

建筑空间湿度分布特性对交叉扩散水平的影响

王 军, 张 旭

(同济大学暖通空调研究所, 上海 200092)

摘要:基于不可逆热力学分析,给出了建筑室内湿度分布特性对交叉扩散水平与特征的影响关系式,并结合室内实际的温度水平和污染气体浓度水平,进一步分析了湿度分布影响下的交叉扩散特征与水平。研究表明,湿度梯度与扩散附加扩散系数同号,则交叉扩散作用所形成的温度梯度和污染气体组分梯度小于零,反之则大于零;此外,在相同湿度梯度和扩散附加扩散作用下,初始温度水平和污染气体浓度水平越高,所形成的温度和污染气体组分梯度的绝对值越大,但初始温度的影响有限,而初始污染气体浓度的影响具有显著性。

关键词:湿度;交叉扩散;温度;组分梯度

中图分类号:TU834 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2009)04-0093-05

Influence of Humidity Distribution on Cross Diffusion Extent in Building Space

WANG Jun, ZHANG Xu

(HVAC & Gas Institute, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: The influencing relationship equation of humidity distribution on the characteristics and extent of cross diffusion was proposed based on the non-equilibrium thermodynamic theory. With the parameters of temperature, humidity and contaminant gas concentration, a further study on the relationship was employed. It was showed that the temperature grads and the contaminant gas mass grads were less than zero when the humidity grads and additional diffusion coefficient were both positive/negative, otherwise the two grads were more than zero. Moreover, the higher the initial temperature and contaminant gas concentration were, the greater the absolute values of temperature grads and contaminant gas mass grads were, with the same humidity grads and additional diffusion coefficient. Whereas the influence of initial temperature was limited, and that of initial contaminant gas concentration was obvious.

Key words: humidity; cross diffusion; temperature; mass grads

建筑室内气体组分和颗粒组分是产生气味、尘埃和微生物污染的基础,但由于气体组分在扩散特性方面与颗粒组分存在显著差异,使得气体污染物不仅在很大程度上决定了空气的新鲜度,而且还对人员区实际获得的新风品质产生显著影响;因此,控制气体污染物成为研究的重点与难点^[1-3]。

气体污染物在扩散传递过程中受到多物理场(温度场、湿度场和自身浓度场)的影响,其扩散迁移特性不仅与自身的浓度分布有关,还受到温度、湿度

等分布特性的影响^[4-5];出现这种影响的原因在于多物理场的共存不仅使气体组分存在自扩散,而且还会受到交叉扩散的影响^[6-8];因此,正确认识和理解建筑室内交叉扩散的特征与水平是有效控制气体污染物的重要前提之一。湿度是室内空气环境的重要控制参数之一,而已有的研究主要集中在不同湿度条件下热与组分的扩散特征上^[9-15],对湿度与室内交叉扩散作用之间的影响关系还需进一步研究。该文基于不可逆热力学分析,着重研究了湿度分布特

收稿日期:2009-01-07

作者简介:王军(1983-),男,博士研究生,主要从事建筑新风量与污染物扩散机理研究,(E-mail) wangjun_tongji@126.com。

性对交叉扩散的作用机制与影响特征,为合理控制室内湿度提供理论指导。

1 交叉扩散传递关系的建立

在非平衡热力学系统中进行的不可逆过程,热力学流与热力学力之间存在以下关系:

$$J_i = \sum_j \left(\frac{\partial J_i}{\partial X_j}\right)_0 X_j + \frac{1}{2} \sum_{j,k} \left(\frac{\partial^2 J_i}{\partial X_j \partial X_k}\right)_0 X_j X_k + \dots \quad (1)$$

在线性非平衡区,忽略高次项可以得到:

$$J_i = \sum_{j=1}^n L_{ij} X_j \quad (2)$$

其中,唯象系数 $L_{ij} = \left(\frac{\partial J_i}{\partial X_j}\right)_0$ (3)

根据 n 组元向 $(n-1)$ 组元的变换关系,写出相应的热力学力的形式为:

$$X_q = -\nabla\left(\frac{1}{T}\right) \quad (4)$$

$$X_i = -\sum_{j=1}^{n-1} A_{ij} \nabla\left(\frac{\mu_j}{T}\right) \quad (5)$$

其中,

$$A_{kj} = \delta_{kj} + \frac{\varphi_j}{\varphi_n}, i, j, k = 1, 2, \dots, n-1 \quad (6)$$

式中: T 为绝对温度; μ_j 为化学势; φ_j 为 j 组元的质量百分数。

因此,可以写出相应的熵产率表示为:

$$\sigma = -J_q \nabla\left(\frac{1}{T}\right) - \sum_{i=1}^{n-1} J_i A_{ij} \nabla\left(\frac{\mu_j}{T}\right) \quad (7)$$

从而相应的线性唯象方程为:

$$J_q = L_{tt} \nabla\left(\frac{1}{T}\right) + \sum_{j,k=1}^{n-1} L_{tk} [-A_{kj} \nabla\left(\frac{\mu_j}{T}\right)] \quad (8)$$

$$J_i = L_{it} \nabla\left(\frac{1}{T}\right) + \sum_{j,k=1}^{n-1} L_{ik} [-A_{kj} \nabla\left(\frac{\mu_j}{T}\right)] \quad (9)$$

式(8)和(9)中所对应的 Onsager 倒易关系为:

$$L_{it} = L_{ti} \quad (10)$$

$$L_{ik} = L_{ki} \quad (11)$$

根据居里原理可知,建筑空间热、水蒸气组分和污染气体组分扩散传递过程中所对应的热力学力存在交叉效应,在不考虑其他热力学力的前提下,可以得到相应的扩散流分别为:

$$J_q = L_{ct} X_c + L_{ht} X_h + L_{tt} X_t \quad (12)$$

$$J_h = L_{ch} X_c + L_{hh} X_h + L_{ht} X_t \quad (13)$$

$$J_c = L_{cc} X_c + L_{ch} X_h + L_{ct} X_t \quad (14)$$

根据式(4)和(5),可以得到式(12)、(13)和(14)中各个热力学力的形式为:

$$X_t = -\frac{1}{T^2} \nabla T \quad (15)$$

$$X_h = -\left[\frac{A_{hh}}{T} \left(\frac{\partial \mu_h}{\partial c}\right)_{p,T,h} + \frac{A_{hc}}{T} \left(\frac{\partial \mu_c}{\partial c}\right)_{p,T,h}\right] \nabla c - \left[\frac{A_{hh}}{T} \left(\frac{\partial \mu_h}{\partial h}\right)_{p,T,c} + \frac{A_{hc}}{T} \left(\frac{\partial \mu_c}{\partial h}\right)_{p,T,c}\right] \nabla h \quad (16)$$

$$X_c = -\left[\frac{A_{cc}}{T} \left(\frac{\partial \mu_c}{\partial h}\right)_{p,T,c} + \frac{A_{ch}}{T} \left(\frac{\partial \mu_h}{\partial h}\right)_{p,T,c}\right] \nabla h - \left[\frac{A_{cc}}{T} \left(\frac{\partial \mu_c}{\partial c}\right)_{p,T,h} + \frac{A_{ch}}{T} \left(\frac{\partial \mu_h}{\partial c}\right)_{p,T,h}\right] \nabla c \quad (17)$$

式中: h, c 分别为水蒸气组分和污染气体组分的质量分数。

为了取代式(12)、(13)和(14)中的唯象系数,引入以下系数:

$$\lambda = \frac{L_{tt}}{T^2} \quad (18)$$

$$D_{th} = \frac{L_{ht}}{\rho(1-c-h)hT^2} \quad (19)$$

$$D_{tc} = \frac{L_{ct}}{\rho(1-c-h)cT^2} \quad (20)$$

$$D_{hh} = \frac{1}{\rho(1-c-h)T} \left\{ \begin{aligned} & [L_{ch}(1-h) + L_{hh}c] \\ & \left(\frac{\partial \mu_c}{\partial h}\right)_{p,T,c} + [L_{ch}h + L_{hh}(1-c)] \left(\frac{\partial \mu_h}{\partial h}\right)_{p,T,c} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

$$D_{cc} = \frac{1}{\rho(1-c-h)T} \left\{ \begin{aligned} & [L_{cc}(1-h) + L_{ch}c] \\ & \left(\frac{\partial \mu_c}{\partial c}\right)_{p,T,h} + [L_{cc}h + L_{ch}(1-c)] \left(\frac{\partial \mu_h}{\partial c}\right)_{p,T,h} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

$$D_{ht} = \frac{1}{\rho(1-c-h)cT^2} \left\{ \begin{aligned} & [L_{ct}(1-h) + L_{ht}c] \\ & \left(\frac{\partial \mu_c}{\partial h}\right)_{p,T,c} + [L_{ct}h + L_{ht}(1-c)] \left(\frac{\partial \mu_h}{\partial h}\right)_{p,T,c} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

$$D_{ct} = \frac{1}{\rho(1-c-h)hT^2} \left\{ \begin{aligned} & [L_{ct}(1-h) + L_{ht}c] \\ & \left(\frac{\partial \mu_c}{\partial c}\right)_{p,T,h} + [L_{ct}h + L_{ht}(1-c)] \left(\frac{\partial \mu_h}{\partial c}\right)_{p,T,h} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

$$D_{ch} = \frac{1}{\rho(1-c-h)hT^2} \left\{ \begin{aligned} & [L_{ch}(1-h) + L_{hh}c] \\ & \left(\frac{\partial \mu_c}{\partial c}\right)_{p,T,h} + [L_{ch}h + L_{hh}(1-c)] \left(\frac{\partial \mu_h}{\partial c}\right)_{p,T,h} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

$$D_{hc} = \frac{1}{\rho(1-c-h)cT^2} \left\{ \begin{array}{l} [L_{cc}(1-h) + L_{ch}c] \\ (\frac{\partial \mu_c}{\partial h})_{p,T,c} + [L_{cc}h + \\ L_{ch}(1-c)] (\frac{\partial \mu_h}{\partial h})_{p,T,c} \end{array} \right\} \quad (26)$$

式中: λ 为气体导热系数; D_{hh} 和 D_{cc} 分别为等温扩散过程中水蒸气组分扩散系数和污染气体组分扩散系数; D_{th} 和 D_{tc} 分别为温度梯度引起的水蒸气组分扩散系数和污染气体组分扩散系数; D_{ht} 和 D_{ct} 分别为水蒸气组分梯度引起的热扩散系数和污染气体组分梯度引起的热扩散系数; D_{ch} 和 D_{hc} 分别为污染气体组分梯度引起的水蒸气组分扩散系数和水蒸气组分梯度引起的污染气体组分扩散系数。

将上述系数带入式(12)、(13)和(14)可以得到:

$$J_q = -\rho h T D_{ct} \nabla c - \rho c T D_{ht} \nabla h - \lambda \nabla T \quad (27)$$

$$J_h = -\rho h T D_{ch} \nabla c - \rho D_{hh} \nabla h - \rho(1-c-h) h D_{th} \nabla T \quad (28)$$

$$J_c = -\rho D_{cc} \nabla c - \rho c T D_{hc} \nabla h - \rho(1-c-h) c D_{tc} \nabla T \quad (29)$$

因此,建筑空间传递过程中包含交叉扩散效应的传递关系得以建立。

2 湿度分布特性对交叉扩散水平的影响

房间湿度分布特性对交叉扩散传递过程的影响在于,一方面由湿度梯度引起扩散附加热效应,在扩散附加热效应的作用下会形成温度梯度,而由温度梯度又产生与扩散附加热效应相反方向的扩散热流;另一方面由湿度梯度还会引起污染气体组分产生扩散附加质扩散效应,在扩散附加质扩散效应的作用下会形成污染气体浓度梯度,而由污染气体浓度梯度又产生与扩散附加质扩散效应相反方向的质扩散;当扩散热效应与相反方向的扩散热流达到平衡时,扩散附加质扩散效应与相反方向的质扩散达到平衡时,整个热力系统处于定态。因此,为了分析室内湿度分布特性的影响作用,引入以下交叉扩散系数:

$$\text{Dufour 系数: } Du_{ht} = \frac{D_{ht}}{\lambda} \quad (30)$$

$$\text{Dufour 系数: } Du_{ct} = \frac{D_{ct}}{\lambda} \quad (31)$$

$$\text{Hertz 系数: } G_{hc} = \frac{D_{hc}}{D_{cc}} \quad (32)$$

$$\text{Soret 系数: } S_{tc} = \frac{D_{tc}}{D_{cc}} \quad (33)$$

同时,根据定态特征有:

$$J_q = 0 \quad (34)$$

$$J_c = 0 \quad (35)$$

从而,由式(27)和(29)可以得到:

$$\rho h T D_{ct} \nabla c + \rho c T D_{ht} \nabla h + \nabla T = 0 \quad (36)$$

$$\nabla c + c T G_{hc} \nabla h + (1-c-h) c S_{tc} \nabla T = 0 \quad (37)$$

由于式(36)和(37)中的 ∇T 和 ∇c 是基于 ∇h 而形成,因此,式(36)中左边第 1 项和式(37)左边第 3 项与其他项相比是小量,可忽略,从而可以得到:

$$\nabla T = -\rho c T D_{ht} \nabla h \quad (38)$$

$$\nabla c = -c T G_{hc} \nabla h \quad (39)$$

基于室内温度的实际波动范围以及以二氧化碳为代表的污染气体浓度所引起的危害程度考虑,确定室内的初始温度水平和污染气体浓度水平分别按照 3 种情形考虑,如表 1 所示。

表 1 初始温度水平和污染气体浓度水平

工况	初始温度水平 $T/^\circ\text{C}$	初始污染气体组分质量分数 $c/\%$
1	20	0.048
2	26	0.048
3	30	0.048
4	26	0.152
5	26	0.228
6	26	0.303

图 1 和图 2 针对表 1 所列的 6 种情形分别给出了湿度分布特性对交叉扩散作用下温度分布和污染气体组分分布的影响。在图 1 中,当 ∇h 大于零时,若 Du_{ht} 大于零,扩散热流的方向与 ∇h 相反,则形成的温度梯度 ∇T 小于零;若 Du_{ht} 小于零,则扩散热流的方向与 ∇h 相同,从而形成的温度梯度 ∇T 大于零。对于 ∇h 小于零的情况,根据 Du_{ht} 的正负,可以推知 ∇T 的正负恰与 ∇h 大于零时的结果相反。另一方面,扩散附加热效应形成的 ∇T 会产生自扩散,与扩散附加热扩散方向相反,当过程进行的时间达到特征时间以后,自扩散与扩散附加热扩散达到平衡,系统表现为定态。

同时,由图 1 可以发现,在相同的湿度梯度和扩散附加热扩散作用下,初始温度水平越高,扩散附加热效应形成的 ∇T 的绝对值越大。并且,当初始温度提高 15%, ∇T 的绝对值提高约 1.3%;当初始温度提高 30%, ∇T 的绝对值提高约 2%;当初始温度提高 50%, ∇T 的绝对值提高约 3.4%。由此说明,初始温度水平与扩散附加热效应形成的 ∇T 的绝对值正相关,但值得指出的是初始温度影响的显著性却是有限的。

在图 2 中,当 ∇h 小于零时,若 G_{hc} 大于零,污染气体组分扩散流的方向与 ∇h 相反,所形成的 ∇c 大于零;若 G_{hc} 小于零,则污染气体组分扩散流的方向与 ∇h 相同,则形成的 ∇c 小于零。对于 ∇h 大于零的情况,根据 G_{hc} 的正负,可以推知 ∇c 的正负

恰与 ∇h 小于零时的结果相反。同时,扩散附加质扩散效应形成的 ∇c 会产生自扩散,与扩散附加质扩散方向相反,当过程进行的时间达到特征时间以后,自扩散与扩散附加质扩散达到平衡,系统表现为定态。

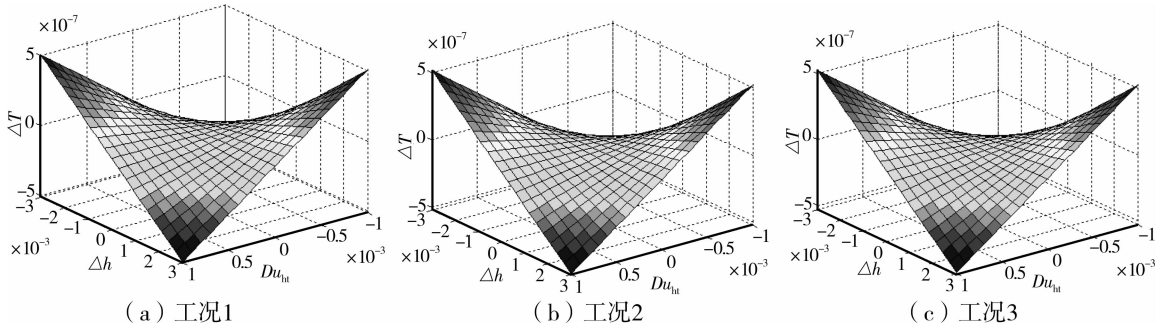


图 1 交叉扩散作用下湿度对温度分布的影响

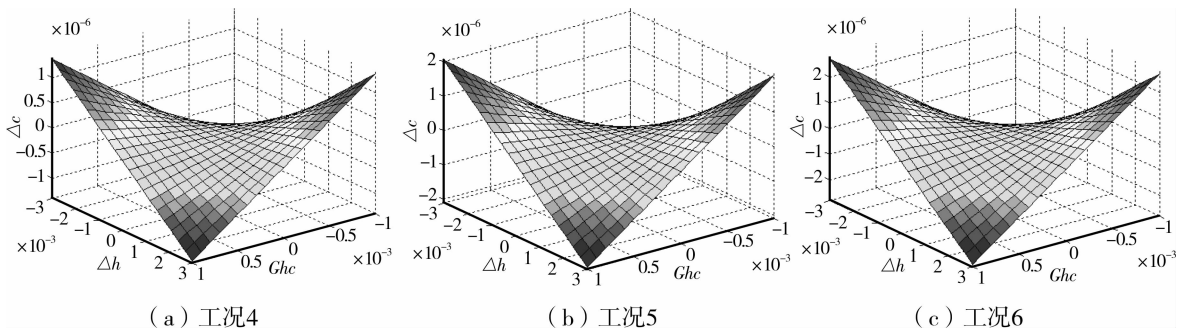


图 2 交叉扩散作用下湿度对污染气体分布的影响

此外,由图 2 可以看到,在相同的湿度梯度和扩散附加质扩散作用下,初始污染气体浓度水平越高,扩散附加质扩散效应所形成的 ∇c 的绝对值越大。具体而言,当初始污染气体浓度提高 30%, ∇c 的绝对值提高约 30%;当初始污染气体浓度提高 50%, ∇c 的绝对值提高约 50%;当初始污染气体浓度提高 99%, ∇c 的绝对值提高约 99%。由此说明,初始污染气体浓度水平与扩散附加质扩散效应所形成的 ∇c 的绝对值也是正相关,并且,初始污染气体浓度水平的影响具有显著性。

3 结 论

该文在对建筑室内湿度分布特性对交叉扩散水平和特征的影响分析基础上,得到以下主要结论:

- 1) 基于不可逆热力学分析,建立了建筑室内湿度分布特性对交叉扩散水平与特征的影响关系式。
- 2) 当湿度梯度和扩散附加扩散系数正负相同时,所形成的温度梯度和污染气体组分梯度小于零,反之则所形成的温度梯度和污染气体组分梯度大于零。

3) 在相同的湿度梯度和扩散附加热效应作用下,室内初始温度越高所形成的温度梯度的绝对值越大,但初始温度的影响却是有限的。

4) 在相同的湿度梯度和扩散附加质扩散效应作用下,室内初始污染气体浓度越高所形成的污染气体组分梯度的绝对值越大,并且初始污染气体浓度的影响具有显著性。

参考文献:

[1] YU B F, HU Z B. Review of research on air-conditioning systems and indoor air quality control for human health [J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 3 (2):3-20.

[2] TRICIA KENNY. A preliminary survey of household and personal carbon dioxide emissions in Ireland[J]. Environment International, 2009, 35(2):259-272.

[3] STRANGER M. Characterization of indoor air quality in primary schools in Antwerp, Belgium[J]. Indoor Air, 2008, 18(6):454-463.

[4] JOSE A OROSA, BAALINA A. Improving PAQ and

- comfort conditions in Spanish office buildings with passive climate control[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(3):502-508.
- [5] PEDER WOLKOFF. Impact of air velocity, temperature, humidity, and air on long-term VOC emissions from building products [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, 32(14):2659-2668.
- [6] GANT S E, KELSEY A. Factors influencing the indoor transport of contaminants and modeling implications[R]. Health & Safety Laboratory, 2006.
- [7] KEMPERS L J T M. A comprehensive thermodynamic theory of the cross-effect in isothermal diffusion in a multicomponent gas, liquid or solid [J]. *Journal of Chemical Physics*, 2001, 115(14):6342-6350.
- [8] LHOST O, PLATTEN J K. Large-scale convection induced by solet effect[J]. *Physical Review A*, 1989, 40(11):6415-6418.
- [9] ILYA I, RYZHKOV. On the cross-diffusion and solet effect in multicomponent mixtures [J]. *Microgravity Sci Technol*, 2008, 10:1007.
- [10] PEDER WOLKOFF, SOREN K. The dichotomy of relative humidity on indoor air quality[J]. *Environment International*, 2007, 33(6):850-857.
- [11] TARGO KALAMEES, MINNA KORPI, et al. The effects of ventilation systems and building fabric on the stability of indoor temperature and humidity in Finnish detached houses[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(8):1643-1650.
- [12] WU CHENG CHIH, GRACE W M, et al. Fluence of air humidity and the distance from the source on negative air ion concentration in indoor air[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 370(1):245-253.
- [13] JORGENSEN R B. Sorption of VOCs on material surfaces as the deciding factor when choosing a ventilation strategy [J]. *Building and Environment*, 2007, 42(5):1913-1920.
- [14] LIN CHI CHI, YU KUO PIN, et al. Evaluation of impact factors on VOC emissions and concentrations from wooden flooring based on chamber tests [J]. *Building and Environment*, 2009, 44(3):525-533.
- [15] SEO JANGHOO, SHINSUKE KATO, et al. Performance test for evaluating the reduction of VOCs in rooms and evaluating the lifetime of sorptive building materials[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(1):207-215.

(编辑 胡 玲)

(上接第 65 页)

- [12] MEHRAN KHOSHBAKHT, MARKW LIN, JUSTIN B BERMAN. Analysis of moisture-induced stresses in an FRP composites reinforced masonry structure [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2006, 42: 414-429.
- [13] 朱岳明,刘有志,曹为民,等. 混凝土湿度和干缩变形及应力特性的细观模型分析[J]. *水利学报*, 2006, 36(10): 1163-1168.
- ZHU YUE-MING, LIU YOU-ZHI, CAO WEI-MIN, et al. Analysis of concrete moisture dry shrinkage and stress based on mesoscopical model[J]. *ShuiLi XueBao*, 2006, 36(10):1163-1168.
- [14] JIN-KEUN KIM, CHIL-SUNG LEE. Moisture diffusion of concrete considering self-desiccation at early ages[J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29:1921-1927.
- [15] 许华胜,蒋正武. 高性能混凝土中自身相对湿度变化与自收缩的研究[J]. *重庆建筑大学学报*, 2004 26(2): 121-125.
- XU HUA-SHENG, JIANG ZHENG-WU. Study on autogenous relative humidity change and autogenous shrinkage of high-performance concrete [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2004, 26(2):121-125.

(编辑 胡 玲)