DOI：10.7672/sgjs2025160015

内置保温板墙体系统设计与施工技术研究*

余若飞
(贵州工程职业学院,贵州　铜仁　565200)

[摘要] 针对严寒地区现浇混凝土保温结构施工技术,在传统施工技术基础上对内置保温板构件的尺寸控制、层间连接方式及混凝土浇筑技术进行优化。针对内置保温板墙体进行热工性能分析,采用 Airpak3.0 软件对热流密度变化进行模拟分析。结果表明,优化后的定额基价仅为 20.68 元/m^2,相比于传统施工技术减少了 18.97 元/m^2。同时,连接件布置越密集,综合修正传热系数越大。当板厚为 80mm 时,连接件为 9 个/m^2 的综合修正传热系数高达 1.468,而连接件为 6 个/m^2 的综合修正传热系数仅为 1.363。该优化不仅提升了建筑物的保温性能和施工效率,还实现了成本的有效控制。

[关键词] 装配式;混凝土;保温板;热工性能;施工技术
[中图分类号] TU761　　[文献标识码] A　　[文章编号] 2097-0897(2025)16-0015-06

Research on Design and Construction Technology of Built-in Insulation Board Wall System

YU Ruofei
(*Guizhou Engineering Vocational College*, *Tongren*, *Guizhou*　565200, *China*)

Abstract: In view of the construction technology of cast-in-place concrete thermal insulation structure in severe cold area, the size control, interlayer connection mode and concrete pouring technology of built-in thermal insulation board members are optimized on the basis of traditional construction technology. The thermal performance of the built-in insulation board wall was analyzed, and the change of heat flux density was simulated and analyzed by Airpak3.0 software. The results show that the fixed base price of the optimized construction technology is only 20.68yuan/m^2, which is 18.97yuan/m^2 lower than that of the traditional construction technology. At the same time, the more dense the layout of the connectors, the greater the comprehensive correction heat transfer coefficient. When the plate thickness is 80mm, the comprehensive correction heat transfer coefficient of the connector is 9/m^2 is as high as 1.468, while the comprehensive correction heat transfer coefficient of the connector is 6/m^2 is only 1.363. The optimization not only improves the thermal insulation performance and construction efficiency of the building, but also achieves effective cost control.

Keywords: prefabricated; concrete; insulation board; thermal performance; construction

0　引言

当前,我国对建筑的节能要求越来越高,新型装配式建筑得到了大力推广,建筑结构与保温体系相结合的理念逐步得以实践。其中,建筑外墙结构的构造与热工性能对整体保温性能有重要影响[1-3]。传统的后贴保温板技术主要是在浇筑完混凝土后进行拆模,再采用保温钉固定保温板;而内置保温板法则在施工过程中直接将保温板固定在模板中,同时,需采用混凝土浇筑保温板两侧,拆模后进行外墙装饰。这种施工方法存在大量脱落、鼓包等现象,严重影响了保温体系的保温功能与寿命[4-5]。现浇混凝土中的内置保温板是新型建筑中的一种节能装置,其具有施工简易、安全性能好及保温性能好等优势;相比于外墙后贴保温板方法,大规模的内置保温板结构具有更好的保温性能,且具有节能减排的作用[6]。当前,大多数研究涉及连接件的受力分析,缺少对其热工影响的分析。同

* 贵州省教育科学规划课题(2023B 111)
[作者简介] 余若飞,讲师,工程师,E-mail:745931722@qq.com
[收稿日期] 2025-06-11

时,在对材料传热性能的检验中,易受到各种外界因素的干扰,导致分析过程十分复杂且精度不高[7]。近年来,模拟技术发展迅速,逐步应用到各个领域的研究中。为此,研究引入 Airpak3.0 软件,提出了一种保温一体化墙体,并对当前新型建筑中现浇混凝土内置保温板体系施工技术进行了优化;同时分析了现浇混凝土内置保温板体系墙体的热工性能,验证了现浇混凝土内置保温板体系施工技术优化的可行性。

1 内置保温板热工性能分析与施工技术优化

1.1 内置保温板体系构造

内置保温板体系主要包括抹面层、防护层、保温层、基层墙体及内饰面层。抹面层采用 5mm 厚抹面胶浆压入玻纤网格布制作而成,防护层为 50mm 厚的现浇混凝土,其中设置了镀锌电焊网。保温层包括挤塑板、墨模塑板、石墨挤塑板及模塑板,厚 80~110mm,等级为 B1 级。基层墙体为现浇混凝土墙体,厚 200mm。拉结件插入钢筋混凝土层 200mm。内饰层面则根据工程设计进行施工。钢丝网片、内板及保温层主要通过连接件固定。模板与保温层之间的钢丝网主要用来强化外墙的保温功能。内置保温板体系一般用于普通工业与住宅的建筑设计中,且抗震防烈等级为 8 度以下,安装部位为承重外部墙体等构件。同时,采用瓷砖、涂料作为外部的装饰层[8-9]。内置保温板体系具体构造如图 1 所示。

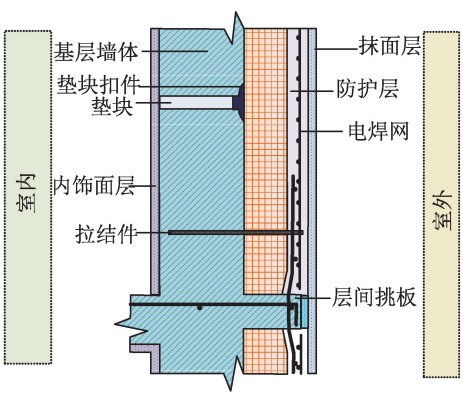


图 1 内置保温板体系具体构造

Fig. 1 Specific structure of built-in insulation board system

保温层设置在基层墙体与防护层之间,主要起到隔热与保温作用,包含挤塑板、墨模塑板、石墨挤塑板及模塑板 4 种材料,各材料的性能指标如表 1 所示。

连接件主要包括垫块扣件、L 形拉结件、限位卡盘、十字方头。在内置保温体系中,连接件的作用包括固定电焊网、保温层位置、基层墙体与防护层。

表 1 保温层材料性能

Table 1 Performance of insulation layer materials

性能指标	挤塑板	石墨模塑板	石墨挤塑板	模塑板
弯曲变形/mm	≥20	≥20	≥20	≥20
压缩强度/MPa	≥0.20	≥0.10	≥0.20	≥0.10
垂直板面的抗拉强度/MPa	≥0.20	≥0.10	≥0.20	≥0.10
密度/(kg·m^{-3})	25~35	25~35	≥20	20~22
导热系数/[W·(m·k)$^{-1}$]	≤0.030	≤0.032	≤0.024	≤0.037
水蒸气透湿性/[ng·(Pa·m·k)$^{-1}$]	1.5~3.5	≤4.5	1.5~3.5	≤4.5
燃烧性能等级	B1	B1	B1	B1

垫块扣件位于基层墙体与混凝土垫块之间,呈圆盘形,主要采用塑料注塑成型。垫块扣件的作用是防止混凝土垫块遭到破坏,并确保基层墙体的厚度不变。

1.2 内置保温板墙体热工性能

在优化内置保温板结构施工技术的基础上,进一步对该结构的热工性能进行分析。在建筑能耗分析中,热损失占了极大比重。外墙面积在维护中的占比最高,热损失比例超过 70%。同时,内置保温体系中的连接件在传热过程中起关键作用,因此有必要对其热工性能进行重点分析。建筑传热方式根据内部温度变化可分为稳态传热与非稳态传热,稳态传热是指墙体温度不会随外界温度的改变而发生变化,非稳态则会发生变化。内置保温体系属于非稳态传热,室外温度会受到太阳辐射与大气温度的影响,从而引起室内温度发生变化[10]。为了简化三维数值模拟,采用稳态传热来计算内置保温体系的传热过程。尽管传热过程较复杂,但大致可归纳为辐射换热、对流换热及导热 3 种传热方式,具体传热如图 2 所示。

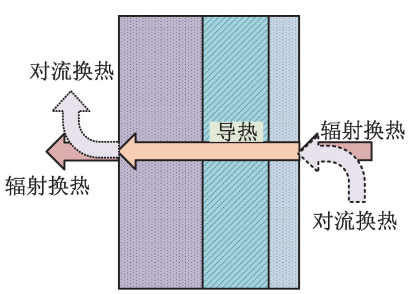


图 2 内置保温体系传热示意

Fig. 2 Heat transfer in the built-in insulation system

导热过程是指相同物体中具有不同温度的部位发生的热量传输过程或温度不同的两个物体相互接触时发生的热量传输过程。由于建筑墙体外侧较平整,厚度远小于其面积,因此其传热方式被

称为平壁传热。在稳定的温度场中,温差作用会导致内置保温体系发生热传导,室内的高温通过墙体传导至室外直至温度相同。其中,墙体的厚度越大,热传导的路径越多,传导热量计算如下:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} A\tau(t_1 - t_2) \tag{1}$$

式中:Q 为传导总热量;λ 为壁面导热系数;δ 为壁面厚度;A 为壁面截面积;τ 为导热时间;t_1,t_2 分别为墙体内侧与外侧温度。

由式(1)可知,传导总热量与墙体厚度成反比。墙体厚度增大,热流通过墙体的路径变长,热量在穿过墙体的过程中需经过更长的物质介质。根据热传导定律,热流密度与墙体的厚度成反向关系。因此随着墙体厚度的增加,热量通过墙体的传导速率会降低,进而减少了通过墙体的总热量流动。相应地,墙体的热传导系数保持不变时,增加厚度可显著减少热流密度,从而提升墙体的保温性能。外墙保温结构中的热流密度计算如下:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{R} \tag{2}$$

式中:R 为构件的热阻。

在多层平壁结构中,每层的热流密度均保持一致,总体的热流密度计算如下:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\sum_{j=1}^{n} R} \tag{3}$$

式中:n 为平壁结构的层数。

由外力推动而引起的流体流动现象被称为强迫对流,而流体受热引起的流体浮动现象被称为自然对流[11]。在建筑墙体外侧表面与墙体内部均会由密度差与温差产生对流换热现象。其中,对流换热的计算如下:

$$Q_c = a_c A(t_1 - t_2) \tag{4}$$

式中:Q_c 为对流换热总量;a_c 为对流换热系数。

进行能耗预测与热工特征分析时,对流换热系数起关键作用,其主要受墙体外侧材料、外部温度等因素的影响。在对流换热系数的计算过程中,主要将保温板外墙视为多层均质墙板,具体的传热系数计算如下:

$$\begin{cases} R_z = R_q + R_w + R_n \\ R_q = \sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} \\ R_n = \frac{1}{a_i} \\ R_w = \frac{1}{a_e} \end{cases} \tag{5}$$

式中:R_z 为围护结构的传热阻;R_q 为平壁热阻;R_w 为墙体外侧的对流换热热阻;R_n 为墙体内侧的对流换热热阻;a_i,a_e 分别为墙体内侧与外侧的换热系数。

根据墙体与外部空气的热交换过程与导热过程进行模拟分析,并采用 Airpak3.0 软件对热流密度变化进行模拟,具体流程如图 3 所示。首先对墙体的材料及尺寸构建数值模型,其支持 CAD,IGES 等其他程序文件输入;然后划分网格并确立边界条件;将网格文件输入求解软件中进行参数设定;最后输出计算结果。

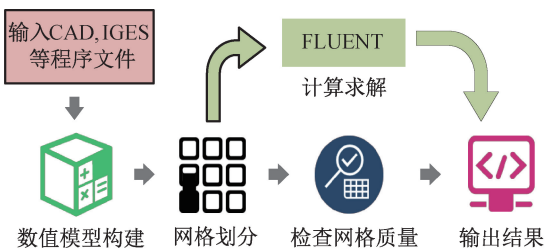


图 3　Airpak3.0 建模求解流程

Fig. 3　Airpak3.0 modeling and solving process

由于传热过程复杂且连续,模拟计算存在一定困难,为此,设置了条件假设:①流体为稳态湍流;②墙体材质连续且均匀,同向传热;③冬季只考虑热辐射换热;④保温材料均匀;⑤连接件不影响传热过程。墙体热工性能分析主要采用 Airpak3.0 软件根据热流密度对平均传热系数进行计算。而对于 L 形连接件,主要采用等效面积法对圆形构件进行转换。在设置边界条件时,研究模拟了冬季传热工况,其中室外温度为-20℃,室内温度为 20℃,墙体内侧与外侧的热阻分别为 0.11,0.04m^2 · K/W。连接件数量为 6,8,9 个/m^2。其中,连接件是高导热材料,与保温材料接触时,会在保温板中形成热桥。热桥能提供一个热传导通道,增加热量传递。当连接件数量增多时,会加剧热桥效应,导致墙体的整体保温性能下降。在网格划分中,研究主要采用 Airpak3.0 对内置保温板墙体进行稳态传热模拟分析,并采用非结构化方式进行网格划分,以确保更小的模拟误差。

1.3　内置保温板施工技术优化

内置保温板体系施工技术尚不成熟,需在传统的保温板施工技术基础上进行优化[12-13]。为确保墙体在内置保温板体系中的性能并提高施工效率,需从内置保温板构件的尺寸控制、层间连接方式及混凝土浇筑技术 3 个方面优化内置保温板施工技术。内置保温结构尺寸控制主要采用木模板对外

部围护构件进行施工,并采用顶模块与连接件控制模板尺寸。传统的尺寸控制主要采用塑料卡环、水泥垫块等,但新型建筑中的现浇混凝土内置保温板体系外侧具有保温材料,强度不够,模板位置控制方法不适用,因此需进行尺寸控制优化。首先,在安装顶模板时,需确保垫块扣件与混凝土垫块紧密贴合,水泥垫块以梅花形放置,垫块的间距不超过400mm,且需与保温板垂直,采用扎丝与构件钢筋进行固定,避免垫块发生偏移。订购水泥垫块时,要求厂家减小垫块卡件厚度,控制在 2~3mm。加固处理主要采用羊角螺栓,避免垫片扣件陷进保温材料中,造成尺寸变小。其次在安装连接件时,需保证墙体外侧的 L 形拉结件卡在十字方头中,同时需在墙体内侧的 L 形拉结件顶端安装防护帽,防止锈蚀的同时也能起到装饰作用。精确控制 L 形拉结件的长度,以确保其十字方头的端点部位到保护帽之间的距离等于构件的截面尺寸。每平方米布置 8 个 L 形拉结件,呈梅花形,避免对保温一体化体系的热工性能造成不良影响。

在新型建筑的现浇混凝土内置保温体系中,楼板位置一般会发生断裂[14]。传统的层间保温体系连接使用盘圆钢筋,在顶板混凝土浇筑后进行植筋,并与下一层保温体系的钢筋网片绑扎连接。为优化施工方法,研究使用螺纹钢筋替代圆钢筋,直径符合规范要求。螺纹钢筋的下料长度要求埋入混凝土的部分为 $10d$(d 为钢筋直径),同时连接部位长度≥200mm。完成楼板混凝土浇筑后,需按预定的排版图对螺纹钢筋进行定位预埋,以确保钢筋的锚固质量。此外,与盘圆钢筋相比,螺纹钢筋的混凝土握裹力更大,因此能提升保温一体化体系的整体性能和可靠性。

在新型建筑现浇混凝土内置保温体系的混凝土浇筑中,内置保温体系具有 50mm 厚的防护层,浇筑过程中易发生混凝土漏振现象,传统浇筑技术主要采用质量较高的自密实混凝土施工,但该材料成本较高,且材质与其他部位混凝土不同,进而产生不良影响[15]。为此,在浇筑前将钢管插入保温板与钢筋网片的空隙中,其中,钢管直径为 35mm,壁厚 2mm,长度根据层高确定,为减少摩擦力,在钢管外侧缠绕胶带。同时,钢管端部焊接了 U 形环,钢管间距为 1m,外部围护结构采用粗骨料粒径为 18mm 左右的混凝土。在浇筑过程中,钢管能确保防护层的尺寸始终为 50mm,不会因混凝土的侧向压力发生变形。

综上,要确保墙体在内置保温板体系中的性能并提高施工效率,需精确控制尺寸、优化垫块和连接件的安装方式。同时,采用螺纹钢筋进行层间保温体系连接,以确保钢筋的锚固质量。此外,混凝土浇筑前需将钢管插入保温板与钢筋网片的空隙中,并在其外侧缠绕胶带,确保 50mm 防护层尺寸稳定,防止混凝土漏振和侧向压力变形。

2 内置保温板施工技术优化与热工性能分析

2.1 内置保温板施工技术优化有效性分析

为验证内置保温板施工技术优化的有效性,将其与传统的施工工艺进行对比,主要从拆模过程的复杂程度、附加材料数量、模板要求及定额基价 4 个方面进行对比,结果如表 2 所示。由表 2 可知,优化后的施工技术在测试的 4 个方面均优于传统施工技术。从成本来看,优化后的施工技术的定额基价仅为 20.68 元/m^2,相比于传统施工技术减少了 18.97 元/m^2。同时,传统的外墙保温板施工技术需更多的附加材料,对模板的要求较高,且拆模过程复杂。优化后的施工技术则有效降低了附加材料数量,减少了模板的限制条件,且简化了拆模过程。说明内置保温板优化施工技术具有更强的可行性和更好的经济性。

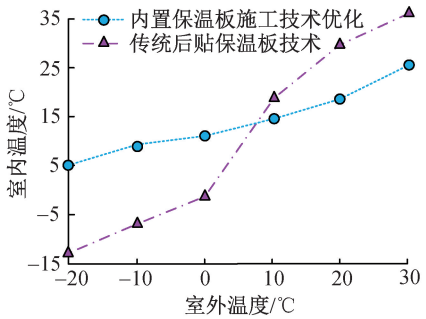
表 2 优化后施工工艺与传统工艺的对比结果

Table 2 Comparison results of optimized construction technology and traditional technology

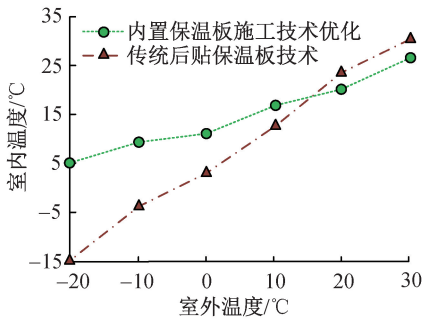
项目	传统施工技术	优化后的施工技术
拆模过程复杂程度	复杂	容易
附加材料数量	多	少
模板要求	高	低
定额基价/(元·m^{-2})	39.65	20.68

为进一步探究内置保温板施工技术优化后的保温效果,将其与传统的后贴保温板技术进行仿真对比分析。仿真试验环境包括居民楼与普通工业建筑,两种保温技术的保温效果如图 4 所示。由图 4a 可知,在居民住宅建筑中,当室外温度处于零下状态时,采用优化的内置保温板施工技术的室内温度均高于 5℃,而传统保温技术的保温效果较差,当外界温度为-20℃时,其室内温度仅提升了 6℃,且在室外温度为 0 时,室内温度为-1℃;当温度高于 20℃时,优化的保温技术能起到降低室内温度的作用。当外界温度为 30℃时,室内温度仅为 25℃,而传统保温技术的室内温度高达 35℃。由图 4b 可知,在普通工业建筑中,当室外温度处于零下状态时,采用优化的内置保温板施工技术的室内温度均高于 5℃;当室外温度为 30℃时,室内温度仅为 27℃。而采用传统的保温技术,室外温度为-20℃时,室内温度仅为-15℃;当室外温度为 30℃时,室

内温度高达 29℃,说明内置保温板施工技术优化后的保温效果较优。



a 居民住宅建筑的室内外温度



b 普通工业建筑的室内外温度

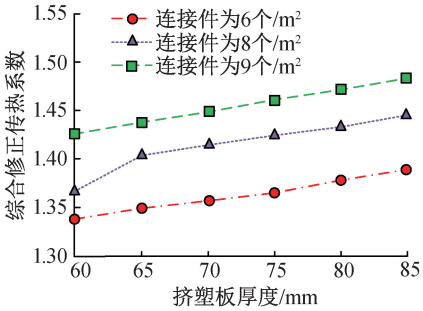
图 4　不同保温技术的保温效果

Fig. 4　Insulation effect of different insulation technologies

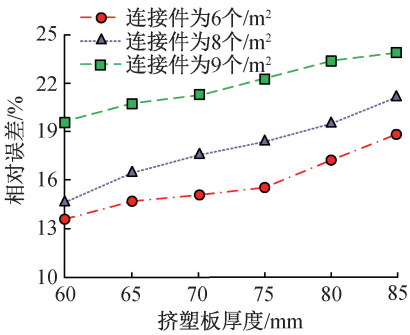
2.2　内置保温板墙体的热工性能分析

在保温材料的挤塑板中,不同密度连接件下的综合修正传热系数与相对误差如图 5 所示。由图 5a 可知,在挤塑板中,综合修正传热系数随板厚的增加而逐渐增大。其中,连接件布置越密集,综合修正传热系数越大。当板厚为 80mm 时,连接件为 9 个/m^2 的综合修正传热系数高达 1.468,而连接件为 6 个/m^2 的综合修正传热系数仅为 1.363。由图 5b 可知,相对误差随板厚的增加而逐渐增大,连接件布置越密集,相对误差越大。当板厚为 80mm 时,连接件为 9 个/m^2 的相对误差高达 23.65%,而连接件为 6 个/m^2 的综合修正传热系数仅为 16.91%。

进一步探究连接件的导热系数对内置保温板墙体传热系数的影响。导热系数设置为 0~56W/(m·K),内置保温板墙体的传热系数变化比例随导热系数的变化曲线如图 6 所示。由图 6 可知,内置保温板墙体传热系数变化比例随导热系数的增大而增加,挤塑板的厚度越厚,传热系数的变化比例越大。其中,当挤塑板厚度为 80mm 时,内置保温板墙体的传热系数变化比例为 1.46%~23.84%,而厚度为 60mm 时的传热系数变化比例范围仅为 1.30%~18.18%。说明挤塑板厚度对内置保温板墙体的传热性能影响显著。较厚的挤塑板可提供更



a 不同连接件密度的综合修正传热系数



b 不同连接件密度的相对误差

图 5　不同数量连接件下的综合修正传热系数与相对误差

Fig. 5　Comprehensive corrected heat transfer coefficient and relative error under different numbers of connectors

好的隔热效果,但同时也会增加墙体传热系数在连接件导热系数变化时的灵敏度。因此,在保温设计中,选择适当的挤塑板厚度是平衡隔热效果和传热系数稳定性的关键因素之一。

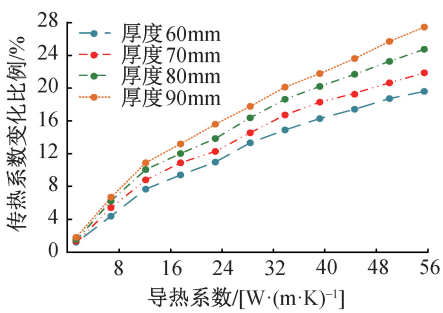


图 6　不同导热系数下的传热系数变化比例

Fig. 6　Proportion of heat transfer coefficient variation under different thermal conductivity coefficients

3　结语

针对现浇混凝土保温结构施工技术的优化,研究改进了内置保温板构件的尺寸控制、层间连接方式及混凝土浇筑技术,并采用 Airpak3.0 软件进行热工性能分析。结果显示,传统的外墙保温板施工技术需更多的附加材料,对模板的要求较高,且拆模过程复杂。优化后的施工技术则有效降低了附加材料数量,减少了模板的限制条件,且简化了拆模过程。在居民住宅建筑中,当外界温度为-20℃

时,传统保温技术的室内温度仅提升了 6℃,且在室外温度为 0 时,室内温度为-1℃。当温度高于 20℃时,优化的保温技术能起到降低室内温度的作用。在普通工业建筑中,当室外温度处于零下状态时,采用内置保温板优化施工技术的室内温度均高于 5℃。此外,挤塑板厚度越厚,传热系数的变化比例越大。说明通过优化保温板的尺寸和层间连接方式,可降低施工中附加材料的使用量,简化模板要求和拆模过程。使用 Airpak3.0 进行热工性能分析,能有效分析内置保温板墙体的热工性能,进而优化建筑物的能效和舒适性。但研究尚未考虑湿传递对墙体接缝处产生的影响,后续可加以优化。

参考文献:

[1] 赵建军,付佳欣,李爽. 岩棉复合保温外模板承载力及温度效应分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2024,56(1):130-138.
ZHAO J J,FU J X,LI S. Bearing capacity and temperature effect of rock wool composite insulation external formwork[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2024,56(1):130-138.

[2] 窦国举,訾建涛,黄莉媛,等. 建筑保温与结构一体化综合施工技术[J]. 建筑结构,2020,50(S1):631-633.
DOU G J,ZI J T,HUANG L Y,et al. Integrated construction technology of building thermal insulation and structure[J]. Building structure,2020,50(S1):631-633.

[3] 陈峰. 住宅外墙外保温材料性能研究[J]. 施工技术(中英文),2025,54(10):33-38.
CHEN F. Study on the performance of external thermal insulation materials for residential exterior walls[J]. Construction technology,2025,54(10):33-38.

[4] 刘泳超,苗沛沛,贾俊岭. 保温结构一体化复合保温模板施工技术及应用[J]. 新型建筑材料,2020,47(12):114-117.
LIU Y C,MIAO P P,JIA J L. Composite thermal insulation formwork construction technology and application[J]. New building materials,2020,47(12):114-117.

[5] 潘利,徐文,梁志雯,等. 常泰长江大桥主航道桥主墩承台大体积混凝土抗裂技术研究[J]. 桥梁建设,2024,54(3):8-14.
PAN L,XU W,LIANG Z W,et al. Study on anti-cracking technology of mass concrete for main pier cap of main channel bridge of Changtai Yangtze River Bridge[J]. Bridge construction,2024,54(3):8-14.

[6] 王春晖,李昊,冯志会. 建筑外墙保温装饰一体化系统施工技术[J]. 建筑结构,2022,52(S1):3216-3221.
WANG C H,LI H,FENG Z H. Construction technology of building external wall thermal insulation and decoration integrated system[J]. Building structure,2022,52(S1):3216-3221.

[7] 窦国举,訾建涛,钟山,等. 预制保温外墙免支模一体化关键施工技术[J]. 建筑结构,2020,50(S1):628-630.
DOU G J,ZI J T,ZHONG S,et al. Key construction technology of prefabricated thermal insulation exterior wall without formwork integration[J]. Building structure,2020,50(S1):628-630.

[8] 张松,岳祖润,张基伟,等. 联络通道冻结施工近隧道端土体温度场分布及管片保温措施优化[J]. 中国铁道科学,2020,41(3):95-102.
ZHANG S,YUE Z R,ZHANG J W,et al. Distribution of soil temperature field close to tunnel end and optimization of segment insulation measures in cross-passage construction by artificial ground freezing method[J]. China railway science,2020,41(3):95-102.

[9] 王砚君,邵增会,高瑞国,等. 寒冷地区超低能耗建筑节能性能提升的关键路径研究[J]. 建筑经济,2023,44(S1):379-383.
WANG Y J,SHAO Z H,GAO R G,et al. Research on the key path to improve the energy saving performance of ultra-low energy consumption buildings in cold areas[J]. Construction economy,2023,44(S1):379-383.

[10] 刘钰,王衍争,耿春雨,等. 寒冷地区超低能耗建筑外墙保温体系设计探讨——以河北某住宅项目为例[J]. 建筑节能(中英文),2025,53(5):68-76,84.
LIU Y,WANG Y Z,GENG C Y,et al. Exterior wall insulation system design of ultra-low energy consumption building in cold area:a case study of a residential project in Hebei Province[J]. Building energy,2025,53(5):68-76,84.

[11] 沙恒荣,张志港,牛宏进,等. 保温板免开洞的爬架辅助连接结构施工技术与应用[J]. 建筑结构,2022,52(S1):3222-3226.
SHA H R,ZHANG Z G,NIU H J,et al. Construction technology and application of climbing frame auxiliary connection structure of insulation board without opening[J]. Building structure,2022,52(S1):3222-3226.

[12] 沈倩. 超低能耗建筑夹心保温清水混凝土土外墙关键技术研发与实践[J]. 建筑结构,2023,53(S2):1238-1242.
SHEN Q. R & D and practice of key technology for sandwich thermal insulation fair-faced concrete exterior wall of ultra-low energy building[J]. Building structure,2023,53(S2):1238-1242.

[13] 许艳平,李安,丁平祥,等. 低温环境下现浇箱梁混凝土结构保温养护措施研究[J]. 建筑结构,2023,53(S1):2296-2300.
XU Y P,LI A,DING P X,et al. Study on thermal insulation maintenance measures of cast-in-place box girder concrete structure under low temperature environment[J]. Building structure,2023,53(S1):2296-2300.

[14] 陈建江,靳红会. 黑河黄藏寺重力坝保温层与辅助防渗层的应用[J]. 人民黄河,2023,45(S2):27-28.
CHEN J J,JIN H H. Application of thermal insulation layer and auxiliary impermeable layer of Huangzangsi gravity dam in Heihe[J]. Yellow river,2023,45(S2):27-28.

[15] ZHENG G,XUE K,HU J,et al. A comparative experimental study on the mechanical properties of cast-in-place and precast concrete-frozen soil interfaces[J]. Geomechanics & engineering,2024,36(2):145-156.