

室外温度及风速对中空玻璃传热的影响分析

程励辉^{1,2}

(1. 广东省建筑科学研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510500;

2. 广东省建设工程质量安全检测总站有限公司, 广东 广州 510500)

摘要: 针对温度及风速对中空玻璃传热系数影响机制不明确的问题, 采用因素分析法研究室外温度、风速对中空玻璃传热性能的影响, 对比分析不同中空玻璃空腔内部换热方式及当量导热系数变化率; 利用四分位数法探究了不同工程环境下, 中空玻璃传热系数相对于产品设计基准值的偏离特征。结果表明: 中空玻璃传热系数随室外风速升高而增大; 普通中空玻璃空腔传热以辐射换热为主, 而镀膜中空玻璃空腔传热以对流换热为主, 且当空腔厚度在一定阈值内 (普通中空玻璃约为 20 mm, 镀膜中空玻璃约为 9 mm), 空腔气体当量导热系数随室外温度升高而增大; 中空玻璃传热系数出现负偏离较为显著。研究结果对优化工程项目的中空玻璃设计和产品选型具有指导意义。

关键词: 中空玻璃; 传热系数; 室外环境温度; 四分位法; 努谢特特数

中图分类号: TU111.19; TU201.5

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2023)06-0517-06

Analysis of influence of outdoor temperature and wind speed on heat transfer of insulating glass

CHENG Lihui^{1,2}

(1. Guangdong Provincial Academy of Building Research Group Co., Ltd., Guangzhou 510500, China;

2. Guangdong Construction Engineering Quality & Safety Testing Head Station Co., Ltd., Guangzhou 510500, China)

Abstract: In order to solve the problem that the influence mechanism of temperature and wind speed on the heat transfer coefficient of insulating glass is not clear, the influence of outdoor temperature and wind speed on the heat transfer performance of insulating glass is studied by factor analysis method, and the internal heat transfer mode and equivalent thermal conductivity change rate of different insulating glass cavities are compared and analyzed. The deviation characteristics of the heat transfer coefficient of insulating glass relative to the reference value of product design under different engineering environments are explored by using the quartile method. Results show that the heat transfer coefficient of insulating glass increases with the increase of outdoor wind speed. The heat transfer in the cavity of ordinary insulating glass is dominated by radiation heat transfer, while the heat transfer in the cavity of coated insulating glass is dominated by convection heat transfer. When the thickness of the cavity is within a certain threshold (about 20 mm for ordinary insulating glass and about 9 mm for coated insulating glass), the equivalent thermal conductivity of the cavity gas increases with the increase of outdoor temperature. The negative deviation of the heat transfer coefficient of the insulating glass is more significant. The research results have guiding significance for optimizing the design and product selection of insulating glass in engineering projects.

Keywords: insulating glass; heat transfer coefficient; outdoor temperature; quartile method; Nusselt number

收稿日期: 2023-10-10

作者简介: 程励辉 (1990—), 男, 广东汕尾人, 工程师, 硕士, 研究方向: 围护结构热工检测与缺陷分析、节能门窗热工性能数值模拟。

门窗及其玻璃系统是建筑围护结构保温的薄弱部分,其中玻璃面积占比最大,行业学者围绕其传热性能作了大量的研究。惠存、王东旭等人^[1-4]在产品条件设计下就中空玻璃的空腔厚度、气体类型、镀膜类型等内在结构要素对其传热性能的影响作了深入研究。李会平、陈德敏^[4-5]研究了中空玻璃的最佳空腔厚度、镀膜面位置等中空玻璃结构优化方法。王厚华、黄春勇^[6-7]围绕非镀膜中空玻璃空气层的对流传热及壁面温差的影响展开讨论。孙丁、张甜甜^[8-9]讨论了封闭空腔对流换热在整体传热过程的主导作用。Karolis B^[10]等人研究了中空玻璃传热系数随室外温度的变化,阐述了中空玻璃传热系数随室外温度的变化量。然而,室外温度及风速对中空玻璃传热系数的影响及其机理尚未有系统性的研究,不同工程环境条件下其传热性能与产品条件设计下的基准值的偏离特征仍需进一步阐明。本文将重点研究温度、风速对中空玻璃传热性能的影响,量化温度和风速变化对不同中空玻璃传热系数的影响,并分析影响的差异和原因,同时采用四分位法阐述不同工程环境条件下传热系数的偏离特征,为优化中空玻璃产品设计和选用提供参考和依据。

1 典型中空玻璃配置及室外环境条件

选取普通、单银镀膜、双银镀膜中空玻璃,其靠近室外的玻璃朝空腔侧表面辐射率分别为 0.84、0.10、0.04,空腔厚度依次取 6、9、12、16、18、20 mm,玻璃厚度均为 6 mm。模拟计算中室内温度为 20 ℃、对流换热系数为 3.6 W · m⁻² · K⁻¹^[11]。产品设计条件的室外温度为 -20 ℃、室外风速为

3 m · s⁻¹。依据《民用建筑热工设计规范》^[12]对冬季室外热工计算温度取值的要求,考虑到中空玻璃是轻质围护结构,本文涉及的 118 个典型工程环境条件的室外温度取自《民用建筑热工设计规范》^[12]附录 A 的累年最低日平均温度。风速数据取自建筑气象参数标准^[13]参数表的冬季平均风速。以福州为例,其室外环境温度取值 3.3 ℃、风速取值 2.7 m · s⁻¹。不同镀膜类型、空腔厚度及环境条件组合构成 2 142 个样品,采用《热工计算规程》^[6]的热平衡方程法计算以上中空玻璃样本的传热系数、空腔热阻、空腔对流换热系数、辐射换热系数,结果与粤建科 MQMC 软件计算结果一致。

2 室外环境条件对中空玻璃传热系数的影响

2.1 室外风速对传热系数的影响

选取典型中空玻璃在宝鸡、邢台、阜阳、日照、青岛地区工程环境条件下的计算结果,分析室外风速对中空玻璃传热的影响,以上 5 个地区的室外温度为 (-8.5±0.5) ℃,室外风速分别为 1.0、1.9、2.9、3.5、5.7 m · s⁻¹。

按镀膜类型分组,不同类型中空玻璃传热系数随室外风速变化如图 1 所示。风速由 1.0 升高至 5.7 m · s⁻¹,中空玻璃传热系数随之增大,空腔厚度越小的中空玻璃传热系数增量越大。普通中空玻璃传热系数增量最大,空腔厚度 6、9、12、20 mm 的普通中空玻璃的传热系数分别增大 0.439、0.368、0.335、0.353 W · m⁻² · K⁻¹。单银、双银镀膜中空玻璃传热系数增量比同等空腔厚度普通中空玻璃略小,分别为 0.285、0.192、0.159、0.197 W · m⁻² · K⁻¹和 0.267、0.174、0.142、0.181 W · m⁻² · K⁻¹。

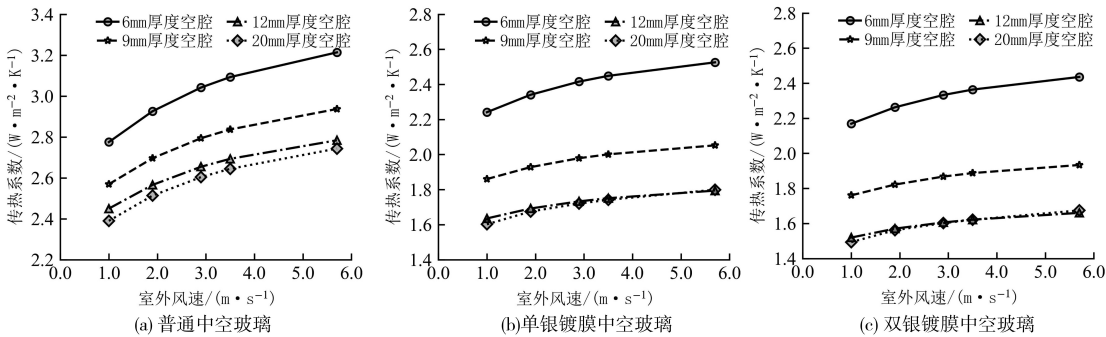


图 1 中空玻璃传热系数随室外风速变化趋势

Fig.1 Variation trend of heat transfer coefficient of insulating glass with outdoor wind speed

2.2 室外环境温度对传热系数的影响

选取典型中空玻璃在大庆、营口、潍坊、池州、厦门地区工程环境条件下的计算结果,讨论室外温度对中空玻璃传热的影响,以上 5 个地区的室外风速均为 $3.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,室外温度分别为 -33.4 、 -23.3 、 -12.0 、 -3.5 、 $6.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

不同中空玻璃按照镀膜类型分组,其传热系数随室外温度变化如图 2 所示。由图 2(a)可见,空腔厚度 6、9、12 mm 的普通中空玻璃传热系数随室外温度升高而增大,受影响较大,室外温度由 -33.4 升高至 $6.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,传热系数增量分别为 0.292、0.210、0.218 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 。空腔厚度 20 mm 的

普通中空玻璃传热系数随室外温度升高而轻微降低,变化幅值仅为 $-0.016\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

如图 2(b)(c)所示,室外温度由 -33.4 升高至 $6.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,空腔厚度较小的镀膜中空玻璃传热系数随之增大。空腔厚度 6、9 mm 的单银、双银中空玻璃的传热系数增量分别是 0.167、0.109 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 和 0.149、0.080 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 。空腔厚度较大的镀膜中空玻璃的传热系数显著降低,空腔越大,室外温度对传热系数影响越强烈,传热系数下降显著。空腔厚度 12、20 mm 的单银、双银中空玻璃传热系数下降量分别为 -0.101 、 $-0.482\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 和 -0.156 、 $-0.552\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

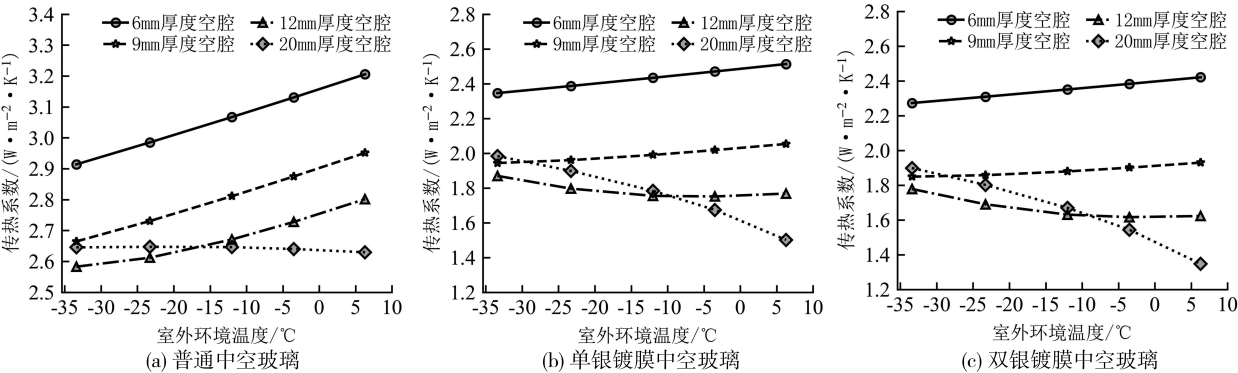


图 2 中空玻璃传热系数随室外环境温度变化趋势

Fig.2 Variation trend of heat transfer coefficient of insulating glass with outdoor temperature

2.3 室外环境温度对传热系数影响的微观分析

2.3.1 不同镀膜类型中空玻璃的空腔主要换热形式

选取空腔厚度为 9、12 mm 的双银中空玻璃及空腔厚度 12 mm 的普通中空玻璃在大庆、营口、潍坊、池州、厦门地区工程环境条件下的空腔换热系数,对比分析空腔对流换热、辐射换热占比及变化趋势。如图 3(a)所示,普通中空玻璃空腔换热以辐射换热为主,辐射换热系数随室外环境温度升高而增大,空腔传热总体呈现升高趋势;镀膜中空玻璃空腔换热以对流换热为主,对流换热系数随室外环境温度升高而降低,而辐射换热系数变化量可忽略不计,空腔传热总体呈现降低趋势。可见,不同镀膜类型中空玻璃空腔的换热形式存在差异,这导致传热系数随室外环境温度变化趋势不同。

如图 3(b)所示,对比不同空腔厚度的双银中空玻璃空腔换热系数,空腔传热均以对流换热为

主,但 9 mm 厚空腔对流换热强度随室外环境温度升高而增强,而 12 mm 厚空腔的对流换热强度却随室外环境温度升高而减弱。

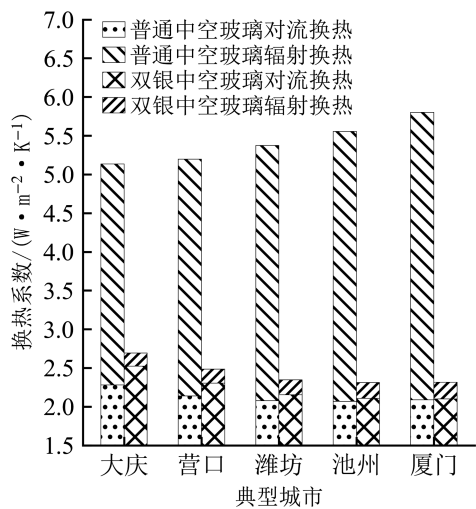
2.3.2 镀膜中空玻璃不同厚度空腔的当量导热系数

选取空腔厚度 9、12 mm 的双银镀膜中空玻璃样本的空腔努塞尔数,其随室外温度变化趋势如图 4,空腔努塞尔数随室外环境温度升高而降低,表明空腔对流换热强度随室外温度升高而减弱,且不同厚度空腔的对流换热强度受室外温度影响的程度存在差异,12 mm 厚空腔的内部对流强度随室外温度的影响更强烈。采用一阶近似表示努塞尔数 $Nu(T)$:

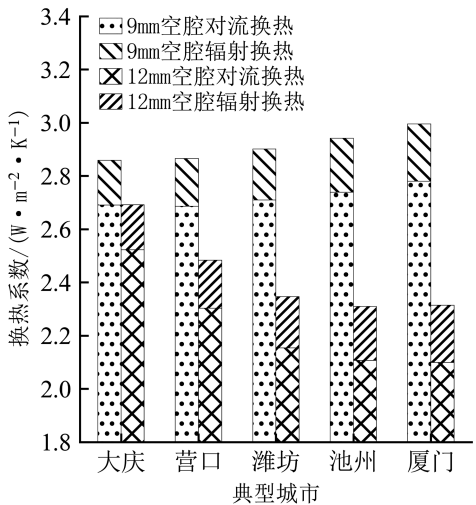
$$Nu(T)=\gamma+\delta\cdot T\tag{1}$$

式中, T 为绝对温度, K; 引入实算数据可得 9 mm 厚空腔系数 $\gamma=1.291\ 4$ 、 $\delta=-0.001\ 0$, 12 mm 厚空腔的系数 $\gamma=3.087\ 5$ 、 $\delta=-0.007\ 4$ 。

空腔内空气的当量导热系数随温度变化率:



(a) 12 mm 空腔厚度不同镀膜类型中空玻璃



(b) 不同空腔厚度双银镀膜中空玻璃

图 3 中空玻璃空腔换热系数对比

Fig.3 Comparison of heat transfer coefficient of insulating glass cavity

$$\lambda'_{\text{eff}} = \frac{d\lambda_{\text{eff}}}{dT} = \frac{d(Nu(T) \cdot \lambda(T))}{dT} \quad (2)$$

式中,空气导热系数 $\lambda(T) = a + b \cdot T, \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; $a = 2.873 \times 10^{-3}$, $b = 7.760 \times 10^{-5}$ 。将努塞尔数的一阶近似表达式代入式(2)简化后可得:

$$\lambda'_{\text{eff}} = \gamma \cdot b + \alpha \cdot \delta + 2\delta \cdot b \cdot T \quad (3)$$

由式(3)可算出, 9 mm 厚空腔相应的 $\lambda'_{\text{eff}} > 0$; 12 mm 厚空腔相应的 $\lambda'_{\text{eff}} < 0$ 。可见,不同空腔厚度的镀膜中空玻璃传热系数随室外环境温度变化趋势不同的根本原因在于,空腔内部气体对流强度受影响程度不同,以及当量导热系数随室外温度的变化方向不一致。

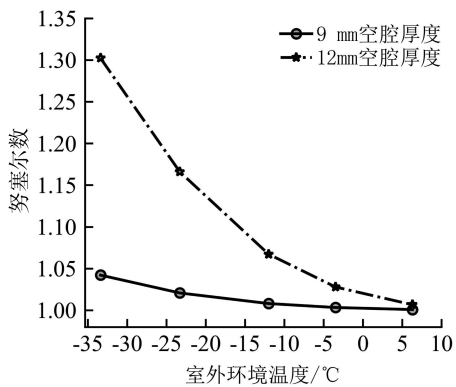


图 4 不同厚度空腔努塞尔数随室外环境温度变化对比

Fig.4 Comparison of Nusselt number of cavities with different thicknesses with outdoor temperature changes

3 工程环境条件下中空玻璃传热系数偏离特征

3.1 传热系数偏离的幅值特征

分别选取上述典型中空玻璃在产品设计、工程环境条件下的传热系数,并以产品设计条件下的传热系数为基准值,计算不同工程环境条件下传热系数正负偏差,以玻璃类型、空腔厚度及偏差的正负性质为分组条件、以四分位法统计分析传热系数偏差特征。将传热系数偏差的统计结果与基准值叠加,如图 5 所示,空腔厚度不超过 12 mm 时,普通中空玻璃正负偏差上四分位点的偏离幅值基本一致,均值分别为 0.13、-0.14;空腔厚度超过 12 mm 时,正偏差的偏离程度大大减少,上四分位点所在处偏离幅值为 0.06,负偏差的程度高于正偏差,上四分位点幅值为 -0.15。单银、双银中空玻璃传热系数偏离规律基本一致,当空腔厚度不超过 12 mm 时,正负偏离程度基本相同且低于普通中空玻璃,上四分位点偏离幅值均值分别为 0.08、-0.09;当空腔厚度超过 12 mm 后,偏离幅值升高,正偏离上四分位点的偏离幅值均值为 0.12,负偏离上四分位点的偏离幅值均值为 -0.30,负偏离幅值大于正偏离幅值且随空气层厚度增加而增大。

如图 5(b)(c)所示,对比单银、双银中空玻璃传热系数基准值差异及不同室外环境条件引起的偏离,室外环境条件对传热系数的影响在某些情况下大于镀膜类型本身的差异,且空腔厚度较大时表现更显著。当双银中空玻璃空腔厚度较大时,应特别注意工程地区室外环境特征,避免项目

中的中空玻璃实际传热系数大于设计值而产生不利影响。

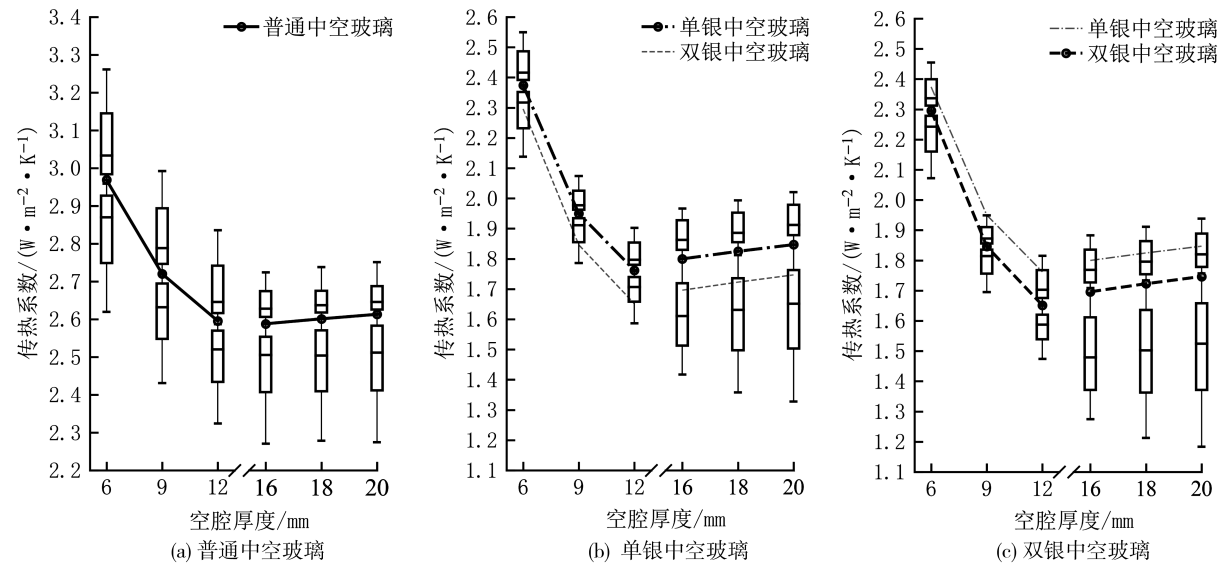


图 5 不同工程地区室外环境条件下中空玻璃传热系数基准值及偏离幅度

Fig.5 Reference value and deviation range of heat transfer coefficient of insulating glass under outdoor environmental conditions in different engineering areas

3.2 传热系数偏离的样本数量分布特征

如图 6 所示,在 118 种工程环境条件下,中空玻璃传热系数出现负偏离的情况多于正偏离,镀膜中空玻璃表现更显著。当镀膜中空玻璃空腔厚度大于 9 mm 时,传热系数出现负偏离的样本数量均值为 92 个,占比 77.9%。普通中空玻璃空腔

厚度大于 12 mm 时,传热系数出现负偏离的数量随空腔厚度增大而逐渐增多,样本数量均值为 81 个,占比 68.6%。正负偏离幅值、样本数量两方面均表明,中空玻璃传热系数出现负偏离较为显著和常见。

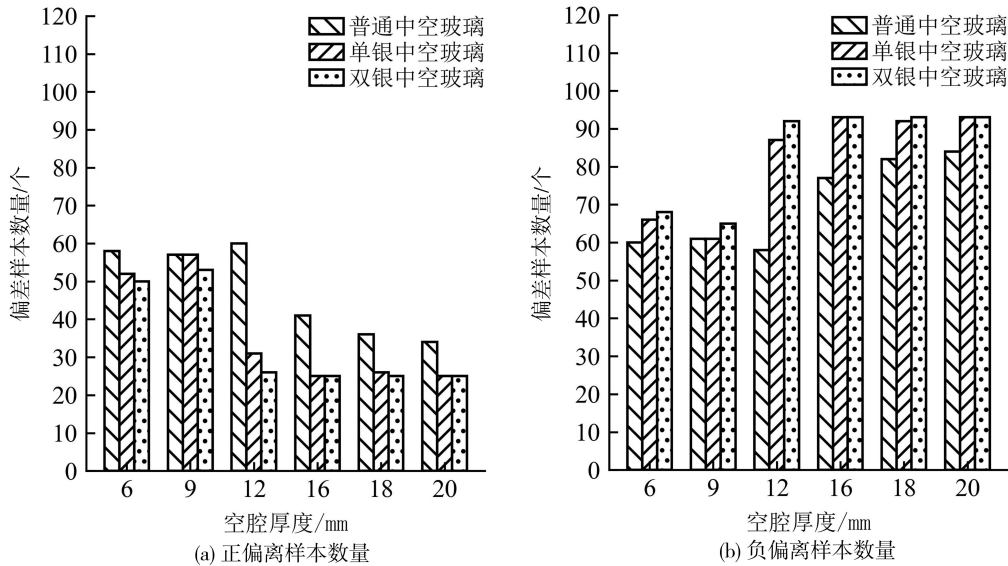


图 6 典型中空玻璃在 118 种工程环境条件下偏离的样品数量分布

Fig.6 Sample distribution of positive and negative deviation of typical insulating glass in 118 engineering environment conditions

4 结论

1) 中空玻璃传热系数随室外风速升高而增大,普通中空玻璃传热系数受风速影响程度高于镀膜中空玻璃;空腔厚度越小,其传热系数随风速变化越显著。

2) 不同类型中空玻璃传热系数受室外环境温度影响的趋势和程度存在较大差异,镀膜类型及空腔厚度决定了空腔的主要换热方式和受温度影响的程度。

3) 普通中空玻璃空腔传热以辐射换热为主。空腔厚度小于 20 mm 时,传热系数随室外环境温度升高而增大;空腔厚度达 20 mm 时,传热系数随室外温度升高而降低,但降低程度极小,可忽略

不计。

4) 镀膜中空玻璃空腔传热以对流换热为主。空腔厚度不超过 9 mm 时,空腔气体当量导热系数随室外温度升高而增大,因而传热系数随室外环境温度升高而增大;空腔厚度大于 9 mm 时,空腔气体当量导热系数随室外温度升高而降低,导致传热系数随室外温度升高而降低,且空腔越大,下降越显著。

5) 以产品设计条件下的传热系数为基准,118 种工程环境条件下,中空玻璃传热系数出现负偏离更为显著和普遍,在空腔厚度大的镀膜中空玻璃中更突出。普通中空玻璃正负偏离幅值基本一致,且偏离幅值较小,镀膜中空玻璃负偏离幅值大于正偏离。

参考文献:

- [1] 惠存,王元清,郑胜林,等. 单层玻璃和中空玻璃传热过程及 U 值影响因素分析[J]. 科学技术与工程,2015,15(28): 54-59.
- [2] 王东旭,高伟,王永帅,等. 充气中空玻璃惰性气体含量相关研究[J]. 玻璃,2022,49(5):53-57.
- [3] 黄安龙,阳启航. 中空玻璃空气层厚度对传热系数的影响对比分析[J]. 玻璃,2023,50(7):55-58.
- [4] 李会平,费辰. Low-E 中空玻璃最佳气体间隔层厚度的研究[J]. 玻璃与搪瓷,2010,38(5):1-5.
- [5] 陈德敏,刘莹惠,汤凯,等. 中空玻璃结构优化及节能性研究[J]. 施工技术(中英文),2022,51(4):97-103.
- [6] 王厚华,黄春勇. 中空玻璃空气夹层内的自然对流换热[J]. 重庆大学学报,2009,32(7):809-814.
- [7] 黄春勇. 中空玻璃的热工性能研究及其在住宅建筑上适用性分析[D]. 重庆:重庆大学,2008.
- [8] 孙丁. 建筑围护结构中封闭方腔空气夹层的热工性能研究[D]. 衡阳:南华大学,2013.
- [9] 张甜甜. 空气夹层流动换热特性及在建筑围护结构中的应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [10] BANIONIS K, KUMŽIENE J, BURLINGIS A, et al. The changes in thermal transmittance of window insulating glass units depending on outdoor temperatures in cold climate countries[J]. Energies, 2021, 14(6): 1694.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑门窗玻璃幕墙热工计算规程:JGJ/T 151—2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑热工设计规范:GB 50176—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [13] 中华人民共和国城乡建设环境保护部. 建筑气象参数标准:JGJ 35—1987[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1987.

(责任编辑:陈雯)