引用格式：古健翔，胡冗冗，王国乾．新型装配式混凝土模块单元外墙传热性能研究[J]．工业建筑，2026，56(2)：70-76．GU Jianxiang，HU Rongrong，WANG Guoqian．Research on the Heat Transfer Performance of Novel Prefabricated Concrete Modular Unit Walls[J]．Industrial Construction，2026，56(2)：70-76 (in Chinese)．DOI：10．3724/j．gyjzG26012601

新型装配式混凝土模块单元外墙传热性能研究

古健翔[1]　胡冗冗[1,2]　王国乾[1]

(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)

摘　要　装配式混凝土模块建筑是工业化装配式建筑的最高集成形式，因其极高的标准化程度，在工业化生产、自动化装配与数字化运维方面具有天然优势，是推动“智能建造”发展、推动建筑业绿色低碳转型的重要途径之一。针对一种新型装配式混凝土模块结构体系，采用ANSYS软件，进行了模块单元外墙的传热性能有限元分析，揭示了干式连接件、外保温层等因素对外墙热性能的影响；分析了不同外保温构造条件下干式连接件所引起的局部热桥，探究了模块单元外墙平均传热系数适用计算方法。结果表明：在寒冷气候区条件下，盒式连接件处会形成局部热桥，使得框架结构部位平均传热系数提升3．4%。随着外覆保温层厚度的增加，热桥效应被逐渐削弱，一维面积加权与三维模拟值对于外墙平均传热系数的计算相对误差逐渐减小，当保温层厚度超过30 mm时误差已小于3%，当外保温层厚度达到70 mm时，外墙平均传热系数为0．42 W/(m²·K)，满足DB 61/T 5033—2022《居住建筑节能设计标准》中对于“建筑层数>3”的外墙传热系数限值要求。

关键词　装配式建筑；干式连接；外墙传热性能；混凝土模块结构

Research on the Heat Transfer Performance of Novel Prefabricated Concrete Modular Unit Walls

GU Jianxiang[1]　HU Rongrong[1,2]　WANG Guoqian[1]

(1．*School of Architecture，Xi'an University of Architecture and Technology，Xi'an* 710055，*China*；2．*National Key Laboratory of Green Building，Xi'an* 710055，*China*)

Abstract：Prefabricated concrete modular construction represents the highest level of integration in industrialized prefabricated building systems．Owing to its exceptional degree of standardization，it possesses inherent advantages in industrialized production，automated assembly，and digital operation and maintenance．It serves as a crucial pathway for advancing "intelligent construction" and facilitating the green，low-carbon transformation of the building industry．This paper focuses on a novel prefabricated concrete modular structural system．Using ANSYS software，a finite element analysis was conducted to evaluate the thermal performance of the exterior walls in a modular unit．This study revealed the influence of factors such as dry connectors and external insulation layers on the wall′s thermal performance．It also analyzed the local thermal bridges induced by dry connectors under various external insulation configurations and investigated applicable calculation methods for the average thermal transmittance (U-value) of the modular unit′s exterior wall．The results indicated that under cold climate conditions，box-type connectors create local thermal bridges，increasing the average U-value at the structural frame sections by 3．4%．As the thickness of the external insulation layer increased，the thermal bridge effect was gradually mitigated．The relative error between the one-dimensional area-weighted method and the three-

第一作者：古健翔，硕士研究生，主要从事装配式住宅节能关键技术研究。

通信作者：胡冗冗，博士，教授，博士生导师，主要从事节能建筑与构造方面研究，hurongrong@xauat．edu．cn。

收稿日期：2026-01-26

dimensional simulation for calculating the average wall U-value decreased progressively. When the insulation thickness exceeded 30 mm, the error fell below 3%. When the external insulation thickness reached 70 mm, the average U-value of the exterior wall is 0.42 W/(m²·K), complying with the specified limit for the thermal transmittance of the external wall, as stipulated for buildings with more than 3 storeys in Design Standard for Energy Efficiency of Residential Buildings(DB 61/T 5033—2022).

Keywords: prefabricated building; dry connection; heat transfer performance of exterior walls; concrete modular structure

0　引　言

2022年1月,住建部发布《“十四五”建筑业发展规划》,提出大力发展装配式建筑[1],各种新型装配式结构体系问世并投入实际工程使用[2]。其中装配式模块结构是将建筑分成若干个空间模块,并在工厂生产阶段就完成大部分精装修和清洁工作,然后运输到工地进行拼接搭建。装配式模块化结构体系易于构建和安装,具有时间短、质量可控、装配率高的特点。装配式模块结构主要包括钢结构模块体系和混凝土模块体系,装配式钢结构模块体系节点复杂、造价较高;装配式混凝土模块结构体系以其较高的装配化程度、较低的建筑成本、防火隔声、耐久性好、居住体验更优等特点,在近年来随着建造技术的提高在市场上快速发展,在多个领域可形成广阔的应用前景,但仍存在模块单元自重大,运输和吊装成本高等问题[3-4]。

为解决现有装配式混凝土模块结构连接可靠度不足、自重过大、生产技术落后等问题,西安建筑科技大学土木学院装配式建筑研究课题组研发基于新型干式连接技术及结构轻量化技术的新型装配式混凝土模块结构体系,如图1所示。该模块结构体系的主要结构承载主体为钢筋混凝土壁式框架结构,同时使用热工性能优良的蒸压加气混凝土(ALC)板材作为填充墙体,相比于常规剪力墙式模块结构,建筑整体结构更轻,降低了运输与施工的成本,有利于装配式混凝土模块结构的生产设计和推广建设。目前该模块结构试验已基本完成,其结构力学性能满足设计要求,基本形式及尺寸已定型,并投入实际项目。

其模块间的连接方式见图2。可知:水平接缝使用盒式连接件进行连接,竖向接缝使用软索连接,这种干式连接方式不仅避免了湿作业可能存在的潜在施工质量问题,而且能够进一步提升装配率。

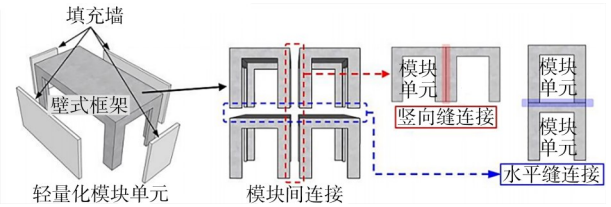


图 1　新型装配式混凝土模块结构体系示意

Fig. 1　Schematic diagram of the novel prefabricated concrete modular structural system

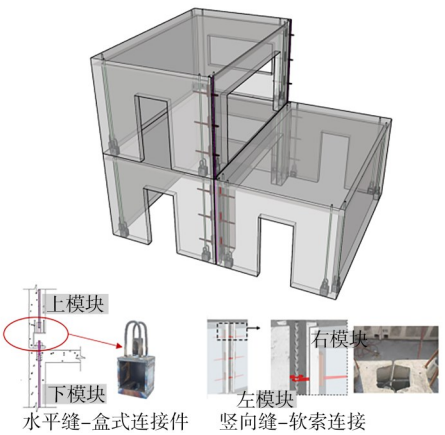


图 2　新型装配式混凝土模块结构体系连接方式

Fig. 2　Connection methods of the novel prefabricated concrete modular structural system

干式连接的装配式混凝土模块结构作为一种高效的建筑工业化形式,因其施工速度快、质量易控、环境影响小等优点而得到广泛应用[5]。然而,该类结构在连接部位(如梁柱节点、墙板接缝等)通常采用螺栓、焊接或专用金属连接件进行机械连接,而非现浇混凝土的湿连接,导致在围护结构内部形成了连续的热传导路径,即结构性热桥,而热桥的存在会显著降低外墙整体热工性能,增加建筑能耗[6-7]。对干式连接装配式混凝土墙体进行精细化传热分析,对于指导该类建筑的热工设计与优化至关重要。

盒式连接件是目前常用于装配式建筑中接缝的一种干式连接件,通过在模块单元墙体内预埋钢

盒,利用受力钢筋或高强度螺栓与预埋钢盒进行连接,从而将上下层模块单元进行可靠连接。该水平缝干式连接方式[8]示意如图3所示。在该盒式连接节点处,坐浆找平层的主要功能为找平与辅助密封接缝,并非核心受力部件,不同于后续湿式连接中所使用的坐浆连接。坐浆连接是指在上下模块单元之间铺设水泥砂浆层,其主要功能为找平、密封及辅助传递压力,属于构造层次的处理[9]。图4为采用这套新型装配式混凝土模块体系的住宅施工现场。

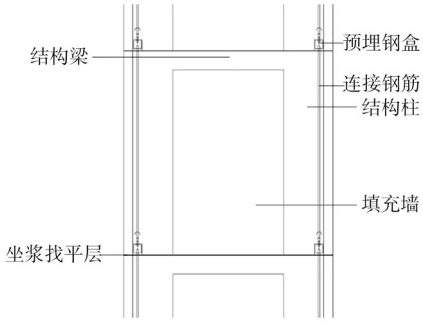


图3 盒式连接水平接缝示意

Fig. 3 Schematic diagram of the box-type connection at a horizontal joint



(a)模块空中调运



(b)模块精准对接



(c)结构主体施工全景

图4 新型装配式混凝土模块结构体系施工现场

Fig. 4 Construction site of the novel prefabricated concrete modular structural system

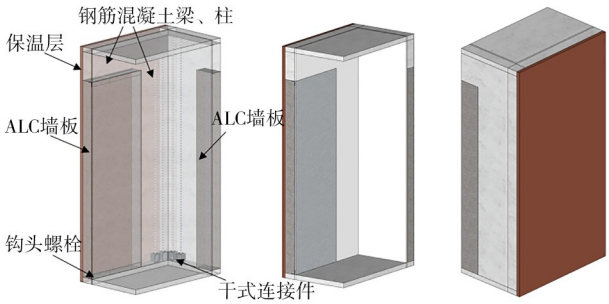
不同于现浇混凝土建筑,装配式混凝土建筑由于其建造方式的不同,构件间的连接方式、构造节点的不同,会存在特殊的结构热桥问题。钢材料的干式连接件、钢筋混凝土材料的梁与柱部位以及墙板或模块之间的接缝部位等,均可能引起不可忽略的热桥问题,影响墙板热性能,需要有针对性的研究和设计[10-12]。装配式混凝土墙板的连接件方面,Kim和Allard[13]通过试验及有限元模拟的方法,研究了寒冷环境下3种类型钢连接件对预制混凝土夹心墙板构件热工性能的影响;徐政等[14]利用Autodesk CFD软件中的传热分析模块对装配式复合墙结构体系中的两种干式连接件进行有限元传热模拟分析,发现干式连接件的热桥作用在不同气候和墙板构造条件下会有明显差异,通过相应的节点构造设计可以减弱或消除墙板热桥。

我国目前针对装配式建筑热工性能与节能技术的研究相对匮乏,应根据各气候分区气候环境特点确定具有最佳节能效果的外围护构造体系[15-16]。特别是部分新型装配式结构体系。由于墙板构造特殊,需要对传热性能进行深入分析。对于新型装配式混凝土模块结构体系,结合当前该模块结构试用地区,我国寒冷B区(依据GB 50176—2016《民用建筑热工设计规范》[17]划分的我国建筑热工设计的二级气候分区)气候特点和建筑节能要求,本文将有针对性地开展寒冷地区装配式混凝土模块单元外墙传热性能分析。通过建立模块结构ANSYS实体有限元模型,揭示干式连接件对外墙传热情况的影响规律,寻求该外墙平均传热系数计算适用方法,为装配式钢筋混凝土模块体系适用于寒冷地区的外围护结构保温设计和构造措施提供参考。

1 模块单元外墙结构热桥定性分析

从传热学原理出发,热桥的形成源于建筑材料导热性能的显著差异及几何结构的不连续性。在装配式混凝土模块体系中,热桥问题主要源于其模块化拼装特性:模块间连接所需要的金属连接件、外墙由多种导热系数不同材料组成及模块单元之间的拼接缝[18]。结合真实结构的情况,模块单元层高为3.3 m,开间取3.3 m,楼板厚度为140 mm,结构柱在立面方向的宽度为540 mm,梁在立面方向的高度为400 mm。楼板、梁、柱部位均为钢筋混凝土。外墙厚度取160 mm,内隔墙墙体厚度为160 mm,外墙与隔墙的墙体材料均为ALC板。将模块单元外墙沿进深方向截取2 m深度的楼板及内隔墙进行建模,所得简化的计算模型可以反映外墙整体的温度分布及传热情况。如图5所示,其模块间的连接节

点，特别是水平缝处的盒式连接件是热工性能的薄弱环节。由于金属连接件的导热系数远高于周围钢筋混凝土墙体材料，极易形成显著的局部热桥。同时由于钢筋混凝土梁、柱的导热系数也高于ALC墙板，作为框架的钢筋混凝土梁柱等部位也易形成结构热桥[19]。



（a）构造详图　（b）室内视角　（c）室外视角

图 5　典型模块单元框架-ALC外墙三维示意

Fig. 5　Three-dimensional schematic diagram of a typical modular unit frame with ALC exterior walls

2　传热模拟模型介绍

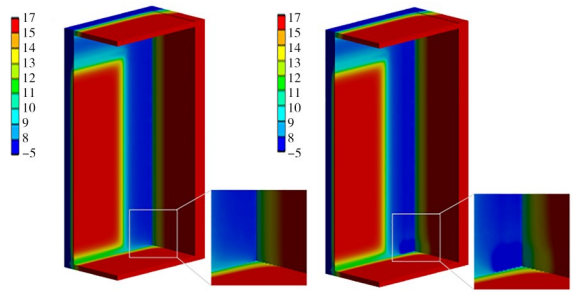
结合寒冷B区气候特点，本节采用ANSYS稳态热分析模块对模块单元外墙模型进行三维稳态传热模拟。选取单个典型模块单元的外墙为计算模型，如图5所示。根据装配式混凝土模块单元有限元模拟分析的特点，选用第三类边界条件作为外墙内外表面的边界条件，除外墙模型内外表面外其他边界面均作绝热处理。热工室内外计算参数取西安地区冬季室内外空气计算参数，冬季室内计算温度取18 ℃，内表面换热系数取8.7 W/(m²·K)，室外计算温度取-6.6 ℃，外表面换热系数取23 W/(m²·K)。

墙体模型所用材料的热工参数根据GB 50176—2016[17]附录B中所列建筑材料热物理性能计算参数进行取值，详见表1。

表 1　材料热工性能参数

Table 1　Thermophysical properties of materials

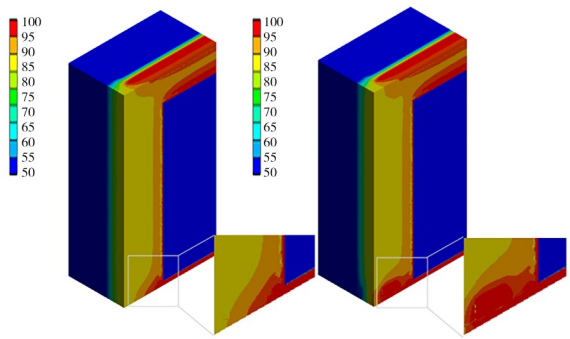
材料	导热系数/(W·m⁻¹·K⁻¹)	密度/(kg·m⁻³)	比热容/(kJ·kg⁻¹·K⁻¹)
钢筋混凝土	1.74	2500	0.92
蒸压加气混凝土板(ALC)	0.16	500	1.13
模塑聚苯乙烯(EPS)	0.039	20	1.38
挤塑聚苯乙烯(XPS)	0.03	35	1.50
水泥砂浆	0.93	1800	1.05
建筑钢板	58.20	7850	0.48



（a）坐浆连接　（b）盒式连接

图 6　无外保温时不同连接方式下外墙温度分布　℃

Fig. 6　Temperature distribution on the exterior wall with different connection methods without external insulation



（a）坐浆连接　（b）盒式连接

图 7　无外保温时不同连接方式外墙热流密度分布　W/m²

Fig. 7　Heat flux density distribution on the exterior wall with different connection methods without external insulation

3　模拟分析

3.1　三维无外保温时不同连接方式下的外墙传热情况

为了更好地进行对比分析，使用不同连接方式的单元外墙为分析对象，对外墙的传热状况进行模拟，湿式、干式两种连接方式外墙内表面温度分布及外墙热流密度分布如图6、图7所示。

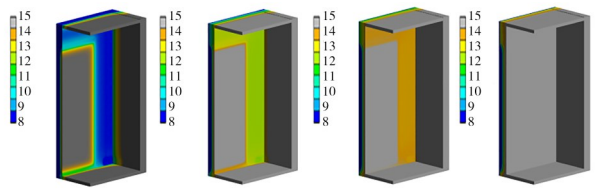
由图6可知：盒式连接件与主断面存在明显温度差异，属于热桥。同时观察ALC填充墙内表面的温度分布情况，还可发现在ALC填充墙与梁、柱交接处的温度比填充墙主体部分的温度略低，交界处存在明显温度变化。在该模型的填充墙与结构性构件的交界处，内表面的温度为12.5~15.1 ℃，而主体中间部分的温度为15.6℃，表明钢筋混凝土梁、柱形成了结构性热桥。与坐浆连接相比，盒式连接导致的内表面最低温度从7.59 ℃下降至5.8 ℃；但两者导致的内表面平均温度差值仅为0.06 ℃，表明盒式连接对外墙内表面温度的不利影响在局部更

为突出。

同时由图7可知：盒式连接件所在部位的热流密度要高于其周边外墙部位的热流密度。基于有限元热工模拟软件数据读取可知：相较于坐浆连接，使用盒式连接后平均热流密度提升，框架结构部位平均传热系数从3.88 W/(m²·K)提升至4.01 W/(m²·K)，影响约为3.4%，这主要是因为金属连接件相较于周围部位导热系数较大，形成局部热性能薄弱区。即盒式连接主要影响外墙的局部温度分布和热流密度分布，对框架结构部位整体热工性能具有一定负面影响。

3.2 使用盒式连接时不同保温层厚度下的外墙传热情况

对于本文工况，即室内温度取18 ℃、相对湿度取60%，计算得到的露点温度为10.1 ℃，低于热舒适度要求的15 ℃，因此选取15 ℃作为外墙内表面温度控制条件。为进一步观察盒式连接件所形成的热桥效应，在装配式钢筋混凝土模块结构外保温的现有工程做法中，采用EPS作为其外保温材料，各节点在不同外保温层厚度下的节点表面温度分布云图如图8所示，图中高于15 ℃的区域显示为灰色；不同外保温层厚度下各部位内表面温度变化如图9所示；外墙平均传热系数与主断面传热系数如图10所示。



(a) 无保温　(b) 10 mm　(c) 20 mm　(d) 30 mm

图8 不同外保温层厚度下的节点表面温度分布 ℃

Fig. 8 Surface temperature distribution at the joint under different external insulation layer thicknesses

由图8、图9可知：不同外保温层厚度下内表面温度最低区域均出现在盒式连接件处。在无外保温的情况下，外墙结构梁、柱及盒式连接件处内表面温度均低于露点温度，有结露风险；随着保温层厚度的增加，各部位的内表面温度均显著提高，各部位之间的温度差明显减小，外墙内表面温度的不均匀分布得到显著改善。当外保温层厚度达到10 mm时，即可以满足GB 50176—2016[17]中冬季需防范结露风险，内表面温度高于露点温度至少1 ℃的要求；当外保温层厚度达到30 mm时，内表面各处

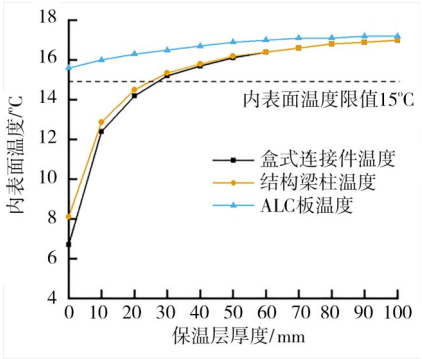


图9 不同外保温层厚度下各部位内表面平均温度

Fig. 9 Average internal surface temperatures at different locations under various external insulation layer thicknesses

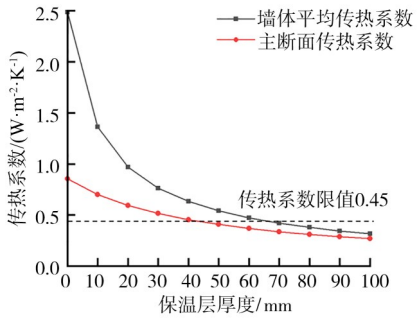


图10 不同外保温层厚度下的外墙平均传热系数与主断面传热系数

Fig. 10 Average thermal transmittance of the exterior wall and thermal transmittances of the principal cross-section under different external insulation thicknesses

温度均达到热舒适度要求的15 ℃，各处均满足热舒适要求。同时外墙的平均传热系数随着保温层厚度的增加进一步下降，与主断面传热系数的差距逐渐减小，表明由盒式连接件、结构梁柱等引起的热桥效应被削弱。由图10可以得知：当外保温层厚度达到70 mm时，外墙的平均传热系数为0.42 W/(m²·K)，满足DB 61/T 5033—2022《居住建筑节能设计标准》[20]中对于“建筑层数>3”的外墙传热系数限值要求。

3.3 模块单元外墙平均传热系数计算适用方法

本研究的模块结构单元外墙的构造较为特殊，内部包含多个热桥部位，在计算外墙平均传热系数时，需要考虑由干式连接件、钢筋混凝土梁、柱等引起的复杂三维传热。为验证一维面积加权简化计算方法是否适用，以下选取不同保温层厚度工况计算外墙平均传热系数，进行三维稳态传热模拟、二维热桥线传热系数计算与一维面积加权简化计算方法下的对比分析。

针对装配式钢筋混凝土模块结构单元外墙采

用模塑聚苯乙烯(EPS)作为其外保温材料,外保温层以 10 mm 为梯度设置 10 种不同工况,各节点室内外边界条件和其余部分材料热工参数设置与前文模拟条件相同,不同外保温层厚度下外墙平均传热系数变化如图 11 所示。图中,“模拟值”是指通过三维稳态传热模拟方法得到的考虑热桥效应下的外墙平均传热系数;“计算值”是指二维热桥线传热系数计算得到的平均传热系数;“加权值”是指通过一维简化的面积加权平均法计算得到的外墙平均传热系数;“相对误差”是指各工况下模拟值与加权值之间的误差。

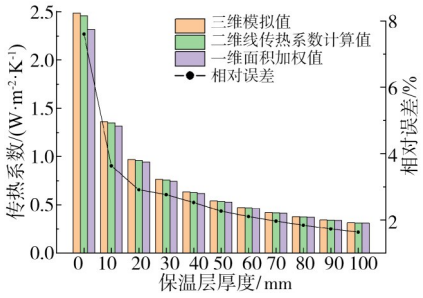


图 11　不同外保温层厚度下的计算误差及平均传热系数

Fig. 11　Calculation errors and average heat transfer coefficients under different external insulation layer thicknesses

由图 11 可知:3 种方法计算所得的外墙平均传热系数都随着外保温层厚度的增大而略有减小。分析模拟值与加权值的相对误差可见:当无外保温时,两种计算方式的相对误差为 7.6%,相对误差水平随着外保温层厚度增大而逐渐减小,这是因为外保温对金属连接件的热桥及不同导热系数构件材料之间的多维传热起到了一定的削弱作用。当外保温层厚度超过 30 mm 时,两种计算方式的误差已小于 3%;当外保温层厚度超过 60 mm 时,两种计算方式的误差小于 3%。表明在寒冷 B 区下,当外保温层厚度达到一定程度时,运用一维面积加权公式计算的平均传热系数与 ANSYS 三维模拟算法的结果呈现高度吻合,误差基本都能控制在容许范围内,可满足节能计算所需的精度要求。因此在工程实践中,建筑师可用面积加权计算结果进行初步节能分析,从而提升效率、降低成本。

4　结束语

通过对寒冷地区装配式混凝土模块结构单元墙体进行有限元分析,揭示了干式连接件、外保温层等对外墙传热性能的影响规律,研究发现:

1)模块单元外墙中的盒式连接件会形成局部热桥。在无外保温的情况下,相对于坐浆连接,使得壁式框架部位平均传热系数从 3.88 W/(m²·K)提升至 4.01 W/(m²·K),影响约为 3.4%;盒式连接件主要影响外墙的局部温度分布和热流密度分布。

2)随着外保温 EPS 板的厚度逐渐增加,内表面温度显著提升,各部位之间的温度差明显减小,外墙内表面温度的不均匀分布得到显著改善。当外保温层厚度达到 30 mm 时,内表面各处温度均达到热舒适度要求的 15 ℃,各处均满足热舒适要求。当外保温层厚度达到 70 mm 时,外墙平均传热系数为 0.42 W/(m²·K),满足规范 DB 61/T 5033—2022 中对传热系数的限值要求。

3)随着保温层厚度的增加,运用一维面积加权公式与三维模拟算法计算外墙平均传热系数的相对误差逐渐减小,当外保温层厚度超过 30 mm 时,两种计算方式的误差已小于 3%,建筑师可采用一维面积加权公式计算模块单元外墙平均传热系数进行初步节能分析。

参　考　文　献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 关于印发“十四五”建筑业发展规划的通知[EB/OL]. (2022-01-19)[2026-02-05]. https://www. gov. cn/zhengce/zhengceku/2022-01/27/content_5670687. htm.

[2] 周天华,王继琴,邵英豪,等. 弱框架-轻钢复合墙体装配式房屋结构体系[J]. 建筑科学与工程学报,2022,39(1):36-43.

[3] 薛莎莎. 模块化思想在现代住宅设计中的运用[D]. 北京:北京建筑大学,2013.

[4] 黄永胜. 模块化建筑的结构设计与 BIM 技术应用研究[D]. 广州:广州大学,2016.

[5] 李业斌,朱朝艳. 预制装配式混凝土梁柱节点连接方式研究[J]. 吉林水利,2017(10):32-34.

[6] KAYILI M, TAVIL A İ. Investigation of thermal performance of steel structural connections[J]. Energy and Buildings, 2008, 40(8): 1531-1539.

[7] 黄艺,胡冗冗,黄炜. 寒冷地区近零能耗装配式复合墙保温构造设计[J]. 建筑节能(中英文),2023,51(10):118-124.

[8] 黄炜,孙玉娇,张家瑞,等. 装配式墙体结构新型连接技术研究现状[J]. 工业建筑,2020,50(7):181-189.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 装配式混凝土建筑技术标准:GB/T 51231—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

[10] ASIZ A, SMITH I. Thermal performance of innovative building components in cold climates: a focus on prefabricated connections[J]. Energy and Buildings, 2019, 183: 729-738.

[11] 王羽,钟立博. 装配式外墙板构造对热工性能的影响[J]. 建

设科技,2023(12):88-90.

[12] 赵子文,张润嘉,王德才. 盒式螺栓连接装配式建筑墙体传热特征数值模拟分析[J]. 建筑节能(中英文),2025,53(1):56-61.

[13] KIM Y J, ALLARD A. Thermal response of precast concrete sandwich walls with various steel connectors for architectural buildings in cold regions[J]. Energy and Buildings, 2014, 80: 137-148.

[14] 徐政,胡冗冗,黄炜. 装配式复合墙结构体系干式连接件传热模拟分析[J]. 建筑节能(中英文),2023,51(3):103-109.

[15] 卢煜,刘明蓉,周渝,等. 装配式建筑外围护结构节能技术研究综述[J]. 西华大学学报(自然科学版),2023,42(6):93-103.

[16] 林正豪. 近零能耗导向的轻质装配式建筑之围护系统设计研究[D]. 北京:清华大学,2018.

[17] 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.

[18] KAYILLO A, GE H, ATHIENITIS A, et al. Experimental study of thermal and airtightness performance of structural insulated panel joints in cold climates[J]. Building and Environment, 2017, 115: 345-357.

[19] 张相勇,高占祥,李豪,等. 一种ALC墙板与钢梁和混凝土楼板连接构造:CN115977258A[P]. 2023-04-18.

[20] 陕西省住房和城乡建设厅,陕西省市场监督管理局. 居住建筑节能设计标准: DB 61/T 5033—2022[S]. 西安: 陕西省建设标准设计站, 2022.