

# 低碳背景下建筑幕墙保温隔热性能优化研究

翟兆伟

山东建筑设计集团有限公司 山东 济南 250101

**摘要:** 本文聚焦于低碳发展背景,系统性地探讨了建筑幕墙保温隔热性能的优化策略与技术路径。研究首先阐述了建筑幕墙在低碳建筑体系中的核心地位及其热工性能对建筑能耗的深远影响;继而深入剖析了幕墙热工性能的关键影响因素,包括传热系数(U值)、遮阳系数(SC)以及气密性等核心指标,并着重分析了热桥效应这一导致能量损失的关键症结;在此基础上,从材料、构造、系统集成和智能化四个维度,全面论述了保温隔热性能的优化方法,涵盖了高性能保温材料、低辐射镀膜玻璃、断热型材、双层/三层幕墙系统、外遮阳一体化设计以及智能响应式幕墙等前沿技术。本研究旨在为构建高能效、低隐含碳的下一代建筑幕墙提供理论支撑与技术参考,助力我国建筑行业绿色低碳转型。

**关键词:** 低碳建筑;建筑幕墙;保温隔热;热工性能;节能优化

## 引言

全球气候变暖是21世纪最严峻的挑战之一,推动各国加速向低碳经济转型。中国提出“2030碳达峰、2060碳中和”目标,建筑行业因高能耗与高碳排放成为关注焦点。其中,建筑运行能耗占全社会总能耗比重长期居高,而通过围护结构(尤其是幕墙)散失的冷热量是主因。传统玻璃幕墙虽具美学与采光优势,但热工性能薄弱:冬季加剧热损失,夏季增加制冷负荷,形成高能耗“短板”,与“双碳”目标矛盾突出。因此,在兼顾功能与美学的前提下,系统性提升幕墙保温隔热性能、降低全生命周期碳足迹,已成为关键课题。本文旨在构建整合材料科学、建筑物理、结构工程与智能控制的多学科分析框架,从热工机理、影响因素到优化路径,全面研究低碳背景下幕墙性能提升策略,为高性能、低隐含碳幕墙的设计与应用提供理论支撑与技术指引。

## 1 建筑幕墙在低碳建筑体系中的角色与挑战

### 1.1 幕墙的功能演变与低碳诉求

早期的幕墙设计主要关注结构安全与视觉效果,对节能性能的考量几乎为零。随着《公共建筑节能设计标准》等一系列法规的出台,幕墙的热工性能被正式纳入强制性设计要求。如今,在“双碳”目标的引领下,幕墙的功能定位已发生根本性转变。它不再仅仅是建筑的“皮肤”,更是建筑与外部环境进行能量交换的“智能器官”。理想的低碳幕墙应具备多重功能:在冬季,它需要成为一个高效的保温屏障,最大限度地减少室内热量的向外流失;在夏季,它则需转变为一个智能的遮阳与隔热系统,有效阻隔太阳辐射热,同时允许自然通风以降低制冷需求;此外,它还应能充分利用自然光,减少人

工照明能耗,并具备良好的气密性和水密性,确保室内环境的舒适与健康。这种从被动围护到主动调节的功能演变,对幕墙的设计理念和技术集成提出了极高的要求。

### 1.2 幕墙热工性能对建筑能耗的影响机制

幕墙的热工性能主要通过三种物理过程影响建筑能耗:传导、对流和辐射。传导热损失是指由于室内外温差,热量通过幕墙的固体材料(如玻璃、金属框)从高温侧向低温侧传递。对流热损失则源于幕墙缝隙处的空气渗透,即所谓的“风冷效应”,它会将处理过的室内空气(无论是加热还是冷却)置换出去,迫使暖通空调(HVAC)系统持续工作以维持设定温度。辐射热得则是指太阳短波辐射穿透玻璃进入室内后,被室内物体吸收并转化为长波辐射,这部分热量被“困”在室内,形成温室效应,显著增加夏季的制冷负荷<sup>[1]</sup>。这三种热交换过程共同作用,使得幕墙成为建筑围护结构中能耗最高的部分之一。其性能优劣直接决定了建筑供暖和制冷系统的规模与运行时间,进而对建筑的全年总能耗产生决定性影响。

### 1.3 当前幕墙节能面临的核心挑战

尽管节能意识普及,幕墙节能仍面临多重挑战。一是性能与美学的矛盾:建筑师偏爱大面宽、少分格的通透玻璃幕墙,却牺牲了保温隔热性能,如何兼顾视觉效果与节能成为设计难点。二是成本制约:真空玻璃、智能调光玻璃及双层幕墙等高性能方案初期投入高,限制了广泛应用。三是热桥效应突出:金属框架与连接件导热性强,易形成贯穿保温层的热桥,显著降低整体热工性能。四是缺乏全生命周期视角:当前设计多聚焦运行能耗,忽视材料生产、运输、施工及拆除过程中的隐含

碳排放。真正低碳的幕墙需统筹运行能效与全生命周期碳足迹，实现综合减碳目标。

## 2 建筑幕墙热工性能的关键影响因素分析

### 2.1 核心热工性能指标解析

评价幕墙热工性能的核心指标主要包括传热系数（U值）、遮阳系数（SC）和气密性等级。传热系数（U值）是衡量幕墙整体保温隔热能力的最重要参数，它表示在稳定传热条件下，当幕墙两侧空气温差为1K时，单位时间内通过单位面积幕墙的传热量。U值越低，表明幕墙的保温隔热性能越好。遮阳系数（SC）则用于表征幕墙阻挡太阳辐射热的能力，它是指在相同条件下，幕墙所透过的太阳辐射得热量与标准3mm透明玻璃所透过的太阳辐射得热量之比。SC值越低，说明幕墙的遮阳隔热性能越强。气密性等级反映了幕墙抵抗空气渗透的能力，等级越高，空气渗透量越小，由风压和热压引起的对流热损失也就越低。这三个指标构成了评价幕墙节能性能的完整体系，缺一不可。

### 2.2 热桥效应的形成机理与危害

热桥效应是幕墙节能设计中最为棘手的问题之一。在幕墙系统中，金属型材（如铝合金）因其高强度和易加工性被广泛用作框架和支撑结构。然而，金属的导热系数远高于常用的保温材料（如岩棉、聚氨酯）。当金属构件贯穿整个幕墙厚度，直接连接室内外时，就形成了一个低热阻的“高速公路”，使得热量能够绕过保温层，快速地从室内传导至室外（冬季）或反之（夏季）。这种局部的、非均匀的热流集中现象，不仅导致该区域的表面温度显著低于（或高于）周围区域，可能引发结露、发霉等室内环境问题，更重要的是，它会大幅拉高整个幕墙单元的平均U值，使精心设计的保温层效果大打折扣<sup>[2]</sup>。因此，有效识别、量化并阻断热桥，是提升幕墙整体热工性能的关键所在。

### 2.3 玻璃配置与型材选择的决定性作用

作为幕墙面积占比最大的组成部分，玻璃的配置对整体热工性能起着决定性作用。从单片玻璃到中空玻璃，再到充惰性气体（如氩气、氪气）的Low-E中空玻璃，甚至是真空玻璃，每一次技术迭代都带来了U值和SC值的显著改善。特别是低辐射（Low-E）镀膜技术的应用，通过在玻璃表面沉积极薄的金属或金属氧化物膜层，可以选择性地反射红外热辐射，同时保持较高的可见光透过率，从而实现了保温与采光的完美平衡。与此同时，幕墙框架型材的选择同样至关重要。传统的铝合金型材导热快，是典型的热桥。为解决此问题，断热型材应运而生。它通过在铝合金型材的内外腔体之间嵌入一条导热

系数极低的非金属隔热条（通常为聚酰胺PA66），物理性地切断了热传导路径，极大地降低了型材部分的U值，使其与高性能玻璃的节能效果相匹配。

### 2.4 系统集成度与施工质量的影响

幕墙的最终热工性能并非各部件性能的简单叠加，而是高度依赖于系统集成的精密程度和现场施工的质量。即使选用了最先进的玻璃和型材，如果接缝密封处理不当、保温材料填充不密实、或者不同材料交接处存在缝隙，都会导致严重的空气渗透和热桥，使设计性能大打折扣。因此，幕墙作为一个系统工程，其性能的实现不仅在于“选什么”，更在于“怎么做”。精细化的节点设计、严格的工厂预制、规范的现场安装以及完善的质量验收体系，是确保幕墙达到预期热工性能的必要保障。

## 3 低碳导向下幕墙保温隔热性能的优化路径

### 3.1 高性能保温隔热材料的应用

材料是性能的基础。在低碳导向下，保温材料的选择不仅要考虑其导热系数，还需兼顾其生产能耗、可再生性、防火安全性和耐久性。传统的保温材料如岩棉、玻璃棉等，虽然性能稳定、价格适中，但其生产过程能耗较高。新型的保温材料，如气凝胶毡，凭借其纳米多孔结构，实现了超低的导热系数，是目前隔热性能最优异的材料之一，尤其适用于空间受限的幕墙节点。真空绝热板（VIP）通过抽真空消除气体对流和传导，也具有极佳的保温效果<sup>[3]</sup>。此外，生物基保温材料（如软木、秸秆板）因其可再生性和较低的隐含碳，也逐渐受到关注。在玻璃领域，除了广泛应用的Low-E中空玻璃外，真空玻璃技术通过将两片玻璃之间的空气抽成真空，从根本上消除了气体传导和对流，其U值可低至0.4 W/(m<sup>2</sup>·K)以下，代表了未来玻璃节能的发展方向。

### 3.2 先进幕墙构造体系的创新

构造体系的创新是突破性能瓶颈的关键。双层幕墙（Double-Skin Facade, DSF）是一种极具代表性的高性能构造。它由内外两层幕墙构成，中间形成一个可调控的空气间层。在冬季，关闭通风口，间层形成一个静止的空气缓冲区，有效提升了整体保温性能；在夏季，开启上下通风口，利用“烟囱效应”引导热空气上升排出，带走间层内的热量，从而降低内层幕墙的表面温度和制冷负荷。三层幕墙则在此基础上进一步强化了保温隔热效果，适用于严寒或酷热地区。此外，单元式幕墙因其在工厂内完成大部分组装和密封工作，现场湿作业少，能更好地保证气密性和水密性，也是提升性能的有效途径。

### 3.3 热桥阻断与精细化节点设计

针对热桥效应，必须采取系统性的阻断措施。除了

普遍采用的断热铝合金型材外,在幕墙与主体结构的连接处、横竖框的交接处、开启扇的五金附件等关键部位,都需要进行精细化的节点设计。例如,使用非金属的隔热垫块替代金属连接件,或在金属连接件周围包裹高性能保温材料,以延长热流路径,增加热阻<sup>[4]</sup>。对于石材、铝板等非透明幕墙,其背后的保温层必须连续、无间隙地覆盖整个背板区域,并妥善处理与窗洞、穿墙管道等部位的收口,确保保温层的完整性,避免形成新的热桥。

### 3.4 外遮阳与自然通风的协同优化

被动式设计策略在幕墙节能中扮演着重要角色。将外遮阳系统与幕墙一体化设计,可以主动干预太阳辐射,是降低SC值最有效的手段。固定式遮阳(如水平挑檐、竖向格栅)适用于太阳高度角变化规律明确的地区;而可调节式遮阳(如电动百叶、卷帘)则能根据日照强度和角度实时调整,实现全年最优的遮阳效果。同时,合理设计幕墙的可开启扇位置和面积,并结合建筑内部空间布局,可以有效组织自然通风。在过渡季节,通过自然通风可以完全替代机械制冷,大幅降低能耗。将遮阳、通风与幕墙本体性能相结合,形成一个动态响应的、自适应的外围护系统,是实现深度节能的核心思路。

### 3.5 智能响应式幕墙技术的融合

随着物联网、传感器和自动控制技术的发展,智能响应式幕墙成为未来的重要趋势。这类幕墙能够感知外部环境(如光照、温度、风速)和内部需求(如人员 occupancy、设定温度),并通过执行机构(如电致变色玻璃、智能百叶)自动调节自身的光学和热工性能。例如,电致变色玻璃可以在通电后改变其透光率和遮阳系数,在保证视野的同时动态控制太阳得热。这种“按需

响应”的能力,使得幕墙不再是静态的围护结构,而是一个能够与建筑能源系统协同工作的智能界面,从而实现能耗的精细化管理和最优化。

## 4 结语

在“双碳”目标引领下,提升建筑幕墙保温隔热性能已成为时代责任。本文系统探讨了低碳背景下幕墙性能优化的理论与路径。研究表明,幕墙节能潜力巨大,但需多学科协同、全链条优化。关键在于深入理解热工性能影响因素,尤其是热桥效应,并针对性改进。应从材料、构造到智能控制采取综合策略:应用高性能保温材料、发展双层/三层幕墙体系、实施精细化热桥阻断、融合外遮阳与自然通风,并探索智能响应技术。未来幕墙将向高能效、低隐含碳、智能化方向演进,不仅作为气候屏障,更成为建筑能源自给与环境共生的智慧界面。深化相关研究对推动建筑绿色转型、实现“双碳”目标和建设美丽中国具有重要现实与战略意义。

## 参考文献

- [1]刘志民.基于低碳节能理念的幕墙优化设计要点[J].城市开发,2025,(22):52-54.
- [2]李国远.住宅建筑外墙保温的玻璃幕墙节能技术研究[J].科技资讯,2025,23(14):189-191.
- [3]王强,温汝洒,邝宝珊,等.夏热冬暖地区建筑幕墙低碳设计研究[C]//中国建筑金属结构协会铝门窗幕墙分会.2026年建筑门窗幕墙创新与发展.奥雅纳工程咨询(上海)有限公司深圳分公司;香港华艺设计顾问(深圳)有限公司,;2026:192-198.
- [4]刘影.低碳建筑在幕墙系统中的主要应用点[J].建筑工人,2020,41(03):35-37.