

高温热源工业建筑室内辐射热在各壁面分布研究

王 怡^{1,2}, 王宇琨^{1,2}, 孟晓静^{1,3}

(1. 西安建筑科技大学 西部绿色建筑国家重点实验室, 陕西 西安 710055;

2. 西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院, 陕西 西安 710055; 3. 西安建筑科技大学 资源工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 针对高温热源工业建筑室内辐射热在各壁面分布情况, 采用有效辐射法, 通过理论分析, 结合 MATLAB 进行数值计算, 分别研究了围护结构内表面温度、角系数以及热源发射率对室内辐射热在各壁面分布的影响。结果发现: 围护结构内表温度对各壁面的净辐射得热强度和净辐射热分配比例的影响可以忽略; 壁面净辐射得热强度、净辐射热分配比例分别与该壁面对热源面的角系数、热源面对该壁面的角系数成正比; 壁面净辐射得热强度与热源发射率成正比, 净辐射热分配比例与热源发射率无关。

关键词: 高温热源; 工业建筑; 净辐射得热; 辐射热分布

中图分类号: TU111.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)02-0302-07

Indoor radiant heat distribution on the walls of industrial building with high temperature heat sources

WANG Yi^{1,2}, WANG Yukun^{1,2}, MENG Xiaojing^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

3. School of Resources Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: This paper investigates the distribution of radiation in an industrial building with high temperature heat sources. Theoretical analysis and MATLAB calculation are carried out. The effects of inner surface temperature, angle factor and emissivity on the distribution of indoor thermal radiation were studied. Results showed that. The influence of inner surface temperature on the net radiant heat intensity and net radiant heat distribution ratio of each wall can be ignored; The net radiant heat intensity of the wall is proportional to the angular coefficient of the wall to the heat source, and the net radiant heat distribution ratio of each wall is proportional to the angular coefficient of the heat source to the wall. The net radiant heat intensity on the wall is proportional to the emissivity of the heat source, and the net radiant heat distribution ratio of each wall is independent of the emissivity of the heat source.

Key words: high temperature heat source; industrial building; net radiation heat gain; radiant heat distribution

工业建筑由于工艺的要求, 室内常常存在高温热源。高温热源会向室内散发大量的辐射热, 对于负荷和室内热环境都产生较大影响。

在计算空调负荷时, 一般将热源的所有散热量都认为是以对流的形式散发到室内^[1], Cheng-chu Yan^[1]在研究中指出, 当室内的辐射热强度较高时, 忽略内部辐射效应可能导致在计算冷负荷时出现较大错误。因此, 需要对建筑内部的辐射效应进行计算, 避免负荷计算中产生较大的误差。Zhiwei Lian^[2]等人通过有效辐射法和 Chapman 法计算热源辐射热在围护结构各表面上的分配比例,

可以较精确的计算空调负荷。

室内热源所散发的辐射热, 投射在围护结构表面引起温度升高使之成为次生对流源, 并以对流散热的形式影响室内热环境^[5]。孟晓静等人^[6]通过纯对流模型和对流辐射耦合模型计算结果与实验结果的对比, 提出数值模拟中辐射作用是提高工业建筑热环境预测精度的重要因素。

对于高温热源工业建筑, 由于工艺的需求, 生产通常要在高温状态下进行, 生产时温度能够达到 500~1 000℃^[7], 高温热源辐射散热量能够达到总散热量的 80%~90%^[8]。因此, 准确计算辐

收稿日期: 2019-07-24

修改稿日期: 2020-03-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0705300); 国家自然科学基金项目(51608425); 陕西省重点科技创新团队(2017KCT-14)

第一作者: 王 怡(1970—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事建筑通风理论及其在实际中应用研究。E-mail: wangyi6920@126.com

射散热量及其在各壁面的分布对热负荷和室内热环境计算具有重要意义。

1 方法

1.1 辐射换热计算

各表面间的辐射传热十分复杂, 实际情况中, 能将所有表面理想化为黑体计算的情况并不常见, 而灰体不同于黑体, 灰体只会吸收一部分投射辐射, 其余的反射出去, 这样就会在灰表面间形成多次吸收、反射的现象^[9]。

辐射换热的计算多采用有效辐射法, 在该方法中, 将表面当做漫射灰表面来处理^[9], 即: (1) 表面各向同性, 辐射和反射性质与方向无关; (2) 表面的单色吸收率不随波长而变化, 是一个常数。有效辐射 J 表示单位时间离开单位面积的总辐射能, 由表面本身的辐射 ϵE_b 和投入辐射的反射部分 ρG 两部分组成, 如图 1 所示。

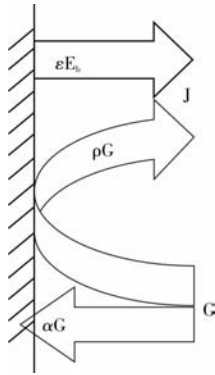


图 1 有效辐射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of effective radiation

有效辐射 J 可以表示为:

$$J_i = \epsilon_i E_{bi} + \rho_i G_i \quad (\text{W/m}^2) \quad (1)$$

式中: ϵ_i 为该表面发射率; E_{bi} 为与之等温黑表面的辐射力, 通常在工程中认为其与热力学温度的四次方成正比; ρ_i 为表面的反射率, α_i 为辐射吸收率, 对于同一表面有 $\alpha + \rho = 1$; G_i 表示单位时间外界对表面 i 单位面积的投射辐射。

通常在计算灰表面之间的辐射传热时, 往往将其放在一个封闭的空腔中进行计算, 由 n 个表面组成的空腔, 各内表面的净辐射换热量为:

$$\varphi_i = A_i \epsilon_i \frac{E_{bi} - J_i}{1 - \epsilon_i} \quad (\text{W}) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中: φ_i 为面 i 的净辐射得热量; A_i 为面 i 的面积, ϵ_i 为面 i 的发射率; E_{bi} 为与面 i 同温度黑表面的辐射力; J_i 为面 i 的有效辐射, 下同。

有效辐射的计算如下:

$$\sum_{i=1}^n J_i X_{j,i} - \frac{J_j}{1 - \epsilon_j} = \left(\frac{\epsilon_j}{\epsilon_j - 1} \right) \sigma_b T_j^4 \quad j=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中, $X_{j,i}$ 表示面 j 对面 i 的辐射角系数, 下同。

1.2 角系数计算

在辐射换热的计算中, 最主要的工作之一就是分析求解辐射换热角系数, 在大多数情况下角系数的计算是相当复杂和困难的。针对建筑的内部特性, 可以将其分为平行平面间和垂直表面间两种情况分别进行计算, 以减少计算量^[10]。

确定角系数的方法有很多, 主要包括计算法、图解法、图网法等等, 其中计算法一般适用于比较有规则的几何形状, 主要根据角系数的基本表达式进行积分或数学变换得出结果, 根据这种方法, 可以分别得到平行平面间和垂直表面间两种情况的计算公式^[10]。

对于两平行平面间的角系数, 如图 2 所示, 假设表面(1)和表面(2)是相距为 g 的两个平行平面, 表面(1)对表面(2)的辐射角系数 $X_{1,2}$ 可根据以下公式进行:

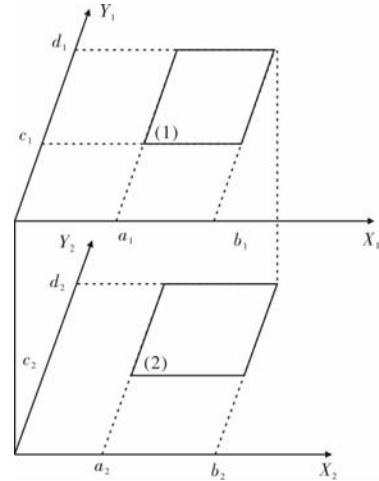


图 2 两平行平面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of parallel planes

$$2\pi(b_1 - a_1)(d_1 - c_1)X_{1,2} = P(b_2 - b_1)Q(c_2 - c_1) + P(b_2 - b_1)Q(d_2 - d_1) - P(b_2 - b_1)Q(c_2 - d_1) - P(b_2 - b_1)Q(d_2 - c_1) + P(a_2 - a_1)Q(c_2 - c_1) + P(a_2 - a_1)Q(d_2 - d_1) - P(a_2 - a_1)Q(c_2 - d_1) - P(a_2 - a_1)Q(d_2 - c_1) + P(b_2 - a_1)Q(c_2 - d_1) + P(b_2 - a_1)Q(d_2 - c_1) - P(b_2 - a_1)Q(c_2 - c_1) - P(b_2 - a_1)Q(d_2 - d_1) + P(a_2 - b_1)Q(c_2 - d_1) + P(a_2 - b_1)Q(d_2 - c_1) - P(a_2 - b_1)Q(c_2 - c_1) - P(a_2 - b_1)Q(d_2 - d_1) \quad (4)$$

$$\text{式中: } P(Z_1)Q(Z_2) = Z_1 W^{\tan^{-1}} \left(\frac{Z_1}{W} \right) + Z_2 V^{\tan^{-1}} \left(\frac{Z_2}{V} \right)$$

$$-\frac{g^2}{2} \ln\left(\frac{W^2 + Z_1^2}{W^2}\right);$$

$$V^2 = g^2 + Z_1^2;$$

$$W^2 = g^2 + Z_2^2.$$

对于互相垂直平面间的角系数,如图3所示,表面(1)对表面(2)的辐射角系数 $X_{1,2}$ 可根据以下公式进行:

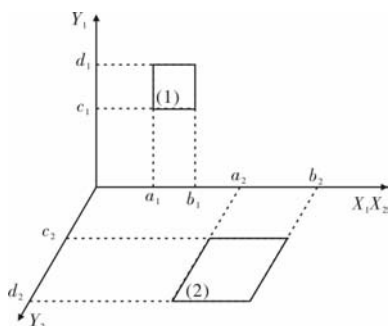


图3 两垂直平面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of vertical planes

$$\begin{aligned} 2\pi(b_1-a_1)(d_1-c_1)X_{1,2} = & R(b_2-b_1)S(c_2+c_1) + \\ & R(b_2-b_1)S(d_2+d_1) - R(b_2-b_1)S(c_2+d_1) - R \\ & (b_2-b_1)S(d_2+c_1) + R(a_2-a_1)S(c_2+c_1) + R \\ & (a_2-a_1)S(d_2+d_1) - R(a_2-a_1)S(c_2+d_1) - R \\ & (a_2-a_1)S(d_2+c_1) + R(b_2-a_1)S(c_2+d_1) + R \\ & (b_2-a_1)S(d_2+c_1) - R(b_2-a_1)S(c_2+c_1) - R \\ & (b_2-a_1)S(d_2+d_1) + R(a_2-b_1)S(c_2+d_1) + R \\ & (a_2-b_1)S(d_2+c_1) - R(a_2-b_1)S(c_2+c_1) - R \\ & (a_2-b_1)S(d_2+d_1) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{式中: } R(Z)S(Y_2 + Y_1) = TZ_1^{\tan^{-1}}\left(\frac{Z_1}{T}\right) + \frac{1}{4}$$

$$(Z_1^2 - T^2) \ln(T^2 + Z_1^2);$$

$$T^2 = Y_2^2 + Y_1^2.$$

2 室内辐射热在各壁面分布的理论分析

针对高温热源工业建筑室内各壁面辐射热分布状况,采用净辐射得热强度和净辐射热分配比例进行衡量.净辐射得热强度即各内壁面单位面积净辐射得热大小(W/m^2),用于直接反映各壁面所受到的净辐射热的强度;净辐射热分配比例即各壁面的净辐射得热与热源的净辐射散热之比.

通常情况下,建筑室内热源表面黑度约为0.6~0.8,各围护结构内表面的黑度往往接近于1,因此由n个表面组成的封闭空腔中的辐射传热,可以将围护结构各内表面当做黑体进行简化处理.

对于任意围护结构内表面*i*,面*i*与热源的净辐射换热量为:

$$\varphi_{is} = A_i X_{i,s} (J_s - E_i) \quad (\text{W}) \quad (6)$$

式中, E_i 为面*i*的表面辐射力, J_s 为热源的有效辐射,下同.

与其他内表面的净辐射换热量为:

$$\varphi_{ij} = A_i X_{i,j} (E_j - E_i) \quad (\text{W}) \quad j=1, 2, \dots, n \quad (7)$$

面*i*所接受到的总净辐射热量:

$$\begin{aligned} \varphi_i = & \varphi_{is} + \varphi_{ij} = A_i X_{i,s} (J_s - E_i) + \\ & A_i X_{i,j} (E_j - E_i) \quad (\text{W}) \quad j=1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (8)$$

建筑围护结构各内表温度通常相差不大,因此认为 $E_i \approx E_j$, 则式(8)可以写成:

$$\varphi_i = A_i X_{i,s} (J_s - E_i) \quad (\text{W}) \quad (9)$$

式(9)中:

$$J_s = E_s + \rho_s \sum_{j=1}^n E_j X_{j,s} \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (10)$$

则,高温热源工业建筑中面*i*受到的净辐射热量为:

$$\varphi_i = A_i X_{i,s} (E_s + \rho_s \sum_{j=1}^n E_j X_{j,s} - E_i) \quad (\text{W}) \quad (11)$$

面*i*的净辐射得热强度 I_i 和净辐射热分配比例 P_i 为:

$$I_i = \frac{\varphi_i}{A_i} = X_{i,s} (E_s + \rho_s \sum_{j=1}^n E_j X_{j,s} - E_i) \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (12)$$

$$P_i = \frac{\varphi_i}{\varphi_s} = X_{s,i} \frac{(E_s + \rho_s \sum_{j=1}^n E_j X_{j,s} - E_i)(1 - \epsilon_s)}{E_s - \epsilon_s (E_s + \rho_s \sum_{j=1}^n E_j X_{j,s})} \quad (13)$$

式(12)、(13)说明,各壁面的净辐射得热强度、净辐射热分配比例均与 E_j ($j=1, 2, \dots, n$) 和 E_i 有关,即与围护结构各内表面温度有关,但对于高温热源工业建筑来说,其热源温度能够达到 $500^\circ\text{C} \sim 1000^\circ\text{C}$, 而围护结构内表面温度通常不会高于 50°C , 因此 E_s 远大于 E_i 及 E_j ($j=1, 2, \dots, n$), 所以式12和式13中的 $\rho_s \sum_{j=1}^n E_j X_{j,s}$ 和 E_i 可以忽略,即壁面温度对于辐射热在各壁面分布的影响可以忽略.

在忽略围护结构内表温度对净辐射得热强度和净辐射热分配比例影响的基础上,面*i*的净辐射得热强度 I_i 和净辐射热分配比例 P_i 为:

$$I_i = X_{i,s} E_s \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (14)$$

$$P_i = \frac{\varphi_i}{\varphi_s} = X_{s,i} \quad (15)$$

从式(14)、(15)可以得知, 面 i 的净辐射得热强度与 $X_{i,s}$ (面 i 对热源面的角系数) 成正比, 面 i 的净辐射热分配比例与 $X_{s,i}$ (热源面对面 i 的角系数) 成正比。

式(14)可以写成:

$$I_i = X_{i,s} \epsilon_s E_{bs} \quad (\text{W/m}^2) \quad (16)$$

可知, 各内表面净辐射得热强度与热源发射率 ϵ_s 成正比, 式(15)可知, 各内表面净辐射得热分配比例与热源发射率无关。

通过上述理论分析发现, 对于高温热源工业建筑, 围护结构各内表面温度对于辐射热在各壁面分布的影响可以忽略; 壁面净辐射得热强度、净辐射热分配比例分别与该壁面对热源面的角系数、热源面对该壁面的角系数成正比; 壁面净辐射得热强度与热源发射率成正比, 净辐射得热分配比例与热源发射率无关。

上述理论分析结果是在一定假设的前提下得到的, 为了对理论分析结果进行进一步验证, 下面对典型高温热源工业建筑进行数值计算。

3 室内辐射热在各壁面分布的数值计算

针对建筑室内热源与各壁面间的辐射传热问题, 根据第1部分介绍方法, 使用 MATLAB 进行编程, 建立时间空间面源间辐射换热数值计算程序即可求得各内表面净辐射换热量, 具体计算流程如下图4所示。

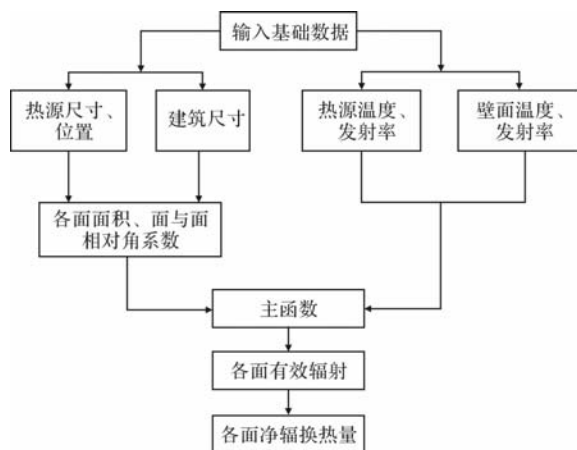


图4 净辐射换热量计算流程图

Fig. 4 Flow chart of net radiative heat transfer calculation

3.1 物理模型

压延加工厂房是典型的高温热源工业建筑, 如下图5所示。这类建筑内部生产线即为其室内热源, 且高温部分主要集中在上表面, 侧面温度相对较低。以压延加工厂房为原型, 对其进行简化,

得到本文计算模型, 如图6所示。模型尺寸为 $90\text{ m} \times 30\text{ m} \times 16\text{ m}$, 热源尺寸为 $40\text{ m} \times 5\text{ m}$, 热源温度 500°C , 热源位于厂房正中。



图5 轧钢生产线

Fig. 5 Steel rolling production line

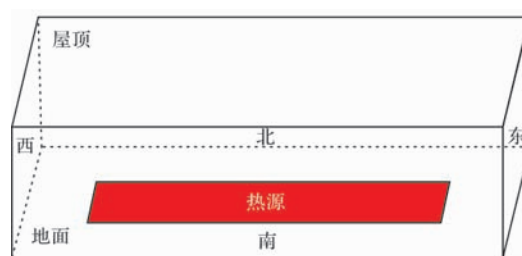


图6 简化模型示意图

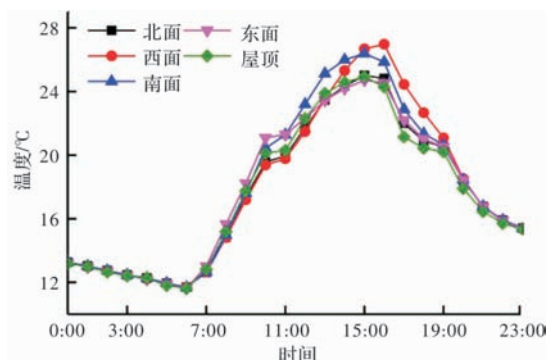
Fig. 6 Schematic diagram of simplified model

根据上述计算模型, 将数据输入 MATLAB 计算程序中进行求解, 即可得到各壁面净辐射换热量, 从而分析不同影响因素对各壁面辐射热分布的影响。

3.2 结果与讨论

3.2.1 壁面温度对辐射热在各壁面分布的影响

为了分析壁面温度对各壁面的辐射热分布的影响, 设置热源表面发射率为 0.8, 各壁面表面发射率为 0.95, 由于实际中, 围护结构各内表面温度是在不断变化的, 因此选择了某一日 24 小时所对应的围护结构各内表面温度, 如图7(a)所示, 并分别计算了各时刻所对应的各表面净辐射得热强度与净辐射热分配比例, 如下图7中(b)、(c)所示。



(a) 围护结构内表面温度随时间变化情况

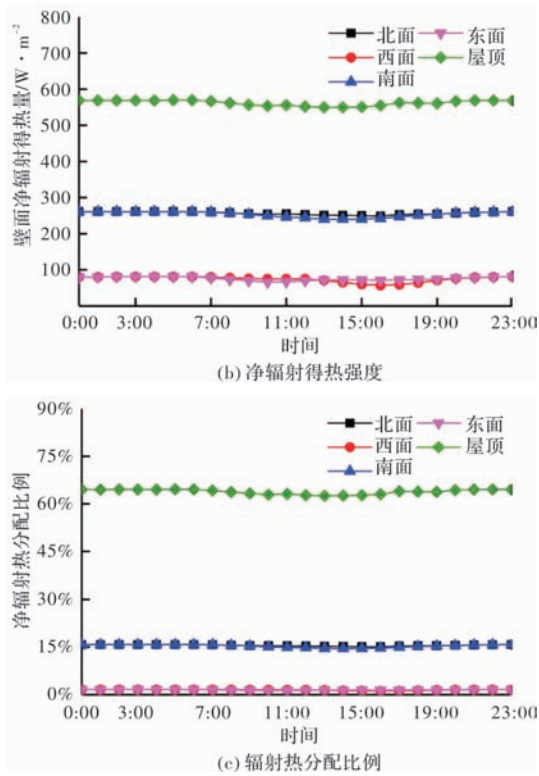


图7 内表面温度对辐射分布的影响

Fig. 7 Influence of inner surface temperature on radiation distribution

图7中显示,随着时间的变化(不同时刻围护结构各内表面温度不同),各内表面的净辐射得热强度和净辐射热分配比例的波动很小,因此可以认为,围护结构内表温度对各壁面的净辐射得热强度和净辐射热分配比例的影响可以忽略。

3.2.2 角系数对辐射热在各壁面分布的影响

设置各壁面温度为 $30^{\circ}C$, 表面发射率 0.95, 热源表面发射率 0.8, 在保持热源面积不变的前提下, 通过改变热源长宽比, 以达到改变角系数的目的。净辐射得热强度、辐射热分配比例与角系数的关系下图8、图9所示。

由于对称关系, 北壁面和南壁面、西壁面和东壁面情况完全相同未列出。图7显示, 壁面净辐射得热强度与该壁面对热源面的角系数近似成正比。

图9显示, 各壁面净辐射热分配比例与热源面对该壁面的角系数近似成正比。因此对于室内具有高温热源的工业建筑, 壁面净辐射得热强度、净辐射热分配比例分别与该壁面对热源面的角系数、热源面对该壁面的角系数成正比。

3.2.3 热源发射率对辐射热在各壁面分布的影响

设置各壁面温度均为 $30^{\circ}C$, 表面发射率 0.95, 热源表面发射率分别为 0.7、0.8、0.9 时的净辐射

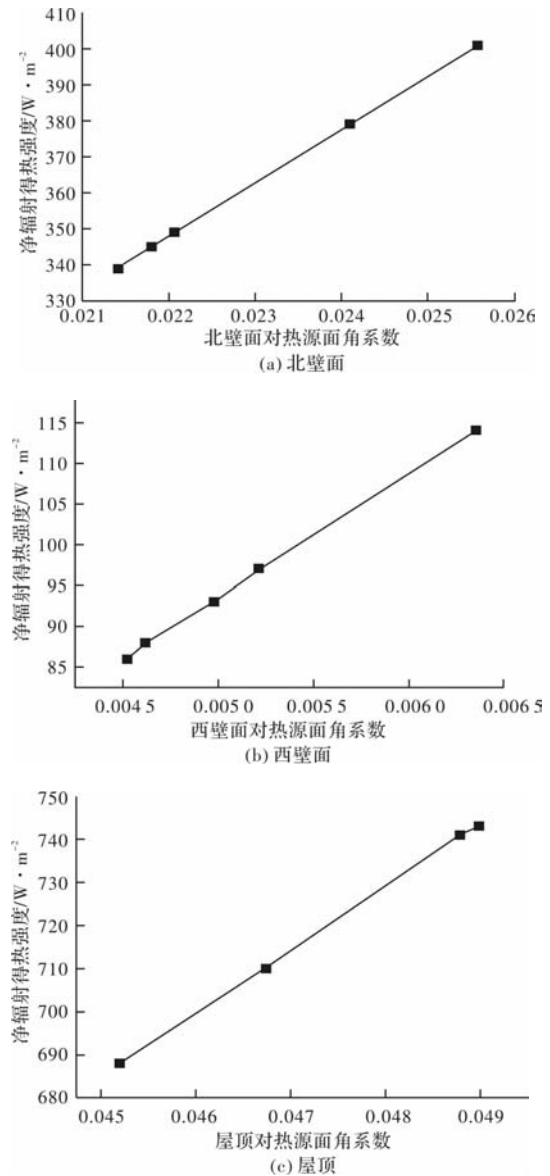
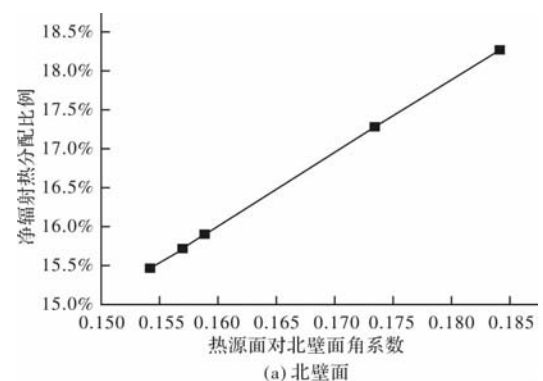


图8 壁面对热源面角系数与该壁面净辐射得热强度图

Fig. 8 Diagram of angular coefficient of wall to heat source and net radiative heat intensity

得热强度、辐射热分配比例如下图9中(a)、(b)所示:

图10显示, 净辐射得热强度与热源发射率成正比, 辐射热分配比例随热源发射率改变未发生变化。因此, 室内具有高温热源的工业建筑, 其内



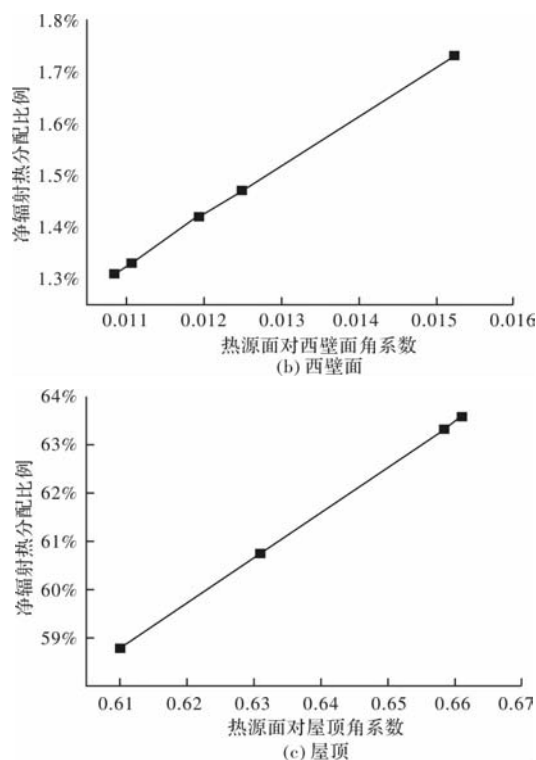


图9 热源面对壁面角系数与该壁面净辐射得热分配比例图

Fig. 9 Diagram of angular coefficient of heat source to the wall and net radiant heat distribution ratio

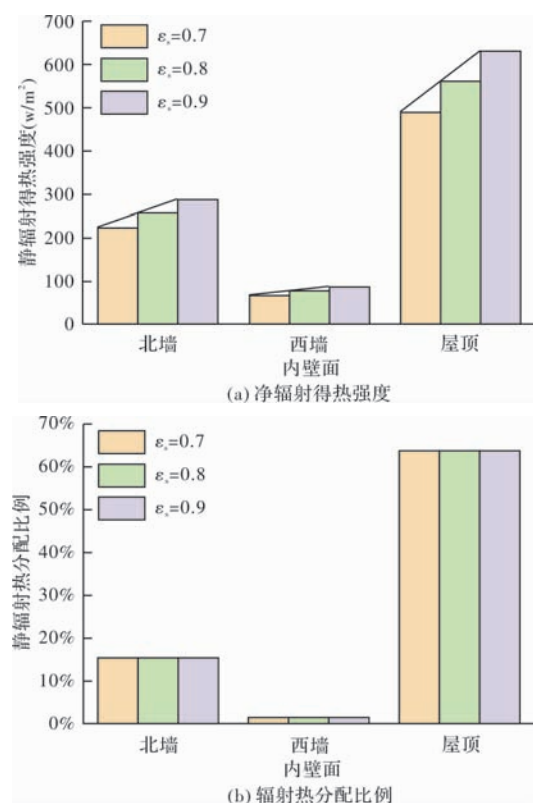


图10 源发射率对辐射分布情况的影响

Fig. 10 Influence of heat source emissivity on radiation distribution

表面净辐射得热强度与热源发射率正比, 各内表面净辐射得热分配比例与热源发射率无关。

4 结论

通过理论分析, 结合典型高温热源工业建筑数值计算, 发现数值计算结果与理论分析结论一致, 因此对于高温热源工业建筑室内各壁面辐射热分布问题, 内壁面温度、角系数以及热源发射率对辐射热分布的影响如下:

(1) 围护结构内表温度对各壁面的净辐射得热强度和净辐射热分配比例的影响可以忽略;

(2) 壁面净辐射得热强度、净辐射热分配比例分别与该壁面对热源面的角系数、热源面对该壁面的角系数成正比;

(3) 内表面净辐射得热强度与热源发射率正比, 各内表面净辐射热分配比例与热源发射率无关。

参考文献 References

- [1] 李先庭, 赵彬. 室内空气流动数值模拟[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 101-102.
LI Xianting, ZHAO Bin. Numerical simulation of indoor airflow [M]. Beijing: China Machine Press, 2009: 101-102.
- [2] YAN Chengchu, WANG Shengwei, SHAN Kui, et al. A simplified analytical model to evaluate the impact of radiant heat on building cooling load [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 77: 30-41.
- [3] LIAN Zhiwei, ZHANG Yan. Distribution ratio of radiant heat and its effect on cooling load [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2003, 42: 311-316.
- [4] 连之伟, 顾瑞英. 求解热源辐射热分配比例的两种方法[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 1997, 29(1): 15-19.
LIAN Zhiwei, GUI Ruiying. Two methods for solving the radiative heat distribution ratio of a heat source [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech (Natural Science Edition), 1997, 29(1): 15-19.
- [5] 赵鸿佐. 室内热对流与通风[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 80.
ZHAO Hongzuo. Indoor heat convection and ventilation [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 80.
- [6] MENG Xiaojing, WANG Yi, LIU Tiening, et al. Influence of radiation on predictive accuracy in numerical simulation of thermal environment in industrial buildings with buoyancy-driven natural ventilation [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 96: 473-480.
- [7] 孟晓静. 高温热源工业建筑双辐射作用下室内热环境

- 特性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
- MENG Xiaojing. Study on indoor thermal environment characteristics of industrial buildings with high temperature heat source under double radiation [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2016.
- [8] TANIGUCHI H, OHMORI T, Iwata M, et al. Numerical study of radiation-convection heat transfer [J]. Heat Transfer-Asian research, 2002, 34(5): 391-407.
- [9] 章熙民. 传热学[M]. 6版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 235-242.
- ZHANG Ximin. Heat transfer [M]. 6th edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015: 235-242.
- [10] 严启森. 筑热过程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986: 181-182.
- YAN Qisen. Building thermal process [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1986: 181-182.
- [11] 杨贤荣. 辐射换热角系数手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982: 206-220.
- YANG Xianrong. Handbook of radiant heat transfer Angle coefficients [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982: 206-220.
- (编辑 桂智刚)

(上接第 301 页)

- [16] 任启文, 王成, 郝光发, 等. 城市绿地空气颗粒物及其与空气微生物的关系[J]. 城市环境与城市生态, 2006, 19(5): 22-25.
- REN Qiwen, WANG Cheng, QIE Guangfa, et al. Airborne Particulates in Urban Greenland and Its Relationship with Airborne Microbes[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2006, 19(5): 22-25.
- [17] 徐蕾. 徐州市环境空气微生物监测分析及与 PM10 相关性研究[J]. 北方环境, 2013, 29(1): 76-78.
- XU Lei. The monitoring analysis about ambient air microorganism and correlation with PM10 of Xuzhou city [J]. Northern Environmental, 2013, 29(1): 76-78.
- [18] LI ANGUI, LIU ZHIJIAN, LIU YING, et al. Experimental study on microorganism ecological distribution and contamination mechanism in supply air ducts[J]. Energy and Buildings, 2012, 47: 497-505.
- [19] LAW A K Y, CHAU C K, CHAN G Y S. Characteristics of bioaerosol profile in office buildings in Hong Kong[J]. Building and Environment, 2001, 36(4): 527-541.
- [20] LIU ZHIJIAN, ZHU ZUNQIANG, ZHU YEYUAN, et al. Investigation of dust loading and culturable microorganisms of HVAC systems in 24 office buildings in Beijing [J]. Energy and Buildings, 2015, 103: 166-174.
- [21] HOSEINI M, JABBARI H, NADDAFI K, et al. Concentration and distribution characteristics of airborne fungi in indoor and outdoor air of Tehran subway stations [J]. Aerobiologia, 2013, 29(3): 355-363.
- [22] 贾丽, 巨天珍, 石垚, 等. 校园大气微生物的时空分布及与人群活动关系的研究[J]. 安全与环境工程, 2006, 13(2): 34-38.
- JIA Li, JU Tianzhen, SHI Yao, et al. Distribution and character of the campus microorbes in early summer[J]. Safety and Environmental Engineering, 2006, 13(2): 34-38.
- (编辑 桂智刚)