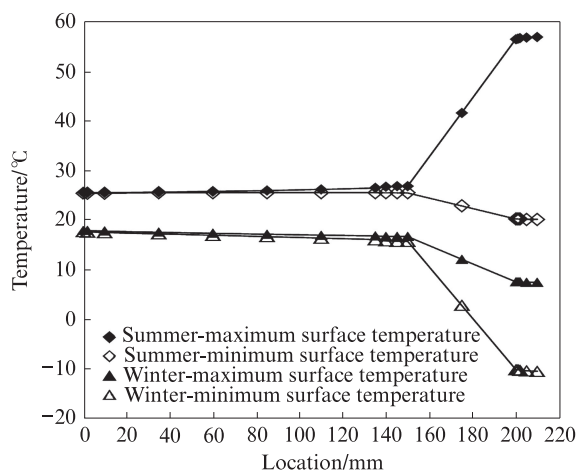


图4 墙体外表面温度最值时沿墙体厚度方向温度场

Fig. 4 Temperature field along thickness direction at extreme temperature of external surface of wall

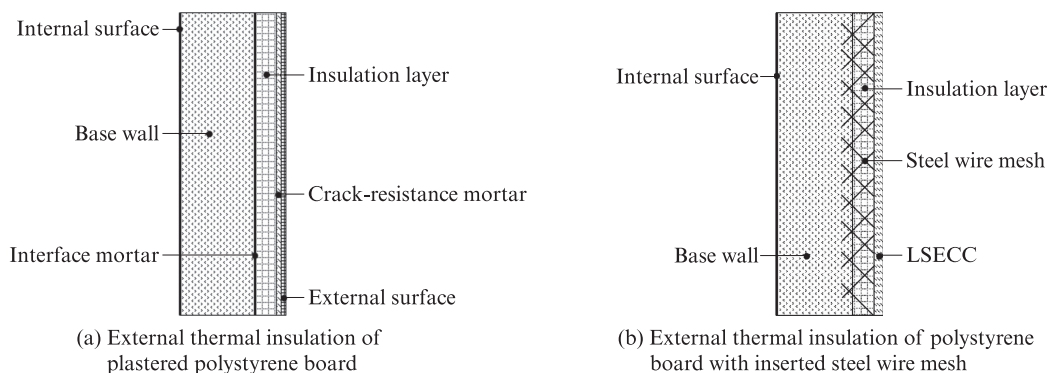


图5 2种外墙外保温做法功能层分布

Fig. 5 Function layer distribution of two methods of external thermal insulation wall

覆盖聚苯板外表面,倾斜钢腹丝采用镀锌钢丝,直径为2 mm,伸出聚苯板内表面长度为60 mm,倾斜角度为45°,全长约为130 mm.

构建无锚栓薄抹灰聚苯板外保温做法、钢锚栓薄抹灰聚苯板外保温做法和钢丝网插丝聚苯板外保温做法3种计算单元,计算各类保温墙体在不同季节的墙体法向位移.各计算单元的尺寸与材料参数如

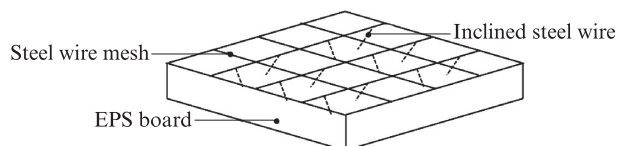


图6 钢丝网插丝聚苯板组成

Fig. 6 Composition of polystyrene board with inserted steel wire mesh

表4、5所示.

表4 无锚栓/钢锚栓薄抹灰聚苯板外保温系统材料参数

Table 4 Material parameters of without anchor bolt/steel anchor bolt plastered polystyrene board external thermal insulation system

Parameter	Base wall	Insulation layer	Mortar	External surface	Steel anchor bolt
d/mm	150	50	5	5	8*
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 400	30	1 600	1 100	7 850
$c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	920	1 380	1 050	1 050	450
$\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	1.74	0.04	0.81	0.50	36.00
$\alpha\times 10^6/\text{K}^{-1}$	10.0	60.0	8.5	8.5	15.0
E/GPa	30.0	0.01	25.0	2.0	205.0
ν	0.2	0.4	0.3	0.3	0.3

Note: * represents diameter; α —Thermal deformation coefficient; E —Elastic modulus; ν —Poisson's ratio.

表5 钢丝网插丝聚苯板外保温系统材料参数

Table 5 Material parameters of polystyrene board with inserted steel wire mesh external thermal insulation system

Parameter	Base wall	Insulation layer	Steel wire	External surface
d/mm	150	50	2*	10
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 400	30	7 850	2 400
$c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	920	1 380	450	1 000
$\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	1.74	0.04	36.00	1.50
$\alpha\times 10^6/\text{K}^{-1}$	10.0	60.0	15.0	10.0
E/GPa	30.0	0.01	205.0	30.0
ν	0.2	0.4	0.3	0.3

Note: * represents diameter.

3种计算单元的截面尺寸均为250 mm×250 mm.其中,钢锚栓薄抹灰聚苯板外保温做法在截面中心位置处设置钢锚栓,钢丝网插丝聚苯板外保温做法

在保温层表面设置等间距排布的钢丝网插丝.

2.2 计算结果与分析

2.2.1 法向位移计算结果

采用有限元方法,使用有限元软件 ANSYS19.0 进行计算,对无锚栓薄抹灰聚苯板外保温系统、钢锚栓薄抹灰聚苯板外保温系统和钢丝网插丝聚苯板外保温系统建立三维计算模型.选取夏冬两季,将温度场计算结果中北京西墙外表面夏季最高温度和冬季最低温度时温度沿墙体厚度方向分布的数据作为体荷载施加在各节点上,得到不同保温做法的最大平面法向位移.图7为夏季墙体各层法向位移云图.不同保温做法计算代表单元的夏季最大法向位移结果列于表6.

图8为冬季墙体各层法向位移云图.不同保温做法计算代表单元的冬季最大法向位移结果列

于表7。

2.2.2 结构安全性影响分析

由图7和表6可知:(1)在夏季高温条件下,无锚栓薄抹灰聚苯板保温做法、钢锚栓薄抹灰聚苯板保温做法和钢丝网插丝聚苯板保温做法的各层最大法向位移呈现出相同的趋势,即外表面层位移>保温层位移>基层墙体位移。(2)由于锚固措施的采用,以

外表面层最大法向位移为参考,钢丝网插丝聚苯板保温做法<钢锚栓薄抹灰聚苯板保温做法<无锚栓薄抹灰聚苯板保温做法。(3)钢丝网插丝聚苯板保温做法的外表面层最大法向位移分别是无锚栓薄抹灰聚苯板保温做法、钢锚栓薄抹灰聚苯板保温做法的22%和38%。夏季最大法向位移的主要来源为保温层的膨胀变形。

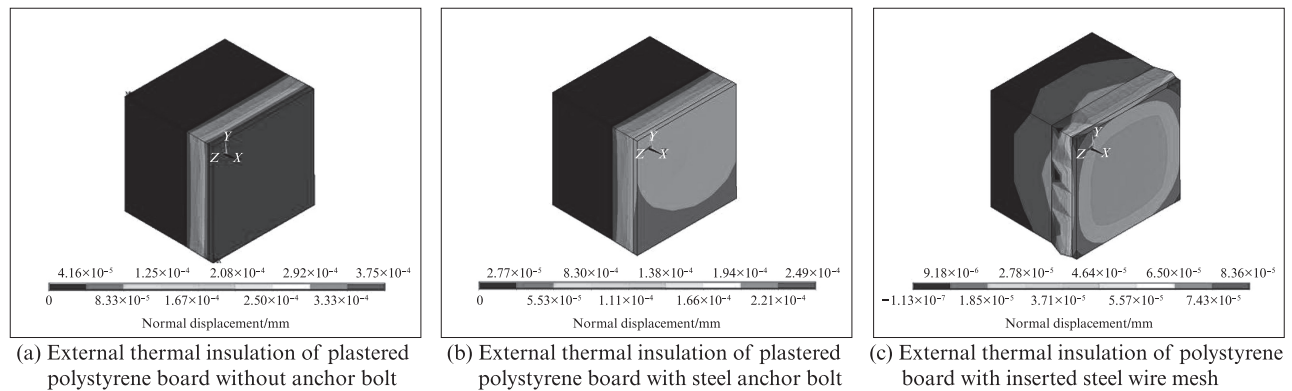


图7 墙体计算单元夏季法向位移分布

Fig. 7 Normal displacement distribution of wall element in summer

表6 不同保温做法墙体计算单元夏季最大法向位移

Table 6 Maximum normal displacement of wall element with different insulation methods in summer

Insulation method	Maximum normal displacement/mm		
	Base wall	Insulation layer	External surface
Plastered polystyrene board without anchor bolt	0.042	0.292	0.375
Plastered polystyrene board with steel anchor bolt	0.028	0.194	0.221
Polystyrene board with inserted steel wire mesh	0.028	0.074	0.084

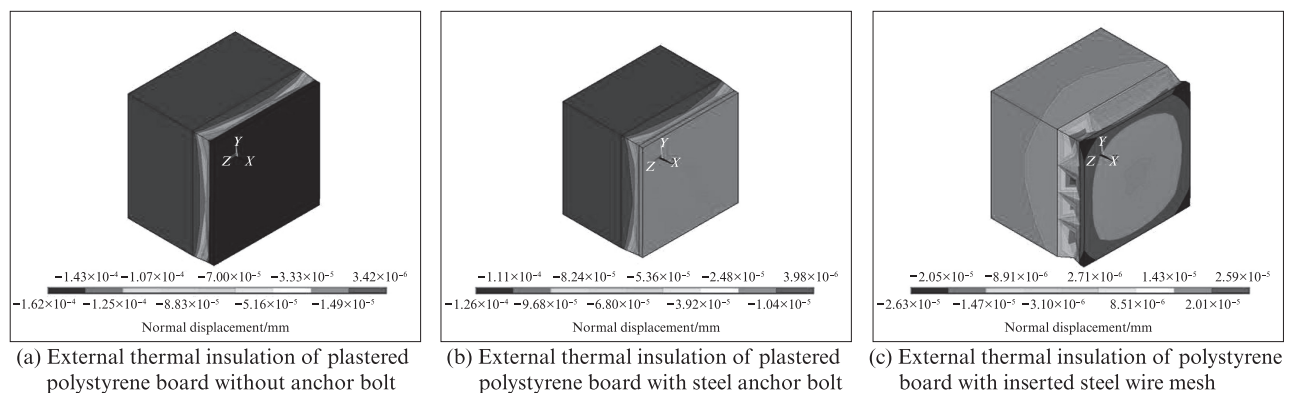


图8 墙体计算单元冬季法向位移分布

Fig. 8 Normal displacement distribution of wall element in winter

表7 不同保温做法墙体计算单元冬季最大法向位移

Table 7 Maximum normal displacement of wall element with different insulation methods in winter

Insulation method	Maximum normal displacement/mm		
	Base wall	Insulation layer	External surface
Plastered polystyrene board without anchor bolt	-0.015	-0.143	-0.162
Plastered polystyrene board with steel anchor bolt	-0.010	-0.068	-0.082
Polystyrene board with inserted steel wire mesh	-0.009	-0.021	-0.026

由图8和表7可知:(1)在冬季低温条件下,无锚栓薄抹灰聚苯板保温做法、钢锚栓薄抹灰聚苯板保温做法和钢丝网插丝聚苯板保温做法的各层最大法向位移绝对值的相对关系与夏季情况类似。(2)以外表面层最大法向位移为参考,钢丝网插丝聚苯板保温做法的外表面层最大法向位移分别是无锚栓薄抹灰聚苯板保温做法、钢锚栓薄抹灰聚苯板保温做法的16%和32%。冬季最大法向位移的主要来源为保温层的收缩变形。

采用带预制纤维增强延性水泥面层的钢丝网插丝聚苯板外墙保温做法,通过设置钢丝网腹丝,可以大幅度减小保温体系的最大法向位移,显著降低外保温系统发生空鼓、脱落的风险,提高结构的稳定性和安全性。采用高韧性低收缩纤维增强水泥基复合材料(LSECC)的面层,与普通水泥砂浆相比,其延性及抗裂性均得到较大幅度提升^[6-7],有效保证了保温系统的耐久性性能。

3 结论

(1)外墙外保温做法墙体温度场的特点是:基层墙体温度变化小;保温层及其他各功能层,包括保温材料层、饰面层和面层防护层温度变化大。

(2)外墙外保温体系冬夏季节法向位移的主要来源为保温层。法向位移的主要表现为夏季膨胀,冬季收缩,法向位移绝对值的变化规律为外表面层位移>保温层位移>基层墙体位移。

(3)设置钢锚栓、钢丝网腹丝等连接锚固增强构件可显著降低外保温系统墙体各功能层的法向位移,提高外保温系统稳定性;钢丝网插丝聚苯板保温做法面层最大法向位移小于无锚栓薄抹灰聚苯板保温墙体和钢锚栓薄抹灰聚苯板保温墙体。

参考文献:

- [1] 张君,黄振利,李志华,等.不同保温形式墙体温度场数值模拟与分析[J].哈尔滨工程大学学报,2009,30(12):1356-1365.
ZHANG Jun, HUANG Zhenli, LI Zhihua, et al. Temperature fields of external walls of different thermal insulation placements [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2009, 30(12):1356-1365. (in Chinese)
- [2] 张君,高原,黄振利.内外保温墙体温度应力对比分析[J].哈尔滨工程大学学报,2011,32(7):895-905.
ZHANG Jun, GAO Yuan, HUANG Zhenli. Comparative studies on the temperature stresses in external walls with different thermal insulation models [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(7):895-905. (in Chinese)
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部.外墙外保温工程技术标准:JGJ144—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019:2-10.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of China. Technical standard for external thermal insulation on walls: JGJ144—2019 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2019:2-10. (in Chinese)
- [4] 北京建筑节能与环境工程协会.外保温技术理论与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2015:15-40.
Beijing Building Energy Conservation and Environmental Engineering Association. Theory and application of external insulation technology [M]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2015:15-40. (in Chinese)
- [5] 北京振利高新技术有限公司.外墙外保温施工工法[M].北京:中国建筑工业出版社,2007:3-8.
Beijing Zhenli High Tech Co., Ltd. Construction method of external thermal insulation wall [M]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2007:3-8. (in Chinese)
- [6] ZHANG J, GONG C X, GUO Z L, et al. Engineered cementitious composite with characteristic of low drying shrinkage [J]. Cement and Concrete Research, 2008, 39 (4): 303-312.
- [7] ZHANG J. Mechanical performance of low shrinkage engineered cementitious composite in tension and compression [J]. Journal of Composite Materials, 2009, 43(22):2571-2585.
- [8] 王家赫,张君,王振波.带预制纤维增强水泥面层的钢丝网插丝聚苯板外墙保温系统[C]//中国硅酸盐学会混凝土与水泥制品分会第九届理事会成立大会暨第十一届全国高性能混凝土学术研讨会论文集.哈尔滨:哈尔滨出版社,2015:97-103.
WANG Jiahe, ZHANG Jun, WANG Zhenbo. Wire mesh plate exterior insulation system with fiber reinforced cement layer [C]//Symposium of 9th Council Founding Congress and 11th National High Performance Concrete Academic Seminar of Concrete and Cement Products Branch of Chinese Ceramic Society. Harbin:Harbin Press,2015:97-103. (in Chinese)
- [9] 秦尚松,刘元珍,李珠,等.保温砂浆墙体保温系统温度效应研究[J].工程力学,2011,28(增刊1):64-68.
QIN Shangsong, LIU Yuanzhen, LI Zhu, et al. Study on temperature effects on walls with thermal insulation mortar system [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(Suppl 1): 64-68. (in Chinese)
- [10] HUANG Y H, LIU G X, HUANG S P, et al. Experimental and finite element investigations on the temperature field of a massive bridge pier caused by the hydration heat of concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 192:240-252.
- [11] ZHOU Y C, BAI L, YANG S Y, et al. Simulation analysis of mass concrete temperature field [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2012, 5:5-12.
- [12] 王家赫,张君,于蕾,等.钢丝与混凝土粘结拔出行为的试验与模拟[J].工程力学,2016,33(6):202-208.
WANG Jiahe, ZHANG Jun, YU Lei, et al. Test and simulation on pull-out behavior of steel wire in concrete [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(6):202-208. (in Chinese)