

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.232

气凝胶玻璃住宅夏季室内光热环境研究与对策分析

张 燧, 杨 柳, 罗智星

(西安建筑科技大学 建筑学院, 西安 710055)

摘要:以 2018 年中国国际太阳能十项全能竞赛为例,对某大学设计并建造的气凝胶住宅在方案设计阶段进行模拟,对建筑建成之后的室内温度及照度进行实测研究。结果表明:采用气凝胶玻璃外围护结构比采用木格构外围护结构的建筑能耗低 26.06%,但应该采取有效的遮阳措施;采用气凝胶玻璃外围护结构的室内天然光照度大于 300 lx,满足相关设计要求。针对此建筑因采用气凝胶玻璃而存在的问题提出改进措施,这对气凝胶玻璃的推广应用以及太阳能建筑的发展具有重要意义。

关键词:气凝胶玻璃;木格构墙体;模拟;遮阳措施;照度均匀度

中图分类号:TU111.4

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2021)09-040-11

Indoor light thermal environment and strategy analysis of aerogel glass residential building in summer

ZHANG Yi, YANG Liu, LUO Zhixing

(College of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: Taking the aerogel glass residential building designed and constructed in Solar Decathlon China 2018 (SDC2018) as an example, this paper simulated the building in the design stage, and measured the indoor temperature and illumination after the building was built. The results show that the energy saving effect of aerogel glass was more significant than that of the wooden lattice envelope with 26.06% less energy consumption, but effective shading measures should be taken in summer. The indoor illumination of the aerogel glass room was greater than 300 lx, which met relevant design requirements. The improvement measures were put forward for the existing problems of this building, which was of great significance for the promotion and application of aerogel glass building.

Keywords: aerogel glass; wooden lattice wall; simulation; shading measures; uniformity of illumination

建筑业产生的能源消耗约占全球能源消耗总量的 40%, 中国为 28%^[1-2], 因此, 降低建筑能耗是中国节能方面的重点工作之一, 建筑节能措施的推广应用具有重要意义^[3]。其中, 采用保温绝热材料是目前重要的建筑节能措施之一^[4]。纳米多孔二氧化硅气凝胶是一种新型保温绝热材料, 是将颗粒形或板状气凝胶填充于 2 块或 3 块平板玻璃中间的空气腔中, 并利用玻璃胶等材料密封形成^[5-6]。其太阳得热系数(SHGC, solar

收稿日期: 2019-10-25 网络出版日期: 2019-12-27

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2017JM7010)。

Supported by Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province(2017JM7010).

作者简介: 张燧(1993—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为绿色建筑技术及节能技术, (E-mail)1256300524@qq.com。

heat gain coefficient)为0.3~0.6,传热系数可达 $1\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 以下,具有耐高温、隔音减震等特点^[7]。

随着气凝胶玻璃在建筑节能领域的应用,相关研究取得了较多成果:王欢等^[8]对广州大学图书馆分别采用单层玻璃、中空玻璃和气凝胶玻璃等5种玻璃的建筑空调冷负荷进行了模拟计算,得到气凝胶玻璃能明显减少建筑空调冷负荷的结论;Huang等^[9]以香港的一座28层商业建筑为例,模拟气凝胶玻璃对其空调冷负荷的影响,最后得到气凝胶玻璃室内得热量比双层玻璃减少60%,空调能耗减少4%~7%;文献^[10-11]的研究表明,气凝胶玻璃的太阳得热系数和可见光透过比均小于中空玻璃和双层玻璃,具有优越的保温隔热以及隔音性能;文献^[12-13]则建立了气凝胶玻璃系统动态传热与太阳辐射传递模型,分析了气凝胶玻璃的节能潜力。通过上述研究,表明气凝胶玻璃节能效果良好,但降低了室内的采光效果。因此,有必要探究气凝胶玻璃建筑如何在达到节能需求的同时又能满足采光需求。此外,气凝胶玻璃主要应用于公共建筑的窗户和采光顶^[14],应用于住宅建筑的相关性能及可能存在的问题仍有待研究。

笔者以2018年中国国际太阳能十项全能竞赛(SDC, solar decathlon China)中某大学设计并建造的气凝胶住宅为研究对象,在方案设计阶段,使用Design Builder软件对建筑外围护结构分别采用气凝胶玻璃和木格构的室内能耗和室内热舒适情况进行了模拟对比,同时使用Ecotect Analysis软件对建筑南面房间采用气凝胶玻璃、中空玻璃等4种玻璃的室内采光性能进行了模拟分析,最后对建筑建成后室内的光热环境进行了测试。通过模拟与实测,分析气凝胶玻璃的设计策略,进一步验证其性能,并针对建筑应用气凝胶玻璃后存在的问题提出解决措施。研究结果对气凝胶玻璃在住宅上的应用推广以及太阳能建筑的发展具有重要意义。

1 方案设计阶段模拟优化分析

气凝胶玻璃虽具有良好的热工性能,但是作为建筑的外围护结构时,是否比木格构更有利于建筑节能有待研究。此外,气凝胶玻璃的可见光透射比低于中空玻璃。因此,在方案设计阶段进行气凝胶玻璃性能的模拟分析,可进一步确定外围护结构的设计方案。

1.1 建筑设计概况

2018年中国国际太阳能十项全能竞赛在山东德州举办,大赛的目的是借助世界顶尖研发、设计团队的技术与创意,将太阳能、节能与建筑设计以一体化的新方式紧密结合,设计、建造并运行一座功能完善、舒适、宜居、具有可持续性的太阳能居住空间^[15-16]。

某大学的参赛建筑设计定位是为中国北方寒冷地区的住户提供舒适生活环境的住宅建筑,建筑面积为 184.97 m^2 ;建筑主体采用轻型木格构作为承重,同时也是外围护结构;阳光间屋顶、南立面墙体和西立面部分墙体拟采用气凝胶玻璃并在夏季采取外遮阳百叶。

建筑整体布局是以南面阳光间为核心,主要的功能房间如卧室和客厅紧邻阳光间布置,以使冬季太阳能可以更多地传入室内主要房间;厨房、卫生间和设备间等热环境要求较低的房间则设置在北面以阻挡北风;建筑西侧设置车库雨棚及绿植墙,以防太阳西晒;建筑屋顶采用光伏发电板,同时起到遮阳作用;地板下方500 mm为架空层。

1.2 建筑模拟分析

1.2.1 热工性能模拟分析

围护结构是建筑物的重要组成部分,直接影响建筑能耗与室内热舒适度。气凝胶玻璃具有耐高温、隔音减震,以及优异的保温绝热性能,可用于建筑围护结构。在方案设计阶段,对建筑分别采用木格构围护结构(有无遮阳)、气凝胶玻璃(有无遮阳)的建筑能耗及室内热舒适度进行模拟分析,以决定建筑外围护结构的设计方案。模拟软件为Design Builder,采用的气象数据为软件自带的典型气象年数据。根据气象学定义和德州地区典型气象年数据可知,德州地区的夏季为6月7日~9月10日,冬季为11月24日~3月29日。

搭建的建筑模型如图1~图4所示。其中:卧室南立面以及阳光间东、西、南立面设计采用3层中空玻璃窗,客厅西墙和阳光间南墙采用3层中空玻璃外门。建筑对应各部件构造做法及传热系数如表1所示。

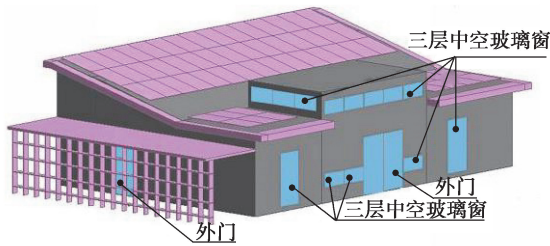


图 1 采用木格构墙体和屋顶

Fig. 1 The simulation building model with wooden lattice wall and lattice roof (no hiding)

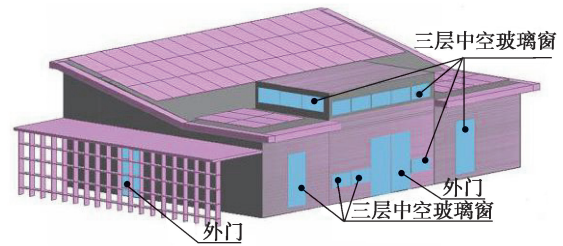


图 2 采用有遮阳的木格构墙体和屋顶

Fig. 2 The simulation building model with wooden lattice wall and lattice roof (hiding)

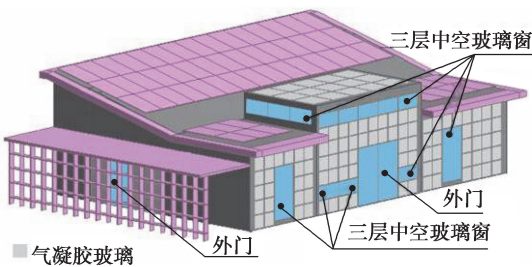


图 3 采用无遮阳的气凝胶玻璃墙体和屋顶

Fig. 3 The simulation building model with aerogel glass (no hiding)

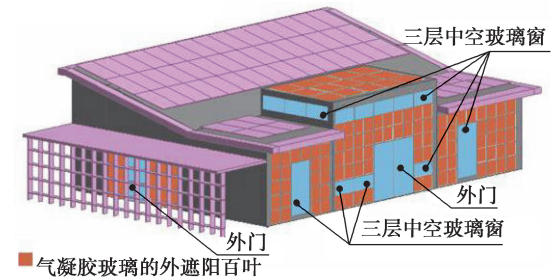


图 4 采用有遮阳的气凝胶玻璃墙体和屋顶

Fig. 4 The simulation building model with aerogel glass (hiding)

表 1 建筑模型信息

Table 1 Simulation envelope design for the building

建筑部件	构造做法(从外到内)	传热系数/ $W(m^2 \cdot K)^{-1}$
外墙体(木格构外墙)	20 mm 封板+40 mm 空气层+200 mm 岩棉+15 mm 木板	0.190
屋顶	7 mm 防水+5 mm 木板+40 mm 空气层+240 mm 岩棉+5 mm 木板,光伏板架空 300 mm	0.188
内墙体(木格构内墙)	5 mm 木板+240 mm 岩棉+5 mm 木板	0.181
地板	20 mm 木板+60 mm 空气层+15 mm 木条+80 mm 岩棉+15 mm 木条,地板架空 500 mm	0.367
楼板	20 mm 木板+60 mm 空气层+5 mm 木条+80 mm 岩棉+5 mm 木条	0.330
外门	玻璃门,木框。玻璃采用 3 层中空玻璃(3+13A+3+13A+3)	1.778
内门	木门	2.283
窗户	玻璃采用 3 层中空玻璃,(3+13A+3+13A+3),木框	1.778

模拟时,建筑物的 3 层中空窗和外门材料不变,只改变客厅西立面部分墙体、卧室和阳光间南立面墙体,以及阳光间屋顶的参数(图 4 中有遮阳百叶的部分)。采用的气凝胶玻璃参数为:传热系数为 $0.91 W/(m^2 \cdot K)$,可见光透射比为 0.2,太阳得热系数为 0.36。

1) 建筑能耗模拟分析。

在全空调运行条件下,模拟建筑采用有无遮阳的气凝胶玻璃与采用木格构外围护结构在夏季和冬季的耗电量大小。具体设定如下:建筑采用分体式空调,一天 24 h 运行,夏季对气凝胶玻璃设置百叶外遮阳,遮阳时间为早上 07:00~19:00(德州地区日照时间 07:00~19:00)。根据民用建筑供暖通风与空气调节设计规范^[17],供冷和供热工况的设定温度取 I 和 II 级舒适度之间的温度数值,夏季室内温度设定为 26 ℃,冬季设定为 22 ℃。因为冬季气凝胶玻璃不采用遮阳措施,所以未模拟气凝胶玻璃有遮阳在冬季的建筑能耗情况。模拟结果如图 5 所示,将模拟改变的墙体和屋顶统称为外围护结构。

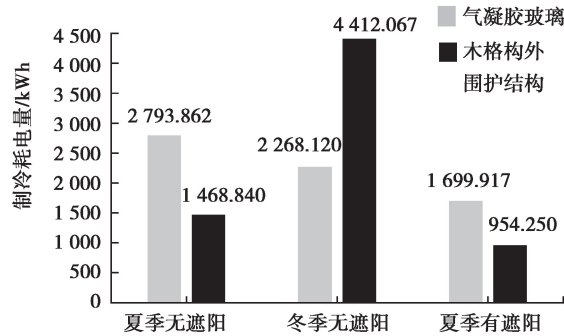


图 5 全空调运行时的建筑能耗

Fig. 5 Energy consumption under free running condition

分析图 5 可知,建筑全空调运行时,采用气凝胶玻璃作为建筑外围护结构,夏季不论有无遮阳措施,其建筑能耗均较木格构外围护结构高;在夏季无遮阳的情况下,采用气凝胶玻璃外围护结构的全年空调能耗为 5 061.987 kW·h,比采用木格构外围护结构全年空调能耗少 818.920 kW·h;在夏季有遮阳的情况下,采用气凝胶玻璃外围护结构的全年空调能耗为 3 968.042 kW·h,比采用木格构外围护结构全年能耗少 1 398.275 kW·h。综合全年情况,采用气凝胶玻璃较木格构外围护结构更节能。

2) 室内舒适时间百分比模拟分析。

为分析夏季室内热舒适情况,对建筑采用气凝胶玻璃(有无遮阳)外围护结构和木格构外围护结构分别进行自然通风模拟。建筑通过开启南北向外窗利用风压和热压进行自然通风,外窗为平开窗,开启面积为 100%,可开启度数为 90°,时间设置为 24 h。设定自然通风条件为:室内温度高于室外温度、大于设定的室内最小温度 16 ℃,且时间表为开启时。

根据相关标准,寒冷地区非人工冷热源热湿环境,采用图示法,用体感温度(operative temperature)进行评价^[18]。根据标准规定的计算方法,计算 6 月 7 日~9 月 10 日的每日室外平滑周平均温度和 II 级舒适等级的每日舒适体感温度范围。模拟的每小时体感温度在每日舒适体感温度之内,为室内舒适体感温度,从而计算舒适时间百分比。以东南卧室的舒适时间百分比为例说明室内的舒适状况,模拟结果如图 6 所示。

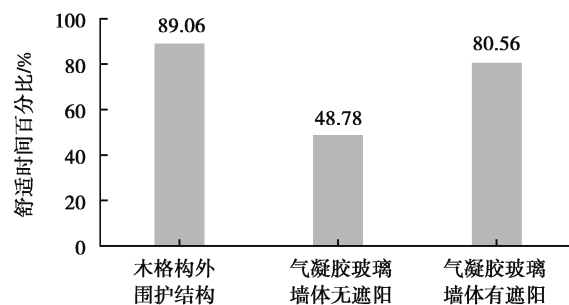


图 6 东南卧室的舒适时间百分比

Fig. 6 The percentage of comfort time in the southeast bedroom

气凝胶玻璃外围护结构采取遮阳措施后,与采用木格构的舒适时间百分比接近,比未采用遮阳措施增加 31.78%,因此,气凝胶玻璃外围护结构采用遮阳设计能有效提升室内舒适度。

1.2.2 采光性能模拟分析

为探明采用气凝胶的室内采光性能,以建筑物南向房间为例,采用 Ecotect Analysis 模拟软件,分别对该房间的南向墙面仅采用中空玻璃、仅采用气凝胶玻璃、同时采用气凝胶及中空玻璃(其他 3 面墙体均采用中空玻璃)的 3 种围护方案下的建筑进行全阴天模型的采光分析。其中,中空玻璃和气凝胶玻璃的可见光透射比分别设定为 0.738 和 0.200,玻璃折射系数均为 1.74,模拟结果如图 7~图 9 所示。

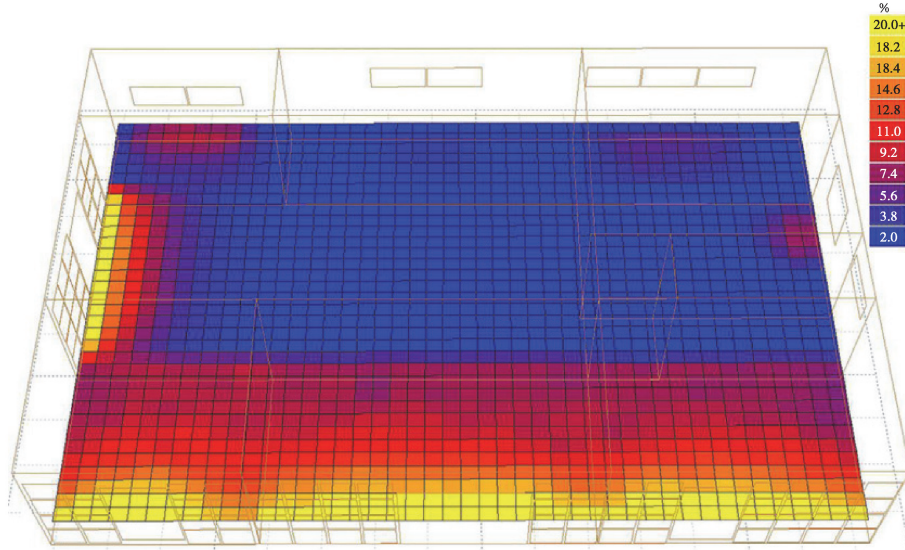


图 7 南面墙体仅采用中空玻璃时的室内采光情况

Fig. 7 Indoor lighting simulation analysis when the building adopts the insulating glass

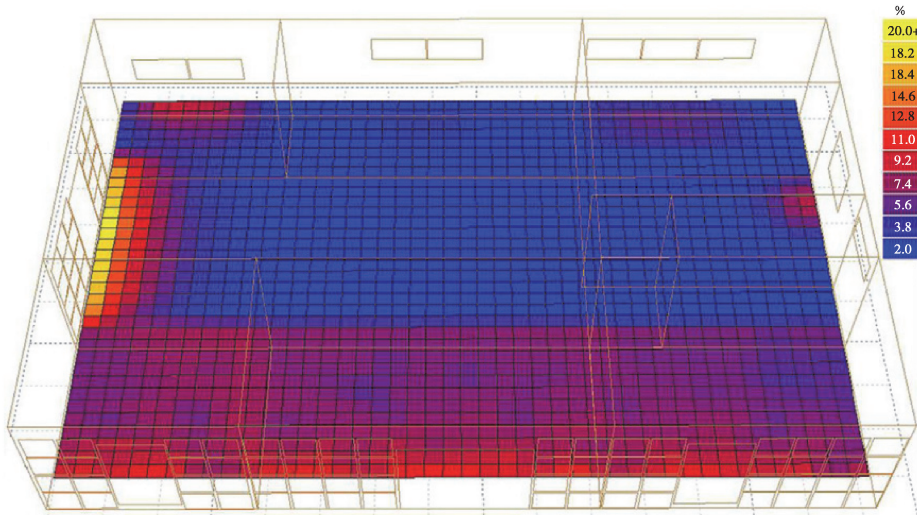


图 8 南面墙体仅采用气凝胶玻璃时的室内采光情况

Fig. 8 Indoor lighting simulation analysis when the building adopts the aerogel glass

由图 7 可知,采用中空玻璃,室内照度沿房间进深方向下降很快,近窗处照度约为远窗处照度的 3 倍,而南向墙体全采用气凝胶玻璃的室内照度分布均匀(见图 8)。由图 9 的模拟结果可知,气凝胶玻璃房间侧面采光的采光系数不低于 2.0%,满足采光要求^[19]。此外,南向房间在中空玻璃近窗处的采光系数高于 20%,在

气凝胶玻璃近窗处的采光系数只有 9.2%，且气凝胶玻璃由近窗处到远窗处采光变化小。结果表明，气凝胶玻璃能有效提升室内的采光质量。

通过模拟分析，确定建筑外围护结构采用气凝胶玻璃，并在夏季设置遮阳措施。

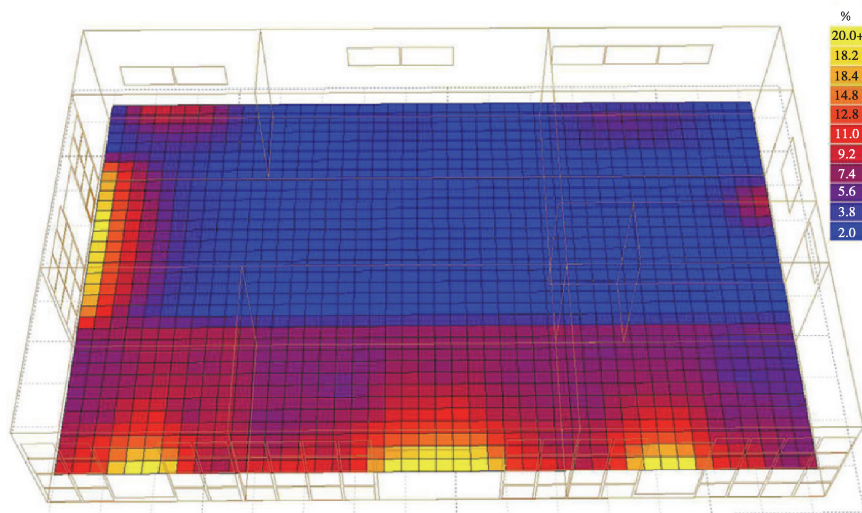


图 9 南面墙体采用气凝胶及中空玻璃时的室内采光情况

Fig. 9 Indoor lighting simulation analysis when the building adopts the two kinds of glasses

2 建筑建成后实测分析

2.1 测试内容及方案

该气凝胶玻璃建筑采用装配式施工方式，由于施工期限短（竞赛要求为 23 d），方案中所要求的外遮阳百叶没有安装。建筑建成实景如图 10 所示，建筑平面如图 11 和图 12 所示。建成建筑的东南卧室南面、客厅西面采用了气凝胶玻璃及中空玻璃作为外围护结构，儿童房东立面采用木格构及中空玻璃作为外围护结构，且上述 3 个立面所采用的中空玻璃面积相等。为研究建筑室内光热环境和建筑围护结构的性能，对其室内温度和照度进行测试。



图 10 建筑实景图

Fig. 10 The image of the building

8 月 3 日~8 月 5 日以及 8 月 9 日和 11 日期间每日 09:00~16:00 该建筑处于自由运行状态。对处于自由运行状态下建筑的室内外空气温度进行测试，测试期间门窗关闭。根据建筑热环境测试方法标准^[20]，房间面积在 16 m² 以内，测点在房间中间，且室内温度和测点高度为 1.1 m，室内温度测点布置如图 10 中所示“■”。

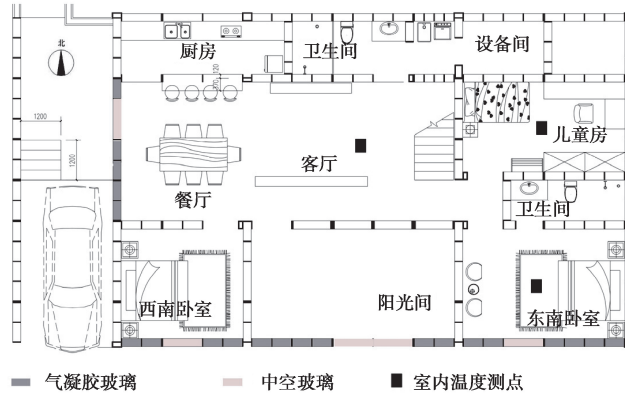


图 11 一层平面图

Fig. 11 The first floor plan

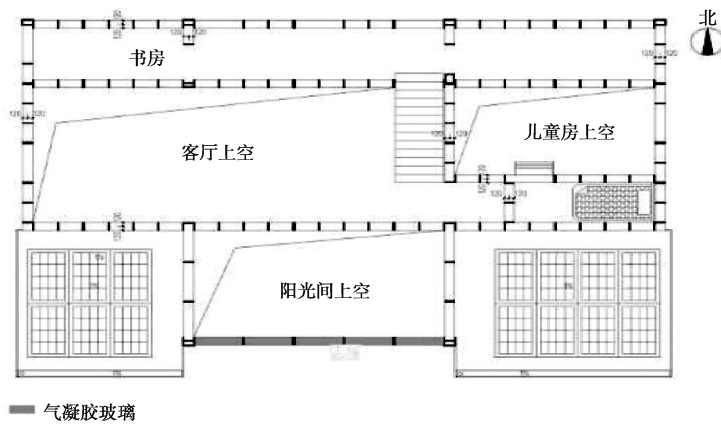


图 12 二层平面图

Fig. 12 The second floor plan

对 8 月 11 日全阴天西南卧室的室内照度进行了测试,测点高度为 0.75 m,室内照度测点布置如图 13 所示。室内光热环境的测量仪器具体见表 2 所示。

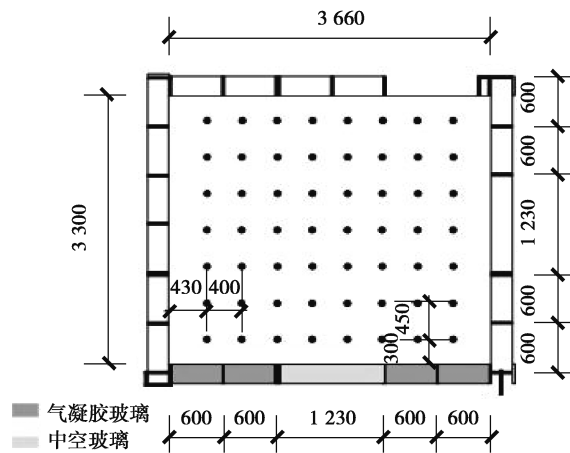


图 13 西南卧室照度测试点布置图

Fig. 13 Layout of indoor illumination test points for the southwest bedroom

表2 室内光热环境各分项测试方案

Table 2 Subitem test schemes for indoor daylighting and thermal environment

测试项目	测试仪器	操作方式
室内空气温度	HOBO U12—012 温湿度自记仪(温度测量范围: -20~70°C; 温度测量精度: ±0.35° (0~50°C))	昼夜连续自动记录, 间隔 5 min
室内照度	照度计(准确度: ±3% rdg ±0.5% f.s. (<10 000 lux); ±4% rdg ±10% dgts (>10 000 lux))	手动记录

2.2 测试结果及分析

2.2.1 气凝胶玻璃建筑室内热环境

图 14 为东南卧室、客厅和儿童房在自由运行状态下的室内外温度实测数据图,测试时间为每天 9:00~16:00。由图 14 可知,在测试时间内,室外温度总体呈上升趋势,室内温度由于受到室外温度的影响总体也呈上升趋势。对于室内温度变化情况,由于儿童房与室外空间接触的外墙为东墙且开有一窗,而东南卧室与室外空间接触的外围护结构为东墙与南墙,但东墙无外窗,南墙有大面积气凝胶玻璃和一个中空玻璃窗,因此在早上,儿童房受到太阳辐射通过东向外墙与外窗的传热,温度略高于东南卧室与客厅温度;但到中午时,东南卧室的南向外围护结构直接受到太阳辐射的影响,其温度高于客厅与儿童房的温度,而客厅南边紧挨着一个阳光间且西面有中空玻璃门和气凝胶玻璃,使客厅温度高于儿童房。

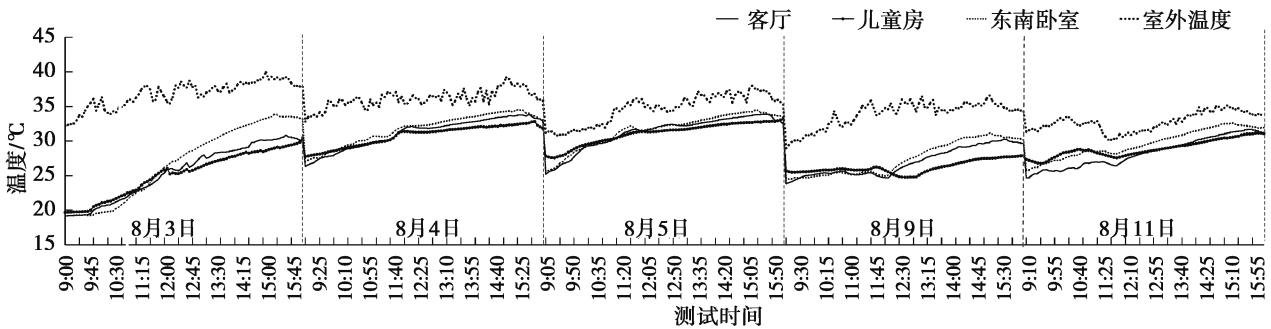


图 14 自由运行状态下所测房间的室内温度

Fig. 14 Indoor temperature of the test room under free running condition

以 8 月 9 日数据为例,室外空气温度、东南卧室、客厅和儿童房在测试时间内温度变化范围分别为 28.97~36.58 °C、24.51~31.15 °C、23.81~30.27 °C 和 24.77~27.88 °C,在早上 09:00~11:15,儿童房温度略高于东南卧室和客厅温度,在 12:10~16:00,东南卧室温度大于客厅温度大于儿童房温度。图 15 为所测 5 天的不同房间温度变化范围情况,可以看出儿童房温度变化范围最小,在白天室内温度相比于其他 2 个房间温度较稳定。

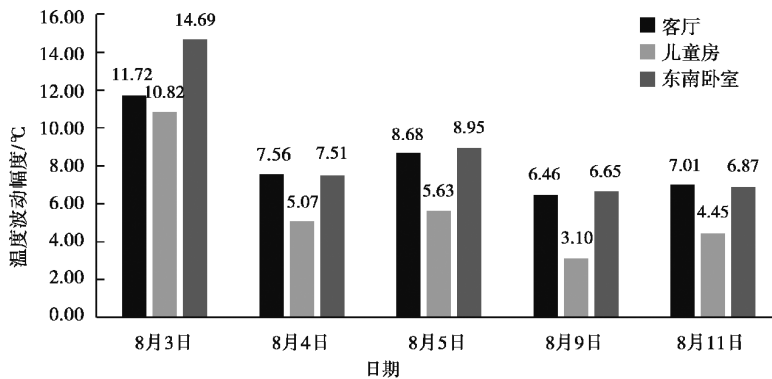


图 15 所测房间的室内温度波动幅度

Fig. 15 The range of indoor temperature fluctuations in the measured room

根据材料的传热系数和对应的面积计算出:儿童房的东面围护结构的平均传热系数为 $0.55 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;东南卧室南面围护结构的平均传热系数为 $1.08 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,东墙平均传热系数为 $0.167 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;客厅西面围护结构的平均传热系数为 $0.71 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。由于木格构墙体的隔热性能好,且气凝胶固体骨架和内部孔隙对太阳辐射热的透过、热传导和辐射传热很低^[21],3 个房间都使用了面积相等的中空玻璃,所以通过中空玻璃传入了室内大量的热量,综合影响结果如下:

1) 儿童房室内温度主要受东晒影响,因东面围护结构平均传热系数最小,所以室内温度最低,室内温度波动最小;

2) 客厅西墙有遮阳雨棚且西墙的平均传热系数较小,但因为通过中空玻璃窗以及阳光房向客厅传递了大量的热量,加上 2 种玻璃的“温室效应”,客厅的室内温度越来越高,仅次于东南卧室;

3) 东南卧室室内温度主要受由气凝胶玻璃墙体和中空玻璃窗组成的南面围护结构传热以及“温室效应”的影响,因此得热量最多,室内温度高且波幅大。

测试结果表明,气凝胶玻璃虽有良好的隔热效果,但透明玻璃对太阳辐射的透过、传热及辐射作用大,加上 2 种玻璃都具有“温室效应”,使得在太阳辐射量大的南立面、西立面,室内温度高且波动大。因此要采取遮阳措施控制从玻璃立面传入室内的热量。

2.2.2 气凝胶玻璃房间室内光环境

为分析建筑采用气凝胶玻璃进行天然采光的室内照度情况,对南向墙体采用了气凝胶玻璃及中空玻璃窗的西南卧室的室内照度进行了测试。测试时间为 2018 年 8 月 11 日 12:00(全阴天),卧室南向墙体外围护情况如图 16 所示,测试结果如表 3 所示。

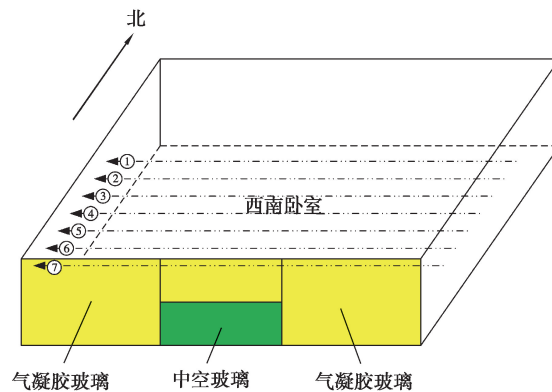


图 16 西南卧室南向墙体示意图

Fig. 16 Diagrammatic sketch of South-facing wall of Southwest bedroom

表 3 西南卧室内不同测点照度

Table 3 Illumination of different measuring points in the southwest bedroom

测点(行)	测点(列)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	460	490	390	510	545	565	490	440
2	495	490	505	550	525	545	485	390
3	550	400	660	620	570	580	500	505
4	700	600	785	760	608	675	665	550
5	830	680	1 030	980	980	865	710	625
6	850	860	1 300	1 750	1 540	1 120	860	705
7	1 090	1 140	1 580	3 000	2 850	1 250	1 060	1 060

注:第 7 行是近窗测点,第 1 行是远窗测点

表3中1~3列与6~8列数据为南向墙体全为气凝胶玻璃时的室内照度值:最大为1 580 lx,最小为390 lx,平均值为828.39 lx;第4~5列数据为南向墙体下侧为中空三层玻璃窗,上侧为气凝胶玻璃时,室内的照度值:最大为3 000 lx,最小为510 lx,平均值为1 132.86 lx。由上述测试结果可知,在近窗处,中空玻璃的室内照度值是两侧气凝胶玻璃墙体的2倍;在远窗处,中空玻璃的室内照度值虽仍高于两侧,但相差不大,这与前述1.2.2所模拟的结果一致。此外,由表3计算得整个房间的照度均匀度为0.47,表明室内照度分布均匀,这是因为气凝胶为纳米多孔骨架结构,直射光线进入气凝胶后,在气凝胶中经过无数次随机的反射、折射及吸收后最终进入室内的辐射几乎全部为散射辐射。此外,根据GB 50033—2013《建筑采光设计标准》^[20],室内天然光照度高于300 lx,说明该卧室所用外围护结构完全满足采光设计要求,这进一步说明了相较于中空玻璃,气凝胶玻璃更能有效提升室内的采光质量。

3 结束语

通过对采用气凝胶玻璃作为外围护结构的建筑能耗及室内舒适时间百分比进行模拟可知,如气凝胶玻璃建筑在夏季不采用遮阳措施,其优越性能将难以体现,建筑能耗与室内舒适性也达不到理想效果。因此,为了更好地发挥气凝胶玻璃的建材性能,在用其做外围护结构时,应在夏季设置外遮阳措施。此外,由于中空玻璃窗能透过大量太阳辐射,且存在“温室效应”,如将其与气凝胶玻璃一起使用时,也应在适当位置设置外遮阳。

1)综合考虑建筑节能与室内热环境,采用气凝胶玻璃围护结构的建筑在夏季应采取遮阳设施;

2)建筑实际使用中存在不开窗通风的情况,为防止夏季室外热量过多进入室内,在得热量多的立面同时使用气凝胶玻璃与中空玻璃时,都应采取遮阳设施;

3)气凝胶玻璃虽不可透过视线,且可见光透射比较中空玻璃低,但其室内光线柔和,完全能达到采光设计要求。

参考文献:

- [1] Yang L, Yan H, Lam J C. Thermal comfort and building energy consumption implications-a review[J]. *Applied Energy*, 2014, 115:164-173.
- [2] Yuan X L, Wang X J, Zuo J. Renewable energy in buildings in China: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 24: 1-8.
- [3] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2016[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016: 5-9. Building Energy Conservation Research Center, Tsinghua University. 2016 annual report on China building energy efficiency[M]. Beijing:China Architecture and Building Press, 2016: 5-9. (in Chinese)
- [4] 郭晓煜, 张光磊, 赵霄云, 等. 气凝胶在建筑节能领域的应用形式与效果[J]. *硅酸盐通报*, 2015, 34(2): 444-449. Guo X Y, Zhang G L, Zhao X Y, et al. Forms and effect of aerogels as insulation materials in building energy-saving[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 34(2): 444-449. (in Chinese)
- [5] 陈友明, 李宇鹏, 郑思倩, 等. 实际气候条件下气凝胶玻璃光热特性实验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(5): 157-164. Chen Y M, Li Y P, Zheng S Q, et al. Experimental study on optical and thermal characteristics of aerogel glazing system under real climate condition[J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2018, 45(5): 157-164. (in Chinese)
- [6] 王珊, 王欢, 杨建明, 等. 气凝胶节能玻璃的研究与应用进展[J]. *建筑节能*, 2016, 44(8): 50-54. Wang S, Wang H, Yang J M, et al. Advances on research and application of aerogel glazing for energy efficiency[J]. *Building Energy Efficiency*, 2016, 44(8): 50-54. (in Chinese)
- [7] Cuce E, Cuce P M, Wood C J, et al. Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: a comprehensive review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 34: 273-299.
- [8] 王欢, 吴会军, 丁云飞, 等. 夏热冬暖地区新型气凝胶节能玻璃遮阳性能优化[J]. *建筑技术*, 2014, 45(2): 174-177. Wang H, Wu H J, Ding Y F, et al. Optimization of new aerogel energy-saving glass sunshade in region with hot summer and warm winter[J]. *Architecture Technology*, 2014, 45(2): 174-177. (in Chinese)
- [9] Huang Y, Niu J L. Application of super-insulating translucent silica aerogel glazing system on commercial building envelope of humid subtropical climates-Impact on space cooling load[J]. *Energy*, 2015, 83: 316-325.
- [10] Garnier C, Muneer T, McCauley L. Super insulated aerogel windows: Impact on daylighting and thermal performance[J].

- Building and Environment, 2015, 94: 231-238.
- [11] Berardi U. The development of a monolithic aerogel glazed window for an energy retrofitting project[J]. Applied Energy, 2015, 154: 603-615.
- [12] 郑思倩, 陈友明, 李宇鹏, 等. 气凝胶玻璃系统动态传热模型及能耗性能研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(5): 1239-1246.
Zheng S Q, Chen Y M, Li Y P, et al. Research on dynamic heat transfer and energy performance of aerogel glazing system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(5): 1239-1246.(in Chinese)
- [13] 陈友明, 肖亚玲, 郑思倩, 等. 气凝胶玻璃的气候适用性分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(5): 140-147.
Chen Y M, Xiao Y L, Zheng S Q, et al. Analysis on suitability of employing aerogel glazing system in different climate zones[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2019, 46(5): 140-147.(in Chinese)
- [14] 吕亚军, 靳卫准, 吴会军, 等. SiO₂气凝胶在建筑中的应用探究[J]. 工业建筑, 2018, 48(4): 99-105.
Lyu Y J, Jin W Z, Wu H J, et al. Research on the applications of SiO₂ aerogel in buildings[J]. Industrial Construction, 2018, 48(4): 99-105.(in Chinese)
- [15] Zheng D L, Yu L J, Tan H W. Design and optimization of zero-energy-consumption based solar energy residential building systems[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 93(8): 120-125.
- [16] Wang L, Gwilliam J, Jones P. Case study of zero energy house design in UK[J]. Energy & Buildings, 2014, 41(11): 1215-1222.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50736-2012 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China. GB 50736-2012 Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50785-2012 民用建筑室内热湿环境评价标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China. GB/T50785-2012 Evaluation standard for indoor thermal environment in civil buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50033-2013 建筑采光设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China. GB 50033-2013 Standard for daylighting design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T 347-2014 建筑热环境测试方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China. JGJ/T 347-2014 Standard of test methods for thermal environment of building[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [21] 王欢, 吴会军, 丁云飞. 气凝胶透光隔热材料在建筑节能玻璃中的研究及应用进展[J]. 建筑节能, 2010, 38(4): 35-37.
Wang H, Wu H J, Ding Y F. Advance in the study and application of aerogels as translucent insulation materials in building energy-saving glass[J]. Building Energy Efficiency, 2010, 38(4): 35-37.(in Chinese)

(编辑 詹燕平)