

冬冷夏热地区低能耗体育建筑改造研究--以衡阳为例

袁菲¹, 闫鑫²

¹中南大学建筑与艺术学院 湖南长沙

²东南大学交通学院 江苏南京

【摘要】气候变化已成为当今全球面临的重要环境问题之一。随着工业化进程的加速和人类活动的不断增加,温室气体排放量持续上升,导致全球气温升高、极端天气事件增多等负面影响。为了应对这一挑战,节能减排成为重要的研究方向。体育建筑作为公共建筑的一种,其能耗和碳排放量也备受关注。研究通过对基础气象参数的设定,深入探讨了日照和温度的分析模型简化与参数设定。此外,还关注了光热平衡下的单棚角度、立面开启面和材质的优化问题。通过开展节能设计研究,能够更为有效地应对气候变化所带来的挑战,进而实现可持续发展目标。

【关键词】冬冷夏热地区;低能耗;体育建筑;衡阳体育中心;日照分析;建筑表面温度分析

【收稿日期】2024 年 12 月 12 日 **【出刊日期】**2025 年 1 月 20 日 **【DOI】**10.12208/j.ace.20250002

Study on the retrofit of low energy consumption sports buildings in cold winter and hot summer areas--

Taking Hengyang sports center as an example

Fei Yuan¹, Xin Yan²

¹School of Architecture and Art, Central South University, Changsha, Hunan

²School of Transportation, Southeast University, Nanjing, Jiangsu

【Abstract】Climate change has become one of the major issues facing the world today. With the acceleration of industrialization and increasing human activities, greenhouse gas emissions continue to rise, leading to negative impacts such as rising global temperatures and increasing extreme weather events. In order to cope with this challenge, energy saving and emission reduction has become an important research direction. Sports buildings, as a kind of public buildings, are also concerned about their energy consumption and carbon emissions. The study delves into the model simplification and parameter setting for insolation and temperature analysis by setting the basic meteorological parameters. In addition, the optimization of canopy angle, façade opening surface and material under light and heat balance is also concerned. With the increasing severity of global climate change, energy efficient design studies are of indispensable value in practical applications. Through these studies, the challenges posed by climate change can be better addressed and the goal of sustainable development can be realized.

【Keywords】Cold winter and hot summer regions; Low energy consumption; Sports buildings; Hengyang Sports center; Sunshine analysis; Building surface temperature analysis

1 引言

全球气候变化引发的环境问题迫切,极端天气事件的加剧对建筑能耗提出了更高的要求。建筑行业作为能源消耗和碳排放的重要领域之一,如何通过设计实现节能减排,是当前研究的热点。在中国冬冷夏热地区,建筑在夏季排暑和冬季供暖方面的

能源需求急剧增大,对建筑节能设计提出了更高的要求^[1]。体育建筑不仅是城市标志性设施,也是高智能化的建筑代表之一^[2]。

在建筑能耗优化与预测方面国内外学者进行了深入而广泛的研究。Davide Madeddu 等运用犀牛软件中的 grasshopper 功能及遗传算法,优化建筑立

面日照角度、时长及行人活动影响下的设计^[3]。我国建筑领域的节能设计研究与实际应用存在滞后,多集中于后期能耗计算与监测。樊松丽等以系统工程等理论构建绿色体育建筑技术体系,采用生命周期评价方法评估其环境性能^[4]。李静^[5]运用计算机模拟和数据对比方法,研究高校体育馆自然采光和通风,优化设计方案。刘畅^[6]采用 Design Builder 软件模拟严寒地区体育馆形体设计对能耗的影响,并探讨节能措施。田雨^[7]研究了通过对风、日射环境的研究,明确了亚热带体育建筑气候适应性的具体影响因素。已有研究为冬冷夏热地区低能耗体育建筑改造提供了一定经验和基础,但是针对特定气候条件下建筑的部件调整及材质优化等问题仍需进一步深入探索。

综合已有研究,本文通过对衡阳体育中心低能耗改造策略分析,降低建筑能耗与碳排放量,提高建筑气候适应性,为该地区体育建筑可持续发展提供参考。

2 研究对象现状

2.1 概况

衡阳市位于湖南省南部,属冬冷夏热季风气候,四季分明,雨量充沛,光照充足。衡阳体育中心坐落于衡阳市珠晖区的衡阳大学城,总面积 689 亩。该中心包含体育场、游泳馆和体育馆三大部分。体育场占地 58000 m²,设有 35762 个固定座位;游泳馆占地面积 2.9 万平米,设有 3800 个固定座位;体育馆建筑面积约 1.2 万平米,设有 7200 个固定座位。

2.2 现有节能设计分析

衡阳体育中心是一座综合性体育建筑集群,涵盖体育场、体育馆与游泳综合馆等场馆。体育场依靠 520 根主柱稳固支撑,其中最大主柱需 4 人合抱,其 42 级看台采用钢筋混凝土结构,保障观众视野与安全,屋面则运用钢结构,兼具防水与承重优势。体育馆主体结构适配多种大型单项赛事需求,内部空间开阔,无显著中间支撑结构。

在材料使用方面。衡阳体育中心在建筑材料的选择上,注重了绿色、环保的原则。首先,衡阳体育中心选用了环保砖作为主要建筑材料。这种环保砖采用废弃物作为原料,经过特殊工艺加工而成,不仅节约了资源,还减少了废弃物的排放。其次,

衡阳体育中心还选用了保温材料来提高建筑的隔热性能。这种保温材料能够有效阻挡室内外的热量传递,从而减少建筑物的能耗。此外,衡阳体育中心还选用了节能玻璃。这种玻璃具有优异的隔热和保温性能,能够有效地阻挡紫外线和红外线,从而减少室内暖气的使用。同时,节能玻璃还能够降低噪音,提高建筑的隔音效果。

同时,衡阳体育中心也采取了多种设计进行节能。其大面积的玻璃幕墙和天窗不仅赋予了建筑现代感,还巧妙地利用自然光线,显著减少了对人工照明的依赖。在照明系统的设计上,为了提高照明质量并降低能耗,该中心采用了智能照明系统。当室内光线充足时,系统会自动降低照明强度,避免过度照明造成能源浪费;当室内光线不足时,系统则会相应地增加照明强度,确保足够的照明亮度。这种自动调节功能不仅提高了照明质量,还有效降低了能耗。在可再生能源方面,中心对太阳能的利用主要通过安装太阳能光伏板实现。这些光伏板能有效地将太阳能转化为电能,为建筑提供所需的电力。其次,风能作为一种清洁、可再生的能源,也被充分应用到衡阳体育中心。通过安装风力发电机,中心能够利用风力发电,进一步补充建筑的电力需求。

3 冬冷夏热地区体育建筑热、日射环境现状分析

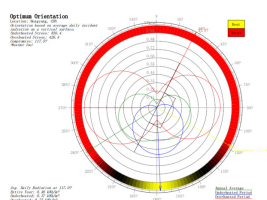
3.1 基础气象参数的设定

以衡阳市的气象数据为统一初始条件进行模拟研究,以便于在横向比较时能保持统一标准。利用 Ecotect 的 weather tool 插件,对衡阳相关气候数据进行分析,得到的模拟图见图 1。

3.2 抽象模型的建立

体育馆空间大,在气候适应性方面面临内部风向和光照条件调整的挑战,而体育场比赛大厅的露天半开放环境,使内部空间气候设计更加复杂^[8]。

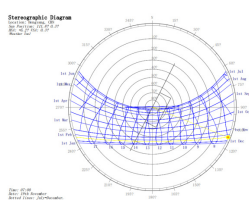
考虑建筑结构、设施、家具、外部环境、人类活动等影响因素,按模拟计算的简化原则创建模型^[9]。以衡阳体育中心为原型,其体育场为椭圆形圆柱体,南北轴长 352 米,东西轴长 327 米,高 36 米。两侧看台上方有对称钢制顶篷,顶篷含多个主框架,部分由混凝土结构支撑,部分与钢管杆和混凝土塔架相连。体育场抽象模型示意图见图 2。



最佳朝向分析图(a)

Optimal orientation analysis

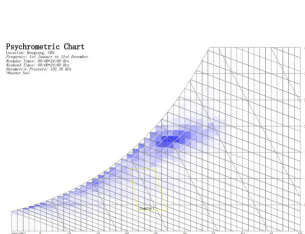
diagram (a)



日轨分析图(b)

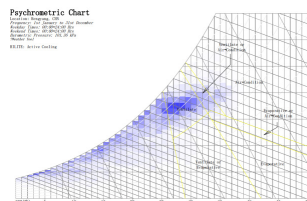
Daily Orbit Analysis Chart

(b)



焓湿图(c)

Enthalpy moisture chart (c)

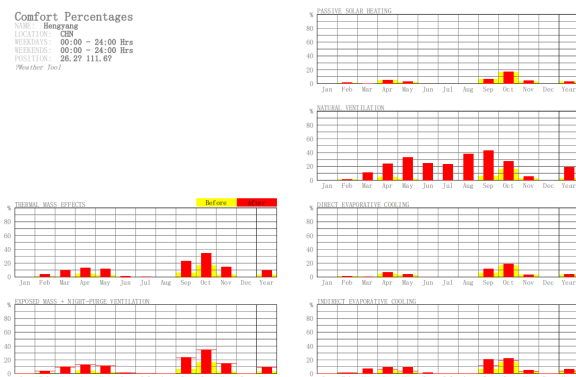


适合主动式降温区域分析图

(d)

Suitable for active cooling zone

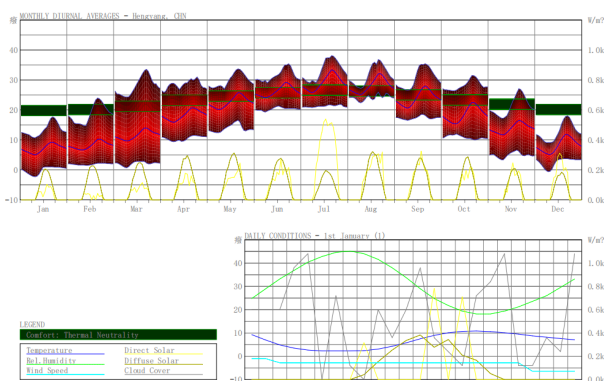
analysis diagram (d)



衡阳舒适百分比-被动式设计分析图(c)

Hengyang Comfort Percentage - Passive Design Analysis

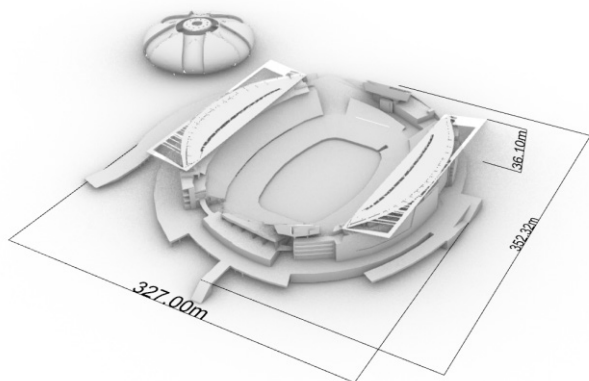
Chart (e)



衡阳逐时数据分析图(f)

Hengyang hourly data analysis chart (f)

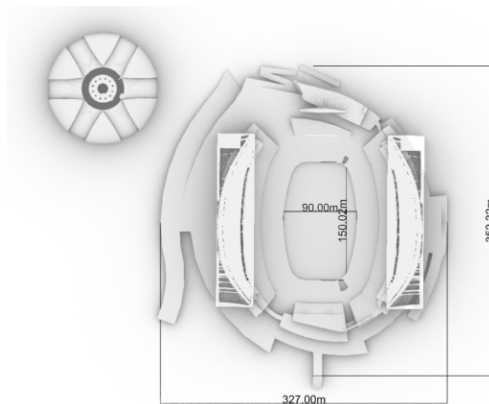
图 1 衡阳气候分析图

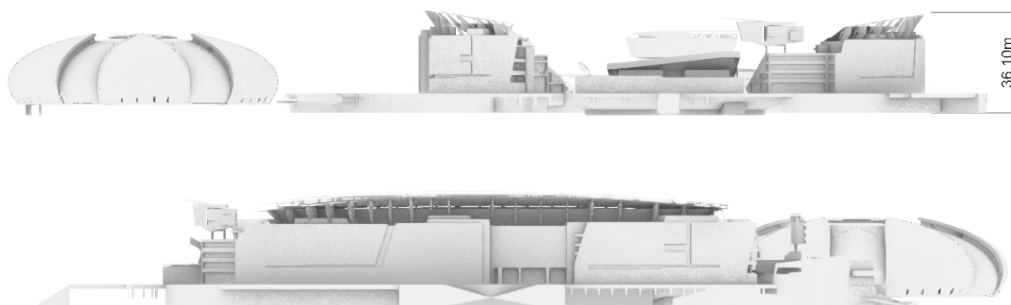


衡阳体育中心体育场抽象模型示意图(a)

Hengyang Sports Xi Center Stadium Abstract model (a)

(续下图)





衡阳体育中心体育场抽象模型侧面示意图(b)

Hengyang Sports Center Stadium Abstract model Side diagram (b)

图2 衡阳体育中心体育场抽象模型示意图

3.3 日照暴露率分析

利用 Grasshopper 的插件 Ladybug 对模型进行模拟计算, 重点关注自然光环境。针对体育场比赛大厅半开放式且在亚热带地区需遮阳的特点, 通过 Ladybug Tools 插件, 设置日照时长相关参数, 如起始和终止时间, 调节日照轨迹比例, 拾取中心点, 载入气象文件, 生成日照时长分析。

为研究日照暴露环境, 全场均匀分布设置 18 个采样点 (a-i 及 a'-i'), 后将部分采样点 (a、b、h、i) 向看台中央略移约 15 米, 使数据更具代表性。根据采样点计算结果和太阳辐照度数值, 以柱状图展示数据, 从而清晰呈现日照暴露率在全场的分布情况, 为后续分析提供依据。模拟结果见图 3、图 4。

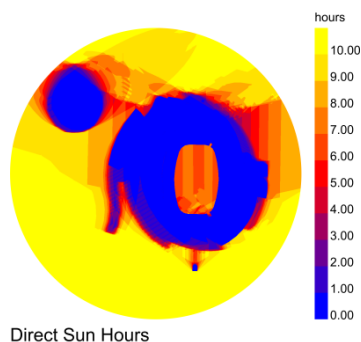
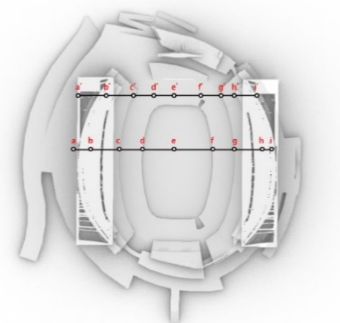
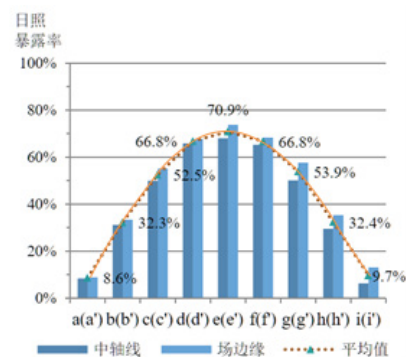


图3 日照时长分析图



(a)



(b)

图4 日照暴露率研究的取样点分布及数值分析图: (a)取样点分布图; (b)取样点日照暴露率分布图

模拟结果显示不同区域的日照暴露率差异较大, 这为遮阳设施的针对性设计提供了依据。日照暴露率较高的区域(如 c-c' 区域), 需要加强遮阳措施, 可考虑设置遮阳篷或调整罩棚角度, 以减少太阳直射带来的热量, 降低空调能耗。对于日照暴露率较低的区域(如场 a-b、a'-c' 等区域), 在遮阳设计上可相对简化, 避免过度遮阳影响自然采光利用, 实现节能与采光的平衡。

3.4 建筑外表温度分析

露天体育场温度与周边环境相近, 热环境模拟对能耗减低作用小, 故本研究选择 **Phoenics** 软件对衡阳体育中心建筑外表皮作温度分析模拟, 以实现低能耗改造设计。该软件可模拟建筑内外环境因素, 为优化设计提供支持。计算前, 参考相关案例和衡阳市温度情况, 调整密度、风速及模型相关参数, 如设置坐标系统、时间依赖性、计算方法、域大小、网格数量、容差等, 以及模型方程、湍流模型、辐射模型等参数, 确保模拟的准确性。模拟结果见图 5、图 6。

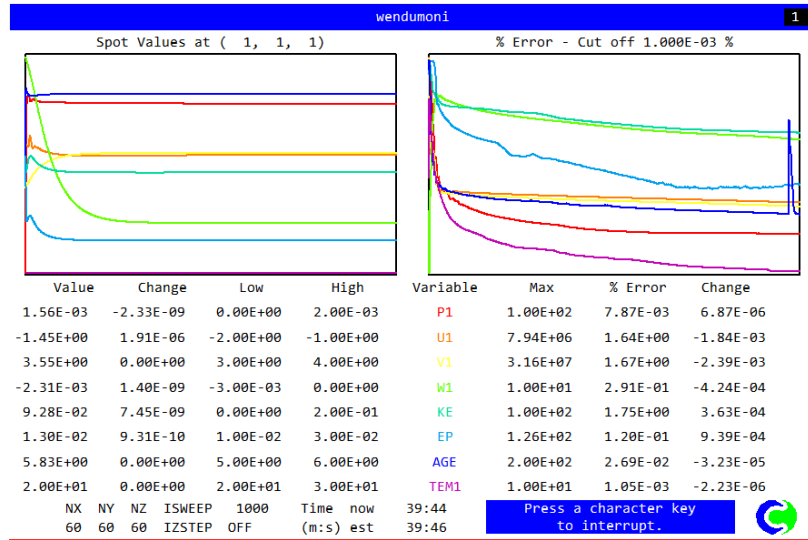


图 5 外表皮温度模拟 spot 图

以冬至日建筑外表皮温度范围为模拟重点, 时间设置和环境温度参数参考衡阳 2019 年冬至日数据。

模拟得出外表皮温度范围为-3℃至 13℃, 并通过分布图、最值图和具体数值图展示温度分布情况。

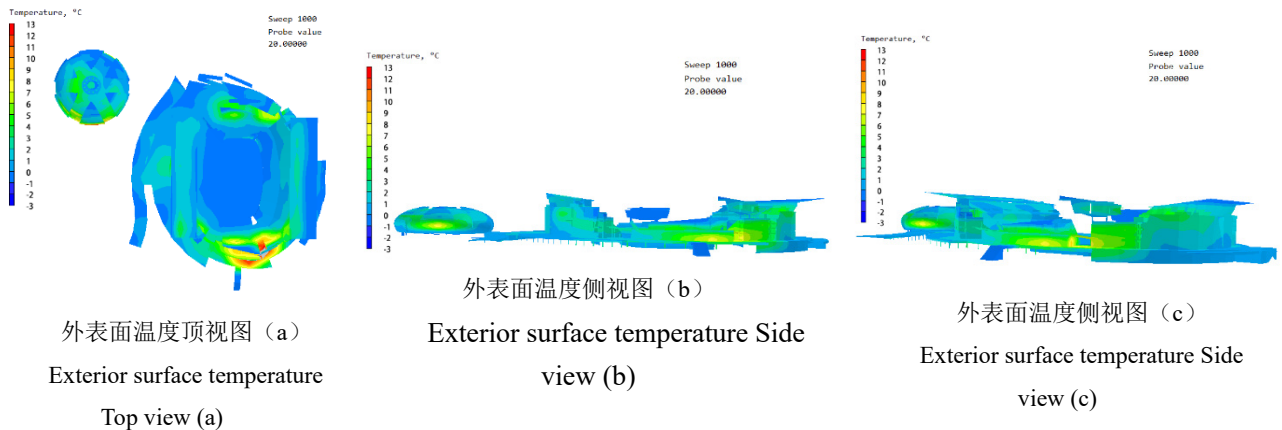


图 6 模拟外表皮温度分布图

模拟得出冬至日建筑外表皮温度范围为-3℃至 13℃, 温差较大。这表明建筑围护结构需要具备良好的保温性能, 以减少冬季室内热量向室外散失, 降低供暖能耗。在选择建筑材料和设计围护结构时, 应优

先考虑保温性能好的材料和构造方式。同时, 低温区域的存在可能暗示建筑中存在热桥部位, 需要采取特殊的热桥处理措施, 如增加保温层厚度、使用隔热材料等, 防止热量在这些部位过度传导, 提高建筑整

体的保温效果,减少能源浪费。

4 改进策略

4.1 光热平衡下的罩棚角度优化

在规划罩棚设计时,需要注意的是,罩棚越大,就越不利于场地的通风。在选择高度相同、位置相反的罩棚时,罩棚的高度应最大限度地控制在 5~15 米的范围内,不要过大。高度过高的罩棚会大大降低风场中的风速。如果罩棚的设计将高度与看台设计相结合,并以相反的形式布置,则可以采取一些策略来优化风场的风环境。为了改善场地的风环境并为其做出贡献,在高边增加罩棚可以提高场地的平均风速。对于覆盖范围大或结构一体化的罩棚,建议罩棚与支架之间至少保持 3 米的距离,以改善场地的风环境。这些措施有助于在遮阳期间保持良好的通风。

在日射环境方面,体育场罩棚的覆盖面积越大,遮阳效果越显著。按照遮阳效果由好到差的顺序排列,可以分为一体式、一体张口型、一体缺口型、船篷型、全包露天型、括号遮罩型。在设计前期,利用经验常数 $k(0.4\sim0.7)$ 可以估算遮阳篷的面积,从而进行方案的比选与优化。对于一体式遮阳篷而言,篷高因素基本无影响;而对于等高分体式遮阳篷,篷高与日照遮挡率之间存在正相关关系。一般而言,篷高每增加 10m 场内的日照遮挡率相应提高约 5%。在布置高低看台和高低遮阳篷的组合方式时,西高东低的形式是有效增强场地午后遮阳效果的选择。

通过这些措施,预期能够实现遮阳与通风的平衡,既有效遮挡太阳直射,减少夏季空调的能耗,又能改善场地的通风状况,避免闷热,提高观众和运动员的舒适度。同时,合理的罩棚高度和布局还可以优化风场,使空气流通更加顺畅,有助于驱散场地内的热气和浊气,并且西高东低的遮阳篷布置能更好地应对午后太阳高度角较大的情况,提供更有效的遮阳,降低场地温度。

4.2 立面开启面优化

大型建筑多采用玻璃立面采光,可开启部分助于自然通风。但因追求外观降低可开启比例,会导致室内通风不足,能耗增加。自然通风可改善空气质量、排热、提舒适度、减空调依赖、降低能耗。

在高温夏季和严寒冬季,通风策略应根据季节变化进行相应调整。在冬季,应在保证最低新风供应的前提下,适度降低通风量。在过渡季节,可以打开窗户进行通风,以平衡热量的散失和保留。如果夏季自然通风无法满足舒适度需求,白天可以使用空调进行降温,夜间则应增加通风量,利用室外较低的温度来推迟次日启动空调的时间。在确定了玻璃幕墙面积的前提下,引入可开启的窗扇(例如水平向开启的窗扇),对于提高室内风速和改善空气流通指标都能够产生积极的作用。

确定玻璃幕墙面积后,引入水平向开启窗扇等可改善室内风环境,提升风速和空气流通指标。此外,还应结合建筑功能和环境特征,权衡多种因素选最优窗洞形式和位置,在不增热能耗、不影响外观的前提下实现室内舒适与节能。

通过合理的通风策略,减少空调的使用时间和能耗,尤其是在过渡季和夏季夜间充分利用自然风降温,从而实现节能。此外,还能改善空气质量,增加室内外空气的交换,排出室内污浊的空气,引入新鲜空气,为观众和运动员提供更健康的环境。同时,稳定的室内温度和良好的空气流通,能够提升人员在建筑内的舒适度,有助于观众更好地观赛,运动员更好地发挥。

4.3 材质优化

大型空间建筑结构具独特性,其设计与结构协调具艺术性。随着科技的进步,结构呈轻型化趋势,屋盖轻薄、采光面积大,支承构件纤细,增强轻盈感与艺术性,为设计提供更多可能。

表 1 不透光部分围护结构碳排放值表

材料	面积 (m ²)	厚度 (m)	密度 (t/m ³)	碳排放因子 (kg)	材料碳排放值 (t)
铝板材	2504.96	0.006	2.7	23800	965.81
	2504.96	0.050	0.032	3290	13.19
	2504.96	0.060	0.032	3290	15.82
	2504.96	0.070	0.032	3290	18.46
XPS 保温板	2504.96	0.080	0.032	3290	21.10
	2504.96	0.090	0.032	3290	23.73
	2504.96	0.100	0.032	3290	26.37
	2504.96	0.110	0.032	3290	29.01

屋顶不透光区域可选铝板与挤塑聚苯乙烯(XPS)保温板系统, XPS板经连续挤出成型, 内部蜂窝状密闭孔洞使热工性能较好, 用于钢结构屋顶可避免冷桥、提升耐久性。通过对比不同厚度 XPS 保温板对能耗和碳排放量影响发现, 厚度增加供热

与制冷能耗先降后趋缓, 保温性能提升有限。计算碳排放量值可知, 铝板碳排放量贡献大, 保温板占比小。对比不同厚度 XPS 板碳排放量变化, 其生产阶段厚度增 10 毫米, 碳排放量约增 2.63 吨。综合考虑, 本研究选 70 毫米厚保温板。

表 2 不同厚度 XPS 板材料阶段与使用阶段碳排放量变化值表

XPS 保温板厚度 (mm)	材料生产阶段碳排放量变化值 Δ (t)	适应阶段碳排放量变化值 Δ (t)
50	--	--
60	2.63	-45.36
70	5.26	-77.11
80	7.89	-99.80
90	10.52	-117.94
100	13.15	-131.55

通过材质优化, 预期可以提升建筑的保温性能, 有效减少冬季室内热量向外散失, 降低供暖能耗, 在夏季阻挡室外热量传入室内, 减轻空调制冷负担。同时, 选择合适厚度的保温板能够降低碳排放, 在满足保温需求的同时, 减少建筑材料生产和使用过程中的碳排放, 助力碳中和目标。此外, 还能够提高建筑的耐久性, XPS 保温板的特性有助于避免钢结构屋顶冷桥问题, 延长屋顶的使用寿命, 降低建筑的维护成本。

5 结语

研究聚焦冬冷夏热地区的低耗能体育建筑改造, 以衡阳体育中心为示例进行了一系列的模拟, 提出了对应的改进策略。衡阳体育中心现有节能设计主要关注的是自然采光与通风、空调系统高效利用、可再生能源的使用及绿色建筑材料的使用等。为了分析其日照暴露情况及建筑外表温度, 建立起抽象模型, 利用 Ladybug 及 Phoenix 等软件进行模拟, 发现在现有条件下存在室内日照暴露情况较差、冬季建筑外表温度较低温差较大的情况。据此, 研究分别从光热平衡下罩棚角度调整、立面开启模式优化及建筑材质优化的角度提出改进措施, 阐释了低能耗建筑改造对碳中和的重要性。结果表明改造可降能耗与碳排放量, 提高经济效益与环境友好性。未来研究可以在日照及建筑外表皮温度分析的基础上加入风热环境等相关分析, 多维度建立起评价体系, 更全面分析环境现状, 以更适配环境气候特点的评价结果出发, 优化冬冷夏热地区大型体育建筑的低能耗

改造设计, 综合考虑经济、环境、美观等要素, 为公共建筑的优化设计提供更科学的改造策略。

参考文献

- [1] Liu L, Ma Y, Huang R, et al. Field measurement study of indoor thermal environment of badminton halls in a hot summer and cold winter region in different seasons in China[J]. Heliyon, 2024, 10(15): e34883. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e34883.
- [2] Xiong D, Cheng K, Chen J. Climate-Adaptive Design Strategies of Sports Stadia in a Hot Summer and Cold Winter Zone: A Case Study of Nanjing[J]. Buildings, 2023,13(9):2238.DOI:10.3390/buildings13092238.
- [3] Madeddu D. Interactive Facade Optimized for Day lighting and Pedestrian Response using a Genetic Algorithm [C].GA2011-XIV Generative Art Conference[J]. XIV Generative Art International Conference, 2011. DOI:10.1016/j.cities.2023.104704.
- [4] 樊松丽. 绿色体育建筑的可持续性及其环境性能评价研究[D]. 华中科技大学, 2006.
- [5] 李静. 基于系统优化的高校体育馆自然采光和通风节能设计研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2010.
- [6] 刘畅. 基于建筑能耗模拟的严寒地区体育馆形体设计研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2013.
- [7] 田雨. 亚热带体育建筑的气候适应性设计策略研究[D].

华南理工大学, 2020.10.27151/d.cnki.ghnlu.2020.000261.

- [8] Hong Y, Ezech C I, Deng W, et al. Climate adaptation of design scheme for energy-conserving high-rise buildings—Comparative study of achieving building sustainability in different climate scenarios[J]. Energy Reports, 2022, 8: 13735-13752.DOI:10.1016/j.egyr.2022.09.106.
- [9] Guo Y, Bart D. Optimization of Design Parameters for Office Buildings with Climatic Adaptability Based on Energy

Demand and Thermal Comfort[J]. Sustainability, 2020, 12(9): 3540.DOI:10.3390/su12093540.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS