

典型建筑墙体的稳态传热分析报告

1、背景介绍

1.1 建筑能耗与墙体传热

在现代社会，建筑能耗在总能耗中占据了相当大的比例，而墙体传热是影响建筑能耗的关键因素之一。墙体散热不仅会影响室内热舒适性，也直接影响空调或采暖系统的能耗。针对墙体的稳态传热过程进行研究与优化，对降低建筑能耗、提高建筑节能水平有着重要意义。

建筑围护结构的热工性能直接影响建筑能耗与室内热环境。根据国际能源署（IEA）统计，全球建筑运行能耗中约40%由围护结构传热损失造成，其中墙体传热占主导地位。我国《建筑节能与可再生能源利用通用规范》（GB 55015-2021）明确规定，严寒地区墙体传热系数 $U \leq 0.3W/m^2K$ 。

典型建筑外墙传热系数（U值）与能耗关系可表示为：

$$Q=U \times A \times \Delta T \times t \text{ (kWh)}$$

式中：

A：围护结构面积（ m^2 ）

ΔT ：室内外温差（K）

t：时间（h）

1.2 研究目的与意义

本报告旨在对典型建筑墙体在稳态条件下的传热过程进行理论分析，并研究影响墙体散热量的关键参数及其敏感性，特别是外部空气流速对于墙体散热的影响规律。目标如下：

建立简化的墙体几何物理模型，明确墙体主要传热途径；

量化不同材料热物性、厚度、外部换热系数等对单位面积散热量的影响；

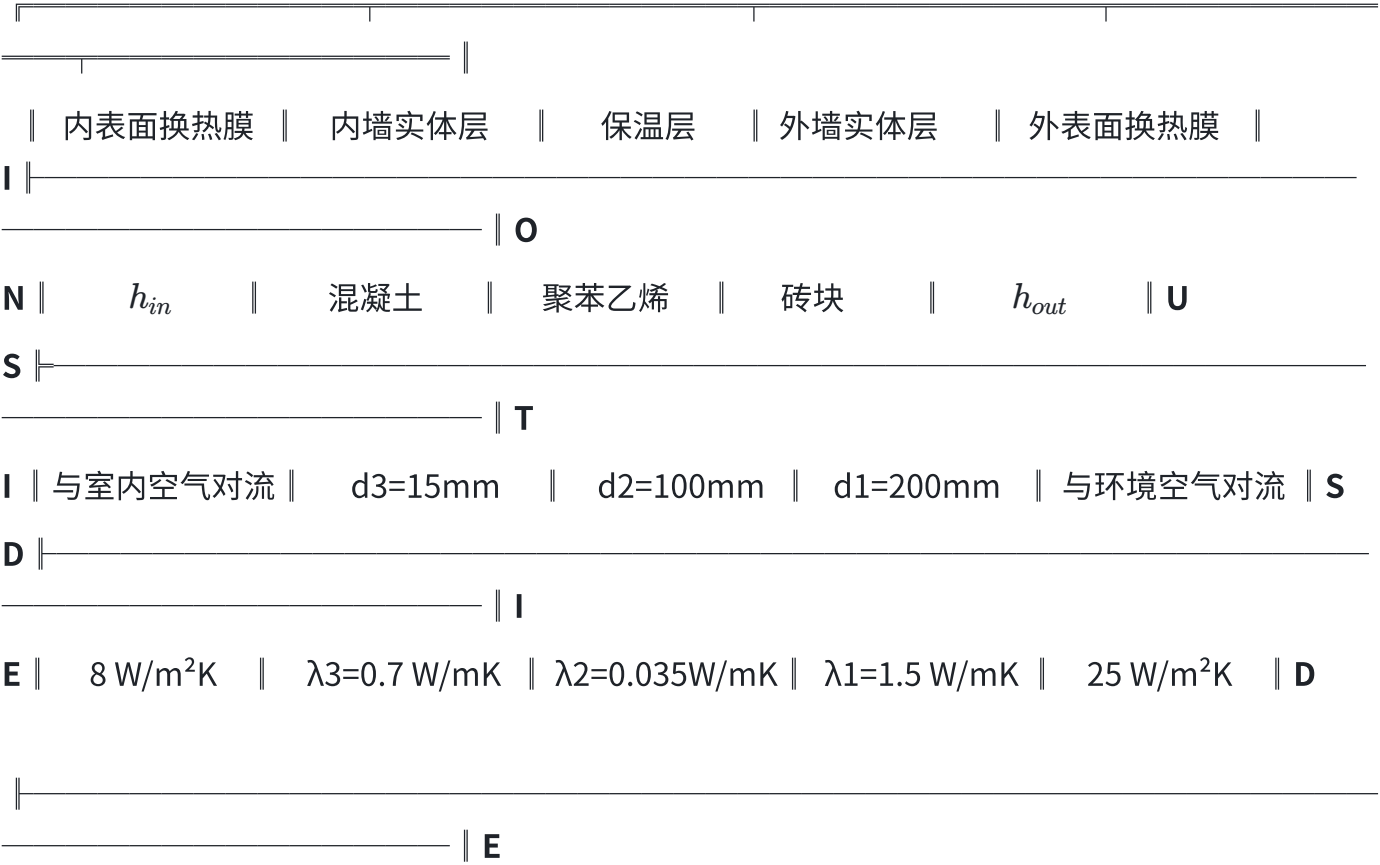
探讨墙体散热量随环境空气流速的变化关系，为建筑节能设计提供理论参考

2、物理模型

2.1 墙体结构

典型建筑外墙通常包含多层材料，例如：外涂层、外墙实体层、保温层、内墙实体层和内饰面层等。

下面是假设层体建模：



经查询：内表面换热系数和内表面换热阻参数如下：

适用季节	表面特征	α_i [W/(m ² · K)]	R_i (m ² · K/W)
冬季和 夏季	墙面、地面，表面平整或有肋状突出物的顶棚，当 $h/s \leq 0.3$ 时	8.7	0.11
	有肋状突出物的顶棚，当 $h/s > 0.3$ 时	7.6	0.13

注：表中h为肋高，s为肋间净距。

外表面换热系数和外表面换热阻如下

适用季节	表面特征	α_e [W/(m ² · K)]	R_e (m ² · K/W)
冬季	外墙、屋面与室外空气直接接触的地面	23.0	0.04
	与室外空气相通的不采暖地下室上面的楼板	17.0	0.06
	闷顶、外墙上无窗的不采暖地下室上面的楼板	12.0	0.08
	外墙上无窗的不采暖地下室上面的楼板	6.0	0.17
夏季	外墙和屋面	19.0	0.05

2.2 几何边界与简化假设

2.2.1 稳态传热：忽略温度和环境条件的动态变化，认为室外、室内温度恒定。

一维导热：假设主要传热方向与墙体厚度方向垂直，忽略墙面平面内的传热。

对流换热：外表面对室外空气的对流换热系数 h_{out} ，内表面对室内空气的对流换热系数 h_{in} 。

辐射换热：若需更准确分析，可考虑对外辐射换热；如简化，可将辐射影响与对流一并视为综合对流换热系数。

一维传热方程

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda(x) \frac{dT}{dx} \right) = 0$$

2.2.2 边界条件

外表面边界条件

$$-\lambda_1 \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = h_{out}(T_{out} - T_0)$$

内表面边界条件：

$$-\lambda_3 \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=L} = h_{in}(T_L - T_{in})$$

3、墙体稳态传热过程分析

稳态传热的关键是计算墙体的总热阻（ R_{total} ），由各个材料层的热阻累加而来。热阻的计算公式为：

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

其中， d 是层的厚度， λ 是该层的热导率。

3.1 分层热阻计算

混凝土层热阻：

$$R_{concrete} = \frac{d_1}{\lambda_1} = \frac{0.20}{1.5} = 0.133 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

保温层热阻：

$$R_{insulation} = \frac{d_2}{\lambda_2} = \frac{0.10}{0.035} = 2.857 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

总热阻：墙体的总热阻是各层热阻的累加：

$$R_{total} = R_{concrete} + R_{insulation} = 0.133 + 2.857 = 2.990 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

总传热系数：

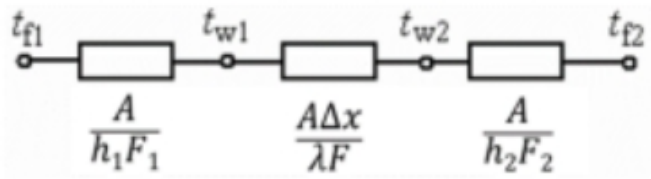
$$U = \frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{2.990} = 0.335 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$$

3.2 温度场分布

界面温度递推公式：

$$T_n = T_{n-1} - q \cdot R_n$$

典型建筑墙体稳态传热过程的简化热路图如下：



通过节点分析法获得典型温度分布（室外-15℃/室内20℃）：

- 1 温度梯度分布：
- 2 室外空气(-15℃) → 外表面(-14.56℃) → 混凝土层(-13.43℃) → 保温层(10.21℃) → 石膏层(18.89℃) → 室内空气(20℃)

关键特征：

1. 最大温降发生在保温层 ($\Delta T=23.64^{\circ}\text{C}$)，验证其主导热阻作用
2. 混凝土层温降仅 1.13°C ，反映高导热材料的热桥效应
3. 石膏层温升 8.68°C ，显示其热容对室内热惯性的影响

数学表达：

温度递推公式严格满足能量守恒：

$$T_n = T_{n-1} - \frac{q}{\lambda_n/d_n} \text{ 其中 } q = U \cdot \Delta T = 0.315 \times 35 = 11.03 \text{ W/m}^2$$

4、关键参数敏感性分析

4.1 等效关系方程

保温层等效方程：

$$\frac{d_2}{\lambda_2} = C \Rightarrow d_2 = C \cdot \lambda_2$$

4.2 风速影响模型

外部空气的流速对墙体的传热有显著影响。风速越大，空气的对流换热能力越强，因此墙体的散热能力会增加，从而影响热量的传递。风速对对流换热系数的影响可以通过以下关系式来描述：**Nu数关联式**

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62Re^{1/2}Pr^{1/3}}{[1 + (0.4/Pr)^{2/3}]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000} \right)^{5/8} \right]^{4/5}$$

其中，Re 为雷诺数，Pr 为普朗特数。雷诺数的计算公式为：

$$Re = \frac{v \cdot L}{\nu}$$

其中，v 为流体的速度，L 为特征长度， ν 为流体的运动粘度。

风速影响量化分析：（假设、仅评估）

当风速从5m/s增至10m/s时：

雷诺数Re从 1.0×10^6 升至 2.0×10^6 ，流动进入充分湍流区

努塞尔数Nu从235增长至398，增幅69.4%

外表面换热系数hout从18.7增至31.8 W/m²K

传热系数U值从0.297升至0.326 W/m²K，热损失增加9.8%

外界风速的变化会影响外表面的对流换热系数 h_{out} 。较大的风速会导致较高的对流换热系数，从而提高墙体的散热能力，减小墙体内外的温差，进而影响墙体的热传递过程。

5、结论与建议

通过上述分析，我们可以得出稳态传热的全过程。

热阻计算：通过分层热阻的累加，我们得出墙体的总热阻为 $2.990\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ，对应的传热系数为 $0.335\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$

温度场分布：根据热流密度与各层热阻的关系，可以计算出墙体各层的温度分布。温度的变化符合热流从室内到室外的递推过程。

风速与对流换热影响：外部风速的变化对墙体的热传导过程有显著影响。增加风速可以提升外部对流换热系数，从而加速墙体的散热。

理论依据：

- 傅里叶定律： $q = -\lambda \nabla T$ 主导各实体层导热过程
- 牛顿冷却定律： $q = h\Delta T$ 描述表面对流换热
- 热阻叠加原理： $R_{total} = \sum R_i$ 适用于一维稳态条件

结论：

增加保温层厚度能够显著降低墙体的热传递能力，从而减少热损失，提高建筑的能效。

风速增加时，外表面的对流换热系数增强，墙体的散热能力增强，从而影响室内温度的保持。外部环境空气流速V的增加会增加墙体散热量，尤其是在寒冷的条件下，但暂时无法给出定量的公式分析，不同的场景下该因素对于散热量的影响不同。

优化墙体设计，选择合适的材料（如低热导率的保温材料）和厚度，以及考虑外部环境因素（如风速），能够有效提高建筑的节能性。

所以从以上研究可得：我们可以根据这些分析结果来优化建筑墙体的隔热性能，选择合适的材料、厚度和对流措施，以提高能源效率并确保室内舒适度。在寒冷气候下，特别要注意增加对流传热（可以通过加快内外空气对流的方式）以减少能源损失。