

## 5. 示范工程应用与评价

### 5.1 示范工程简介

示范工程为上海市闵行区档案局上海市闵行区档案保管中心，工程地址位于上海联农路南，新源路西，横沙河北，一幢四层高。

本次工程涉及修缮和室内装修，其中设有一个单独的房间用于保存特殊档案资料，包括纸质文件和影像资料等易燃材料。

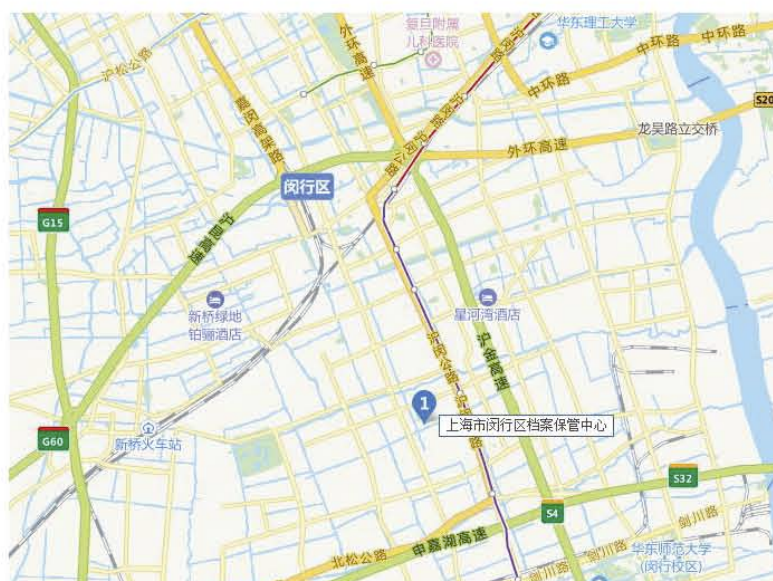


图 5.1 示范工程在闵行区的区位关系



图 5.2 示范工程地块周边环境情况



图 5.3 示范工程实景照片

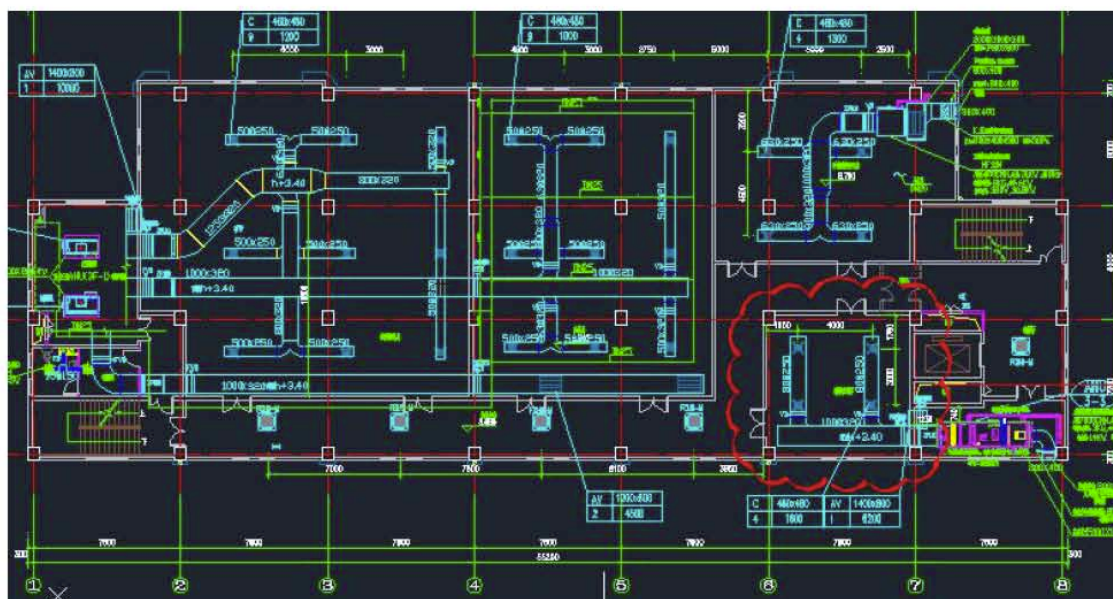


图 5.4 示范房间在建筑中所处的位置

研究用的库房位于保管中心大楼 3 层南面，南墙为建筑外墙，北、东、西墙为内墙，分别与走道和设备机房、电梯井相邻。房间东西向长 7.8 米，南北向宽 7.2 米，高度为 3.4 米。由于该房间主要存放影像资料，所需要的室内环境要求为常年保持  $14^{\circ}\text{C}$ ，与其他库房的环境要求差异较大。因此该房间由独立的空调通风系统，保证室内的温湿度要求。其中空调系统风量为  $7000\text{m}^3/\text{h}$ ，换气次数达到 37 次/h。

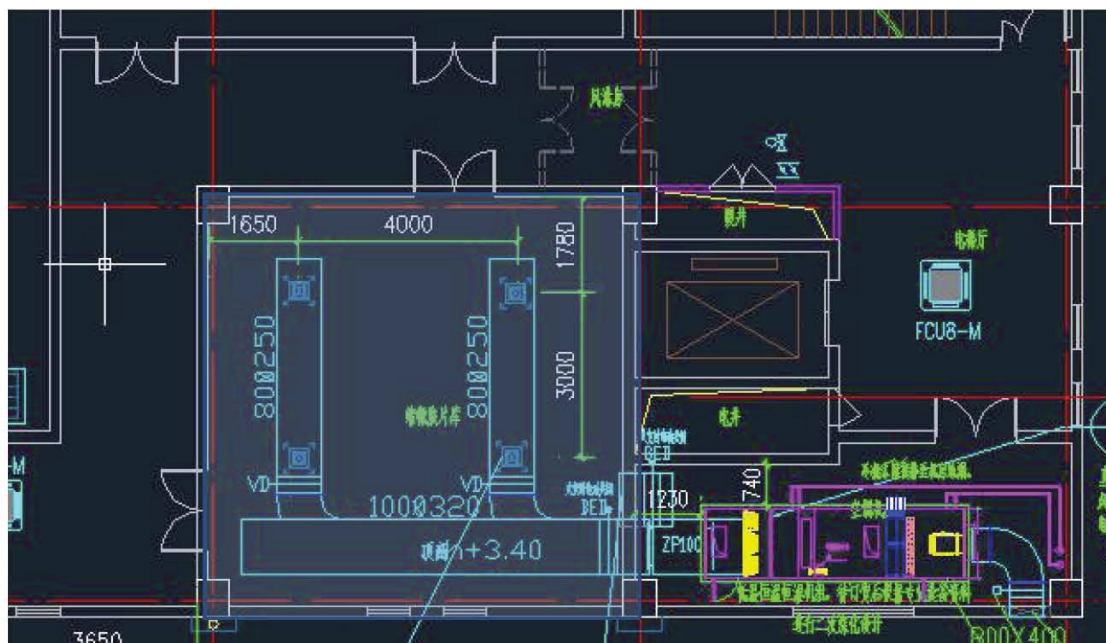


图 5.5 示范房间几何尺寸和相应空调系统布置



图 5.6 示范房间空调系统风管布置实景

## 5.2 建筑围护结构概况

示范库房所涉及的围护结构包括南向外墙、东西北向的内墙，以及分隔各各层的楼板，外墙采用内外保温，材料为外侧 40 厚 I 型无机保温砂浆，内侧为 30 厚 II 型无机保温砂浆；内墙材料为 200mm 轻质砖+50mm 珍珠岩水泥砂浆；楼板采用 100mm 混凝土+60mm 混凝土找平。根据《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB50736-2012) 的规定，围护结构的传热系数按下式计算：

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n} + \sum \frac{\delta}{\alpha_\lambda \cdot \lambda} + R_k + \frac{1}{\alpha_w}}$$

式中：K——围护结构的传热系数，W/(m<sup>2</sup>·K)

$\alpha_n$ ——围护结构内表面换热系数，W/(m<sup>2</sup>·K)，对于表面凭证的墙面、地面和顶面， $\alpha_n$ 取 8.7

$\alpha_w$ ——围护结构外表面换热系数，W/(m<sup>2</sup>·K)，针对内墙， $\alpha_w = \alpha_n$ ，对于外墙外表面， $\alpha_w$ 取 23

$\delta$ ——围护结构各层材料厚度（m）

$\lambda$ ——围护结构各层材料导热系数，W/(m·K)

$\alpha_\lambda$ ——材料导热系数修正系数

$R_k$ ——封闭空气间层的热阻，m<sup>2</sup>·K/W

上述公式是考虑材料之间导热以及材料表面与空气对流传热所对应的综合传热系数，本示范工程的现场环境监测为达到监测数据的有效性和完整性，还同时监测了墙体内外表面的壁面温度，因此这里有必要同时计算不考虑墙体或楼板两侧空气对流的综合导热热阻，围护结构的综合导热热阻按下式计算：

$$R_\lambda = \sum \frac{\delta}{\alpha_\lambda \cdot \lambda}$$

上述两式中围护结构的空气表面换热系数，围护结构材料的导热系数、以及围护结构的修正系数均可由相关规范表格查询得到，具体查询结果见下表：

表 5.1 不同材质传热性能取值表

| 序号 | 计算参数                              | 取值   |
|----|-----------------------------------|------|
| 1  | 围护结构内表面换热系数，W/（m <sup>2</sup> ·K） | 8.7  |
| 2  | 围护结构外表面换热系数，W/（m <sup>2</sup> ·K） | 23   |
| 3  | I 型无机保温砂浆导热系数，W/（m·K）             | 0.07 |
| 4  | II 型无机保温砂浆导热系数，W/（m·K）            | 0.08 |
| 5  | 材料导热系数修正系数                        | 1    |
| 6  | 混凝土砌块，W/（m·K）                     | 1.28 |
| 7  | 珍珠岩水泥砂浆导热系数，W/（m·K）               | 0.21 |
| 8  | 轻质砖导热系数，W/（m·K）                   | 0.5  |

按照上述两个公式，三楼库房围护结构材料的传热系数和综合导热热阻见下表：

表 5.2 三楼库房围护结构材质与相应传热系数表

| 部位 | 材质                                      | 传热系数<br>$W/(m^2 \cdot K)$ | 导热热阻<br>$(m \cdot K)/W$ |
|----|-----------------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 外墙 | 外侧 40 厚 1 型无机保温砂浆<br>内侧为 30 厚 2 型无机保温砂浆 | 0.92                      | 0.93                    |
| 内墙 | 200mm 轻质砖+50mm 珍珠岩水泥砂浆                  | 1.15                      | 0.64                    |
| 楼板 | 100mm 混凝土+60mm 混凝土找平                    | 2.82                      | 0.125                   |

### 5.3 气凝胶保温材料应用情况

档案馆库房需要保证室内环境的恒温恒湿  $14^{\circ}\text{C}$ ，该项目作为闵行区政府试点项目。纳米二氧化硅保温毡这一新型材料，单一材料就能满足防火、憎水、保温的要求，而且有极低的导热系数，长久的使用寿命，可靠的保温节能性能。而且纳米二氧化硅保温毡用于内保温具有无可比拟的优势，室内空间几乎不受影响，石膏板面装饰方便可靠。于是甲方最终决定外墙岩棉外保温改成外墙纳米二氧化硅保温毡内保温，外墙干挂改成外墙面砖，保温性能更加可靠，且造价大幅度降低，同时内墙与楼板也同样应用纳米二氧化硅保温毡进行内部保温。

根据由上海市建筑科学研究院出具的纳米二氧化硅保温毡的检测报告，其检测结果满足《二氧化硅纳米保温毡》(Q/SNN 002-2013)，具体检测结果详见表 4.1 所示。

由于采用了二氧化硅保温毡作为内保温材料，其围护结构的传热系数较未保温时有了显著的下降，具体传热系数见下表。

表 5.3 库房围护结构各部位改造后构造及其传热系数

| 部位 | 材质                                                   | 传热系数<br>$W/(m^2 \cdot K)$ | 导热热阻<br>$(m \cdot K)/W$ |
|----|------------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 外墙 | 外侧 40 厚 1 型无机保温砂浆<br>内侧为 30 厚 2 型无机保温砂浆<br>+10mm 保温毡 | 0.57                      | 1.60                    |
| 内墙 | 200mm 轻质砖+50mm 珍珠岩水泥砂浆+10mm 保温毡                      | 0.65                      | 1.31                    |
| 楼板 | 100mm 混凝土+60mm 混凝土找平<br>+10mm 保温毡                    | 0.98                      | 0.792                   |



图 5.7 示范房间施工现场采用的纳米二氧化硅保温毡

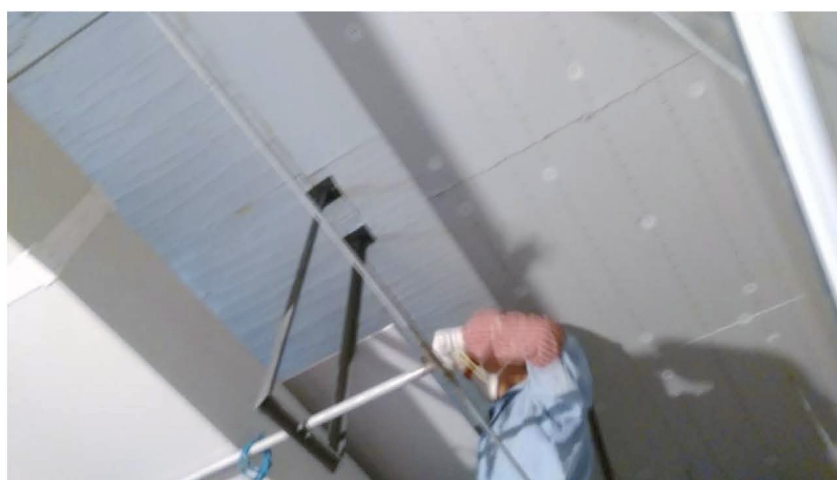


图 5.8 示范房间内保温施工现场工人作业



图 5.9 示范房间内保温工程竣工实景

## 5.4 库房保温效果实验

### 5.4.1 实验目的

通过对在实际工况下实际环境与能耗监测数据的记录和计算,根据空调系统实际空调负荷与库房围护结构传热量的实时监测数据,通过热平衡关系,计算得到内墙与外墙实际传热系数,并由此计算全年能耗情况,并与非内保温状态下的能耗进行对比,从而评价纳米二氧化硅保温毡内保温应用的节能效果。

### 5.4.2 实验方案

在实际工况条件下,跟踪记录实验房间室内外温湿度的变化,以及由此产生的空调负荷在充分进行现场示范工程调研的基础上,制定了示范工程的测试方案,方案综合考虑了现有监测系统以及自记型温湿度仪器的特点,实时记录测试期间通过围护结构传热引起的冷热负荷,空调系统承担的冷热负荷;通过在夏季 1-2 个月的实时运行数据采集,统计分析两者的热量平衡,以此模拟预测全年的空调负荷和相应的能耗。

#### ① 环境监测系统测试布点方案

在现有空调系统的自动控制平台上,增加关键部位的温湿度传感器,通过实时监测,记录实验工况下的温湿度数据。布点上主要考虑实验库房四周不同墙体内外侧的温度,空调系统供回风侧温湿度,对于墙体内外表面的壁面温度,采用铂电阻温度传感器,嵌入墙体,内部用导热硅胶填充,表面磨平。下图为传感器布置示意图。

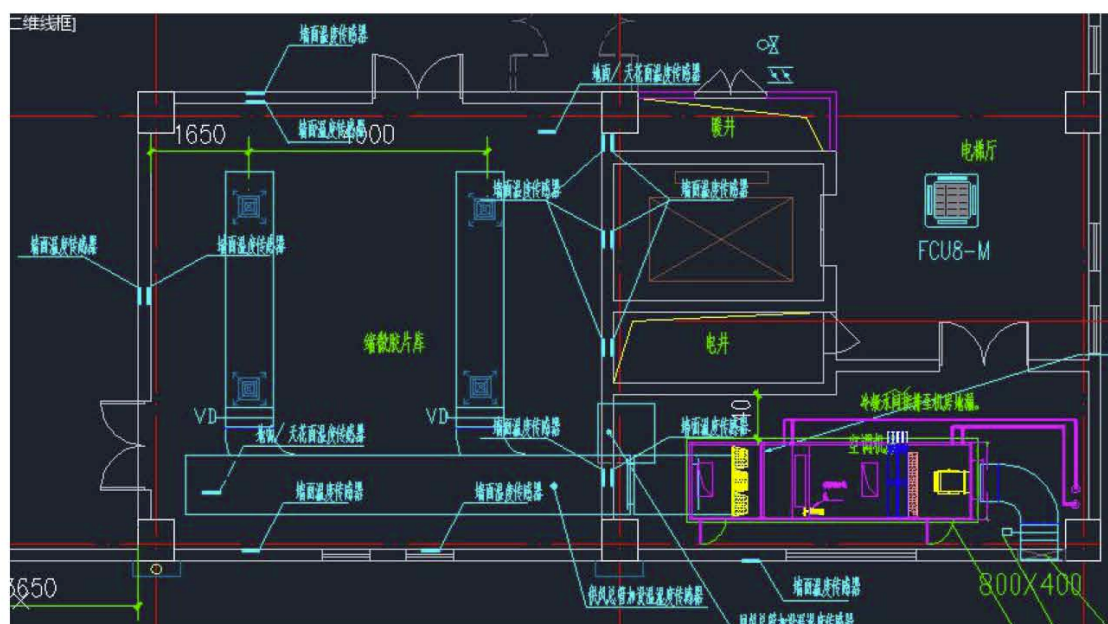


图 5.10 传感器布置示意图

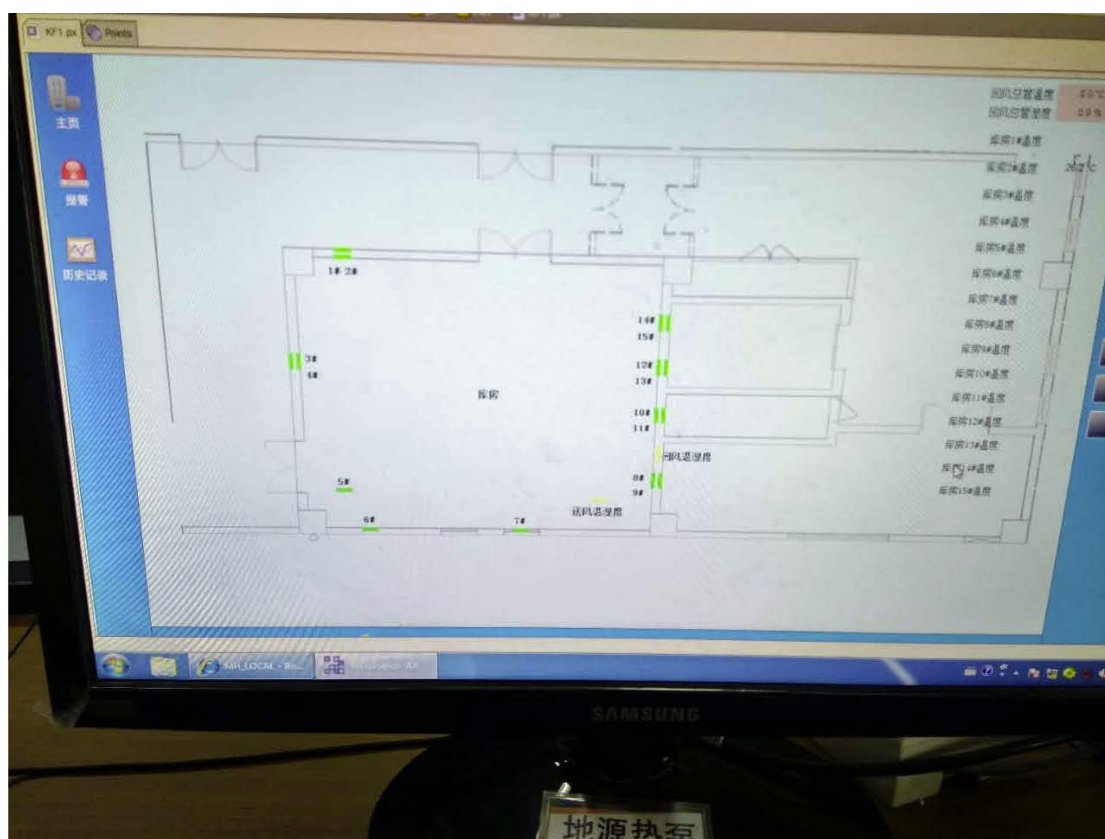


图 5.11 环境监测系统平台照片

## ② 温湿度自计议布置方案

现有的环境监测系统主要监测的是墙体壁面温度和空调系统内部温度，尚无法覆盖实验房间及其周边的空气温度，因此在监测系统的基础上，在房间内部和四周走道以及上下层空间内放置温湿度自计议作为自动监测数据的补充，共同参

与计算分析，本次采用的温湿度自计仪是台湾衡欣 AZ8808 型温湿度自记仪。其规格性能参数如下：

表 5.1 台湾衡欣 AZ8808 型温湿度自记仪性能参数表

|        |                                                         |
|--------|---------------------------------------------------------|
| 测量范围   | 温度-40~85℃ (-40~185°F)<br>湿度 0~100% (仅 8808)             |
| 准确度    | 温度：±0.6℃ (-20~50℃)<br>±1.2℃ (-40~-20℃，51~85℃)<br>湿度：±3% |
| LCD 显示 | 大屏幕显示：温度/湿度（屏幕尺寸：50.9x65.5 mm）<br>分辨率：0.1℃/0.1°F，0.1%   |
| 取样数    | 16000 笔                                                 |
| LED 讯号 | REC 记录资料/LAM 超过设定值                                      |
| 电缆长度   | 150cm 带 DB9 接口,或选购 USB 接口                               |
| 尺寸/重量  | 120L x 93W x 42Tmm                                      |
| 供电电源   | 4 pcs x AA 电池                                           |
| 附件     | 携带盒，电池，RS232 软件及连线，使用说明书。                               |



图 5.12 温湿度自记议



三楼室内自计议布置

四楼楼板上自计议布置

图 5.13 自记仪布置实景

### ③ 热平衡原理

利用热平衡方程，建立围护结构负荷与空调系统负荷的关系，以此论证气凝胶材料的节能效果；通过对 1-2 个月的监测数据的统计，来推算全年的节能效果。

其中室内热平衡基本公式：

1、围护结构传热在监测期形成的累计热负荷：

$$Q_{\text{围护结构}} = \sum KF(t_{\text{out}} - t_{\text{in}}) \tau$$

2、由于库房只有两个内门与 3 层外间连接，因此需要考虑邻室的渗透引起的冷负荷：

$$Q_{\text{渗透}} = \sum m(i_{\text{外}} - i_{\text{内}}) \tau$$

3、空调系统在监测期间承担的累计热负荷：

$$Q_{\text{空调系统}} = \sum m(i_{\text{in}} - i_{\text{入口}}) \tau$$

因此在实际工况下，只要记录过程中的温湿度情况，就可以获得房间围护结构的传热系数并与实际围护结构的实验室数据进行对比矫正。

在从气象数据库中获取上海地区常年的室外气象参数，就可以获得理论条件下的室内冷热负荷，对比非内保温工况下的负荷值，便可以获得负荷节约量和对

应的理论节能量。

### 5.4.3 气凝胶保温隔热性能评价

本次现场数据采集实验在示范建筑的内保温工程、库房独立空调系统及其环境监测系统安装调试完成后进行，时间位于 2017 年夏末初秋，室外温度在 20-30℃之间波动，连续记录日期为 2017 年 9 月 7 日至 2017 年 9 月 29 日，共三周时间，数据采集周期为 10 分钟。

#### 1、库房内外相关空间温湿度变化情况

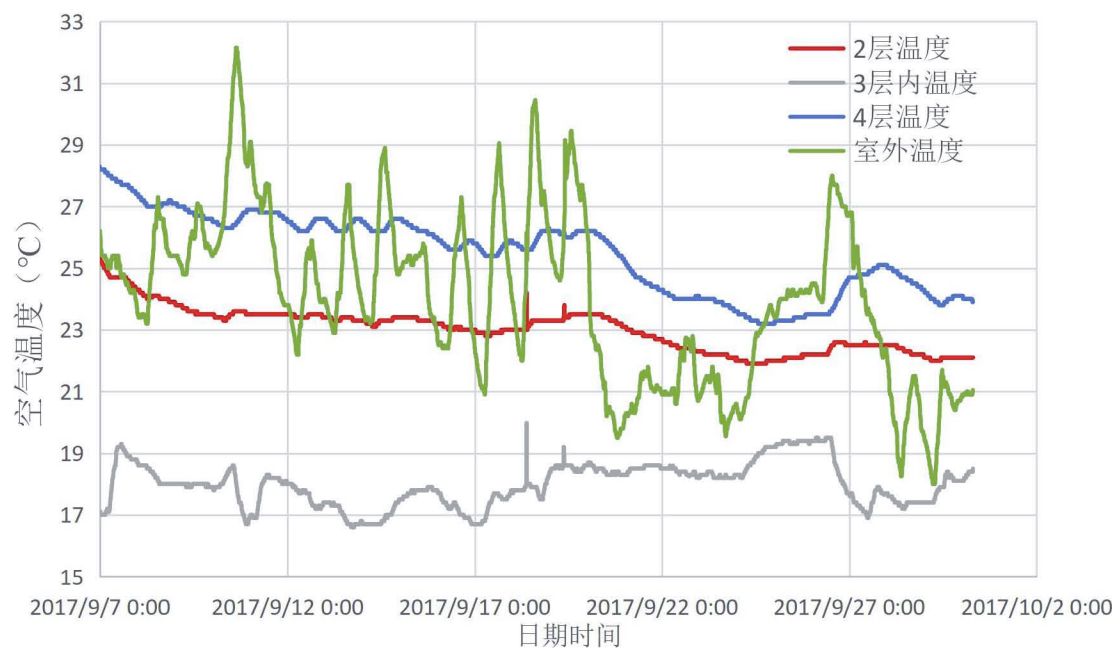


图 5.14 库房内外相关空间空气温度实时监测数据

由上图温度曲线可知，室外空气温度基本在 20-30℃范围变化，且总体上有逐日下降的趋势；2 层与 4 层的温度随着室外的气温变化也逐渐下降，在变化的波动性方面更加稳定，且由于自然热压的作用，4 层的温度总体高于 2 层。3 层库房内的温度总体保持在  $18\pm 1^{\circ}\text{C}$  的范围内，基本满足了库房对温度的设定和变化范围的要求。另外 3 层库房内的空气温度与相邻空间的温差基本在 3℃以上。利用库内外空间的空气温度的差值，结合空间隔断围护结构的传热系数，便可以计算围护结构的传热负荷，每个时间点的传热负荷可以定义为该时间点附近时间间隔内（本次监测时间间隔设定在 10 分钟）的传热量，利用累加的方法，便可以得到一段监测时间内累计的传热量。

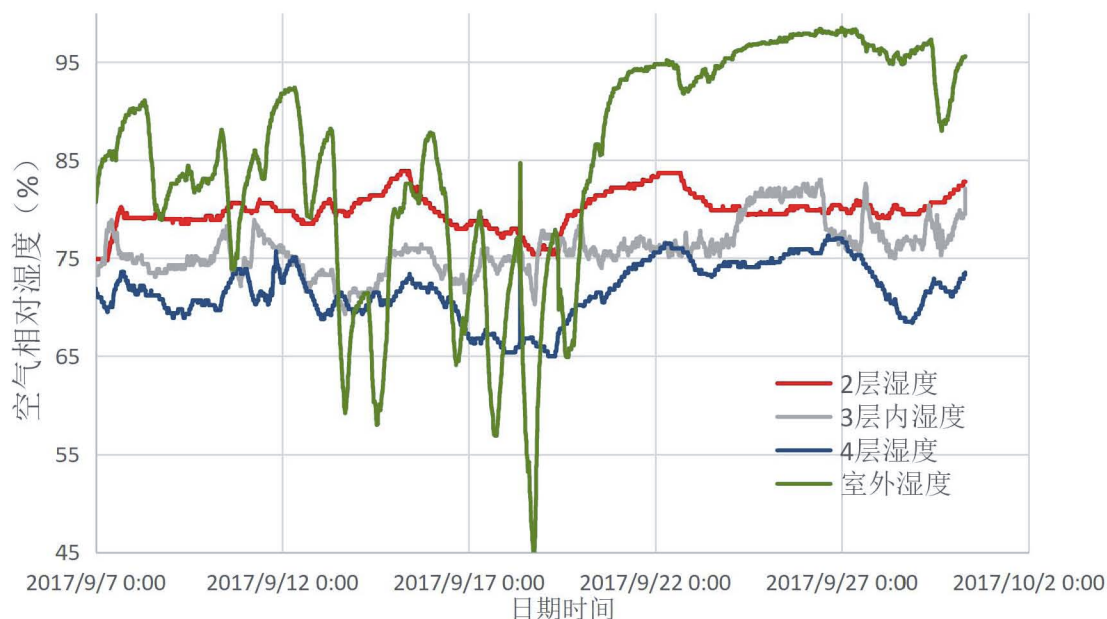


图 5.15 库房内外相关空间空气相对湿度实时监测数据

由上图相对湿度曲线可知，室外空气相对湿度随着早晚气温的变化和阴晴状况变化波动明显，在 45-95%的大范围区间内波动，相比之下室内各层的相对湿度变化范围较窄，其中 3 层库房的相对湿度在  $75\% \pm 5\%$  的范围内波动，4 层空气相对湿度在  $70\% \pm 5\%$  的范围波动，而 2 层空气相对湿度在  $80\% \pm 5\%$  的范围内波动。

## 2、库房墙面温度变化情况

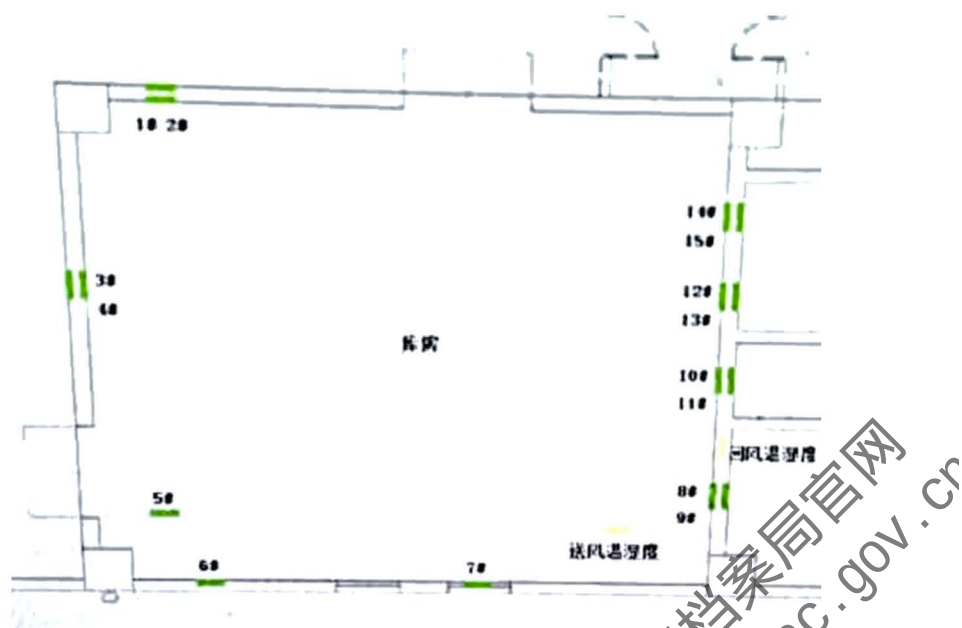


图 5.16 库房墙面温度传感器布置图

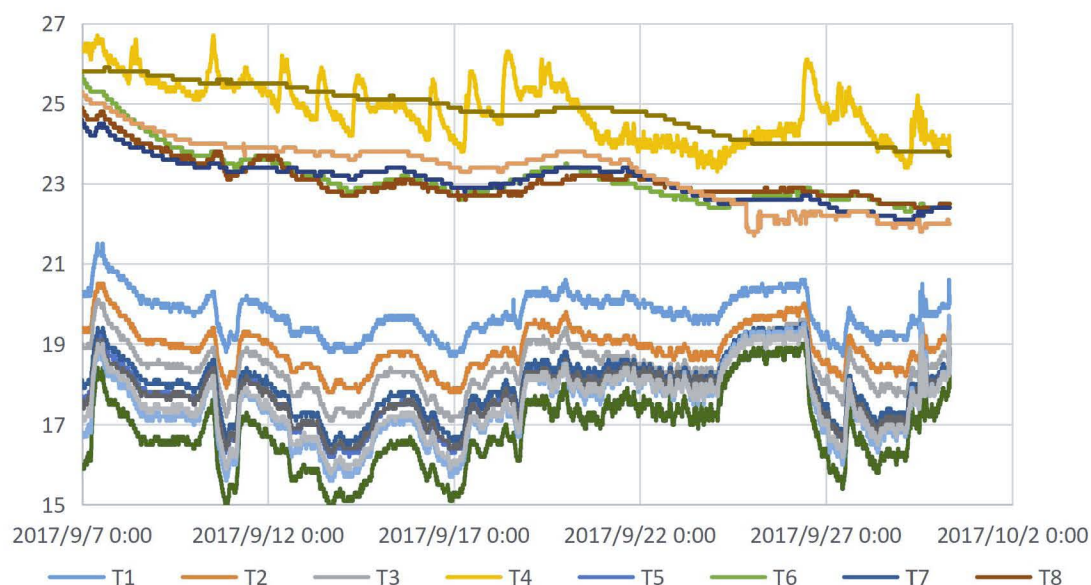


图 5.17 库房内外壁面温度实时监测数据

由上图壁面温度曲线可知，库房内表面温度曲线基本处于图的下方，且变化规律一致，而外表面温度则随着外部不同区域空气温度变化的不同，呈现各异的变化规律。

通过对库房各面围护结构内外表面的温差进行分析，结合各位置围护结构导热热阻的计算，同样可以获得通过各位置围护结构的传热量，这个计算方法非常重要，尤其是对于 3 层库房外不同朝向的温度难以一致且空气温度数据无法全面采集的情况下，用壁面温度的传热量计算更为可靠。

### 3、空调系统出风口温度变化情况



图 5.18 库房空调系统风口温度实时监测数据

由上图空调系统的送回风温度的实时监测数据可知，两者变化趋势相近。通过对送风温度、回风温度以及库内温度的统计分析，结合送回风风量，可以计算得到一定统计周期内空调系统承担库房的显热负荷。

4、热负荷计算

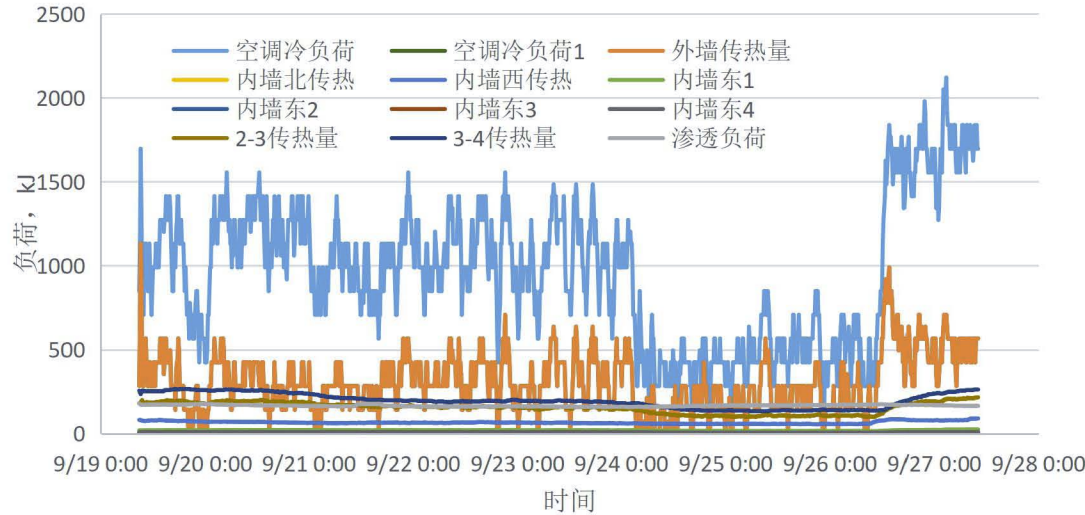


图 5.19 库房各类负荷实时监测计算数据

选择 9 月 19 日至 9 月 26 日一周的采集的数据进行计算，分别计算围护结构包括外墙、各方向内墙，上下层楼板在内的传热负荷；空调系统形成的冷负荷；由于存在内门以及内外焓差的影响形成的渗风冷负荷。

在进行负荷计算时考虑如下因素：

1) 围护结构传热冷负荷：外墙、楼板的传热负荷采用内外空气温度与传热系数参与计算的传热量计算方法；内墙由于外部空间较为复杂多样，采用壁面温度与导热热阻参与计算的传热量计算方法；

2) 空调系统形成的冷负荷：一般情况下，空调系统提供的冷量等于空调出风口与室内空气的显热焓差与出风质量的乘积，然而为了更加精确的计算空调负荷，同时考虑回风空气状态与室内空气状态不一致的情况（室内温度分层现象以及风系统在室内形成部分短路时可能发生），同时计算空调回风空气与室内空气显热焓差。

3) 渗透风形成的冷负荷：库房没有外窗，空调系统不设新风系统，唯一与外界联系的是位于西面和北面内墙上的内门，空气可通过门缝在 3 层库房内外流通。这也是空调系统承担的唯一湿负荷，通过湿负荷的平衡关系，可以推导出渗透风的风量大小，从而得到渗透总的冷负荷。

## 5、热平衡分析

各项按照 5.3.2 节的热平衡原理和计算方法，分别计算空调系统进回风口的提供的冷热负荷，围护结构传热形成的冷负荷以及渗透因素形成的冷负荷，其热平衡关系为：

$$Q_{\text{空调系统}} = Q_{\text{围护结构}} + Q_{\text{渗透}}$$

进而得到：

$$\sum Q_{\text{空调出风}} - \sum Q_{\text{空调回风}} = \sum Q_{\text{外墙}} + \sum Q_{\text{内墙}} + \sum Q_{\text{楼板}} + \sum Q_{\text{渗透}}$$

在上述平衡计算中，隐藏着唯一一个变量，就是内保温材料的实际导热系数修正 $\alpha_\lambda$ ，利用热平衡关系，通过试算的方法，便可以求得 $\alpha_\lambda$ 的值。该值是一个 $\geq 1$ 的数值，越接近 1 说明内保温材料实际导热系数越接近实验室测试数据。

通过计算，保温毡的导热系数修正为 1.048，非常接近实验室数据，由此说明示范工程的现场施工工艺可以有效地保障保温毡的保温效果。

## 6、全年节能效果分析

分析思路：利用上海市典型气象年的逐时气象数据，模拟库房空调全年的环境，从而分别计算有无保温毡条件下的空调负荷，另外假设独立空调系统全年平均 COP 为 3.0，从而推算有无保温毡空调系统的耗电量，最终分析得到全年库房的节能量。

### 1) 上海市典型气象年的逐时气象数据

本示范工程位于上海市内，节能模拟计算分析采用的气象数据为专为上海地区进行能耗模拟计算的上海地区典型气象年逐时气温数据。典型气象年是由 12 个具有最接近历史平均值统计意义的典型月组成的“假想”气象年。

室外温度

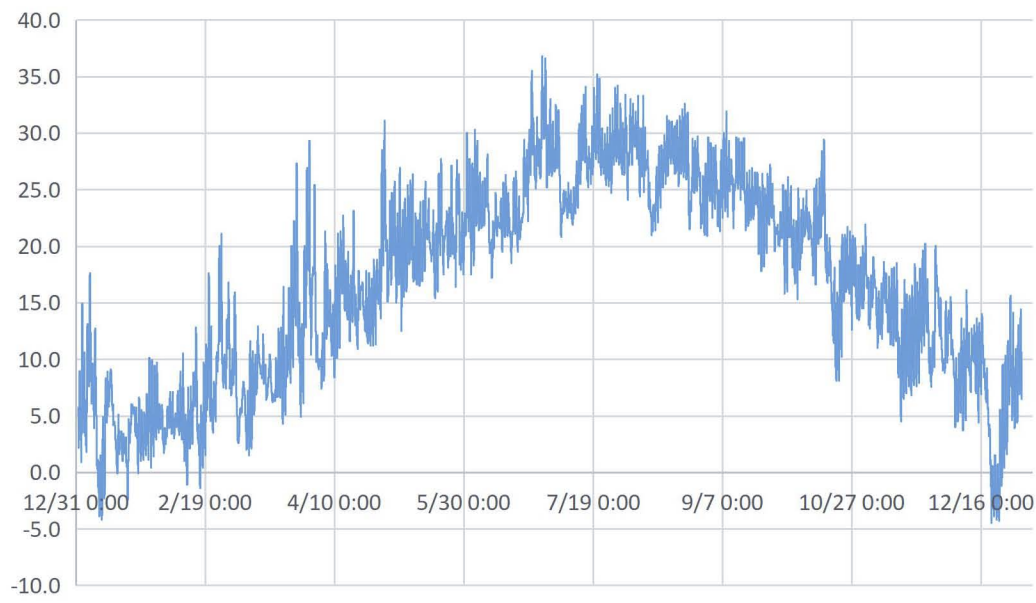


图 5. 20 上海地区典型气象年逐时气温数据

2) 档案馆库房室内温度的设定

根据档案馆室内环境参数的设计要求，能耗模拟与对比分析所采用的库房室内温度设定在 16℃，库房以外的其他区域设定在 25℃。

3) 围护结构传热系数设定

改造前后的围护结构传热系数在 5.2，5.3 节中已得到确认，唯一区别在于改造后的内保温的实际导热系数需要考虑通过热平衡分析得到的导热系数修正（1.048）。具体参数见下表所示：

表 5. 2 库房围护结构各部位改造前后传热系数

| 部位 | 改造前传热系数<br>W/（m <sup>2</sup> ·K） | 改造后传热系数<br>W/（m <sup>2</sup> ·K） |
|----|----------------------------------|----------------------------------|
| 外墙 | 0.92                             | 0.58                             |
| 内墙 | 1.15                             | 0.66                             |
| 楼板 | 2.82                             | 1.00                             |

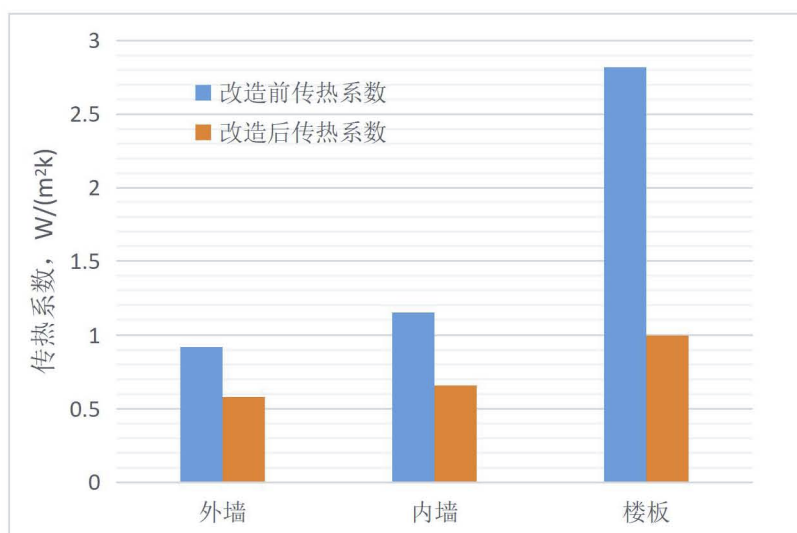


图 5.21 库房围护结构改造前后传热系数对比

#### 4) 库房分时冷热负荷计算

根据库房及其周边空间的设计温度、室外典型气象年逐时温度，围护结构改造前后的传热系数，根据传热公式可以求得库房逐时冷热负荷。

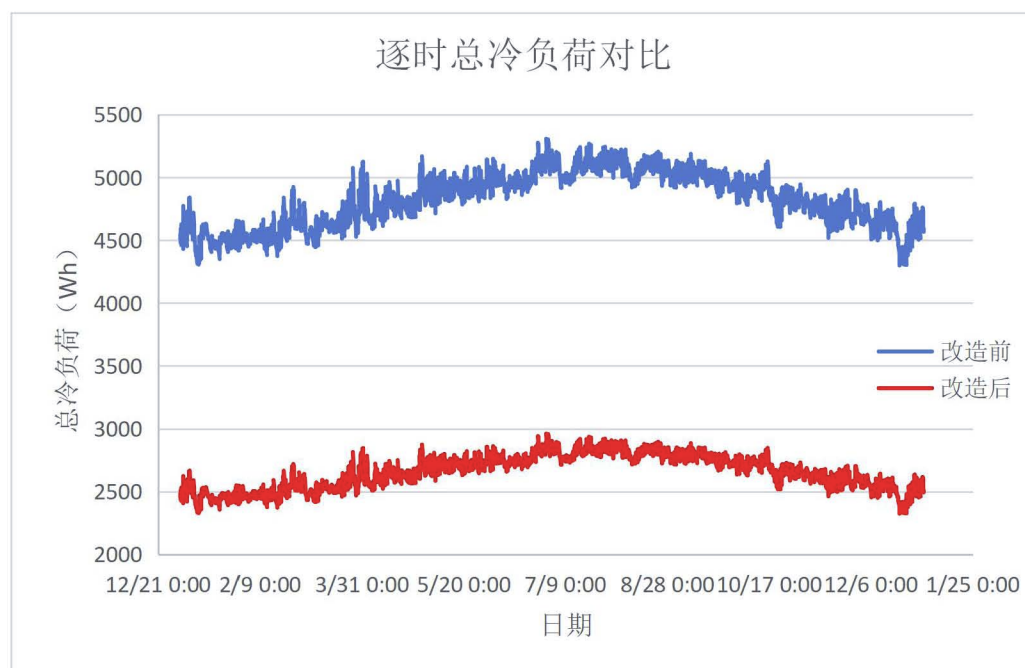


图 5.22 库房围护结构改造前后冷负荷变化曲线

#### 5) 全年耗电量对比与节电效果评价

对模拟工况下，对库房围护结构进行内保温节能改造前后，全年耗电量进行累计和对比，其中假定低温空调系统的年平均 COP 为 3.0。

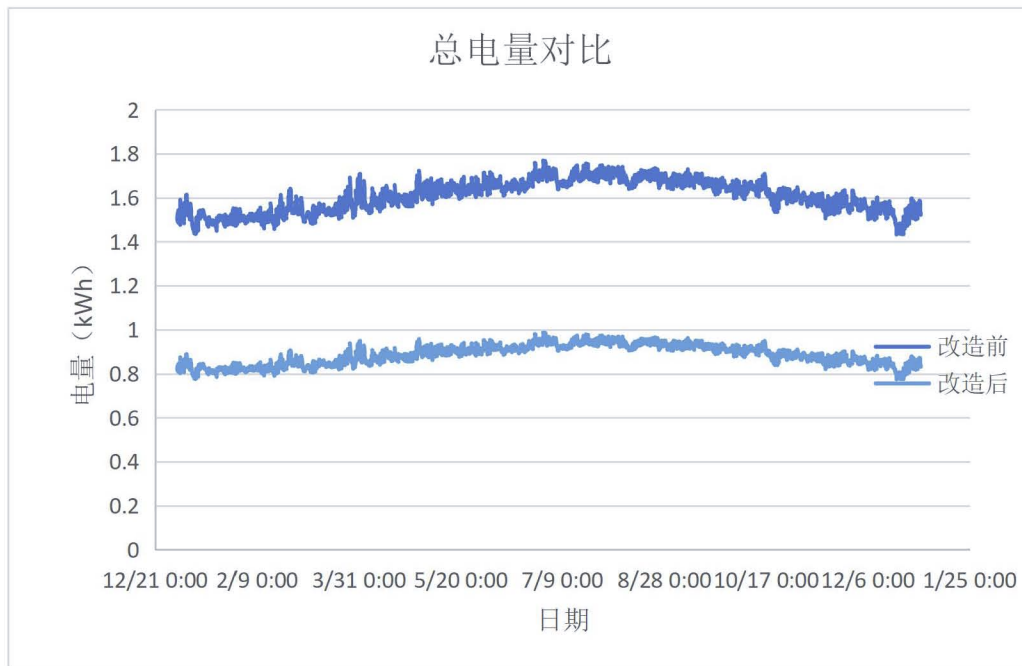


图 5.23 库房围护结构改造前后耗电量变化曲线

经计算，库房围护结构节能改造前全年累计的耗电量为 14064.6kWh，改造后全年累计耗电量为 7740.1kWh，节能率达 45%。

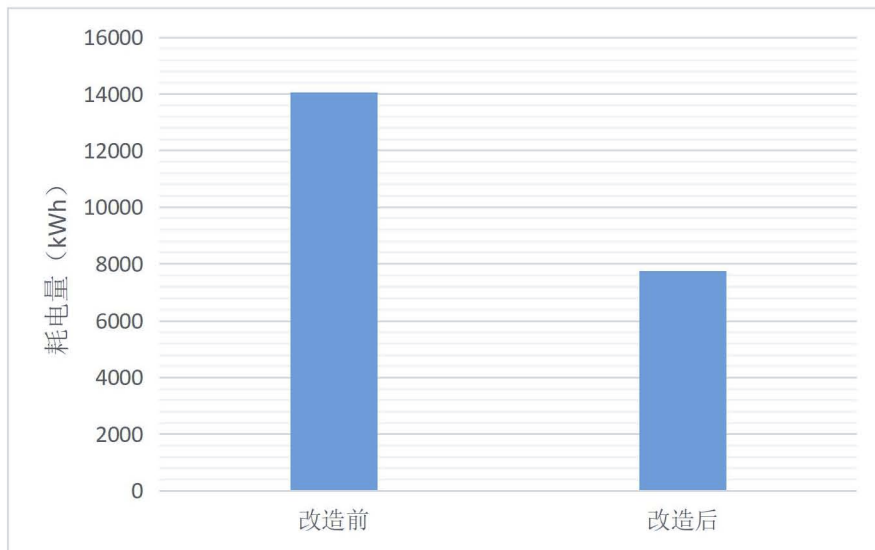


图 5.24 库房围护结构改造前后总冷负荷对比

#### 5.4.4 气凝胶保温材料应用的成本效益分析

##### 1) 节能改造工程初投资

二氧化硅气凝胶保温毡目前市场价格约为 500 元/平米（含人工费），总铺设面积为：

$$S = (7.8 * 7.2 + 7.8 * 3.4 + 7.2 * 3.4) * 2 = 214.32(m^2)$$

因此节能改造的总投资约为：107160 万元。

## 2) 年度节省电费

按照工商业电费 1 元/Kwh 计算，该节能改造工程的年度节点为：

$$14064.6 - 7740.1 = 6324.5 \text{ 元}$$

## 3) 静态投资回收期

$$N = 107160 \div 6324.5 = 16.94 \text{ (年)}$$

# 6. 结论与展望

本课题在基于对二氧化硅气凝胶材料物化性能、制备方法等进行充分调研的基础上，首次在对室内温度和精度有特殊要求的库房的围护结构内应用该材料进行内保温，为该材料在建筑节能工程中的应用提供了新的方向，具有工程实践的新颖性。

本课题通过对示范工程的实际应用，在应用层面说明了材料本身在建筑节能工程中应用的可操作性和实用性。

本课题通过在实际运行过程中对空调系统内、围护结构壁面以及内外空间温湿度的实际进行一个月的在线监测，在对实时数据进行分析、比对的基础上，计算获得保温材料的实际传热系数，科学的反映了材料的实际保温效果，其综合节能率达 45%，节能效果较好。

本课题在基于实验获得的材料实际传热系数的基础上，结合上海市典型气象年逐时温度，模拟计算并对比分析了库房节能改造前后空调系统的耗电量及其相关电费；同时根据节能工程的初投资，计算了该节能隔热材料的静态投资回收期为 16.94，因此投资回收期较长。这与该材料目前市场的成熟度、使用量不够，产品的生产规模效应尚没有释放。待通过该材料量产后，市场价格由 500 元/平米降至 230 元/平米甚至更低的时候，投资回收期可控制在 8 年以内，从而达到较好的经济效益。

参考文献:

- [1] 杨丽修. 气凝胶超级绝热材料的快速制备及其建筑节能应用研究[D]. 广州大学硕士论文, 2013.
- [2] 沈军、吴宇、张志华等. 《微纳复合 SiO<sub>2</sub> 气凝胶超级绝热建筑外墙保温材料》[J]. 新型建筑材料, 2015, (4):17-21.
- [3] 王飞、刘朝辉、叶圣天等. 《SiO<sub>2</sub> 气凝胶保温隔热材料在建筑节能技术中的应用》[J]. 表面技术, 2016, (2):144-150.
- [4] 张季超、张婷婷等. 《高性能新型纤维增强气凝胶板外保温构造措施研究》[J]. 施工技术, 2015, (8):60-63.
- [5] 程颐、成时亮、阮丰乐等. 《气凝胶材料在墙体保温系统中的应用》[J]. 新型建筑材料, 2012, (9):80-83.
- [6] 赵海波. 浅析气凝胶材料在建筑节能领域的应用与发展[J]. 墙材革新与建筑节能, 2018, (2):56-58.
- [7] 杨长甫. 浅谈无机保温纤维喷涂施工. [J]. 建设科技, 2011, (8):86-87.
- [8] 李杰. 供暖建筑热稳定性的评价模型及能效研究[D]. 大连理工大学硕士论文. 2018.
- [9] DB33/T1118-2015. 纳米二氧化硅保温毡应用技术规程、条文说明. 浙江省工程建设标准.