

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.01.019



气凝胶建筑玻璃透光隔热性能及影响因素

吕亚军^{1a,2}, 吴会军^{1a,1b}, 王珊^{1a}, 付平^{1a}, 周孝清^{1a}

(1. 广州大学 a. 土木工程学院; b. 广东省建筑节能与应用技术重点实验室, 广州 510006; 2. 华北水利水电大学 建筑学院, 郑州 450056)

摘要:新型气凝胶玻璃具有良好的透光隔热性能,作为高性能建筑玻璃能有效降低建筑能耗。通过气凝胶颗粒粒径和填充厚度设计,制成 8 种不同结构的气凝胶填充玻璃;实验研究了气凝胶颗粒粒径与填充厚度对气凝胶玻璃透光和隔热性能的影响。结果表明:当气凝胶粒径从 0.41 mm 增大到 0.93 mm 时,玻璃透光率明显增大,而当气凝胶粒径继续增大时透光率变化不大;当气凝胶粒径从 0.41 mm 增大到 2.7 mm 时,气凝胶玻璃传热系数增大约 15%;相对于普通玻璃,相同尺寸的空玻璃传热系数最多可降低 51.43%。采用玻璃隔热实验测试研究了气凝胶玻璃与普通中空玻璃的隔热温差,结果表明,气凝胶玻璃较普通玻璃隔热效果提高 5.4~10.2 ℃。

关键词:气凝胶玻璃;粒径;填充厚度;热工性能;光学性能

中图分类号:TU171.72 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)01-0134-07

Influencing factors of aerogel architectural glazing thermal and light properties

Lyu Yajun^{1a,2}, Wu Huijun^{1a,1b}, Wang Shan^{1a}, Fu Ping^{1a}, Zhou Xiaqing^{1b}

(1a. School of Civil Engineering; 1b. Building Energy Research Institute, Guangzhou University, Guangzhou 510006, P. R. China; 2. College of Architecture, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, P. R. China)

Abstract: Aerogel glazing units (AGUs) with the high translucent insulation performance could reduce effectively energy saving in buildings. In this paper, eight kinds of AGUs were prepared and the effect on translucent and insulation performance of AGUs with different particle size and filling thicknesses was investigated. Experiments results indicate that visible light transmittance and solar radiation transmittance of AGUs increase obviously when particle size increases from 0.41mm to 0.93mm, while that change little when particle size continues to increase from 0.93mm. The heat transfer coefficient decreases about 15% when the particle size reduces from 2.7mm to 0.41mm. The increase of the thickness of aerogel effectively decrease visible light transmittance, solar radiation transmittance and heat transfer coefficient, the heat transfer coefficient of AGUs can decrease 51.43% compared with conventional double galzing at the same size. Finally, heat insulation experiments of testing insulation temperature difference of AGUs and

收稿日期:2017-05-19

基金项目:国家自然科学基金(51678167);广东省自然科学基金(S2013050014139);中国博士后基金(2017M612629)

作者简介:吕亚军(1978-),男,博士,主要从事建筑节能研究,E-mail:darkdanking@126.com。

吴会军(通信作者),男,研究员,博士,E-mail:wuhuijun@tsinghua.org.cn。

Received:2017-05-19

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51678167); Natural Science Foundation of Guangdong Province(No. S2013050014139); Postdoctoral Foundation of China (No. 2017M612629)

Author brief: Lyu Yajun(1978-), PhD, main research interest: building energy efficiency, E-mail: darkdanking@126.com.

Wu Huijun(corresponding author), researcher, PhD, E-mail: wuhuijun@tsinghua.org.cn.

conventional double glass were conducted, and the results reveal the temperature difference of AGUs before and after heating raise 5.4~10.2 °C. Therefore, conclusion of this study give a clue to the application of this new heat insulating materials on energy saving in buildings.

Keywords: aerogel glazing; particle size; incorporating thickness; thermal properties; optical properties

建筑能耗已经占到社会总能耗的40%^[1],并产生了全球约1/3的温室气体^[2],建筑节能受到前所未有的关注。建筑窗户作为重要的建筑构件,影响室内的采光、通风,也在很大程度上影响建筑能耗。据统计,40%~50%建筑围护结构能耗是通过窗户玻璃消耗的^[3-4],因此,建筑玻璃性能是影响建筑室内光环境、热环境和建筑采暖空调能耗的重要因素。

气凝胶作为一种具有耐火不燃、超级绝热和透光等高性能的新型材料^[5],在建筑墙体、玻璃等节能应用方面引起了越来越多的关注。气凝胶含有开放空间网络结构的轻质纳米多孔性非晶体固体材料^[6-7],孔隙率高达99.8%,特殊的纳米多孔结构使其具有比空气还低的导热系数、高透明度和良好的隔声性能^[8],在建筑节能方面有广泛的应用前景^[9]。

将气凝胶与玻璃相结合制成气凝胶玻璃,能够有效地降低玻璃的太阳辐射透过率和传热系数,降低建筑能耗。目前,气凝胶玻璃的应用形式主要是整块气凝胶玻璃和粉末状气凝胶玻璃。一些学者将颗粒状气凝胶填充到两块玻璃中间,制备了颗粒气凝胶玻璃。Buratti等^[10-11]将气凝胶颗粒直接充入4 mm厚浮法玻璃的14 mm空腔中,得到气凝胶玻璃的传热系数为1.31 W/m²·K, Garnier等^[12]、Cotana等^[13]、Huang等^[14]将制备的气凝胶玻璃,应用于建筑中,由于气凝胶玻璃具有较低的传热系数,取得了良好的节能效果。学者们就气凝胶粒径和厚度的大小对于玻璃传热系数、太阳光和太阳辐射透过率进行了研究,例如,Gao等^[15]实验制备了两种不同粒径(3~5 mm和<0.5 mm)的气凝胶玻璃,结果发现,小粒径气凝胶玻璃对可见光及太阳辐射透过性较差,对应的玻璃传热系数更低。但是,对于气凝胶颗粒粒径对玻璃性能的影响规律有待进一步系统和深入研究。

笔者首先制备了气凝胶颗粒,采用筛分方法获得了4组不同粒径的气凝胶颗粒,将两种填充厚度制成8种气凝胶玻璃;实验测试各种气凝胶玻璃的太阳辐射透射率、传热系数和隔热温差,研究气凝胶颗粒粒径、填充厚度等参数对气凝胶玻璃透光性和传热系数的影响;最后,通过气凝胶和普通中空玻璃隔热实验,对比气凝胶玻璃相对于普通中空玻璃的隔热效果。

1 实验

1.1 材料和玻璃的制备

1.1.1 气凝胶颗粒的制备及颗粒筛分 采用溶胶-凝胶法和常压干燥制备SiO₂气凝胶颗粒材料,具体制备工艺见文献^[16]。将制备的气凝胶颗粒筛分,得到4种不同粒径分布的气凝胶颗粒,粒径范围分别为0.25~0.5 mm、0.5~0.83 mm、0.83~1 mm、1.00~4.00 mm,如图1所示,经测量其平均粒径分别为0.41、0.64、0.93、2.7 mm,这4种粒径的气凝胶颗粒分别标识为P_{0.41}、P_{0.64}、P_{0.93}、P_{2.7}。

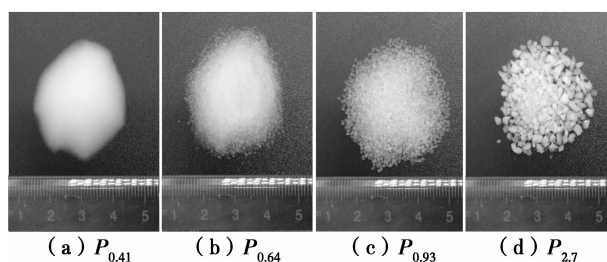


图1 4种不同粒径的气凝胶颗粒

Fig. 1 Aerogel granule of different particle size

1.1.2 气凝胶玻璃的制备 将气凝胶颗粒作为填充材料填充到在两块4 mm厚的普通玻璃中间,并通过橡胶条密封制成气凝胶玻璃,构造方式如图2所示。对于4种不同颗粒粒径的气凝胶颗粒,采用7.5 mm和10 mm厚两种填充厚度,制成8中不同结构的气凝胶玻璃,编号如表1所示,其中,T代表气凝胶填充厚度,P代表气凝胶颗粒的平均粒径。

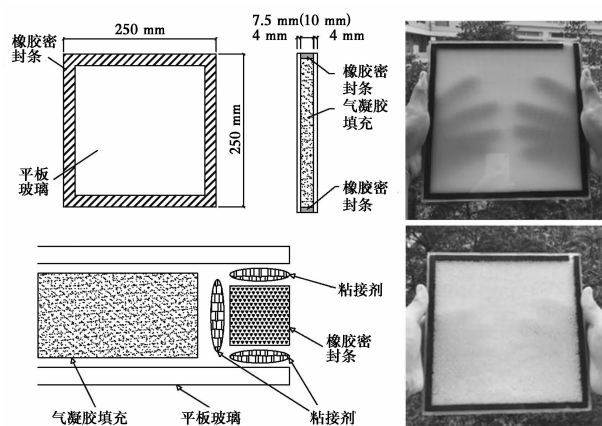


图2 气凝胶玻璃构造图

Fig. 2 Diagram of aerogel glazing units

表 1 气凝胶玻璃填充粒径及填充厚度

Table 1 AGUs of different particle size and filling thickness

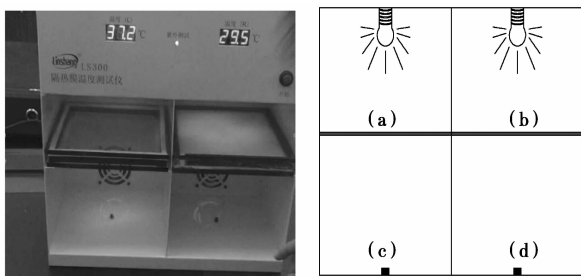
玻璃编号	粒径范围/mm	平均粒径/mm	气凝胶填充厚度/mm
$T_{7.5}P_{0.41}$	0.25~0.50	0.41	7.5
$T_{7.5}P_{0.64}$	0.50~0.83	0.64	7.5
$T_{7.5}P_{0.93}$	0.83~1.00	0.93	7.5
$T_{7.5}P_{2.7}$	1.00~4.00	2.70	7.5
$T_{10}P_{0.41}$	0.25~0.50	0.41	10
$T_{10}P_{0.64}$	0.50~0.83	0.64	10
$T_{10}P_{0.93}$	0.83~1.00	0.93	10
$T_{10}P_{2.7}$	1.00~4.00	2.70	10

1.2 气凝胶与玻璃的性能实验测试

1.2.1 气凝胶导热系数测试 采用 TPS2500 热常数分析仪(瑞典 Hot Disk 公司)测试不同粒径气凝胶颗粒的导热系数。

1.2.2 气凝胶玻璃性能测试 采用 Lambda1050 光谱仪(美国 PerkinElmer)测试气凝胶玻璃的红外-可见光透过率(300~2 500 nm)。采用 CD-DR3030 防护热板法(沈阳紫薇)测试玻璃的传热系数(GB/T 10294—2008)。

使用 LS300 隔热膜温度测试仪(深圳林上)测试气凝胶玻璃和普通中空玻璃的隔热温差,如图 3 所示,使用的玻璃尺寸和结构参数如表 2 所示。具体步骤为:将普通中空玻璃和气凝胶玻璃(如图 3 中 A、B)放置在红外加热灯前面,所选用的玻璃规格如表 2 所示。试验时,开启加热灯,对两种玻璃的一侧进行加热,3 min 后温度达到稳定,记录测温点 C 和 D 加热前后的温差。



注: (a) 试件A; (b) 试件B; (c) 温度探头C; (d) 温度探头D。

图 3 LS300 隔热膜温度测试仪

Fig. 3 LS300 thermal insulation film temperature measuring instrument

表 2 隔热实验使用玻璃

Table 2 Glazing in heat insulation experiments

玻璃编号	中空玻璃尺寸	气凝胶玻璃尺寸
1	4 mm+7.5 mm+4 mm	4 mm+7.5 mm+4 mm
2	4 mm+10 mm+4 mm	4 mm+10 mm+4 mm

续表 2

玻璃编号	中空玻璃尺寸	气凝胶玻璃尺寸
3	6 mm+7.5 mm+6 mm	6 mm+7.5 mm+6 mm
4	6 mm+10 mm+6 mm	6 mm+10 mm+6 mm
5	8 mm+7.5 mm+8 mm	8 mm+7.5 mm+8 mm
6	8 mm+10 mm+8 mm	8 mm+10 mm+8 mm

2 结果与讨论

2.1 气凝胶颗粒材料的结构与性能

2.1.2 气凝胶的导热系数 不同粒径的气凝胶密度和导热系数如图 4 所示。从图中可以看出,当气凝胶的平均粒径由 0.41 mm 增加到 2.7 mm,随着气凝胶粒径的增大,气凝胶的密度由 1.022 g/cm³ 降为 0.979 g/cm³,其导热系数由 0.022 9 W/(m·K)增大为 0.026 3 W/(m·K)。这是由于气凝胶颗粒呈不规则形状,随着粒径的增大,气凝胶颗粒间的空隙也相应增大,从而导致气凝胶颗粒堆积密度下降。

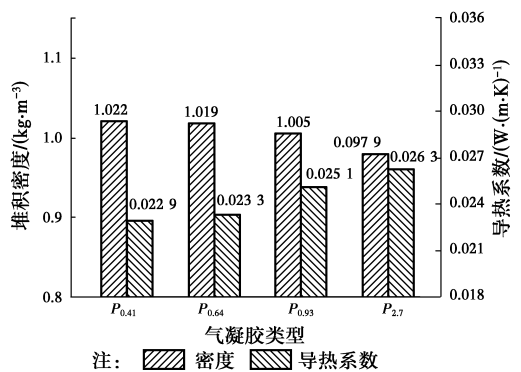


图 4 气凝胶粒径与密度及导热系数关系

Fig. 4 Relationship of aerogel thermal conductivity and bulk density

由于气凝胶自身特殊的纳米多孔结构,其胶体颗粒尺寸小于空气自由程,使得骨架内部的空气不能自由活动,因而,气凝胶内部的对流传热可忽略不计,气凝胶导热系数受空气导热与气凝胶固相导热的综合影响,其关系式为^[17]

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{(1-\epsilon)}{\lambda_s} + \frac{\epsilon}{\lambda_a} \quad (1)$$

式中: λ 为气凝胶的表观导热系数; λ_s 为气凝胶的固相导热系数; λ_a 为空气的导热系数; ϵ 为气凝胶的孔隙率。

孔隙率的计算式为

$$\epsilon = 1 - \rho_b / \rho_s \quad (2)$$

式中: ρ_b 为样品的实测密度; ρ_s 为样品的堆积密度。

将式(2)代入式(1)中,可得

$$\lambda = \frac{\lambda_s \lambda_a}{\lambda_s} - (\lambda_s - \lambda_a) - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (3)$$

由式(3)可以看出,导热系数随着实测密度的增大而增大,这也与实验测试的气凝胶结果相一致。

2.1.3 气凝胶的疏水性 气凝胶颗粒具有明显的疏水性,水分难以进入气凝胶颗粒内部,这就保证了气凝胶在潮湿的环境中仍能保持较低的导热系数,不受水的侵蚀。研究中使用疏水角来表征气凝胶材料的疏水性。从图 5 中可以看出,几种气凝胶的疏水角介于 139°~147°之间,表明其具有良好的疏水性,可以有效降低气凝胶吸水率,在使用过程中不会由于吸水而造成导热系数下降现象,应用于建筑外表面具有较好的耐候性。

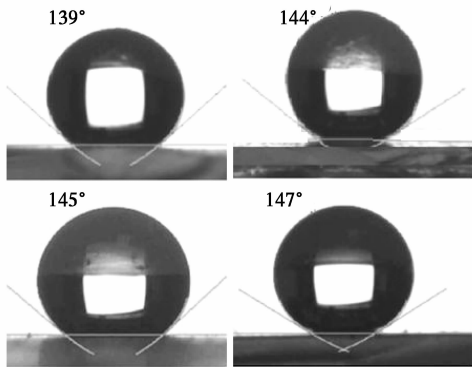


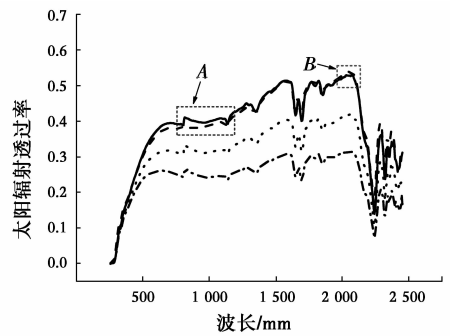
图 5 气凝胶疏水角
Fig. 5 Hydrophobic angle of aerogel

2.2 气凝胶玻璃的透光和隔热性能

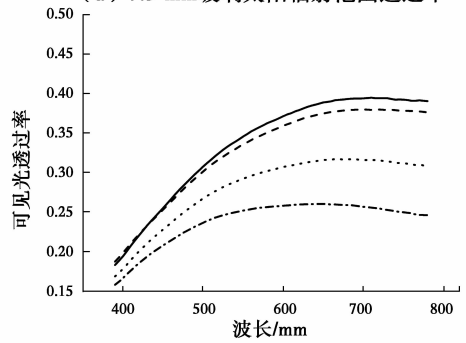
二氧化硅颗粒状气凝胶制作成本相对低廉,导热系数低、具有较好的透光性,制成气凝胶夹层玻璃,能够有效地降低建筑能耗^[18]。而气凝胶颗粒大小及厚度对气凝胶玻璃的光、热性能会造成一定的影响^[15],在本部分,重点研究不同气凝胶颗粒及厚度,对气凝胶玻璃的可见光透过率、太阳辐射透过率和传热系数的影响。

2.2.1 气凝胶颗粒粒径和填充厚度对气凝胶玻璃透光性的影响 研究中,采用气凝胶填充厚度为 7.5、10 mm 玻璃,4 种气凝胶平均粒径为 2.7、0.93、0.64、0.41 mm,对应的气凝胶玻璃如表 1 所示。图 6 中对可见光透过率、太阳辐射透过率和玻璃的传热系数进行了测试,并做了对比分析。

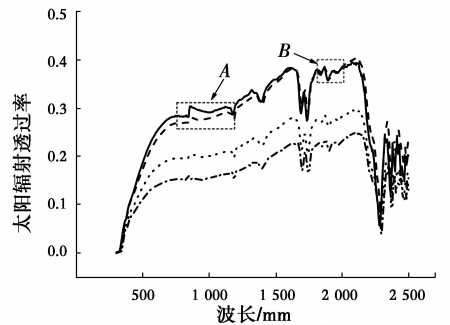
图 6(a)、(c)反映出太阳辐射(300~2 500 nm)透过不同粒径气凝胶玻璃透过率的情况,从图中可以看出,不同粒径气凝胶玻璃对于太阳辐射相同波段透过趋势相一致,当气凝胶颗粒增大时太阳辐射透过率增大,尤其气凝胶颗粒平均粒径由 0.41 mm 增大到 0.64 mm 及由 0.64 mm 增大到 0.93 mm 时,太阳辐射透过率增加非常明显。但是,当气凝胶



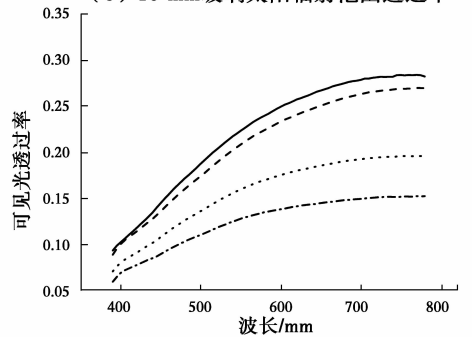
(a) 7.5 mm玻璃太阳辐射范围透过率



(b) 7.5 mm玻璃可见光透过率



(c) 10 mm玻璃太阳辐射范围透过率



(d) 10 mm玻璃可见光透过率

注: — $T_{10}P_{2.7}$ --- $T_{10}P_{0.93}$ $T_{10}P_{0.64}$ - - - $T_{10}P_{0.41}$

图 6 辐射透过率图

Fig. 6 Radiation transmittance diagram

颗粒平均粒径由 0.91 mm 增大到 2.7 mm 时,太阳辐射透过曲线非常接近(如图 6(a)、(c)中的 A、B 区域所示),可见,气凝胶颗粒增大到 0.93 mm 以后,再增大气凝胶的粒径并不能明显增加太阳辐射的透过率。图 6(b)、(d)所示是不同气凝胶玻璃粒径情况下,可见光(390~780 nm)透过率。可见光的透过规律与太阳辐射的透过规律类似,当平均粒径由

0.41 mm 增加到 0.93 mm 时,可见光透过率增加非常明显,但是,当粒径由 0.93 mm 增加到 2.7 mm 时,可见光透过率增加并不明显。

如表 3 所示,对于 7.5、10 mm 厚气凝胶玻璃,降低气凝胶的粒径能够有效地降低太阳辐射(300~2 500 nm)和可见光(390~780 nm)的透过率,以 7.5 mm 厚玻璃太阳辐射透过率为例,平均粒径由 2.7 mm 降为 0.93 mm 时,气凝胶玻璃的太阳辐射透过率下降并不明显,但是,由 0.93 mm 降为 0.41 mm 时,太阳辐射透过率明显下降,这种现象在 10 mm 厚气凝胶玻璃也可以看到;当气凝胶玻璃平均粒径由 0.93 mm 降为 0.41 mm 时,减少的粒径对于阻挡辐射的作用越明显,以 7.5 mm 厚玻璃太阳辐射透过率为例,平均粒径由 0.93 mm 降为 0.41 mm 时,太阳辐射透过率由 39% 降为 24.04%,但是,当平均粒径由 2.7 mm 降为 0.93 mm 时,太阳辐射透过率由 39.01% 降为 39.00%,几乎没有任何下降,这样的结论在 10 mm 厚玻璃以及可见光透过率中同样也可以看到,这与图 6(a)、(c)中太阳辐射透过率和图 6(b)、(d)中可见光透过率的结论相一致。所以,在研究中,要通过改变气凝胶粒径来降低或者提高气凝胶玻璃的透过率,最有效的粒径范围小于 0.93 mm。

表 3 气凝胶玻璃辐射透过率
Table 3 Transmittance of aerogel glass

平均粒径/mm	7.5 mm 厚玻璃太阳辐射透过率/%	10 mm 厚玻璃太阳辐射透过率/%	7.5 mm 厚玻璃可见光透过率/%	10 mm 厚玻璃可见光透过率/%
2.7	39.01	28.68	31.06	22.23
0.93	39.00	28.43	30.09	20.92
0.64	31.05	20.72	26.26	15.74
0.41	24.04	16.74	22.63	12.51

2.2.2 气凝胶颗粒粒径和填充厚度对气凝胶玻璃传热系数的影响 在两块平板玻璃间使用气凝胶填充能够有效降低其传热系数,如图 7(a)所示。当使用传统空气层厚度为 7.5 mm 中空玻璃时,其传热系数为 3.17 W/(m²·K),当使用同样填充厚度,平均粒径分别为 0.41、0.64、0.93、2.7 mm 气凝胶玻璃时,其传热系数分别为 1.53、1.74、1.81 和 1.83 W/(m²·K),相对于相同厚度的中空玻璃传热系数分别下降了 52.37%、45.11%、42.90% 和 42.27%,下降非常明显;另外,当气凝胶的粒径减小时,玻璃的传热系数随之下降,以 7.5 mm 气凝胶玻璃为例,当粒径由 2.7 mm 降为 0.41 mm 时,传热系数由

1.83 W/(m²·K)降为 1.53 W/(m²·K),降低了 16.39%;气凝胶填充厚度为 10 mm 时,当粒径由 2.7 mm 降为 0.41 mm 时,传热系数由 1.39 W/(m²·K)降为 1.19 W/(m²·K),降低了 14.39%。可见,通过减小气凝胶的粒径能够有效降低传热系数。

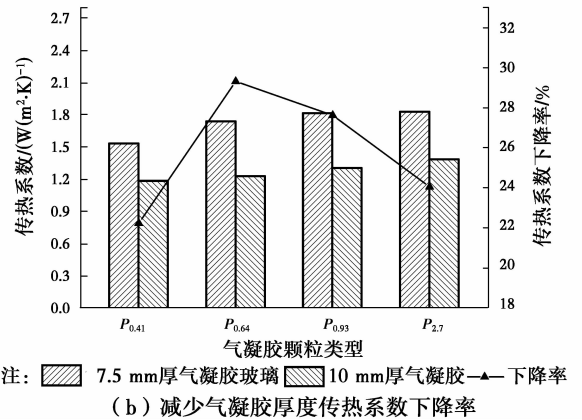
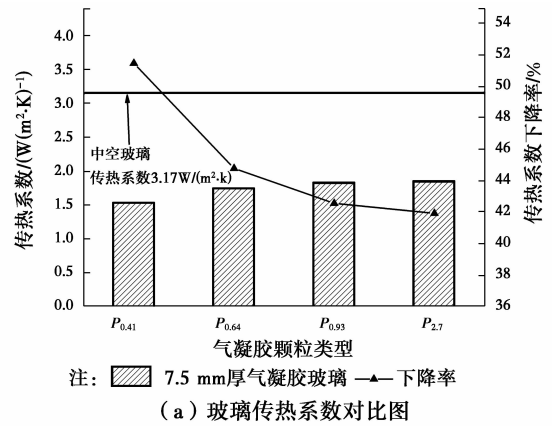


图 7 玻璃的传热系数

Fig. 7 Heat transfer coefficient of glass

随着气凝胶填充厚度的增加,气凝胶的传热系数随之降低(如图 7(b)所示)。例如,气凝胶填充厚度由 7.5 mm 增加为 10 mm,对应于气凝胶的平均粒径分别为 0.41、0.64、0.93、2.7 mm 时,传热系数分别降低了 22.22%、29.31%、27.62% 和 24.04%。这是由于气凝胶的导热系数为 0.022 9~0.026 3 W/(m·K),而普通玻璃的导热系数为 1.1 W/(m·K),气凝胶的导热系数介于玻璃导热系数的 1/41~1/48,所以,气凝胶玻璃的传热系数主要由气凝胶的导热系数和厚度决定,改变气凝胶填充厚度能够在很大程度上改变气凝胶玻璃的传热系数。

2.3 气凝胶玻璃与普通中空玻璃的隔热性能对比

气凝胶玻璃比普通中空玻璃具有更好的隔热作用,从图 8 可以看出,使用红外加热灯进行照射后,对于相同规格尺寸的玻璃,气凝胶玻璃升温范围在 2.4~3.2 °C 之间,而普通中空玻璃的升温幅度在

8.6~11.7℃之间,所以,相对于普通中空玻璃而言,气凝胶玻璃有非常明显的隔热效果。

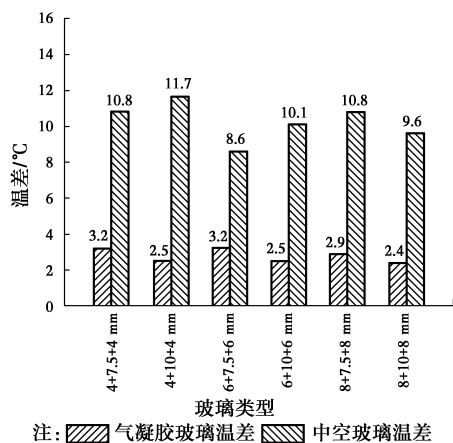


图 8 气凝胶玻璃隔热性能测试

Fig. 8 Thermal insulation test of aerogel glass

3 结论

新型气凝胶玻璃具有良好的透光隔热性能,可有效降低建筑能耗。研究制成了 8 种不同粒径和填充厚度的气凝胶填充玻璃,实验测试了气凝胶玻璃的辐射透过率和传热系数,研究了气凝胶颗粒粒径与填充厚度对气凝胶玻璃辐射透过率及对隔热性能的影响,得到以下结论:

1) 粒径小的气凝胶比粒径大的气凝胶更能降低玻璃的传热系数。如:对于填充厚度 7.5 mm 气凝胶玻璃,当气凝胶粒径从 2.7 mm 降低到 0.41 mm 时,气凝胶玻璃的传热系数从 $1.83 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 降低到 $1.53 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,降低了 16.39%。

2) 当气凝胶玻璃的粒径增大时,透过气凝胶玻璃太阳辐射透过率和可见光透过率都增大。在研究中,太阳辐射透过率和可见光透过率具有以下现象:当气凝胶粒径从 0.41 mm 增大到 0.93 mm 时,玻璃太阳辐射和可见光透过率增大明显,而当气凝胶粒径继续增大时,太阳辐射和可见光透过率增加不显著。

3) 随着气凝胶填充厚度的增大,气凝胶玻璃的太阳辐射透过率,可见光透过率和传热系数均减小。

4) 气凝胶玻璃与普通玻璃相比具有良好的隔热效果,通过红外灯加热对比实验发现,对于相同尺寸的玻璃,气凝胶玻璃升温幅度较小,而中空玻璃升温幅度较大。

参考文献:

[1] 黄建恩,吕恒林,冯伟,等.既有居住建筑围护结构节能

改造热工性能优化[J].土木建筑与环境工程,2013,35(5):118-124.

HUANG J E, LYU H L, FENG W, et al. Thermal performance optimization of energy saving retrofit for existing residential building envelope [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013,35(5):118-124. (in Chinese)

[2] WAQAS A, DIN Z U. Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings-A review [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2013,18:607-625.

[3] 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(4):35-37.

WANG H, WU H J, DING Y F. Research and application progress of aerogel transparent heat insulation material in building energy-saving glass [J]. Building Energy Efficiency, 2010(4):35-37. (in Chinese)

[4] 王欢,吴会军,丁云飞,等.建筑外窗热工性能对空调能耗与节能的影响分析[J].节能技术,2011(2):172-175,192.

WANG H, WU H J, DING Y F, et al. Influence of thermal performance on energy consumption and energy saving of exterior windows in buildings [J]. Energy Conservation Technology, 2011(2):172-175,192. (in Chinese)

[5] 钟支葵,葛全伟,吴会军,等.气凝胶超级绝热复合材料对钢结构的防火性能[J].新型建筑材料,2015(11):54-57.

ZHONG Z K, GE Q W, WU H J, et al. Fire resistant performance of aerogel super insulation composite for steel structure [J]. New Building Materials, 2015(11):54-57. (in Chinese)

[6] 王宝民,宋凯,韩瑜,等.硅藻土制备介孔 SiO_2 气凝胶[J].土木建筑与环境工程,2013,35(2):141-146,158.

WANG B M, SONG K, HAN Y, et al. Preparation of mesoporous SiO_2 aerogels by diatomite [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013,35(2):141-146,158. (in Chinese)

[7] WU H J, CHEN Y T, CHEN Q L, et al. Synthesis of flexible aerogel composites reinforced with electrospun nanofibers and microparticles for thermal insulation [J]. Journal of Nanomaterials, 2013.

[8] GIBIAT V, LEFEUVRE O, WOIGNIER T, et al. Acoustic properties and potential applications of silica aerogels [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1995,186:244-255.

- [9] 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(2):444-449,455.
GUO X Y, ZHANG G L, ZHAO X Y, et al. Application form and effect of aerogel in building energy saving field [J]. Bulletin of The Chinese Ceramic Society,2015(2):444-449,455. (in Chinese)
- [10] BURATTI C, MORETTI E. Experimental performance evaluation of aerogel glazing systems [J]. Applied Energy, 2012, 97:430-437.
- [11] BERADI U. The development of a monolithic aerogel glazed window for an energy retrofiting project [J]. Applied Energy, 2015, 154: 603-615.
- [12] GARNIER G, MUNEEER T, MCCAULEY L. Super insulated aerogel windows; Impact on daylighting and thermal performance [J]. Building and Environment, 2015,94:231-238.
- [13] CONTANA F, PISELLO A L, MORETTI E, et al. Multipurpose characterization of glazing systems with silica aerogel; In-field experimental analysis of thermal-energy, lighting and acoustic performance [J]. Building and Environment, 2014, 81:92-102.
- [14] HUANG Y, NIU J L. Energy and visual performance of the silica aerogel glazing system in commercial buildings of Hong Kong [J]. Construction and Building Material, 2015,94:57-72.
- [15] GAO T, JELLE B P, IHARA T, et al. Insulating glazing units with silica aerogel granules: The impact of particle size [J]. Applied Energy, 2014,128:27-34.
- [16] LIAO Y D, WU H J, DING Y F, et al. Engineering thermal and mechanical properties of flexible fiber-reinforced aerogel composites [J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2012,63(3) :445-456.
- [17] LI M, CHEN Y. Relation of density and thermal conductivity of micro-porous calcium silicate insulation material [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2005, 33 (11): 1414-1417.
- [18] RAO A V, HARANATH D. Effect of methyltrimethoxysilane as a synthesis component on the hydrophobicity and some physical properties of silica aerogels [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 1999,30 (2/3):267-273.

(编辑 王秀玲)