**引用格式**：闫晓，王烁焱，杨丽平，等．超高性能混凝土（UHPC）密肋夹心保温墙板局部传热特性及热桥消解研究[J]．工业建筑，2026，56(2)：62-69．YAN Xiao，WANG Shuoyan，YANG Liping，et al. Research on Local Heat Transfer Characteristics and Thermal Bridge Mitigation in UHPC Ribbed Sandwich Wall Panels[J]. Industrial Construction，2026，56(2)：62-69 (in Chinese)．DOI：10.3724/j.gyjzG26010804

# 超高性能混凝土（UHPC）密肋夹心保温墙板局部传热特性及热桥消解研究*

闫　晓[1]　王烁焱[1]　杨丽平[1,3]　杨　柳[1,2]　刘　衍[1,2]

（1. 西安建筑科技大学建筑学院，西安　710055；2. 绿色建筑全国重点实验室，西安　710055；3. 延安大学建筑工程学院，陕西延安　716000）

**摘　要**　针对超高性能混凝土密肋夹心墙板，通过三维稳态传热计算，量化了墙体在切向（$x$）、法向（$y$）及竖向（$z$）的局部传热特性。结果表明，三个方向的热流密度呈现近似等比例分布的特征，结构几何参数主导各向热流的比例分配，材料热工参数则决定其增幅大小。基于此传热特性提出了采用气凝胶毡对密肋结构进行不同方向差异化包裹的热桥消解措施：当在$x$与$z$方向包裹16 mm厚气凝胶毡时其热工性能最佳，墙体平均传热系数较未包裹降低6.35%；在包裹相同厚度的气凝胶毡时，该方法较嵌入式局部处理方法可使墙体平均传热系数最多降低20.28%。

**关键词**　热桥效应；密肋结构；热桥消解；局部传热特性

# Research on Local Heat Transfer Characteristics and Thermal Bridge Mitigation in UHPC Ribbed Sandwich Wall Panels

YAN Xiao[1]　WANG Shuoyan[1]　YANG Liping[1,3]　YANG Liu[1,2]　LIU Yan[1,2]

(1. *School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an* 710055, *China*; 2. *State Key Laboratory of Green Building, Xi'an* 710055, *China*; 3. *School of Civil Engineering and Architecture, Yan'an University, Yan'an* 716000, *China*)

**Abstract**: Concrete ribs, serving as crucial load-bearing components, inherently face thermal bridging issues that have become a core challenge in the energy-efficient design of such envelope systems. This study focuses on high-performance concrete ribbed sandwich insulation walls, employing three-dimensional steady-state heat transfer simulations to quantify the local thermal characteristics along the tangential (x), normal ($y$), and vertical ($z$) directions. The results indicated that the heat flux densities in the three directions exhibited an approximately proportional distribution. Structural geometric parameters primarily governed the proportional allocation of heat flow in each direction, while the thermophysical properties of materials determined the magnitude of increase. Based on this heat transfer behavior, a thermal bridge mitigation strategy was proposed, involving the differentiated wrapping of the ribs with aerogel felts in different directions. Optimal thermal performance was achieved when the ribs were wrapped with 16-mm-thick aerogel felts in the $x$ and $z$ directions, reducing the wall's average thermal transmittance by 6.35% compared to the unwrapped condition. Under the same thickness of aerogel felts, this method reduced the wall's average thermal transmittance by up to 20.28% compared to embedded local treatment, providing an effective approach for optimizing the thermal performance of concrete ribbed sandwich insulation walls.

*“十四五”国家重点研发计划（2022YFC3801400）。

**第一作者**：闫晓，工学硕士，主要从事建筑热工方向的研究。

**通信作者**：刘衍，工学博士，教授，主要从事建筑热工、建筑气候、新型围护结构、零碳建筑的研究，liuyan@xauat.edu.cn。

**收稿日期**：2026-01-08

**Keywords**: thermal bridging effect; ribbed structure; thermal bridge mitigation; local heat transfer characteristics

近年来,建筑生产方式正经历从传统现场湿作业向预制化、模块化方向的深刻转型[1]。装配式建筑材料生产、运输和施工环节消耗了大量的能耗。在此背景下,采用围护结构一体化的装配式建筑,已成为推动建筑节能、落实“双碳”战略目标的关键技术路径之一[2]。该体系虽在工厂化生产、现场快速组装等方面展现出显著优势,提升了工程效率与质量,但也不可避免地使预制构件拼缝、连接件及构造节点处的热桥效应更加集中和突出,其带来的额外能耗约占建筑总能耗的 10%~30%[3-4]。因此,发展兼顾结构安全、高效保温且显著削弱热桥影响的新型围护结构体系已成为建筑节能的关键所在。混凝土密肋夹心墙板便是此类体系的典型代表,优良的抗震性与结构整体稳定性使其在建筑中应用广泛[5]。然而混凝土密肋在确保结构安全的同时,也成为了破坏保温连续性的线状热桥。因此揭示其局部传热特性并提出针对性的热桥消解措施,对实现此类墙体热工性能的提升具有重要的工程意义。

自 20 世纪 90 年代起,对该体系的研究主要集中于力学性能和结构设计等方面,而在建筑节能领域的研究则相对薄弱,在密肋结构传热特性的研究中,徐传阳等[6]与黄炜[7]均通过对带肋复合保温外墙板热工性能进行数值计算发现混凝土肋部位存在较高的热流密度,热桥效应主要集中在密肋框架上,且热流分布的影响由密肋结构向砌块填充部位扩散。现有研究多聚焦于密肋结构与平壁部位传热性能的影响,尚未对结构内部沿不同方向的传热特性开展系统深入的探讨,无法支撑精细化的热桥消解技术。

在现有的热桥消解技术研究中,石玉凤等[8]提出了在装配式混凝土墙体表面设置不小于 20 mm 厚的外保温层的措施,弥补了夹心保温密肋复合墙板热工缺陷问题。刘扬[9]针对密肋结构局部热桥问题,提出了采用导热系数低的挤塑聚苯乙烯泡沫板外墙外保温系统的措施,增加复合总热阻,进一步降低了墙体的平均传热系数。Zhang 等[10]提出了在横向孔洞内设置保温隔热材料的 H 型混凝土砌块的措施,有效阻断了横向的热桥效应。上述研究针对热桥的消解仅局限于整块墙体保温层的厚度与保温材料导热系数的优化设计,缺乏对墙体结构进行局部传热特性的分析优化处理,消解措施过于粗放。

本文选取超高性能混凝土(UHPC)密肋夹心墙板为研究对象,其中 UHPC 主要应用于墙板内外饰面层。该材料具备优异的耐久性及轻质高强等特性,使得墙板能集保温、隔热、防水等多功能于一体,构成性能优良的装配式框架体系复合外墙。目前该类产品已在工程实践中得到较多应用,具有显著的发展前景。

基于数值计算的方法[11],本文系统分析了混凝土密肋结构的局部热桥效应,提出基于传热特性优化的热桥消解策略,旨在提升多功能一体化围护结构的热工性能,为超低、近零能耗建筑的实际工程应用提供理论依据与技术参考。

## 1　传热模型的建立与验证

### 1.1　模型的建立

#### 1.1.1　物理模型

为研究寒冷地区混凝土密肋夹心保温墙体的传热特性,本文基于 GB/T 51350—2019《近零能耗建筑技术标准》中关于寒冷地区居住建筑外墙平均传热系数的限值要求,通过有限元分析的方法,利用 COMSOL Multiphysics 软件建立了相应的传热分析模型。基准外墙模型长 3240 mm,高 2940 mm,肋柱与肋梁的截面高度为 80 mm;肋柱间距为 1000 mm,肋梁间距为 900 mm,材料的热物性参数见表 1,墙体基准构造见表 2。

**表 1　材料热物性参数**

**Table 1　Thermophysical properties of materials**

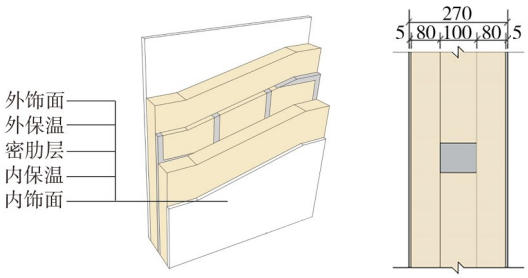
| 材料名称 | 干密度/($kg\cdot m^{-3}$) | 导热系数/($W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$) | 比热容/($J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| 钢筋混凝土 | 2500 | 1.740 | 920 |
| UHPC | 2300 | 2.320 | 1300 |
| 聚氨酯(PU)复合板材 | 35 | 0.024 | 1380 |

#### 1.1.2　数学模型

假设墙体无内热源,忽略材料间接触热阻,墙体与室内、室外空气接触的壁面设置为第三类边界条件,墙体壁面与室内外空气发生对流换热,墙体端面设置为绝热条件,数学模型的公式如下所示。

**表2　基准外墙构造分析**

**Table 2　Analysis of the baseline exterior wall configuration**

| 构造示意 | 基础构造（由外向内） | 平均传热系数/（W·m$^{-2}$·K$^{-1}$） |
|---|---|---|
|  | UHPC外饰面层<br>PU外保温层<br>钢筋混凝土密肋层<br>PU内保温层<br>UHPC内饰面层 | 0.109 |

导热微分方程：

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial z}\right)=0 \quad (1a)$$

第三类边界条件[12]：

$$-\lambda\frac{\partial t}{\partial n}\Big|_{x=n}=h_i(t-t_i) \quad (1b)$$

$$-\lambda\frac{\partial t}{\partial n}\Big|_{x=n}=h_e(t-t_e) \quad (1c)$$

绝热边界条件[12]：

$$-\lambda\frac{\partial t}{\partial n}=0 \quad (1d)$$

式中：$\lambda$为导热系数；$t$为墙体温度；$x$，$y$，$z$为空间变量；$h_e$为外表面换热系数；$h_i$为内表面换热系数；$t_i$为室内空气温度，根据GB/T 50176—2016《民用建筑热工设计规范》[13]，冬季室内采暖房间取18 ℃；$t_e$为室外空气温度，本文研究选取西安作为典型城市展开研究，根据热惰性指标进行计算[13]，室外温度为-4.8 ℃；$n$为$x$，$y$外法线方向。

### 1.2　网格划分与独立性验证

模型计算域采用自由四面体网格进行离散。通过对几何模型进行合理简化，并针对密肋结构等关键区域优化网格尺寸分布，实现了网格密度与物理场梯度的良好匹配。

为验证模拟结果与网格数量的无关性，选取5套不同规模的网格展开独立性验证，并以热流密度作为考核指标。计算结果如图1所示，当网格数量为668194时，墙体的热流密度与网格数为774930时的结果误差为0.0036%，因此可认为当网格数量为668194时获得了网格无关解。

### 1.3　模型验证

采用文献[14]中的试验数据对提出的建模方法进行校验。通过对7组不同构造的密肋夹心保温装配式复合墙板开展冷热箱-热流计法试验，获得了墙体平均传热系数与不同测点表面温度值的实测数据。本文选取的密肋夹心保温装配式复合墙板构造为15 mm厚的混凝土外饰面层；50 mm厚的模塑聚苯板外保温层；180 mm厚的密肋层及17 mm厚的混凝土砂浆抹面层，并采用本文提出的建模方法，建立了其对应的传热计算模型。模型中内表面换热系数、内外表面温度以及材料导热系数等关键参数，均严格依据文献[14]给定数值进行设置。

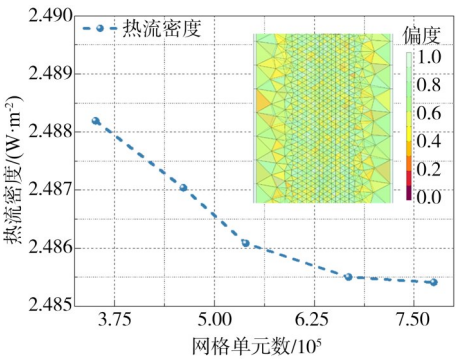



**图1**　网格单元划分及独立性验证

**Fig. 1**　Meshing and independence verification

模拟结果见表3，墙体平均传热系数的数值计算值与实测值基本吻合，最大误差为1.67%。内、外表面测点温度的数值计算值与实测值的最大误差仅为0.664%，进一步验证了本文数值计算的准确性。

## 2　局部传热特性

### 2.1　热桥效应局部特性分析

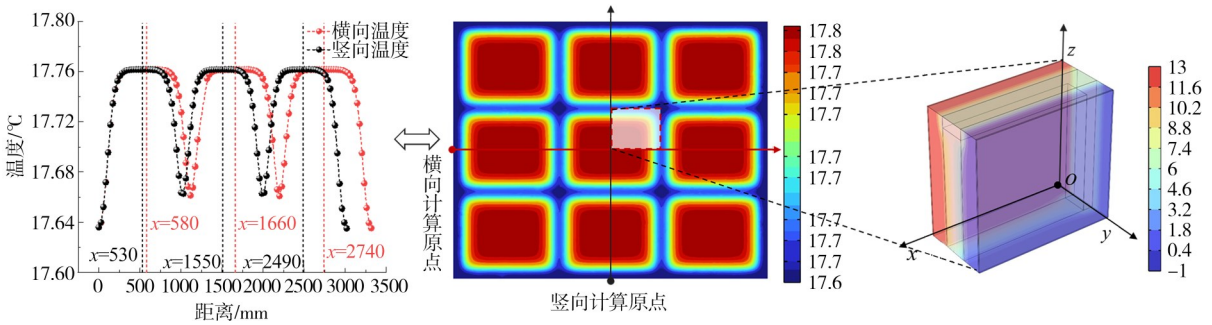
保温层与混凝土密肋结构层由于材料导热性能上的显著差异，在墙体内部形成热桥效应，导致热流密度呈非均匀性分布，形成具有一定范围的热桥影响区域。对混凝土密肋夹心墙板模型进行横向与竖向温度分布的数值计算，计算结果如图2（a）所示。

两个方向上的温度分布与肋格间距呈现规律性变化：每个肋格内的温度变化趋势一致，均表现

**表 3　试件 2 实测值[14]与数值计算值对比**

**Table 3　Comparison of measured and simulated values for Specimen 2**

| 测点 | 内表面温度实测值/℃ | 内表面温度数值计算值/℃ | 误差/% | 外表面温度实测值/℃ | 外表面温度数值计算值/℃ | 误差/% | 平均传热系数实测值/(W·m$^{-2}$·K$^{-1}$) | 平均传热系数数值计算值/(W·m$^{-2}$·K$^{-1}$) | 误差/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 16.886 | 16.913 | 0.160 | −4.436 | −4.42 | 0.361 | 0.66 | 0.649 | 1.67 |
| B | 16.886 | 16.947 | 0.361 | −4.452 | −4.439 | 0.292 | | | |
| C | 16.936 | 16.913 | 0.136 | −4.436 | −4.425 | 0.248 | | | |
| D | 16.411 | 16.317 | 0.573 | −4.456 | −4.444 | 0.269 | | | |
| E | 16.411 | 16.302 | 0.664 | −4.476 | −4.463 | 0.290 | | | |
| F | 16.412 | 16.316 | 0.585 | −4.456 | −4.444 | 0.269 | | | |




（a）基准外墙的横向与竖向温度曲线　（b）基准外墙的内表面温度分布云图，℃　（c）选取的代表性模型单元，℃

**图 2**　代表性模型单元的选取流程

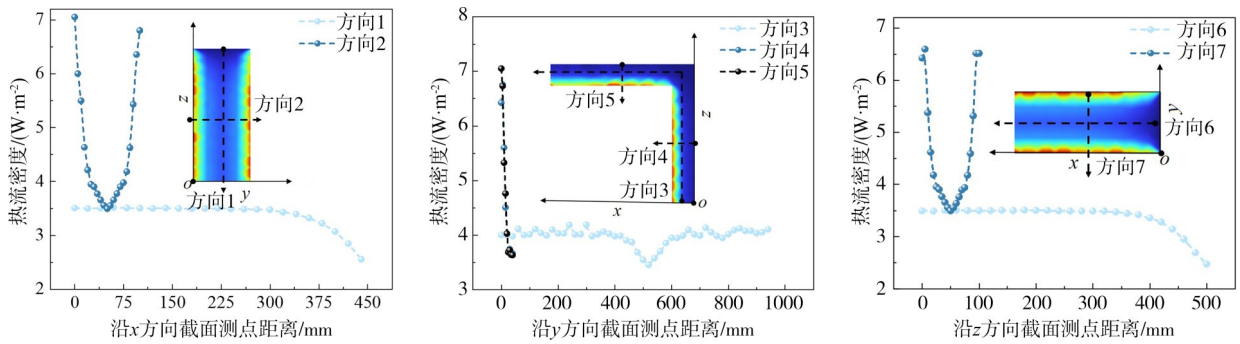
**Fig. 2**　Process for the selection of representative model units

出由边缘向中心逐渐升高，趋于稳定后再逐渐降低的分布特征，且空间分布具有明显的左右对称与上下对称性。因此，可将 1/4 肋格区域视为该墙体的代表性模型单元，选取流程如图 2 所示。

墙体内部的热量传递，根据具体传热方向定义为切向（$x$ 方向）、法向（$y$ 方向）与竖向（$z$ 方向）[15]。热桥的存在加剧了热量在不同方向上的传递速度，进一步造成热量流失。

为进一步探究该墙体的局部传热特性，对比分析了密肋结构不同方向截面的热流密度分布情况，如图 3 所示。可见：

1）混凝土密肋改变了热量传递路径，一部分热量沿墙体 $y$ 方向传递，依次贯穿内饰面、保温层、密肋层，最终经由外保温与外饰面层导出至室外；另一部分热量在保温层与密肋交界区域发生流向偏转，形成沿 $x$ 方向与 $z$ 方向的热量传递。热流在密肋结构处产生汇聚效应向室外传递，充分揭示了密肋结构与保温材料间存在的显著热桥效应。




（a）$x$ 方向　（b）$y$ 方向　（c）$z$ 方向

**图 3**　不同方向热流密度的分布

**Fig. 3**　Distribution of heat flux density in different directions

2）混凝土密肋影响不同方向的热量比重，在基准外墙模型的代表性模型单元中，通过对密肋结构三个方向截面上的热流密度进行数值计算分析，发现流经该结构 $x$ 方向与 $z$ 方向的热流密度数值基本一致，沿 $y$ 方向热流密度相对较大，其中，$x$ 方向热流密度为 4.348 W/m$^2$，$y$ 方向热流密度为 4.629 W/m$^2$，$z$ 方向热流密度为 4.413 W/m$^2$。表明在这三个方向上的热量传递对热桥效应贡献程度的比重接近 1∶1.1∶1，进一步表明热桥效应的存在不仅使热量沿密肋部位 $y$ 方向集中传递，也在 $x$ 和 $z$ 方向发生偏转且热桥效应影响较大，不可忽略。

## 2.2　影响因素分析

根据热量传递路径长度、传热面积与传热速率之间的关系，可将影响因素归纳为结构几何参数与材料热工参数两类。密肋层厚度、肋柱截面高度与肋梁截面高度为结构几何参数，该因素决定了热桥的尺度特征，直接影响热量传递的路径形态和尺寸。混凝土与保温材料的导热系数为材料热工参数，该因素反映了材料对热流的阻隔能力，共同影响热量在墙体内部的传递速率。

本文以通过混凝土密肋部位三个不同方向上的热流密度为研究对象，定量分析不同因素对热桥效应的影响程度。具体因素的取值范围见表 4。

**表 4　影响因素取值**

**Table 4　Values of influencing factors**

| 结构几何参数/mm | | | 材料热工参数/(W·m$^{-1}$·K$^{-1}$) | |
|---|---|---|---|---|
| 密肋层厚度 | 肋柱截面高度 | 肋梁截面高度 | 混凝土材料导热系数 | 保温材料导热系数 |
| 100，110，120，130，140 | 80，90，100，110，120 | 80，90，100，110，120 | 0.18，0.53，1.28，1.74 | 0.024，0.030，0.039，0.064 |

### 2.2.1　结构几何参数影响因素分析

随着结构几何参数因素尺寸的增大，三个方向的热流密度比例均偏离了基准外墙模型的比例（1∶1.1∶1）。在不同工况下，三个方向的热流可交替成为主导，但其各自占比最高不超过总热流的 35.5%。其主要原因在于结构几何参数的改变直接影响了热桥的几何尺寸与形态，从而扰动了局部的温度场与热流路径分布。

对于混凝土密肋 $x$ 方向热流密度的影响程度，由图 4 可知，肋梁截面高度与密肋层厚度对其影响程度很小，影响幅度保持在 0.002%~1.3%。而肋柱截面高度对其影响较为显著，影响幅度保持在 1.7%~3.8%。在 $y$ 方向热工性能分析中，肋柱截面高度与肋梁截面高度对热流密度均呈现负相关关系。肋柱截面高度影响幅度为 2.3%~5.2%，肋梁截面高度影响幅度为 1.6%~4.6%，密肋层厚度对热流密度的影响幅度较小，呈现出正相关关系。在 $z$ 方向热工性能分析中，肋梁截面高度对热流密度的影响程度较为显著。随着肋梁截面高度的增加，热流密度逐渐减弱，其影响幅度保持在 2.0%~4.4%。相比之下，其余因素的影响相对较小。密肋层厚度的变化对墙体的平均传热系数影响最大，影响幅度保持在 2.6%~12.6%，其次为肋梁截面高度，影响幅度为 2.2%~7.8%，最后为肋柱截面高度，影响幅度为 0.5%~1.5%。

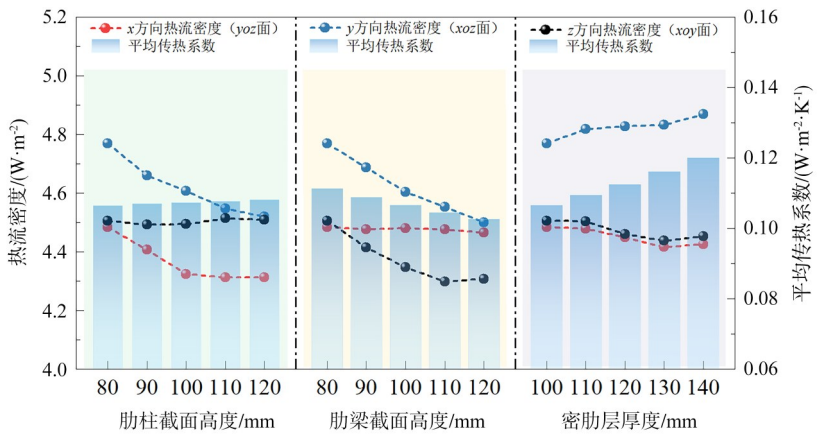



**图 4　结构几何参数影响因素分析**

**Fig. 4　Analysis of factors influencing structural geometric parameters**

这一差异主要源于其在围护结构中热传递路径的不同。其中，肋柱与肋梁截面高度的变化影响了混凝土密肋导热截面的尺寸，进而加剧了局部热流集中和温度分布不均。而密肋层厚度的增加虽延长了传热路径，但由于放大了混凝土密肋的几何尺寸，在整体上仍会强化密肋的热桥效应。

**2.2.2**　材料热工参数影响因素分析

随着材料导热系数的增大，三个方向的热流密度比例与基准模型的比例基本保持一致，均为 1:1.1:1，这表明在模型保持几何对称性及边界条件均匀一致性的前提下，热流的空间分布形态主要由结构构造主导，而对材料导热系数的变化不敏感，但在影响程度上存在明显差异，具体分析如图 5 所示，其中保温材料导热系数的影响尤为突出。

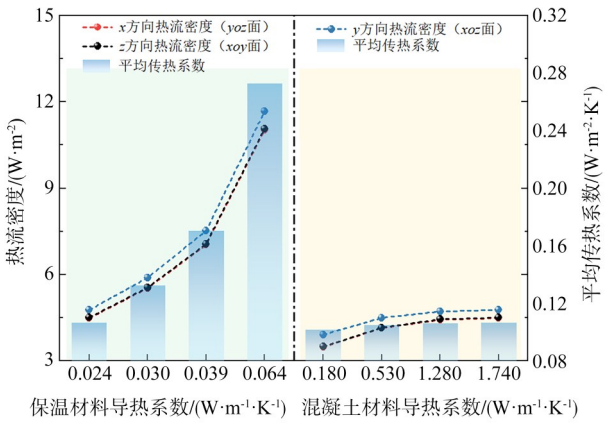



**图 5**　材料参数影响因素分析

**Fig. 5**　Analysis of factors influencing material parameters

保温层作为构成墙体热阻的主要部分，其导热系数直接决定通过墙体主体的热流大小。一旦其热阻降低，墙体整体传热量会显著上升，在热桥区域会形成明显的局部热流集中现象，因此随着保温材料导热系数的变化，混凝土密肋三个方向热流密度的增幅保持在 23.2%~145.9%，对墙体平均传热系数的增幅保持在 24.2%~156.2%。混凝土导热系数的影响相对较小，主要原因在于混凝土在墙体中厚度占比有限，导热系数的变化对墙体整体热阻影响微弱，热工贡献相对较小。因此其变化导致在三个方向热流密度的增幅保持在 1.0%~22.4%，对墙体平均传热系数的增幅保持在 0.2%~4.5%，整体而言，保温材料导热系数对热桥效应的影响幅度大于混凝土材料导热系数。

从建筑热工角度分析，改善材料热工参数对围护结构热工性能的提升作用显著优于调整结构几何参数。因此针对严寒、寒冷地区建议优先选用低导热系数的保温材料，可以有效提升墙体的热工性能。

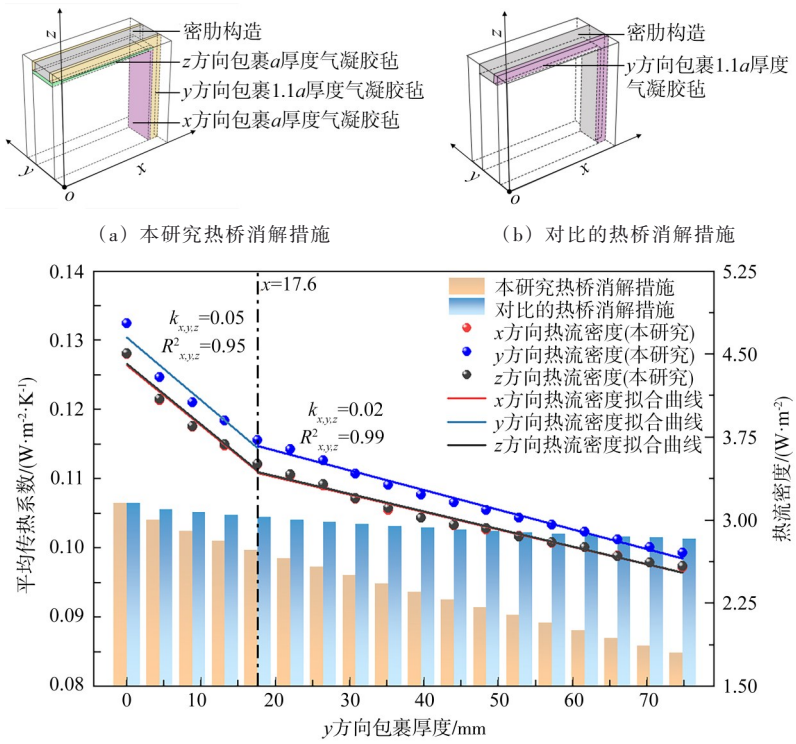
## 3　热桥消解

热桥消解本质上是削弱由导热性能差异引起的局部热流集中。对于混凝土密肋夹心墙板，若一味通过降低材料导热系数来提升热阻[16]，将进一步加剧墙体内部承重结构与保温层之间的热工性能差异。虽然大幅度降低了墙体的平均传热系数，但会导致热流在混凝土密肋部位集中流失，从而放大局部热桥效应，引起内表面温度显著降低，增大结露风险。因此宜采用均衡保温、调控热桥的策略，即在优化保温材料性能的同时，对混凝土密肋部位的热桥效应进行有效处理。而断热桥措施主要分为两类：一是通过在连接件等关键部位包裹隔热材料以局部增大热阻[17-19]，该方法在工程中已广泛应用；二是通过腹板开孔来延长热量传递路径[20]。为兼顾结构完整性与整体稳定性，密肋结构宜优先采用局部增大热阻的方式来实现断热桥。

根据代表性模型单元在三个方向上的热流密度分布特征，靶向确定了密肋结构 $x$ 方向、$y$ 方向与 $z$ 方向所需包裹厚度的适宜性取值。在现有的绝热材料中，气凝胶的导热系数小，工程应用广泛，故后续选取 $SiO_2$ 气凝胶毡[21]展开分析。

在基准外墙的代表性模型单元中，密肋结构在 $x$ 与 $z$ 方向的气凝胶毡包裹厚度为 4~68 mm（步长 4 mm），$y$ 方向包裹厚度为 4.4~74.8 mm（步长 4.4 mm）。为验证该热桥消解方案的实际效果，本研究采用对比分析方法，引入文献[22]中提出的墙板嵌入式局部热桥外保温处理措施作为对照。该措施应用于寒冷气候区的工程项目中，在密肋结构靠近外保温一侧的 $y$ 方向进行保温隔热材料的包裹，将此措施应用于代表性模型单元中，采用 $SiO_2$ 气凝胶毡包裹，气凝胶毡包裹厚度范围为 4.4~74.8 mm（步长 4.4 mm），如图 6 所示。

根据热流密度变化曲线可知，本研究提出的措施可有效削弱墙体热桥效应。在 $y$ 方向包裹厚度达到 17.6 mm 前，热流密度拟合曲线斜率 $k$ 最大为 0.05；超过该厚度后，曲线下降幅度变缓，斜率 $k$ 为 0.02，表明该厚度为最优包裹厚度。此时墙体平均传热系数为 0.10 W/(m²·K)，三个方向的热桥削弱效果基本相当：$y$ 方向降低 22.20%，$x$、$z$ 方向分别为




（a）本研究热桥消解措施　（b）对比的热桥消解措施

（c）两种热桥消解措施的热流密度分析

注：$a$为厚度。

**图6**　热桥消解措施对比分析

**Fig. 6**　Comparative analysis of thermal bridge mitigation measures

21.80%和22.10%。与未包裹工况相比，墙体平均传热系数降低了6.35%；与对比的热桥消解措施相比，墙体平均传热系数降低了4.54%。在包裹同等厚度气凝胶毡时，本文提出的措施较嵌入式局部处理方法，能使墙体平均传热系数进一步降低，最大降幅达20.28%，为高性能围护结构的热工优化提供了有效途径。

## 4　结　论

本文以混凝土密肋夹心墙板为研究对象，通过采取数值计算的方法分析了混凝土密肋结构的局部传热特性，提出了热桥消解的措施，得到了以下结论：

1）明确了三个方向的热流密度呈现近似等比例分布的特征，$x$方向与$z$方向的热桥效应不可忽略。

2）在混凝土密肋夹心墙板热桥效应的影响因素中，结构几何参数主导各向热流的比例分配，材料热工参数则决定其增幅大小，其中保温材料导热系数对墙体平均传热系数的影响最为显著。因此在满足力学性能前提下，优先选用低导热系数的保温材料，并协同优化混凝土密肋的截面尺寸，系统降低密肋部位热桥区域的传热损失。

3）根据混凝土密肋夹心墙板的局部传热特性，提出了采用$SiO_2$气凝胶毡靶向包裹密肋结构的热桥消解措施，该措施可显著削弱三个方向上的热桥效应，并降低墙体整体平均传热系数。

## 参　考　文　献

[1]　蒋勤俭. 国内外装配式混凝土建筑发展综述[J]. 建筑技术，2010，41(12)：1074-1077.

[2]　吴自敏. 寒冷地区超低能耗建筑用于外墙保温系统结构承托的挑板热桥研究[J]. 建筑节能(中英文)，2022，50(12)：72-76.

[3]　于斯斯. 预制混凝土夹心墙等效传热系数研究[D]. 西安：西安建筑科技大学，2022.

[4]　O'HEGARTY R，REILLY A，WEST R，et al. Thermal investigation of thin precast concrete sandwich panels[J]. Journal of Building Engineering，2020，27：100937.

[5]　颜雪洲. 轻质高性能混凝土力学性能试验研究及新型复合墙体性能分析[D]. 北京：北京交通大学，2006.

[6]　徐传阳，李君妮，李昕，等. 带肋复合保温外墙板传热系数计算方法[J]. 建筑科学，2025，41(4)：110-115.

[7]　黄炜. 密肋复合墙体抗震性能及设计理论研究[D]. 西安：西

安建筑科技大学，2004.
[8] 石玉凤，陈英杰，陈国新，等. 严寒地区夹芯保温密肋复合外墙热工缺陷探析[J]. 建筑节能，2018，46(12)：54-57.
[9] 刘扬. 密肋复合墙结构节能建筑综合效益评价方法研究[D]. 西安：西安建筑科技大学，2009.
[10] ZHANG C H，QIU J S，GUAN X，et al. Research on thermal performance of external thermal insulation composite concrete wall block[J]. International Journal of Heat and Technology，2018，36(1)：277-281.
[11] JAKUBOVSKIS R，KAKLAUSKAS G. Damage of bond in reinforced concrete：a detailed finite element analysis[J]. Structural Concrete，2021，22(6)：3228-3240.
[12] 李魁山，张旭. 建筑热桥三维非稳态传热数值模拟分析[J]. 建筑科学，2007(12)：35-38.
[13] 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：中国计划出版社，2016.
[14] 张坚. PCW 结构墙片传热性能模拟与实验研究[D]. 西安：西安建筑科技大学，2019.
[15] 刘衍，崔临风，杨丽平，等. 墙体平均传热系数简化算法的辨析研究[J]. 建筑科学，2024，40(2)：204-212.
[16] LU M J. Thermal optimization strategy of external wall in low-rise light steel keel structure based on the theory of thermal bridge[J]. Advanced Materials Research，2013，671：2150-2153.
[17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 外墙保温用锚栓：JG/T 366—2012[S]. 北京：中国标准出版社，2012.
[18] 中国工程建设标准化协会. 建筑外墙保温锚固件应用技术规程：T/CECS 1561—2024[S]. 北京：中国标准出版社，2024.
[19] 沈阳建筑大学. 一种断热桥螺纹连接件及断热桥方法：201810708884.4[P]. 2018-11-02.
[20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准：GB 50017—2017[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2018.
[21] 于镇洲. $SiO_2$气凝胶纤维复合材料制备及其在建筑节能领域应用的进展[J]. 复合材料科学与工程，2022(9)：124-132.
[22] 姚谦峰，张旭峰，魏晓. 新型节能复合墙体保温性能及连接构造研究[J]. 工业建筑，2007，37(9)：69-72.