

文章编号: 1671-6612 (2020) 01-001-05

海拔高度与门窗气密性对建筑供暖 设计热负荷影响及机理研究

高 飞¹ 龙恩深^{1,2} 肖栋天² 李皓月²

(1.四川大学灾后重建与管理学院 成都 610065 ;

2.四川大学建筑与环境学院 成都 610065)

【摘 要】 建筑供暖负荷主要包括围护结构传热及冷风渗透两部分, 海拔高度的变化, 影响建筑围护结构表面对流换热系数及空气密度, 因此海拔高度对建筑供暖设计热负荷的影响不可忽视。主要考虑当海拔高度增加时, 在相同门窗气密性等级条件下分析建筑冷风渗透部分负荷的变化。通过进一步研究来揭示海拔高度与门窗气密性对建筑供暖设计热负荷的影响及其机理。研究表明: (1) 建筑的采暖设计热负荷会随海拔高度的增加而降低; (2) 门窗气密性在高海拔地区对建筑设计热负荷的影响不如低海拔时明显; (3) 对于高海拔地区若经济不允许, 则可适当放宽对门窗气密性的规定, 采暖设计热负荷计算中需考虑海拔高度的影响。研究成果为在高海拔地区的建筑供暖设计热负荷的确定及节能相关整改措施提供理论参考。

【关键词】 海拔高度; 空气密度; 冷风渗透; 设计热负荷
中图分类号 TU241.4/TU831.6/TU834.1 文献标识码 A

Effects of Altitude and Air Tightness of Doors and Windows on Heating Load and its Mechanism

Gao Fei¹ Long Enshen^{1,2} Xiao Dongtian² Li Haoyue²

(1. Institute of Disaster Management and Reconstruction, Sichuan University, Chengdu, 610065;

2. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu, 610065)

【Abstract】 Building heating load mainly includes two parts: envelope heat transfer and air infiltration. The change of altitude affects the convection heat transfer coefficient and air density on the surface of building envelope, so the influence of altitude on the heat load of building heating design can't be ignored. In this paper, it is mainly considered that when the altitude increases, the thermal load change of the air infiltration part is analyzed under the same air tightness level of doors and windows. The influence of altitude and air tightness of doors and windows on the heat load of building heating design and its mechanism are revealed through the research on the influence. This study shows that: (1) The heating design heat load of the building will decrease with the increase of altitude; (2) The influence of air tightness of doors and windows on the heat load of building design in high altitude area is not as obvious as that in low altitude area; (3) For high-altitude areas if the economy is not allowed, it can be appropriate to relax the air tightness of windows and doors, and heating design heat load calculation need to consider the impact of altitude. The research

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0700400); 国家自然科学基金 (51778382)
作者简介: 高 飞 (1993.10-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 1135472415@qq.com
通讯作者: 龙恩深 (1964.03-), 男, 博士, 教授, E-mail: longes2@163.com
收稿日期: 2019-04-26

results provide a theoretical reference for the determination of the heat load in the heating design of buildings in high altitude areas and the rectification measures related to energy conservation.

【Keywords】 Altitude; Air density; Air infiltration; Design heat load

0 引言

高海拔地区由于其独特的地势特点，气候多为寒冷、严寒型，且多深处祖国内陆交通不便，经济落后，地方建筑多半因地制宜、就地取材，造成围护结构传热系数普遍较大，门窗气密性差。结合当地寒冷的气候条件、保温性能较差的建筑现状，居民生活供暖将是刚需。而现行标准对这类高海拔地区的供暖设计热负荷较少考虑高海拔空气稀薄的因素，造成对建筑供暖负荷的过大估计，从而存在供暖系统设计偏大及过度强调门窗气密性改善问题，以致造成过多的能源消耗。气密性是空气渗漏的一个主要影响因素，针对空气渗漏及建筑气密性的相关研究表明，空气渗透引起的热损失占建筑冬季热负荷的 30%以上^[1]。国内刘东等人指出，北京地区的典型多层建筑中，通过门窗缝隙引起的空气热损失约占全部热损失的 23%，而哈尔滨地区则为 29%^[2]，从而可见冷风渗透对建筑供暖能耗的影响极大。虽然目前学者对建筑气密性的计算^[3-6]及冷风渗透对建筑能耗影响的^[7-8]研究较多，但很少结合地方海拔高度差异性去考虑空气密度变化对冷风渗透耗热量的影响，从而可能造成对一些地区的供暖负荷过大计算。

因而本文结合川西高原这类高海拔地区的气候条件，就海拔高度及门窗气密性对建筑供暖负荷的影响进行研究并分析其机理性，从而为高海拔地区供暖系统的精确设计及门窗气密性相关的节能改造提供理论参考。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

本文选取某居住建筑作为研究对象，定量分析门窗不同气密性等级下的供暖设计热负荷。建筑模型如图 1 所示，该楼为某住宅楼，每层两户，共六层，建筑层高 2.8m，建筑总高度 17.4m，建筑总面积 1352.16m²，建筑体形系数为 0.43。建筑四面装窗，建筑外窗共有 6 种，尺寸分别为：1500mm×1500mm（24 个）、900mm×1500mm（36 个）、1200mm×1000mm（6 个）、2800mm×1800mm（12 个）、2100mm×2400mm（12 个）、1500mm×2400mm

（12 个），主要安装在南北两侧立面上，南侧窗墙比为 0.49、北侧窗墙比为 0.32，东西侧窗墙比为 0.04。

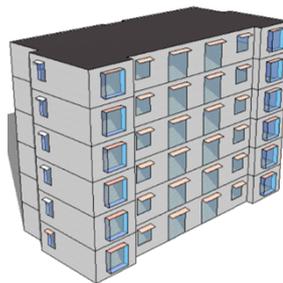


图 1 建筑模型

Fig.1 Building appearance diagram

1.2 研究条件

参考 Weather Data | EnergyPlus 中给出的川西松潘县的气象数据，通过计算得到松潘地区的日均温度分布，计算结果如图 2 所示。从而可以得到松潘县日均温度 ≤+5℃ 的天数为 154 天，日均温度 ≤+5℃ 的起止日期为当年的 10 月 10 日至次年的 4 月 21 日，本文将该时间段定为松潘地区的采暖期，采暖期内日均温度最高为 10.93℃，最低为 -9.09℃；室外平均温度为 0.93℃，空调室内设定温度为全天 18℃。

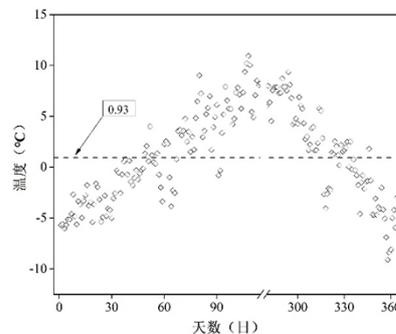


图 2 逐日平均温度

Fig.2 The rule of daily mean temperature change in Songpan district heating period

建筑采暖期内供暖负荷计算中, 建筑采暖负荷计算过程中取外墙传热系数为 $0.3\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 外窗传热系数为 $2.0\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 屋面传热系数为 $0.3\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 忽略高海拔地区空气稀薄对各围护结构传热系数的影响, 不考虑室内人员、照明, 设备等稳定内热源。换气次数设定按照气密性的单位面积分级指标, 具体分级情况参考《建筑外门窗气密、水密、抗风压性能分级及检测方法》^[9]GB/T 7106-2008, 根据建筑物门窗面积, 计算得出不同门窗气密性等级下的建筑换气次数。其中每个等级的单位面积分级指标所对应范围上下限的平均值, 具体计算结果如表 1 所示。

表 1 分析模型在不同门窗气密性条件下的换气次数 n_k (次/h)

Table 1 The number of air changes under different air tightness conditions of doors and Windows

气密性等级	1	2	3	4	5	6	7	8
通风换气次数	0.75	0.65	0.55	0.45	0.35	0.25	0.15	0.05

1.3 研究方法

建筑负荷采用特征温度法 (CTM 法)^[10]计算, 其特征温度物理意义是, 当房间传热过程达到稳定状态时, 外界传入房间空气总热量与室内空气传出热量的能力之比, 其负荷计算主要通过下式得到:

$$Q_0 = \pm(t_{in} - t_{\infty}^{shut}) \left(\sum K_i F_i + \frac{n_k}{3600} \rho c V \right) \quad (1)$$

式中, Q_0 为单位时间冷热负荷, W; \pm 表示房间需供热或制冷; t_{in} 为房间内空气设定温度, $^{\circ}\text{C}$; t_{∞}^{shut} 为空调设备停机状态的特征温度, $^{\circ}\text{C}$; K_i 为不同围护结构的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; F_i 为围护结构面积, m^2 ; n_k 为房间换气次数, 次/h; ρ 为室外空气密度, kg/m^3 ; c 为室外空气比热, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; V 为房间体积, m^3 。

2 计算结果与分析

对于寒冷地区的六层以下居住建筑, 其外门窗气密性等级不应低于国家标准 GB/T 7106-2008 中规定的 4 级, 结合实际调研情况, 当地居民外门窗气密性普遍较差。因而这里以外门窗气密性 4 级为例, 气象条件参考松潘地区的逐时气象参数, 分析在相同气密性条件下海拔高度对建筑供暖负荷

的影响。图 3、4 分别给出了海拔高度为 0m、2850.7m 时该建筑在采暖期的逐时热负荷分布情况。考虑到南方供暖主要以分散式为主, 因而本文设计热负荷按不保证 1 天的日平均温度计算, 对比图 3、4 可以看出, (1) 采暖负荷较大值主要集中在 12 月及 1 月; (2) 海拔增加, 建筑采暖季的逐时热负荷呈现明显的降低; (3) 海拔高度为 0m 时, 建筑设计热负荷为 37.15kW, 海拔高度增加到 2850.7m 时, 对应的设计热负荷为 32.04kW, 设计热负荷降低了 14%, 从而可得海拔高度对建筑的设计负荷的计算影响较大。

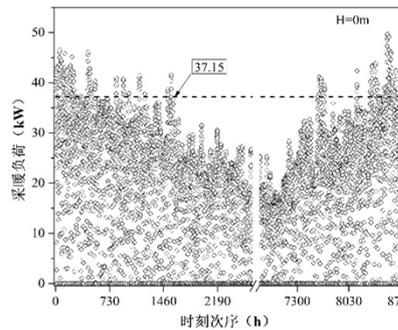


图 3 海拔高度为 0m 时的逐时热负荷

Fig.3 Comparison of hourly thermal loads at an altitude of 0m

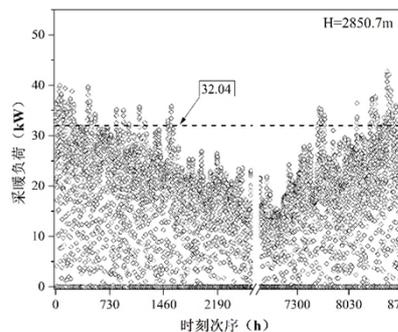


图 4 海拔高度为 2850.7m 时的逐时热负荷

Fig.4 Comparison of hourly thermal loads at an altitude of 2850.7m

图 5 为同一建筑分别位于海拔高度为 2850.7m 时与 0m 时, 门窗不同气密性条件下建筑设计热负荷的计算结果。如图所示, 相同气密性等级下海拔

高度为 0m 时的设计热负荷明显高于海拔 2850.7m 的热负荷, 两者热负荷差值由气密性等级为 1 级时的 8.52kW 逐渐减小为气密性等级为 8 级时的 0.57kW, 从图 5 中可以看出在海拔 2850.7m 的位置建筑气密性等级为 1 级对应建筑设计热负荷已达到海拔高度为 0m 气密性等级为 3 级的大小, 其他气密性等级大多有类似情况, 只在气密性特别好的情形下, 海拔高度变化对设计热负荷的影响变得微弱, 从而可知高海拔下, 气密性对建筑设计热负荷的影响不如低海拔显著, 所以对于高原地区单从设计热负荷来看, 若建筑节能在经济不允许时对外门窗气密性的要求可适当放宽, 这同时也能弥补高原地区空气稀薄而导致室内空气质量不高的情况。

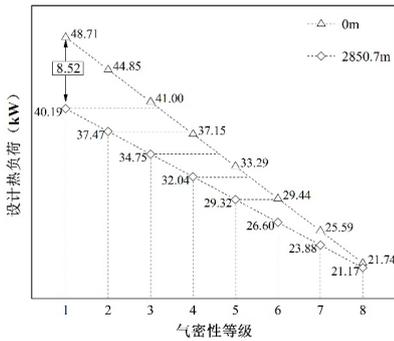


图 5 不同海拔下建筑设计热负荷与气密性的关系

Fig.5 Relationship between heat load and air tightness in architectural design at different altitude

3 机理研究与讨论

在工程计算中, 当海拔高度低于 11km 时, 大气压强随海拔变化的关系式为:

$$p = p_0 \times \left(1 - \frac{0.0065H}{288.15} \right)^{5.25588} \quad (2)$$

式中, H 为海拔高度, m; p_0 为海平面处的大气压强, 取 101.3kPa; p 为海拔 H 处的大气压强, kPa。

根据道尔顿分压定律及气体状态方程得到式 (3):

$$\rho = 0.003484 \frac{P_o \times \left(1 - \frac{0.0065H}{288.15} \right)^{5.25588}}{T_{out}} \quad (3)$$

式中, ρ 为室外空气密度, kg/m^3 ; T_{out} 为室外

空气干球温度, K; 其他符号同前。

由式 3 可知, 在室外空气干球温度一定的情况下, 空气密度与海拔高度呈指数型关系, 随着海拔高度的增加而减小; 与空气干球温度呈反比例关系。图 6 为海拔高度取 0~8000m, 空气温度变化范围为 $-25^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ 时的空气密度取值。从图中可以看出, 空气密度随着海拔高度的增加而显著减小; 空气温度对空气密度的作用与海拔高度有关, 其影响程度随着海拔高度的增加而减小。

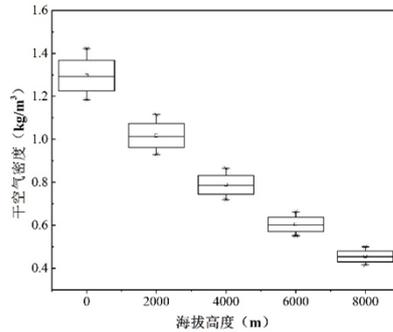


图 6 海拔高度及空气干球温度对空气密度的影响

Fig.6 Effects of altitude and air dry bulb temperature on air density

正因海拔高度及气温对空气密度的耦合影响, 对于海拔高度为 0m 和 2850.7m 两者在负荷计算时, 室内外温差 Δt 相同, 建筑的换气次数 n_k 相同, 则围护结构部分的散热量相同。对于空气渗透部分散热量的计算需引入室外空气的密度因素, 结合图 6 的结果, 同温度条件下海拔高度由 0m 增加到 2850.7m 时, 室外空气密度降低 29.48%, 相应的空气渗透部分负荷也将降低 29.48%, 将这个减少量考虑到建筑的供暖负荷中, 则建筑的负荷计算将相应减小。正如图 3、4 给出的结果, 建筑在海拔 0m 时, 设计热负荷为 37.15kW, 在海拔 2850.7m 时, 设计热负荷为 32.04kW, 减少了 14%。

通过对建筑在两种海拔高度下采暖季 4656 个小时对应的逐时冷风渗透的质量流量求平均, 从而得到门窗气密性及由门窗缝隙渗透空气的质量流量的关系, 建筑体积为 3921m^3 , 门窗总面积 261m^2 , 如图 7 所示。从图中可以看出, 气密性等级越高, 空气渗透对应的质量流量越小; 相同气密性等级条件下, 海拔 2850.7m 对应的质量流量小于海拔 0m

时的流量,随着气密性等级增加,两者差值明显缩小;图中给出了两种柱状图对应变化的趋势线,与图5相比,可以看出两线变化趋势大致相同,即气密性等级增加,空气渗透的体积减小,而高海拔时 ρ 较小,在 ΔV 变化相同的条件下,则冷风渗透耗热量变化量 ΔQ 高海拔将低于低海拔的,在围护结构部分负荷不变的情况下,建筑设计热负荷势必会与单位时间渗透进入建筑空气的质量流量相关;对两个趋势线进行拟合,得出海拔为0m的 K_0 为-505.32,海拔2850.7m的 $K_{2850.7}$ 为-356.33,两者相差29.48%,与两种海拔下的空气密度差值相同,因而可知空气密度是其不同海拔高度下,影响空气渗透质量流量的主导因素,两者数量级别的差异与建筑体积及门窗面积相关。

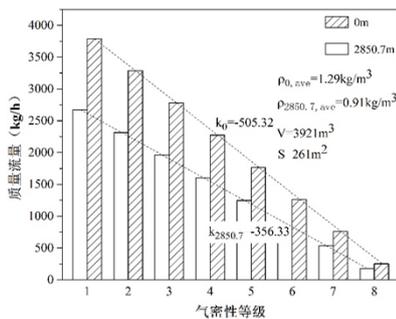


图7 门窗渗透空气质量流量与气密性关系

Fig.7 Relationship between air quality flux and air tightness through doors and Windows

4 结论

通过本文以松潘地区为例研究了海拔高度与门窗气密性对建筑采暖耗热量及热负荷的影响,分别对比了在8个门窗气密性等级下海拔高度分别取2850.7m、0m的建筑负荷及耗热量的情况,可以得出如下结论:

(1) 空气密度受海拔高度、空气干球温度的共同作用,其中海拔高度的变化对空气密度的影响较为显著,当海拔高度达到一定高度后,空气温度对密度的影响变得十分微小。

(2) 通过模拟计算可知,在相同气密性条件下海拔升高,建筑的采暖设计热负荷将会降低,高

海拔下,气密性对建筑热负荷影响不如低海拔显著。

(3) 对于相同空气渗透体积变化量 ΔV 相同时,高海拔 ρ 小于低海拔时的,则冷风渗透部分质量流量变化量在高海拔时小于低海拔,对应负荷部分变化量偏小,在围护结构部分热负荷不变的条件下,总的热负荷在高海拔将小于低海拔。

参考文献:

- [1] Martin Prignon, Geoffrey Van Moeseke. Factors influencing airtightness and airtightness predictive models: A literature review[J]. Energy & Buildings, 2017:146.
- [2] 刘东,陈沛霖,张云坤.建筑环境与暖通空调节能[J].节能技术,2001,(2):17-19.
- [3] Ng L C, Persily A K, Emmerich S J. Improving infiltration modeling in commercial building energy models[J]. Energy & Buildings, 2015,88:316-323.
- [4] J Šadauskienė, L Šeduikytė, V Paukštys, et al. The role of air tightness in assessment of building energy performance: Case study of Lithuania[J]. Energy for Sustainable Development, 2016,32:31-39.
- [5] Relander T O, Sverre Holøs, Thue J V. Airtightness estimation—A state of the art review and an en route upper limit evaluation principle to increase the chances that wood-frame houses with a vapour- and wind-barrier comply with the airtightness requirements[J]. Energy & Buildings, 2012,54:444-452.
- [6] Goopyo Hong, Byungseon Sean Kim. Field measurements of infiltration rate in high rise residential buildings using the constant concentration method[J]. Building and Environment, 2016:97.
- [7] Sorgato M J, Melo A P, Lamberts R. The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption[J]. Energy & Buildings, 2016,133:1-13.
- [8] Alberto Meiss, Jesús Feijó-Muñoz. The energy impact of infiltration: a study on buildings located in north central Spain[J]. Energy Efficiency, 2015,8(1).
- [9] GB/T 7106-2008,建筑外门窗气密、水密、抗风压性能分级及检测方法[S].北京:中国标准出版社,2011.
- [10] 龙恩深.建筑能耗基因理论与建筑节能实践[M].北京:

Commented [21]: 补充出版地, 出版单位, 及出版日期

科学出版社,2009.

