

墙体传热对流辐射比例的特性研究

陈剑昌, 黄晨, 吕留根, 李丽, 白天宇
(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 利用实验室墙体内壁敷设电热膜模拟实际墙体传热, 通过表面热流计获得该壁面的总传热量, 通过有效辐射计算方法和热平衡方法获得墙体净辐射热量和对流换热量, 由此达到对流热量和辐射热量分离的目的。论文通过实验结果探讨墙体传热中对流辐射分离比例与墙体传热量、房间换气次数以及传热墙体附近气流形式的关联。结果表明: 对流辐射分离中, 对流比例受墙体传热量和换气次数的影响不大; 受传热墙体附近气流形式影响很大, 送风口下墙体传热量中对流比例远大于回风口下墙体传热量中的对流比例。

关键词: 墙体传热; 对流辐射分离; 有效辐射; 电热膜

中图分类号: TP392

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)02-0166-03

study on characteristics of convective and radiative ratios of heat transfer on wall

CHEN Jianchang, HUANG Chen, LÜ Liugen, LI Li, BAI Tianyu

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The paper used electric-thermal films in the wall body of building to simulate heat conduction of actual wall, and gained the total heat by heat flow meter on the inner surface of the laboratory walls. gains through the wall was measured. The net radiative heat gains and convective heat gains were calculated by effective radiative method and heat balance method. It discussed the associations of the split ratio of convective heat and radiative heat amount through the wall, ventilation rates of laboratory and the airflow pattern near wall. Results indicated that among the separation of convection radiation, the convection rates were little affect by amount of heat transfer and ventilation times, whereas the airflow pattern greatly influenced the the convection rates. The convection ratios of the wall under the air supply outlet were far higher than that of wall body under air return outlet.

Key words: heat transfer by wall; split of convection and radiation; effective radiation; electrothermal film

1 研究背景

围护结构传热负荷是建筑空调负荷计算的重要内容, 墙体传热量可分为对流部分和辐射部分, 其中对流部分立即转化为负荷, 辐射部分被室内其他壁面或家具吸收, 温度升高, 再逐步释放到空气中。我国现在通用的两种负荷计算方法为谐波反应法和冷负荷系数法。在谐波反应法中, 对流辐射按 4: 6 分离^[1], 并且根据工程需要制得负荷温差表; ASHRAE 推荐的辐射时间序列法^[2]中, 关键一步也是将各种热量分为对流部分和辐射部分, 其中墙体传热量中对流

辐射按 0.37: 0.63 分离^[3]。这两种方法都没有考虑壁面传热量、房间换气次数以及墙体附近气流形式的影响, 实际应用中用固定的比例分离对流辐射量会引起一定误差, 虽然 ASHRAE 在推荐该方法时也提到了这个问题, 但是并没有进一步给出解决的方案。因此, 墙体传热量在不同情况下的对流辐射分离比例是值得研究的。陈友明等^[4]研究外壁面对流换热系数、张文武^[5]研究城市不透水外表面对流换热系数时, 都通过测量日射净辐射量和导热系数, 由热平衡方程得到对流热量, 其目的在于得到外壁面对流换热量, 该方法针对短波日射辐射研究了外壁面的对流放热系数,

收稿日期: 2014-08-19; 修回日期: 2014-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278302); 沪江基金项目(D14003)

作者简介: 陈剑昌(1989-), 男, 江苏苏州人, 在读硕士研究生, 研究方向: 大空间分层空调负荷计算。

通讯作者: 黄晨(1958-), 女, 上海市人, 博士, 教授, 研究方向: 大空间建筑室内环境及空调设计研究。

未探讨外壁面对流辐射比例在不同条件下的变化,且与室内壁面长波辐射换热有所不同。Francesco Causone 等^[6]在研究屋顶辐射空调墙面换热系数时,以辐射顶板中热水(冷水)散热(得热)为总热量,用壁温计算辐射热量,以热平衡方程得到对流热量,达到对流辐射分离的目的,进而探讨辐射顶板与房间基准温度的选择对总换热系数的影响。本文将探讨墙体传热量中对流辐射分离比例与墙体传热量、房间换气次数以及传热墙体附近气流形式的关系,为围护结构传热负荷的计算提供更为可靠的依据。

2 实验原理及方案

2.1 对流辐射分离原理

建筑外墙通过内表面向室内传递的热量分为向室内空气传递的对流热量和向室内其他表面传递的辐射热量两部分。其中的对流热量直接成为瞬时负荷;而辐射热量被其他壁面吸收再以对流形式传递

$$\begin{pmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \\ \vdots \\ J_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{1,1} - \frac{1}{1 - \varepsilon_1} & X_{1,2} & X_{1,3} & \cdots & X_{1,n} \\ X_{2,1} & X_{2,2} - \frac{1}{1 - \varepsilon_2} & X_{2,3} & \cdots & X_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n,1} & X_{n,2} & X_{n,3} & \cdots & X_{n,n} - \frac{1}{1 - \varepsilon_n} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 - 1} \sigma_b T_1^4 \\ \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_2 - 1} \sigma_b T_2^4 \\ \vdots \\ \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_n - 1} \sigma_b T_n^4 \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中: J 为有效辐射, W/m^2 ; $X_{i,j}$ 为表面 i 对表面 j 的角系数; ε_i 为 i 壁面发射率; σ_b 为黑体辐射常数,其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_j 为 j 表面温度; E_b 为黑体辐射, W/m^2 ; n 为实验房计算壁面数。那么 i 面的净辐射热量为

$$q_r = \sum_{j=1}^n \frac{\varepsilon_j}{1 - \varepsilon_j} (E_{bj} - J_j) \quad (4)$$

则辐射和对流所占比例分别为

$$K_r = \left| \frac{q_r}{q_\lambda} \right| \quad (5)$$

$$K_c = 1 - K_r \quad (6)$$

式中: K_r 为辐射热量占总传热量的比例; K_c 为对流热量占总传热量的比例。

2.2 实验对象及测点布置

研究用实验环境室为 $2.5 \text{ m} \times 2.1 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$, 6个面满布电热膜, 实验时只加热一个面, 造成高温面, 模拟实际中的外墙传热, 电热膜是远红外碳纤维面状发热板, 额定功率为 $(230 \pm 20) \text{ W}/\text{m}^2$ 。实验室气流组织为上送上回形式。实验室采用 100 mm 厚聚氨酯保温库板制作, 保温材料的传热系数约为 0.2

到空气中, 这部分辐射热量经过延迟和衰减成为辐射负荷。房间总负荷应为对流负荷与辐射负荷之和。因此, 获得正确的对流辐射分离比例对负荷计算至关重要。

建筑内壁面是一种导热、对流和辐射共存的复合换热过程, 其瞬时热平衡式为:

$$q_c + q_r + q_\lambda = 0 \quad (1)$$

式中: q_c 为对流换热量, W/m^2 ; q_r 为净辐射换热量, W/m^2 ; q_λ 为墙体传热量, W/m^2 。

墙体传热量 q_λ 可用热流密度计测得, 壁面净辐射热量 q_r 可由壁面温度用有效辐射^[7] 方法计算而得。由(1)式便可求得壁面对流热量 q_c 。由此便可达到对流辐射分离的目的。有效辐射计算的公式为:

$$\sum_{i=1}^n J_i X_{i,j} - \frac{J_j}{1 - \varepsilon_j} = \left[\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_j - 1} \right] \sigma_b T_j^4 \quad (2)$$

则各个壁面有效辐射计算为:

W/m^2 。实验时测量壁面温度和壁面热流密度。

经前期相关预实验研究, 确定布点位置如图1所示, 在加热墙上, 热流计紧密贴在每片电热膜中间位置, 壁面电热膜以及电热膜接缝带处均布有壁面温度测点, 通过其各测点均值代表加热面向室内传递的热量, 在非加热墙上, 热流计贴在中间如图1所示, 两边对称布置两个温度计。在分析回风口下墙面传热时, 南北墙的布点位置对调。

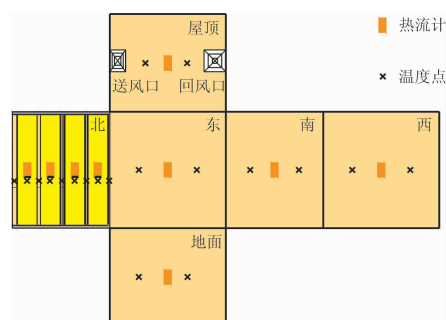


图1 实验室布点展开图

2.3 实验方法

按图1测点布置实验用到的测试仪器有热流密

度计和温度计等。热流计为建通 JTNT - C 多通道温度热流测试仪。JTNT - C 可同时测量热流密度和温度,热流量程为 $0 \sim 2 \text{ kW/m}^2$,分辨率为 0.1 W/m^2 ;温度量程为 $-20 \sim 85^\circ\text{C}$,分辨率为 0.1°C 。

实验通过调节电热膜输入功率、改变室内换气次数以及更换加热面,以研究对流辐射分离比例受墙体传热量、房间换气次数和传热墙体附近气流形式的影响,实验工况可见表 2,其中北面墙位于送风口下,南面墙位于回风口下。在研究北面墙传热时,电热膜只开启北面墙作为高温面;在研究南面墙传热时,电热膜只开启南面墙作为高温面。利用公式(4)计算得到净辐射量 q_r ,计算时壁面发射率 ε 按预实验测量数据取 0.93。实验时开启电热膜和空调机组。JTNT - C 记录实时热流密度和温度。

3 实验结果与分析

实验壁面加热功率、总传热量、对流所占比例和对流辐射分离比例等实验结果汇总于表 1 中。

表 1 工况和对流辐射分离比例						
加热面	工 况	加热功 率/W	传热量/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	换气次数/ ($\text{次} \cdot \text{h}^{-1}$)	对流比例 $K_c/\%$	对流: 辐射
北 (送风 口下)	1	400	82.80	27.66	71.44	0.71: 0.29
	2	800	158.98	27.66	71.18	0.71: 0.29
	3	800	160.10	34.44	72.52	0.73: 0.27
	4	800	167.84	41.30	74.85	0.75: 0.25
	5	1200	215.12	27.66	63.38	0.63: 0.37
	6	540	100.22	34.06	43.25	0.43: 0.57
南 (回风 口下)	7	240	45.38	34.06	39.28	0.39: 0.61
	8	450	82.64	25.45	39.87	0.40: 0.60
	9	450	83.67	34.06	40.08	0.40: 0.60
	10	450	83.27	47.54	41.87	0.42: 0.58
文献[1]					40	0.40: 0.60
文献[3]					37	0.37: 0.63

3.1 对流比例随墙体传热量变化的特性

对比工况 1、2、5,保持换气次数不变,改变北墙面加热功率发现,从传热量 82.8 W/m^2 增加到 215.12 W/m^2 时,对流比例平均减少 0.06% ,有减小趋势。对比南墙面在换气次数仍保持不变,在改变加热功率后,传热量从 45.38 W/m^2 增加到 100.22 W/m^2 时,对流比例有所增加,平均增加 0.07% 。变化趋势如图 2 所示。实验结果表明,对流比例随墙体传热量的改变没有明显变化。这是由于墙体传热量增加,壁面温度上升,对流换热量和辐射换热量同时增加,但并不能判断哪个占主导性地位。

3.2 对流比例随换气次数变化的特性

对比北墙加热面时的工况 2、3、4,保持北面墙加热功率不变,在传热量相近的条件下,对流比例随换气次数的增加略有增加,平均增加 0.27% 。对比更换为南墙加热面后的工况 8、9、10,保持南面墙加热功率不变,在传热量相近的条件下,对流比例随换气次数的增加规律与北墙加热面时相同,均有所增加,但平均增加 0.08% ,略小,南北墙在换气次数变化时平均增加 0.18% ,且送风口附近的北墙对流比例系数增加略大。变化趋势如图 3 所示。实验结果表明,对流比例随换气次数的增加略有增加。这是由于换气次数增加,室内扰动更大,空气与壁面的对流换热增强。且北墙在送风口下,换气次数对对流比例的影响就更大。

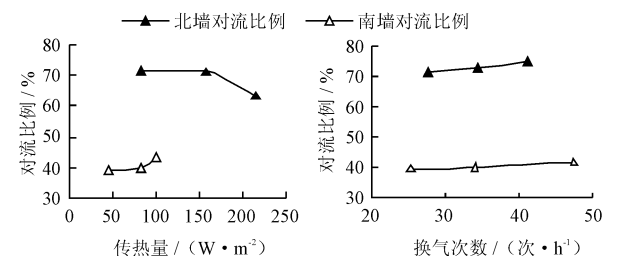


图 2 对流比例随单位面积传热量变化趋势 图 3 对流比例随换气次数变化趋势

3.3 对流比例随加热面气流形式变化的特性

不同加热面因受其表面气流形式的不同,其对流占比也有所不同,加热送风附近的北面墙,其对流比例为 $63\% \sim 75\%$,平均 70.67% ;加热回风附近的南面墙,其对流比例为 $41\% \sim 45\%$,平均 40.87% ,如图 4 所示。

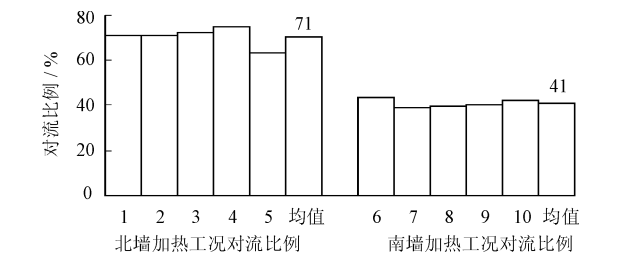


图 4 不同加热墙的对流比例

实验结果表明,对流比例在加热面所处的气流形式不同,其值相差较大,靠近送风口的对流比例要远大于靠近回风口的对流比例,相差近 30% ,这主要是送风口附近的风速较大,增加了加热面的对流换热量。

子系统进行分别和综合评价,最终得出复合评价结果表明:深溪沟水电站的环境影响处于第 2 级(有较不利影响),并偏向于第 3 等级(无影响)。

(3)由于调查研究及资料收集方面的不完善,指标的罗列存在一定不完备性,建议在后续的研究中能够用充分的数据及更为客观的方法计算特征值。

参考文献:

[1] 郑艳红,付海峰.水电开发项目环境影响后评价及评价指标初探[J].水力发电,2009,35(10):61-63.

[2] 陈昂,隋欣,王东胜.国外水库大坝工程环境影响后评价及对我国的启示[J].中国水能及电气化,2010(12):26-31.

[3] 史云鹏,陈凯麒,包洪福.对水电工程环境影响后评价的思考[J].人民长江,2013,44(15):90-93.

[4] 刘华.水电工程项目环境影响后评价探讨[J].科教文汇(上半月),2006(11):112-113.

[5] 王勇智.我国海洋工程海洋环境影响后评价指标体系的研究[D].青岛:中国海洋大学,2010.

[6] Branis M, Christopoulos S. Mandated monitoring of post-projects impacts in the Czech EIA[J]. Environmental Im-

pact Assessment Review, 2005,25(3):227-238.

[7] Anbari F T, Carayannis E G, Voetsch R J. Post-project reviews as a key project management competence[J]. Technovation, 2008, 28(10):633-643.

[8] 中华人民共和国主席令. 中华人民共和国环境影响评价法[M]. 北京:法律出版社,2002.

[9] 中华人民共和国水利部. 水利建设项目后评价管理办法(试行)[EB/OL]. [2012-03-09][2014-11-20] <http://ghjh.mwr.gov.cn/zdzt/slgcxmhpj/slgcxmhpjgzdd/201203/P020120309496656565146.pdf>.

[10] 陈若缙. 水坝工程环境影响后评价与环境资源价值损失核算[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2006.

[11] 蒋固政,马经安,李红清. 水工程环境影响后评价探讨[J]. 水资源保护,2011,27(5):17-20.

[12] 盛松涛,李星,张贵金. 水利水电工程环境影响综合评价方法研究[J]. 人民黄河,2012,34(10):110-113.

[13] 张虎成,闫海鱼,邱兴春. 关于我国水电梯级开发环境影响后评价的思考[J]. 水力发电,2013,39(7):1-3.

[14] 史云鹏,陈凯麒,包洪福. 水电工程环境影响后评价指标体系研究[J]. 中国农村水利水电,2013(5):161-163+167.



(上接第 168 页)

4 结 语

墙体传热量中对流比例受传热墙附近的气流形式影响最大,在论文实验工况范围内,送风口附近墙体对流比例与回风口附近对流比例分别为 70.67% 和 40.87%,前者比后者大近 30%。墙体传热量大小对流比例的影响极小,在送风口下墙体和回风口下墙体处的影响其绝对值均小于 0.07。换气次数对对流比例的影响也较小,平均只有 0.18%。为此,在计算墙体传热量中对流辐射分离比例时,需要具体分析墙体附近气流状态,选择合适的对流辐射分离比例,用固定的比例可能会引起较大误差,在本文工况下的北墙对流辐射比例约为 0.71:0.29,南墙对流辐射比例约为 0.41:0.59,如用文献[1]中的对流辐射 0.4:0.6 分离的话,在北墙所引起的误差最大可达到 30%,在南墙引起的误差较小。因此在实际负荷计算中,若近壁面风速不大,则可以用文献[1]比例;若近壁面风速较大,则应适当增加对流比例。而对流辐射分离比例与近壁面风速的关系还需更进一步研究,以便在今后的负荷计算中,根据具体

情况选取更合适的对流比例。

参考文献:

[1] 赵荣义,范存养,薛殿华,等. 空气调节[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.

[2] Spitler J D, Fisher D E, Pedersen C O. The radiant time series cooling load calculation procedure [J]. ASHRAE Transactions, 1997, 103(2):503-515.

[3] ASHRAE. ASHRAE handbook - 2005 Fundamentals[M]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers,2005.

[4] 张 玲,汤广发,陈友明,等. 一种测定建筑墙体外表面换热系数的实验方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2001,28(3):102-107.

[5] 张文武. 城市不透水表面对流换热系数的实测和模拟研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.

[6] Causone F, Corgnati S P, Filippi M, et al. Experimental evaluation of heat transfer coefficients between radiant ceiling and room [J]. Energy and Buildings, 2009, 41(6):622-628.

[7] 章熙民,任泽霁,梅飞鸣. 传热学[M]. (第五版)北京:中国建筑工业出版社,2007.