

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2024.04.005

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:周雨,富仁杰,徐蔼彦,唐大波,朱轶韵.绿色体育馆能耗及碳排放分析[J].西安理工大学学报,2024,40(4):494-502.

ZHOU Yu, FU Renjie, XU Aiyun, TANG Dabo, ZHU Yiyun. Energy consumption and carbon emission analysis of green gymnasium[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024, 40(4): 494-502.

绿色体育馆能耗及碳排放分析

周雨, 富仁杰, 徐蔼彦, 唐大波, 朱轶韵

(西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 在全球气候问题日趋严峻的背景下,节能减排已经成为我国低碳发展的关键。体育馆建筑由于其体量大、能耗高等特点,将是建筑领域实现碳减排的研究重点。本文建立寒冷地区体育馆建筑模型,基于数值模拟法分析建筑围护结构的构造参数对体育馆能耗及碳排放的影响,采用正交试验法得到最优构造参数组合。研究表明:对建筑采暖碳排放、制冷碳排放及总碳排放影响最大的因素分别是天窗窗墙比、侧窗窗墙比、侧窗传热系数。最优构造参数组合为侧窗窗墙比 20%、天窗窗墙比 10%、侧窗传热系数 $2.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、天窗传热系数 $1.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、外墙传热系数 $0.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、屋顶传热系数 $0.45 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。与案例建筑构造参数组合相比,最优组合的总能耗及采暖碳排放、制冷碳排放、总碳排放分别降低了 10.73%、6.99%、18.76%、13.78%。本文为寒冷地区体育馆建筑的节能设计和绿色低碳发展提供了理论参考。

关键词: 绿色体育馆; 建筑能耗; 建筑碳排放; 正交试验

中图分类号: TU201.5

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2024)04-0494-09

Energy consumption and carbon emission analysis of green gymnasium

ZHOU Yu, FU Renjie, XU Aiyun, TANG Dabo, ZHU Yiyun

(Faculty of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Against the background of increasingly severe global climate problems, energy saving and emission reduction have become the key to low-carbon development in China. Due to its large volume and high energy consumption, the stadium building will be the research focus on realizing carbon emission reduction in the construction field. This paper establishes a model for building the gymnasium in cold regions, analyzes the influence of the construction parameters for the building envelope on the energy consumption and carbon emission of the gymnasium based on numerical simulation, and obtains the optimal combination of the construction parameters by the orthogonal test method. The results of the study show that the factors having the greatest influence on the carbon emissions from heating, cooling and total carbon emissions of the building are the skylight-to-wall ratio, the side window-to-wall ratio and the side window heat transfer coefficient, respectively. The optimal combinations of construction parameters are 20% for the side window-to-wall ratio, 10% for the skylight-to-window ratio, $2.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ for the side window heat transfer coefficient, $1.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ for the skylight heat transfer coefficient, $0.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ for the facade heat transfer coefficient, and $0.45 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ for the roof heat transfer coefficient. Compared with the baseline construction parameter combinations, the total energy

收稿日期: 2023-09-15; 网络首发日期: 2024-02-06

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20240204.1850.010.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078419); 陕西省科技厅资助项目(2023-YBSF-189)

第一作者: 周雨, 女, 硕士生, 研究方向为建筑节能及碳排放分析。E-mail: iszhouyu@163.com

通信作者: 朱轶韵, 女, 博士, 教授, 研究方向为绿色建筑、建筑节能及碳排放等。E-mail: zyyun@xaut.edu.cn

consumption and carbon emissions from heating, cooling, and total carbon emissions of the optimal combination are reduced by 10.73%, 6.99%, 18.76% and 13.78%, respectively.

Key words: green gymnasium; building energy consumption; building carbon emission; orthogonal experiment

为了实现“双碳”目标,我国各行业都开始实行绿色发展战略。《2022年中国建筑能耗与碳排放研究报告》^[1]显示,2010至2020年间,公共建筑碳排放增长了51% ($6.34 \times 10^8 \text{ t CO}_2$),并且公共建筑面积从 $7.8 \times 10^9 \text{ m}^2$ 急剧增加到 $1.42 \times 10^{10} \text{ m}^2$,年均增长率为6.2%。因此控制公共建筑的能耗和碳排放至关重要。体育馆作为公共建筑中重要的一类,具有空间尺度大、整体造型多变、运行管理复杂等特点,因此具有巨大的节能减排的潜力。

与此同时我国大力推动体育事业的发展,近几年举办了各类大型国际体育赛事,更是激发了国民积极参加体育运动的热情。根据《2021年全国体育场地统计调查数据》^[2]显示,2013—2021年间,我国体育场地数量增加了 2.2768×10^6 个,并且2021年我国人均体育场地面积达到 2.41 m^2 。此外,人们在日常运动中更倾向于选择像羽毛球、篮球等简单易学的项目,因此对羽毛球馆等室内体育场馆的需求日益增大,所以推动体育馆建筑绿色节能发展尤为关键。

为了使体育馆建筑实现绿色低碳发展,需要考虑影响体育馆建筑能耗及碳排放的各种因素,在此背景下,众多学者开展了一系列研究。一方面,不同的空间结构和布局对体育馆节能有一定影响,蔡晓曦^[3]研究了体育馆平面和剖面形态对建筑节能的影响,总结出夏热冬冷地区体育馆生态设计的策略要点。同时,体育馆的设备系统也同样重要,董巧慧^[4]通过对不同空调系统进行模拟,得出采用间歇开启的方式将有效减少建筑能耗。此外,在体育馆设计之初,设计人员还需要考虑体育馆的典型设计参数,这些参数本身对建筑有一定影响,还会相互影响建筑节能效果。李岚等^[5]提取了体育馆建筑18项设计参数进行能耗分析,得到高侧窗窗墙比对能耗敏感度最高。因此对于体育馆建筑的能耗及碳排放,可以利用主动或被动策略进行优化,其中对建筑照明、通风等方面优化的主动策略占多数^[6-7],而针对建筑形式、围护结构等方面的被动策略也对建筑节能减排尤为重要^[8-9],其中张宇翔^[10]对既有建筑的围护结构进行模拟分析,建立了碳排放理论框架,提出了基于围护结构的碳减排策略。白路恒^[11]从围护结构的传热系数、建筑体形系数等方面研究了影响公共建筑碳排放的因素,为低碳设计提供了参考。

综上可知,大量学者为实现绿色体育馆的节能减排提供了坚实的基础,但目前针对体育馆建筑的研究多集中于严寒地区建筑的能耗方面,针对寒冷地区体育馆建筑碳排放的研究相对较少,基于此本文对寒冷地区体育馆的建筑能耗展开研究,结合建筑碳排放因素,探究寒冷地区体育馆建筑能耗及碳排放的影响因素与规律,为当地体育馆建筑的绿色节能设计提供理论参考和数据支持。

1 研究对象及方法

1.1 研究对象

本研究通过对西安市及周边地区走访调研,结合调研结果,选取西安市某一栋具有典型性和代表性的体育馆建筑为研究对象,该建筑的空间布局、构造、围护结构等关键要素均满足西安地区的气候特征及环境条件,该建筑面积为 2250 m^2 ,体形系数为0.16,平面尺寸为 $50.0 \text{ m} \times 45.0 \text{ m} \times 13.5 \text{ m}$,比赛大厅尺寸为 $38.0 \text{ m} \times 20.0 \text{ m}$ 。场馆开窗方式有天窗与侧窗两种,其中图1红色标注处是侧窗所在位置,蓝色标注处是天窗所在位置。整体采用钢筋混凝土框架结构,其空间布局为比赛大厅位于场地正中,辅助用房等分布在四周。建筑的围护结构构造参数见表1。

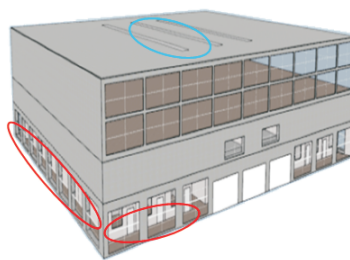


图1 体育馆的模拟计算模型图

Fig. 1 Simulation model diagram of the stadium

表1 案例建筑围护结构构造参数

Tab. 1 Baseline building envelope construction parameters

参数类型	参数值
侧窗窗墙比/%	55
天窗窗墙比/%	5
侧窗传热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	2.70
天窗传热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	1.84
外墙传热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	0.55
屋顶传热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	0.49

1.2 研究方法

1.2.1 建筑能耗模拟分析

在公共建筑中,围护结构参数是影响建筑负荷及碳排放的重要因素^[12],为了探究影响体育馆建筑能耗及碳排放的关键因素,本文采用 DesignBuilder 模拟软件对案例建筑进行全年的能耗模拟。暖通空调系统设定为风机盘管加新风系统,采用恒流式系统。供热设备设定为燃气锅炉,其性能系数 COP_h 设置为 0.85。制冷设备为电驱动冷水机组,其性能系数 COP_c 设置为 1.8。供暖和制冷的年运行时间为采暖季从 11 月 15 日至来年 3 月 15 日,制冷空调季为 6 月至 9 月。通过对寒冷地区体育馆建筑的调研结果分析与相关文献资料研究^[13-15],确定选取建筑围护结构的侧窗窗墙比、外墙传热系数、天窗窗墙比、侧窗传热系数、天窗传热系数、屋顶传热系数六个构造参数进行影响因素分析。体育馆建筑的模拟计算模型见图 1。

1.2.2 建筑碳排放计算分析

目前,关于建筑碳排放计算的方法主要有排放因子法、物料平衡法以及实测法 3 类,其中排放因子法是现在计算建筑碳排放的主流方法^[16],该方法简单明确且具有标准的计算公式,因此本文采用排放因子法对体育馆建筑的碳排放进行计算,采用《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)^[17]中的碳排放计算方法。体育馆建筑运行阶段主要考虑空调和采暖两个方面的碳排放,通过模拟得出制冷、采暖能耗,折

合计算出对应的电力消耗量以及天然气消耗量,以此来计算碳排放总量。碳排放计算公式如下:

$$C = \sum_{i=1}^n E_i R_i \quad (1)$$

式中: C 为建筑运行阶段 CO₂ 排放量, kg; E_i 为第 i 种能源的消耗量, 单位; R_i 为 i 物质的 CO₂ 排放因子, kg/单位。其中电力排放因子根据《关于做好 2023—2025 年发电行业企业温室气体排放报告管理有关工作的通知》^[18]中指出 2022 年度全国电网 CO₂ 平均排放因子为 0.570 3 t/MWh; 天然气排放因子参考《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)^[17], 其中天然气单位热值 CO₂ 排放因子为 55.54 t/TJ。

2 建筑能耗及碳排放影响因素研究

2.1 窗户面积对建筑能耗及碳排放的影响

体育馆建筑的窗户面积通常大于其他公共建筑,这主要是由于体育馆对于通风和照明需求所决定的,因此探究体育馆建筑的窗户面积与能耗、碳排放的关系。根据《建筑节能与可再生能源利用通用规范》(GB 55015—2021)^[19]要求,属于寒冷地区公共建筑的窗墙比应不超过 60%,故选取侧窗窗墙比 0.2~0.6,步长设定 0.1,天窗窗墙比 0、0.05、0.10、0.15、0.20。保持其他构造参数不变,分别调整侧窗和天窗的窗墙比,进行建筑能耗全年模拟,模拟结果见图 2。

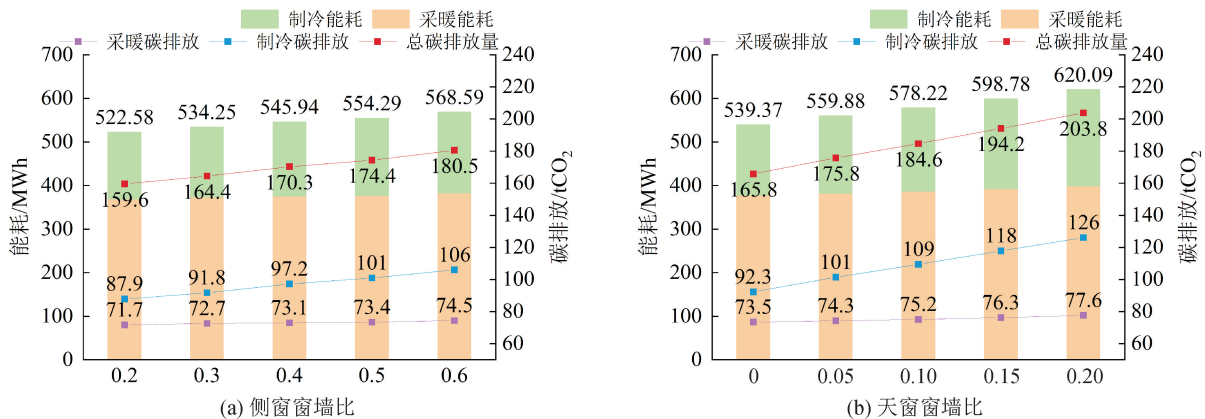


图 2 窗户面积与建筑能耗及碳排放的关系

Fig. 2 Relationship between window area and building energy consumption and carbon emissions

根据图 2 可以看出不论是侧窗还是天窗,窗户面积的增大都会导致能耗和碳排放的升高。由图 2 看出采暖能耗大于制冷能耗,但采暖碳排放反而小于制冷碳排放,这是因为制冷消耗电力的碳排放因子远大于采暖消耗的天然气的排放因子。同时不难看出制冷碳排放的增速明显较快,这是因为冬季窗

户既有热量的流失,也有热量的获得,所以窗户面积大小对采暖碳排放的影响相对较小;而夏季大面积窗户开启会导致室内的热量迅速增大,从而引起制冷碳排放的增加。

2.2 窗户传热系数对建筑能耗及碳排放的影响

体育馆建筑大面积的窗户使得热量传递更为容

易,故体育馆窗户的传热系数对节能减排有着至关重要的作用。根据通用规范(GB 55015—2021)规定,当体形系数 ≤ 0.30 时,单一立面外窗的传热系数的上限值为 $2.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,屋顶透光部分的传

热系数的上限值是 $2.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,因此设定侧窗传热系数分别为 $1.0, 1.5, 2.0, 2.5$,天窗传热系数为 $1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2$ 。模拟结果见图3。

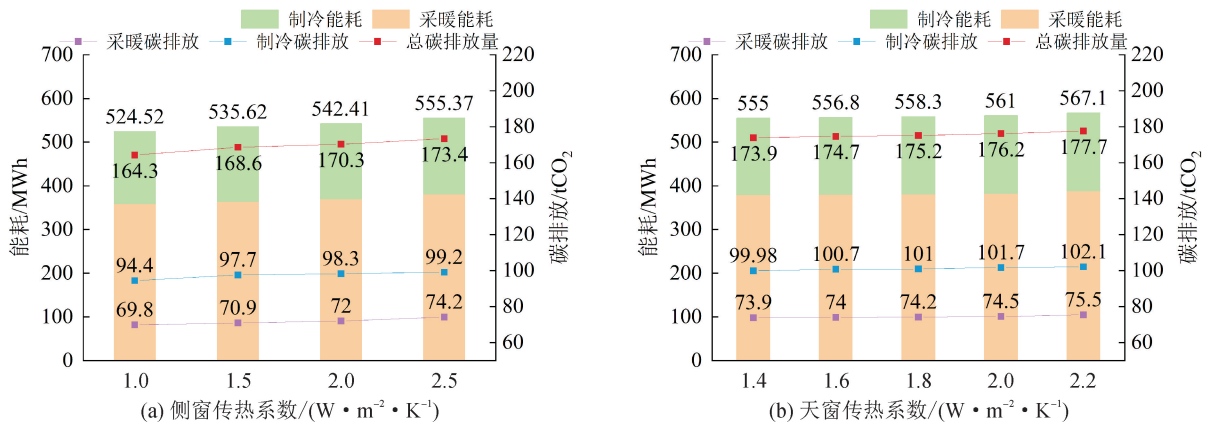


图3 窗户传热系数与建筑能耗及碳排放的关系

Fig. 3 Relationship between window heat transfer coefficient and building energy consumption and carbon emission

根据图3,采暖、制冷的碳排放都随着窗户传热系数的增大而缓慢增加,全年总碳排放也呈缓慢上升趋势。分析可知,在冬季由于室外温度远低于室内温度,热量从窗户流失,导致采暖能耗的增加,因此采暖碳排放也随之增加;而在夏季时则相反,室内温度低于室外温度,热量从窗户流入室内,导致室内温度上升,引起制冷能耗的增加,故而制冷碳排放也会增加。窗户的传热系数对建筑碳排放有一定的影响。当侧窗传热系数从 $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 增长到 $3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时,建筑制冷碳排放、采暖碳排放及总碳排放增幅分别为 $0.5\%/0.1, 0.37\%/0.1, 0.44\%/0.1$ 。

2.3 墙体传热系数对建筑能耗及碳排放的影响

体育馆作为多功能公共建筑,墙体设计需满足多种使用需求,如宽敞的内部空间、良好的通风条件等。然而这些需求往往会增加体育馆的能耗。因此,墙体传热系数的节能设计显得尤为重要。根据通用规范(GB 55015—2021),当寒冷地区公共建筑体形系数 ≤ 0.30 时,外墙的传热系数应不大于 $0.50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,屋面传热系数不大于 $0.40 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,故设定外墙传热系数为 $0.1 \sim 0.5$,步长设定 0.1 ,设定屋顶传热系数为 $0.05, 0.15, 0.25, 0.35, 0.40$ 。模拟结果见图4。

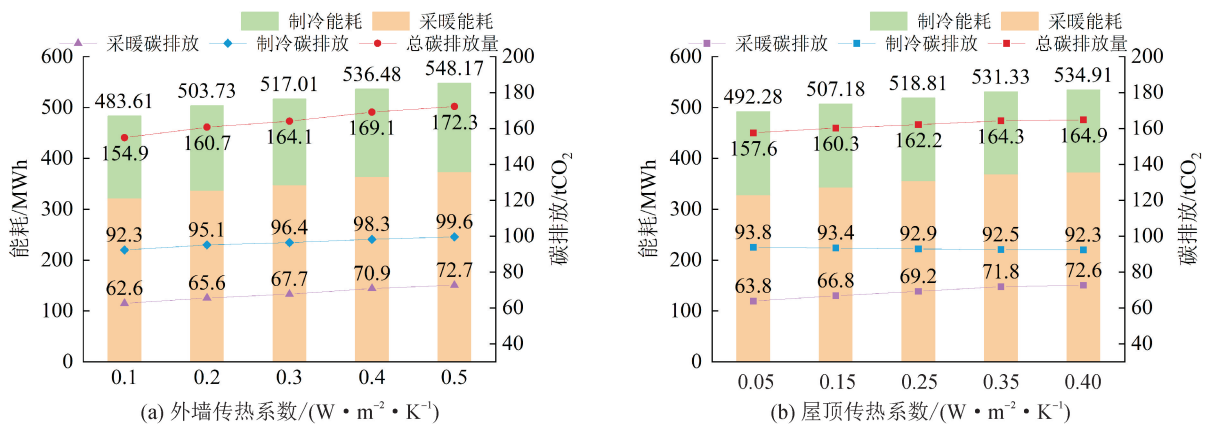


图4 墙体传热系数与建筑能耗及碳排放的关系

Fig. 4 Relationship between wall heat transfer coefficient and building energy consumption and carbon emission

根据图4,随着传热系数的增加,外墙和屋顶总能耗和总碳排放都呈现上升趋势,但屋顶的制冷碳排放随屋顶传热系数的增加反而有所降低。究其原因,当屋顶传热系数减小时,墙体保温效果更好,墙

体的蓄热能力也随之提高,所以夏季日间碳排放有所降低,但是对于夏季夜间,较小的传热系数反而阻止了墙体向室外散热,从而增加了制冷碳排放。由此可知,非透明围护结构的传热系数对建筑能耗和

碳排放都有着密切的关系,尤其对于寒冷地区来说,对采暖能耗需求更大,设计合理的墙体传热系数将对节能减排有较大的作用。

3 多因素建筑碳排放影响研究

3.1 正交试验设计

通过对以上选取的六个因素进行单因素分析后,分别用 A,B,C,D,E,F 代表侧窗窗墙比、天窗窗墙比、侧窗传热系数、天窗传热系数、外墙传热系数、

屋顶传热系数,再根据单因素分析结果,选取这六种因素的合理水平,每种因素分为 3 个水平,采用 L18 (3^6) 正交实验表,因素水平见表 2,利用正交实验法分析各因素相互作用下对体育馆能耗及碳排放的影响,正交实验表见表 3。正交试验结果见图 5 和图 6,其中图 5 是正交试验 18 组方案的采暖、制冷碳排放模拟计算结果,图 6 为 18 组方案的总能耗和总碳排放模拟计算结果。

表 2 正交试验因素水平表

Tab. 2 Orthogonal experiment factor level table

水平	A	B	C/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	D/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	E/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	F/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)
1	0.2	0.05	1.0	1.2	0.1	0.15
2	0.4	0.10	2.0	1.8	0.3	0.30
3	0.6	0.15	3.0	2.4	0.5	0.45

表 3 正交试验表

Tab. 3 Orthogonal test table

编号	A	B	C/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	D/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	E/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	F/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)
1	1(0.2)	1(0.05)	1(1.0)	1(1.2)	1(0.1)	1(0.15)
2	1	1	2(2.0)	2(1.8)	3(0.5)	3(0.45)
3	1	2(0.10)	1	3(2.4)	3	2(0.30)
4	1	2	3(3.0)	1	2(0.3)	3
5	1	3(0.15)	2	3	2	1
6	1	3	3	2	1	2
7	2(0.4)	1	1	3	2	3
8	2	1	3	1	3	2
9	2	2	2	2	2	2
10	2	2	3	3	1	1
11	2	3	1	2	3	1
12	2	3	2	1	1	3
13	3(0.6)	1	2	3	1	2
14	3	1	3	2	2	1
15	3	2	1	2	1	3
16	3	2	2	1	3	1
17	3	3	1	1	2	2
18	3	3	3	3	3	3

3.2 极差分析

极差可以反映出一组数据的离散程度,极差值越大,则该因素的数值变化对试验结果的影响也就越大。极差通过下式计算:

$$R = \max\{k_i\} - \min\{k_i\} \quad (2)$$

式中:R 为极差; k_i 为每个因素在水平 i 下的试验结果的平均值。对正交试验极差结果 $k_i(k_1, k_2, k_3)$ 值

的直观分析如下。

根据图 7 中 k 值大小可以看出,极差最大的是天窗窗墙比,其次是侧窗传热系数和屋顶传热系数,说明这三项是影响体育馆建筑采暖碳排放的关键因素,而侧窗窗墙比、天窗传热系数和外墙传热系数对采暖碳排放影响较小。选取 k_1, k_2, k_3 中最低水平,得到最佳水平组合为 $A_3B_1C_1D_2E_1F_1$ 。

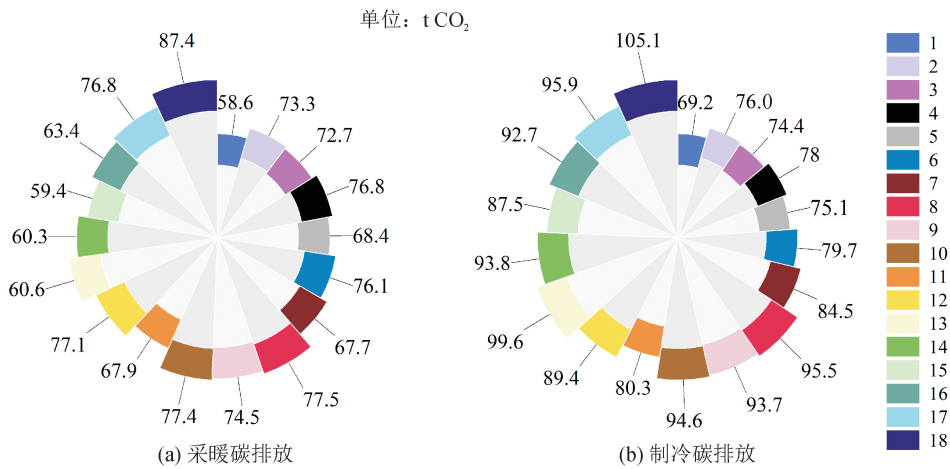


图 5 正交试验采暖碳排放及制冷碳排放结果

Fig. 5 Results of orthogonal experiment carbon emissions from heating and carbon emissions from cooling

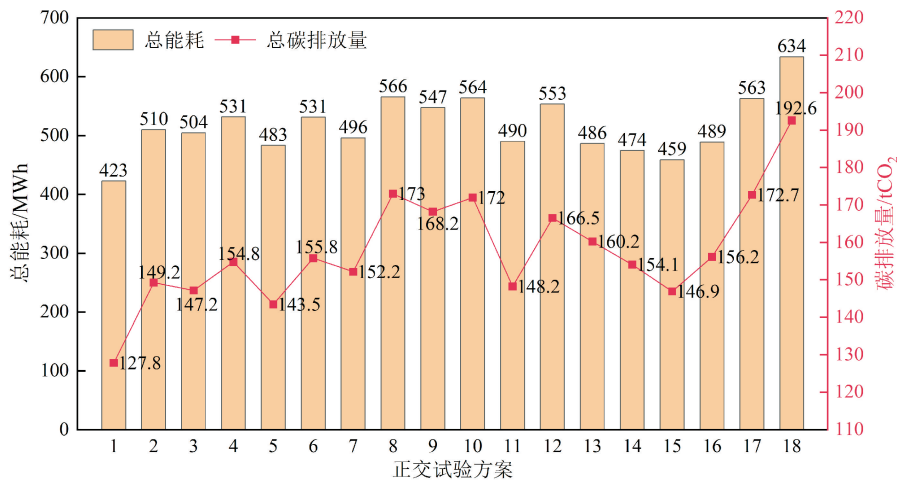


图 6 正交试验总能耗与总碳排放量结果

Fig. 6 Results of orthogonal experiment total energy consumption and total carbon emission

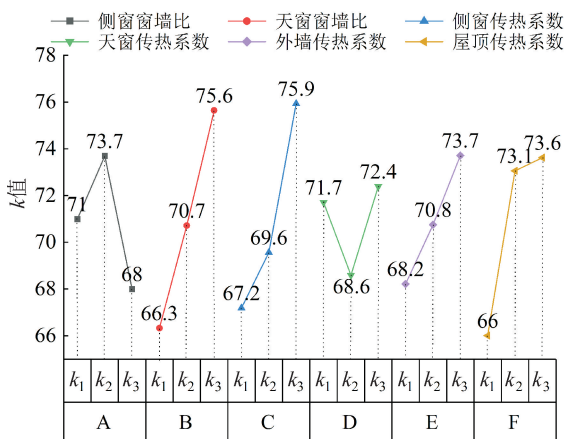


图 7 采暖碳排放极差分析

Fig. 7 Extreme variance analysis of carbon emissions by heat production

根据图 8,对于制冷碳排放,即空调碳排放而言,极差最大的是侧窗窗墙比,其次是侧窗传热系

数,而其他因素的极差较小,故对体育馆建筑制冷碳排放影响较小。且制冷碳排放最佳水平组合为 A₁B₁C₁D₂E₁F₁。由此可以分析出针对体育馆建筑的制冷碳排放应首先考虑窗户的大小和传热系数。

总碳排放极差分析见图 9,侧窗传热系数的极差最大,即对总碳排放的影响程度最大,其次是侧窗窗墙比、屋顶传热系数,并且得出总碳排放最佳水平组合为 A₁B₁C₁D₂E₁F₁。通过极差分析得到的总碳排放最佳组合与制冷碳排放最佳组合相同,而与采暖碳排放最佳组合有所区别,究其原因是在冬季侧窗窗墙比的增大,建筑通过窗户获得的太阳辐射要大于通过外窗的热损失量。

根据图 10 中极差值大小,可知影响体育馆建筑采暖碳排放的各因素主次顺序为 B>C>F>A>E>D;影响制冷碳排放的各因素主次顺序为 A>C>F>D>B>E,各因素对总碳排放量影响主次顺序

为 $C > A > F > B > E > D$ 。综合分析采暖、制冷以及总碳排放极差结果,得出该体育馆建筑围护结构的最优水平组合是 $A_1 B_1 C_1 D_2 E_1 F_1$,该组合意味着要将窗户面积及传热系数都达到最小,虽能耗和碳排放降低但对工程施工技术要求极高、投资成本大且未必能提供满足人体舒适度的空间环境^[20-21],故只能作为理论最优组合。

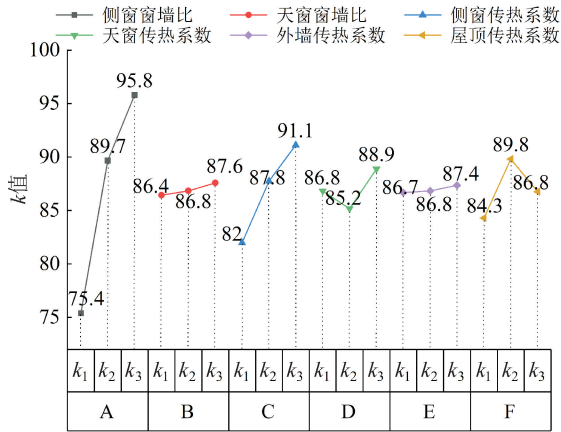


图 8 制冷碳排放极差分析

Fig. 8 Extreme variance analysis of carbon emissions by refrigeration

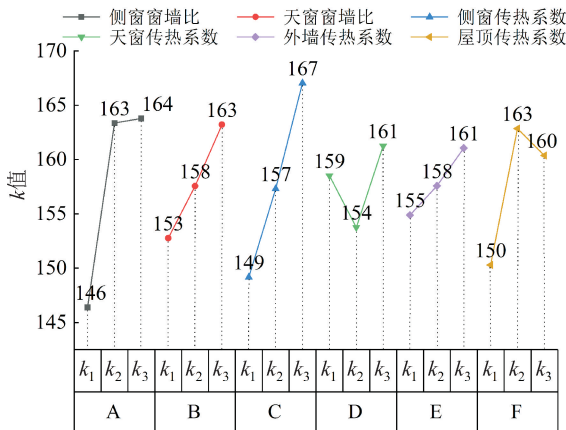


图 9 总碳排放极差分析

Fig. 9 Extreme variance analysis of total carbon emissions

3.3 方差分析

方差分析法能够减小试验误差的影响,确定各因素的显著性水平以及验证极差分析的结果。结合正交试验结果进行方差计算,得出影响体育馆建筑碳排放的显著性因素。各因素对体育馆建筑碳排放影响的方差计算结果见表 4。

由表 4 的方差分析结果可知,对于采暖碳排放, F 值大小排序为 $B > C > F > A > E > D$,即天窗窗墙比的影响最大,侧窗传热系数次之,与极差分析结果一致。但采暖碳排放所有因素的显著性水平 P 值均

大于 0.05,说明各因素对建筑采暖碳排放均无显著影响。对于制冷碳排放, F 值大小排序为 $A > C > F > D > B > E$,即侧窗窗墙比的影响最大,侧窗传热系数次之,与极差分析结果一致。其中侧窗窗墙比和侧窗传热系数的显著性 P 值均小于 0.05,所以侧窗窗墙比和侧窗传热系数是制冷碳排放的显著影响因素,且其 P 值小于 0.05 的数倍,说明这两个因素是极显著的影响因素,而其他因素的 P 值均高于 0.05,故不是制冷碳排放的显著性因素。所以应优先以制冷碳排放为约束条件进行侧窗的节能设计。对于总碳排放,其 F 值大小排序为 $A > C > F > B > D > E$,表明侧窗窗墙比的影响最大,侧窗传热系数次之,并且这两者的显著性 P 值都小于 0.05,对建筑总碳排放具有显著影响。

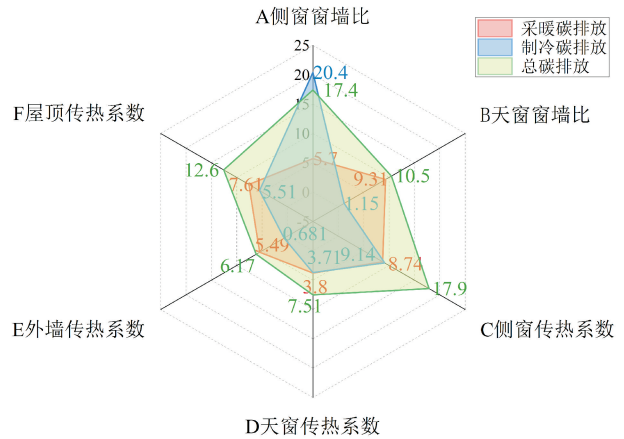


图 10 各因素对碳排放影响程度对比

Fig. 10 Comparison of the degrees of impact of factors on carbon emissions

综合极差分析和方差分析结果,侧窗窗墙比及其传热系数对建筑制冷碳排放和总碳排放都有显著影响,综合分析得出 $A_1 B_2 C_2 D_1 E_2 F_3$ 为最优组合,并且侧窗窗墙比、天窗窗墙比、侧窗传热系数、天窗传热系数、外墙传热系数、屋顶传热系数应分别控制在 0.2、0.1、2.0、1.2、0.3、0.45 以下,节能效果最好。

3.4 优化前后建筑能耗及碳排放对比分析

通过对正交试验结果的极差和方差分析,该体育馆建筑围护结构的最优构造参数组合为 $A_1 B_2 C_2 D_1 E_2 F_3$,即侧窗窗墙比 20%、天窗窗墙比 10%、侧窗传热系数 $2.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、天窗传热系数 $1.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、外墙传热系数 $0.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、屋顶传热系数 $0.45 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。将案例建筑构造参数和最优构造参数组合分别进行能耗及碳排放模拟,模拟结果见图 11。

表4 建筑碳排放方差分析
Tab.4 Analysis of variance for building carbon emissions

排放	因素	离差平方和	自由度	均方	F 值	显著性(P)
采暖碳排放	A	97.378	2	48.689	1.711	0.272
	B	260.324	2	130.162	4.573	0.074
	C	244.935	2	122.467	4.303	0.082
	D	49.209	2	24.604	0.864	0.476
	E	90.709	2	45.355	1.594	0.292
	F	215.824	2	107.912	3.791	0.100
制冷碳排放	A	1 314.084	2	657.042	78.708	≤0.01
	B	4.068	2	2.034	0.244	0.793
	C	256.310	2	128.155	15.352	0.007
	D	41.584	2	20.792	2.491	0.178
	E	1.535	2	0.767	0.092	0.914
	F	91.465	2	45.733	5.478	0.055
总碳排放	A	1 182.072	2	591.036	9.105	0.022
	B	329.015	2	164.508	2.534	0.174
	C	961.264	2	480.632	7.404	0.032
	D	173.282	2	86.641	1.335	0.343
	E	114.960	2	57.480	0.885	0.469
	F	531.373	2	265.687	4.093	0.089

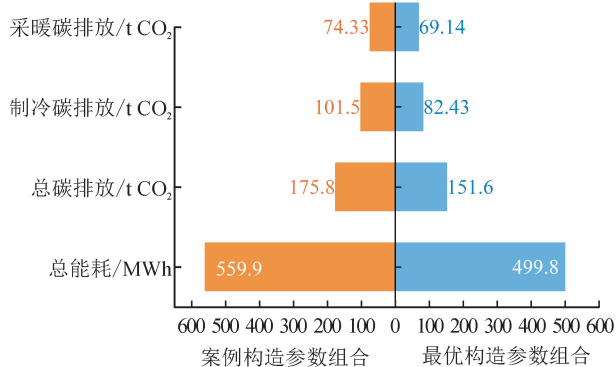


图11 优化前后能耗及碳排放对比

Fig. 11 Comparison of energy consumption and carbon emissions before and after optimization

根据图11可知,优化后的体育馆建筑能耗及碳排放量均有所降低,最优构造参数组合得到的总能耗为499.8 MWh,单位面积能耗为222.14 kWh,采暖碳排放、制冷碳排放、总碳排放分别为69.14 t CO₂、82.43 t CO₂、151.56 t CO₂,单位面积CO₂排放分别为30.73 kg/m²、36.63 kg/m²、67.36 kg/m²。与案例建筑构造参数组合相比,单位面积总能耗降低了26.70 kWh,降幅为10.73%,采暖、制冷及总碳排放单位面积分别降低了2.31 kg CO₂、8.46 kg CO₂、10.77 kg CO₂,降幅分别为6.99%、18.76%、13.78%。

通过以上研究可以发现,与其它公共建筑相比,体育馆建筑具有空间结构大、单层明显高、能源需求高等显著特点,在围护结构的保温和隔热方面面临

较大的挑战,通过优化围护结构节能减排效果明显。因此,通过优化围护结构来实现节能减排,是体育馆建筑设计中需要重点关注的问题。

4 结论

本文的研究对象为体育馆建筑,以实现绿色体育馆的节能减排为目标,分析围护结构的构造参数对建筑能耗和碳排放的影响规律,总结出适宜于寒冷地区绿色体育馆构造参数组合。

1) 当侧窗、天窗的窗墙比和侧窗、天窗、外墙的传热系数增大时,采暖、制冷以及总碳排放都随之增加;当屋顶传热系数增大时,制冷碳排放有所降低,但采暖碳排放增加,所以总碳排放呈上升趋势。

2) 影响体育馆建筑总碳排放的构造参数主次顺序为侧窗传热系数>侧窗窗墙比>屋顶传热系数>天窗窗墙比>外墙传热系数>天窗传热系数,通过正交实验验证,得到最优构造参数组合为侧窗窗墙比20%、天窗窗墙比10%、侧窗传热系数2.0 W/(m²·K)、天窗传热系数1.2 W/(m²·K)、外墙传热系数0.3 W/(m²·K)、屋顶传热系数0.45 W/(m²·K)。

3) 体育馆建筑最优构造参数组合与案例建筑构造参数组合相比,总能耗降低了10.73%;采暖碳排放、制冷碳排放、总碳排放相分别降低了6.99%、18.76%、13.78%。

参考文献:

- [1] 中国建筑节能协会. 2022 建筑节能与碳排放研究报告 [EB/OL]. (2022-12-29) [2023-08-30]. https://mp.weixin.qq.com/s/4bOBkXbp0kL_ldaLWyk48g?scene=25#wechat_redirect.
- [2] 国家体育总局. 2021 年全国体育场地统计调查数据 [R/OL]. (2022-4-2) [2023-08-30]. <https://www.sport.gov.cn/n315/n329/c24251191/content.html>.
- [3] 蔡晓曦. 夏热冬冷地区高校中小型体育馆生态设计研究[D]. 长沙:湖南大学,2010.
CAI Xiaoxi. The research on ecological design of small and medium-sized universities gymnasium in the summer-hot and winter-cold area [D]. Changsha: Hunan University, 2010.
- [4] 董巧慧. 体育场馆能耗调控分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2011.
DONG Qiaohui. The regulation and analysis of gymnasium's energy consumption [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.
- [5] 李岚,王超,黄勇,等. 寒地综合型体育馆建筑能耗敏感性分析[J]. 建筑节能(中英文),2023,51(4):1-11.
LI Lan, WANG Chao, HUANG Yong, et al. Sensitivity analysis of building energy consumption of comprehensive gymnasium in cold region [J]. Building Energy Efficiency, 2023, 51(4): 1-11.
- [6] DING Yan, ZHANG Qiang, YUAN Tianhao, et al. Model input selection for building heating load prediction: a case study for an office building in Tianjin [J]. Energy and Buildings, 2018, 159: 254-270.
- [7] 王翠灵,梁辰吉昱,李天成,等. 夏热冬冷地区新建平疫结合型体育馆空调方案初探[J]. 建筑科学,2021, 37(8):1-8.
WANG Cuiling, LIANG Chenjiyu, LI Tiancheng, et al. Air-conditioning scheme for newly built gymnasiums serving both general and epidemic control purposes in hot summer and cold winter areas [J]. Building Science, 2021, 37(8): 1-8.
- [8] RASHDI W S S W M, EMBI M R. Analysing optimum building form in relation to lower cooling load [J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2016, 222: 782-790.
- [9] WAN K K W, LI D H W, PAN Wenyan, et al. Impact of climate change on building energy use in different climate zones and mitigation and adaptation implications [J]. Applied Energy, 2012, 97: 274-282.
- [10] 张宇翔. 严寒地区体育场馆围护结构改造碳减排策略 [D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2019.
ZHANG Yuxiang. Carbon emission reduction strategy for enclosure reconstruction of sports venues in severe cold regions [D]. Shenyang: Shenyang University of Architecture, 2019.
- [11] 白路恒. 公共建筑全生命周期碳排放预测模型研究 [D]. 天津:天津大学,2019.
BAI Luheng. Study on public building life cycle carbon emissions prediction model [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [12] 王乾坤,刘畅. 公共建筑围护结构对建筑能耗的影响分析[J]. 武汉理工大学学报,2011,33(3):112-115.
WANG Qiankun, WAN Chang. Analysis on the influence of building envelope to public buildings' energy consumption [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(3): 112-115.
- [13] 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:哈尔滨工业大学,2013.
LIU Chang. Design of gymnasium morphology in severely cold regions based on energy simulations [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [14] 赵洋. 基于低能耗目标的严寒地区体育馆建筑设计研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
ZHAO Yang. Research on gymnasium design with low-energy consumption in severe cold area of China [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [15] 张睿峰. 北方严寒地区既有建筑围护结构的节能改造技术[J]. 建筑技术,2017,48(5):465-469.
ZHANG Ruifeng. North cold regions extant building envelope structure energy efficiency renovation technology [J]. Architecture Technology, 2017, 48(5): 465-469.
- [16] 刘明达,蒙吉军,刘碧寒. 国内外碳排放核算方法研究进展[J]. 热带地理,2014,34(2):248-258.
LIU Mingda, MENG Jijun, LIU Bihan. Progress in the studies of carbon emission estimation [J]. Tropical Geography, 2014, 34(2): 248-258.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑碳排放计算标准:GB/T 51366-2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [18] 中华人民共和国生态环境部. 关于做好 2023—2025 年发电行业企业温室气体排放报告管理有关工作的通知 [EB/OL]. (2023-02-07) [2023-08-30]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202302/t20230207_1015569.html.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑节能与可再生能源利用通用规范:GB 55015-2021 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2021.
- [20] 段明威. 不同墙体材料对房间舒适性的影响[D]. 河北:河北科技大学,2022.
DUAN Mingwei. Effects of different wall materials on room comfort [D]. Hebei: Hebei University of Science and Technology, 2022.
- [21] 田一辛,黄琼,王韬. 窗面积影响室内热舒适的实测与模拟对比研究[J]. 建筑科学,2022,38(10):84-91.
TIAN Yixin, HUANG Qiong, WANG Tao. comparative field and simulation study on the effects of window area on indoor thermal comfort [J]. Building Science, 2022, 38(10): 84-91.