

建筑气密性对住宅能耗影响的分析*

清华大学 丰晓航[☆] 燕 达 彭 琛 江 亿

摘要 简要介绍了国内外居住建筑气密性的相关标准、研究现状和节能措施,在此基础上综合考虑人体健康需求和节能要求,建立了居住建筑气密性和通风模式的模型,分析了不同气密性条件下不同通风模式不同气候区的供暖空调能耗,提出优化的气密性和通风模式。

关键词 建筑气密性 通风模式 供暖空调能耗 节能 居住建筑

Influence of residential building air tightness on energy consumption

By Feng Xiaohang[★], Yan Da, Peng Chen and Jiang Yi

Abstract Briefly presents the relevant standards, current research status and energy saving measures of residential building air tightness at home and abroad. Considering the needs of human health and energy saving, establishes the air tightness model and ventilation model of residential buildings. Analyses the energy consumption of heating and air conditioning system under different air tightness levels, different ventilation modes and different climate areas. Puts forward optimal air tightness and ventilation mode.

Keywords building air tightness, ventilation mode, energy consumption of heating and air conditioning system, energy saving, residential building

★ Tsinghua University, Beijing, China

0 引言

建筑物气密性是影响建筑供暖能耗和空调能耗的重要因素。室内外空气通过门窗的缝隙可直接进行交换,在供暖季或空调季,由于室内外温差,空气渗透将增加供暖负荷或空调负荷。尤其在严寒地区和寒冷地区的冬季,室内外温差大,室外空气进入室内将明显增大新风负荷。相关研究表明,空气渗透引起的热损失占建筑热负荷的 25%~50%^[1],Caffey 认为冷热负荷中 40% 由空气渗透引起^[2],Persily 得出的比例为 33%^[3]。针对国内情况,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%^[4]。可见,因空气渗透引起的能耗在建筑供暖和空调能耗中所占比例较大。

提高建筑气密性可减小室内外的空气渗透量,有效地降低空气渗透引起的供暖或空调负荷,但同时也减少通过门窗渗透进入室内的新风

量。而室内新风量不足时,会对人体健康产生不利影响。Wargoeki 等人结合大量的文献调研,指出通风换气和人体健康存在很强的关联性,通风换气量不足时,易引发病态建筑综合征(sick building syndrome, SBS)、炎症、哮喘和过敏等疾病和症状,当住宅内换气次数小于 0.5 h^{-1} 时,过敏病情有所增加^[5]。Oie 等人挑选了 172 位患有支气管梗阻的儿童,并以相同出生日期的健康儿童为对照,调查了住宅的换气次数等参数,发现居住在换气次数低(小于 0.5 h^{-1})的室内的群体患有支气管梗阻的概率要高于居住在换气次数较高住宅里的群体^[6]。欧洲国家的标准中给出的换气次数下限一般为 0.5 h^{-1} ^[7]。为保证人体健康,当空气渗透量无法达到室内的新风需求时,需要采用机械通风的形式引入新风。此时,尽管减小了空气渗透带来的热损失,但是同时增

* 国家自然科学基金资助项目(编号:51078376),国家能源“十二五”规划课题——建筑节能评估方法和指标体系研究(编号:2012BAJ12B03)

[☆] 丰晓航,男,1989年6月生,在读博士研究生
100084 北京市清华大学建筑节能研究中心 201 室
(010) 62789761
E-mail: fengxh12@mails. tsinghua. edu. cn
收稿日期:2013-04-07

加了风机电耗,总体上是否节能需要进一步的计算分析。

综合考虑人体健康需求和节能,结合建筑的气密性,可以有两种通风模式:1)自然通风的模式,建筑气密性较差,依靠空气渗透已能满足人体健康要求;2)机械通风的模式,建筑气密性较好,只依靠空气渗透不能满足人体健康要求。本文尝试探讨两种模式下建筑气密性对住宅能耗的影响,提出优化的气密性和通风模式。

1 相关研究调研

1.1 不同国家气密性标准和现状

不同国家针对建筑气密性的标准有所差异,对气密性标准的评价方法也不尽相同。欧美发达国家对建筑气密性有较严格的规定,各国的气密性标准中使用的评价方法大体上有以下两种:

1)换气次数法。以建筑物内外压差为 50 Pa 时,单位时间内室内外空气交换量与建筑内部容积的比值作为标准,记为 ACH_{50} 。

表 1 列出了采用该种方法的国家和相应的标准值^[8]。

表 1 采用换气次数法的国家和相应的标准值

气密性标准值(ACH_{50})/ h^{-1}	
荷兰	6
瑞士	3.6
德国	1.8~3.6
丹麦	2.8
芬兰	1
瑞典 ^[9]	1.0~3.0

2)空气渗透率法。以建筑物内外压差为 50 Pa,单位时间内室内外空气交换量与外围护结构面积的比值作为标准,称为空气渗透率。

表 2 列出了采用该种方法的国家和相应的标准值^[8]。

表 2 采用空气渗透率法的国家和相应的标准值

气密性标准值/($m^3/(m^2 \cdot h)$)	
英国	10
爱沙尼亚	3
加拿大	1.5

建筑物气密性主要取决于外门窗密闭条件。我国标准将建筑外门窗的气密性指标分为 8 个等级,以标准状态下压力差为 10 Pa 时的单位开启缝长空气渗透量 q_1 和单位面积空气渗透量 q_2 作为分级指标^[10]。表 3 为分级情况。

表 3 我国建筑外门窗的气密性指标分段

	分级							
	1	2	3	4	5	6	7	8
单位缝长分级	$4.0 m^3/(m \cdot h) \geq$	$3.5 m^3/(m \cdot h) \geq$	$3.0 m^3/(m \cdot h) \geq$	$2.5 m^3/(m \cdot h) \geq$	$2.0 m^3/(m \cdot h) \geq$	$1.5 m^3/(m \cdot h) \geq$	$1.0 m^3/(m \cdot h) \geq$	$q_1 \leq 0.5$
指标值 q_1	$q_1 > 3.5 m^3/(m \cdot h)$	$q_1 > 3.0 m^3/(m \cdot h)$	$q_1 > 2.5 m^3/(m \cdot h)$	$q_1 > 2.0 m^3/(m \cdot h)$	$q_1 > 1.5 m^3/(m \cdot h)$	$q_1 > 1.0 m^3/(m \cdot h)$	$q_1 > 0.5 m^3/(m \cdot h)$	$m^3/(m \cdot h)$
单位面积分级	$12 m^3/(m^2 \cdot h) \geq$	$10.5 m^3/(m^2 \cdot h) \geq$	$9.0 m^3/(m^2 \cdot h) \geq$	$7.5 m^3/(m^2 \cdot h) \geq$	$6.0 m^3/(m^2 \cdot h) \geq$	$4.5 m^3/(m^2 \cdot h) \geq$	$3.0 m^3/(m^2 \cdot h) \geq$	$q_2 \leq 1.5$
指标值 q_2	$q_2 > 10.5 m^3/(m^2 \cdot h)$	$q_2 > 9.0 m^3/(m^2 \cdot h)$	$q_2 > 7.5 m^3/(m^2 \cdot h)$	$q_2 > 6.0 m^3/(m^2 \cdot h)$	$q_2 > 4.5 m^3/(m^2 \cdot h)$	$q_2 > 3.0 m^3/(m^2 \cdot h)$	$q_2 > 1.5 m^3/(m^2 \cdot h)$	$m^3/(m^2 \cdot h)$

与国外不同,国内尚没有明确的建筑气密性标准。

在满足人体健康的前提下,0.5 h^{-1} 被作为换气次数的下限^[7,11]。我国标准给出的严寒或寒冷地区换气次数为 0.5 h^{-1} ,夏热冬冷地区为 1 h^{-1} ^[12-14]。这种自然条件下的换气次数 ACH 可转换为 50 Pa 压差下的换气次数 ACH_{50} ^[15]:

$$ACH = \frac{ACH_{50}}{n} \quad (1)$$

式中 n 为关联系数,与各地的气候等因素有关,我国的建筑可取 $n=17$ 。

文献^[15]对我国北方地区(北京和唐山)的居住建筑进行了气密性测试,其中北京住宅的换气次数为 0.24 h^{-1} ,唐山住宅的换气次数为 0.98 h^{-1} 。按式(1)转化为 ACH_{50} ,分别为 4.08 h^{-1} 和 16.66 h^{-1} 。

Pan 测试了英国 287 栋 2006 年以后新建的居住建筑的气密性,室内外 50 Pa 压差下空气渗透率

平均值为 5.97 $m^3/(m^2 \cdot h)$,测试结果大致符合一般正态分布,最大值为 17.46 $m^3/(m^2 \cdot h)$,97.9% 的建筑达到了英国建筑规范 L1A2006 的空气渗透率标准,同时通过回归分析,研究了气密性和建筑材料、建筑形式、季节、围护结构面积等的定量关系^[8]。Ryynanen 从 1997 年开始对芬兰的 22 栋居住建筑(18 栋独立式住宅,4 栋联排别墅)进行了为期 3 年的气密性测试,刚建成时独立住宅的换气次数 ACH_{50} 为 4.5 h^{-1} ,联排别墅为 2.8 h^{-1} ,随着建筑的使用,气密性的改善并不明显^[9]。Jokisalo 等人综合了芬兰 170 栋独立式住宅的气密性测试数据,得出其平均 ACH_{50} 为 3.7 h^{-1} ,并建立了住宅的能耗计算模型,探讨了空气渗透的能耗影响^[16];Kalamees 于 2003—2005 年间测试了爱沙尼亚 32 栋独立式住宅的气密性,分析楼层数、是否现场施工、通风方式等不同情况下气密性的差别,所有建筑空气渗透率的平均值为 4.2 $m^3/(m^2 \cdot h)$,换气

次数为 4.9 h^{-1} [17]。

从实测结果来看,除英国外,发达国家的气密性相对于各自国家的标准仍存在差距;而我国对建筑气密性的实测数据较少,从已有数据看,我国的气密性等级相对于发达国家还处于较低的水平。在目前的气密性水平下,是否应该以发达国家的标准为参照,增强建筑气密性,是一个值得研究的问题。

1.2 提高建筑气密性节能作用的相关研究

提高建筑气密性可以减小全年供暖总能耗和峰值能耗[18]。在风压和热压的作用下,气密性是保证建筑外窗保温性能稳定的重要控制性指标[19]:外窗的气密性直接关系到外窗的冷风渗透热损失,气密性等级越高,热损失越小。我国将建筑门窗气密性等级分为1~8级,一般1级窗的窗缝冷风渗透量约为 $4.5 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{h})$;若采用3级窗,可使房间冷风渗透热损失减少40%;若采用4级窗,可使此项能耗减少60%~70%;若采用5级窗,则可使此项能耗减少80%之多。施工时保证窗框和窗洞之间密封良好的话,则冷风渗透热损失取决于窗的气密性等级。

Jokisalo 等人对住宅空气渗透的模拟分析表明,ACH₅₀改变一个单位,因空气渗透引起的供暖能耗改变4%~12%,平均为7%,同时总的供暖能耗改变2%~7%,平均为4%[16]。Wall以瑞典的低能耗建筑为模型,模拟分析了室内设定温度、气密性、窗户类型、室内人员状况等对供暖能耗的影响,当空气渗透的换气次数从 0.2 h^{-1} 降低到 0.1 h^{-1} 时,供暖能耗降低28.7%;从 0.1 h^{-1} 降低到 0.05 h^{-1} 时,供暖能耗降低19.5%[18]。在华北地区,典型多层住宅通过门窗缝隙的空气渗透热损失约占供暖热负荷的23%,加强门窗的气密性是减少供暖能耗的关键环节[20]。文献[21]建议综合考虑外门窗的传热系数与空气渗透导致的热损失来评价门窗的实际保温效能。文献[22]分析了宁波地区提高建筑气密性对全年能耗的影响,模型建筑换气次数从 1 h^{-1} 减小到 0.1 h^{-1} ,即外窗气密性等级从2级增大到5级,全年供冷能耗不变,全年供暖能耗减小77%,全年耗电量减小15%。提高外窗气密性对减少居住建筑全年耗电量效果较显著,因此减少建筑物空气渗透能耗是建筑节能的一个重要方面。Emmerich 等人研究了美国的办公建

筑,提高气密性,使得空气渗透换气次数从 $0.17 \sim 0.26 \text{ h}^{-1}$ 减小到 $0.02 \sim 0.05 \text{ h}^{-1}$,可以节约40%的燃气用量和25%的用电量[23]。

有文献指出,近年来,随着建筑技术的发展,住宅的气密性有了较大的提高,单靠自然通风远不能满足人们对室内空气质量的要求,加之装修建材的大量应用,室内空气质量越发恶劣。采用有组织的通风换气来维持良好的室内空气质量很有必要[24]。

Tommerup 等人以住宅的节能改造为例,分析了采用加强保温、采用机械通风加热回收等措施之后的供暖能耗变化情况,通过模拟计算得到对于某一住宅在加强外围护结构的保温后供暖能耗为 $90 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,在此基础上引入机械通风加热回收装置,供暖能耗降为 $42 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ [25]。芬兰国家技术研究中心 VTT 建筑技术研究所进行的一项低能耗建筑物研发项目发现,气密性好的外围护结构是确保通风系统和热回收装置运行并进行有效控制的必要条件,通过提高建筑的气密性和利用热回收装置,较大幅度地降低了供暖能耗,从而降低了建筑运行的总能耗[26]。Simonson 研究了芬兰居住建筑,分析了采用机械通风与热回收对节能的影响,研究发现节能量与热回收效率有密切关系,当热回收效率分别为70%,50%和0%时,换气次数每增加 0.1 h^{-1} ,能耗将分别增加2.7,4.5,9.2 $\text{kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;而 0.5 h^{-1} 的换气次数下,每提高10%的热回收效率,可减少3.3 $\text{kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的能耗[27]。此外,德国学者通过实际工程研究指出,被动房采用热回收技术,冬季可以实现明显的节能效果[28]。

综上,国外对居住建筑的气密性作了广泛的测试调研,得出了居住建筑的换气次数和空气渗透率,并与相关标准进行了对比,同时,分析了在不同气密性条件下的建筑能耗。我国对居住建筑的气密性测试较少,缺乏对减小换气次数后建筑能耗变化情况的相关研究。在保证人体健康的前提下,以节能为目标,确定合适的气密性等级和通风模式,是今后建筑节能中的重要一环。

2 模型及工况设计

2.1 居住建筑模型

实际建筑中影响能耗的因素复杂,若采用实验的方法,不仅周期长而且通风换气量难以控制,很

难达到理想的效果。为此,本文通过建立居住建筑模型,定量分析门窗不同气密性等级下,自然通风和机械通风两种模式对建筑能耗的影响,考虑气候的差异,针对不同气候区提出适宜的通风模式和建筑气密性等级。

建筑模型见图 1。

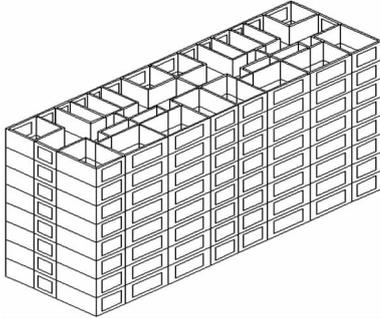


图 1 建筑模型

每层有 4 户居民,建筑的窗墙面积比为 0.31。以户为研究单位,采用气密性等级的单位面积分级指标 q_2 计算空气渗透引起的换气次数。得到的空气渗透换气次数和门窗气密性等级的关系见表 4。

表 4 门窗气密性等级和通风换气次数的关系

通风换气次数/h ⁻¹	气密性等级							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	1.00	0.87	0.74	0.62	0.50	0.37	0.25	0.12

本文分析不同气密性等级和通风模式下建筑的供暖、空调和风机能耗,以气密性等级和通风模式为变量,技术路线图见图 2。

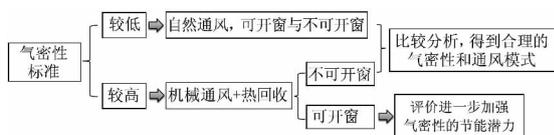


图 2 气密性和通风模式分析的技术路线图

2.2 工况设计

室内人员活动需要一定的新风量。建筑气密性较差时,通过空气渗透即可满足新风需求,但空气渗透会引起冷热负荷;为减小这部分负荷,可通过增强建筑气密性实现,当气密性达到一定水平以后,只依靠空气渗透已不能满足新风需求,这时需要引入机械通风补充不足的量,并且可以通过热回收装置回收一部分冷热量,但由此带来了额外的风机能耗。实际应用中采用密闭不可开窗加机械通风的模式,还是采用可开窗加自然通风的模式,需要经过计算论证。

基于以上认识,设计以下工况进行计算:

1) 可开窗和不可开窗的设计

在相同气密性等级下,窗户可开和不可开决定了能否利用室外新风调节室内的热环境。通过比较同一气密性等级下,窗户可开和不可开情况下的供暖和空调能耗,定量评价两者造成的能耗差异。

2) 加入机械通风和热回收的分析

加强气密性至一定程度时,为满足新风需求,需要引入机械通风,热回收装置可回收一部分能量。探讨随着气密性的增强,采用机械通风模式各部分的能耗变化情况,评价机械通风模式随气密性变化的节能效果。

3) 采用自然通风和机械通风的比较

气密性较差时,可利用空气渗透满足新风需求;气密性较好时,需采用机械通风。通过模拟计算分析比较,从节能的角度选择较为合适的通风模式。

4) 机械通风,同时可开窗充分利用自然通风的模式研究

气密性较好时,采用机械通风,同时假设可开窗充分利用自然通风改善室内热环境。此时未考虑窗户密闭性的工艺要求,即认为可开窗且密闭性好,分析通风模式进一步的节能潜力。

考虑严寒、寒冷、夏热冬冷和夏热冬暖 4 个气候区,分别选择哈尔滨、北京、上海、广州为代表城市,应用当地的气象条件计算。针对建筑外门窗的 8 个气密性等级,计算机械通风和开窗通风模式下的供暖、空调和风机能耗。

对于北京和哈尔滨而言,标准中给出的换气次数要求为 0.5 h^{-1} ;对上海和广州而言,标准给出的换气次数要求为 1 h^{-1} 。

综合以上分析,模拟计算的工况见表 5。

为便于比较分析,将得到的负荷结果折算为电耗。考虑不同气候条件下 COP 的差异,风机电耗由样本^[29]根据风量得出。

3 模拟结果与分析

3.1 窗户是否可开启的比较

根据以上的工况设计,本节分析在不需要加入机械通风系统时,不同气候条件下,外窗可开启和不可开启(建筑设计不可开外窗,或者集中空调或供暖系统运行时不允许开窗)两种类型建筑,提高气密性对建筑空调和供暖能耗的影响。

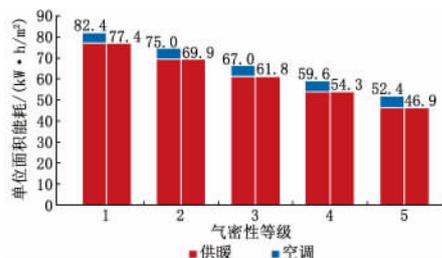
表5 模拟计算的工况

	气密性等级	窗户可开与否	通风模式	研究问题
哈尔滨	1~5	是	自然通风	可开窗与不可开窗
	1~5	否	自然通风	可开窗与不可开窗
	6~8	是	机械通风,充分利用自然通风	不考虑密闭性工艺要求
北京	6~8	否	机械通风	机械通风和热回收分析
	1~5	是	自然通风	可开窗与不可开窗
	1~5	否	自然通风	可开窗与不可开窗
上海	6~8	是	机械通风,充分利用自然通风	不考虑密闭性工艺要求
	6~8	否	机械通风	机械通风和热回收分析
	1	是	自然通风	可开窗与不可开窗
广州	1	否	自然通风	可开窗与不可开窗
	2~8	是	机械通风,充分利用自然通风	不考虑密闭性工艺要求
	2~8	否	机械通风	机械通风和热回收分析

下面给出了哈尔滨、北京、上海和广州4个城市供暖和空调能耗的计算结果,由于气候条件不同,不同城市空调和供暖能耗受外窗可开启与否以及建筑气密性的影响有以下特点:

1) 严寒地区

哈尔滨处于严寒地区,该地区的气候特点是,全年最热月平均气温低于 25°C ,充分利用自然通风可以解决夏季供冷的需求,因此,在可开窗的情况下,夏季可以不用空调,如果外窗不可开启,则还有空调的需求。如图3所示,提高门窗气密性,对于减少供暖能耗有明显效果,当气密性等级从1级提高到5级,每 m^2 可以减少 $30.5\text{ kW}\cdot\text{h}$ 的供暖能耗,节能 39.4% 。这主要是因为,在冬季室内外温差大,按照室内 18°C 、室外 -10°C 计算,温差接近 30°C ,而夏季室内外温差绝大部分时间在 5°C 以内,因而由于空气渗透造成的热量损失大,提高气密性大大减少了供暖能耗。



注:每一气密性等级下,前一列为该气密性等级下窗不可开模式下的能耗,后一列为窗可开模式下的能耗

图3 哈尔滨窗可开与不可开能耗比较

2) 寒冷地区

北京处于寒冷地区,该地区冬季寒冷,而夏季最热月温度可能超过 28°C ,即便如此,开窗通风在大部分时间可以带走室内余热,解决降温问题。例如当气密性等级为5级时,相比于不可开窗 $15.2\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 空调能耗的情况,可开窗时空调能耗为 $1.6\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$,仅为不可开窗情况的 10.5% 。由图4可以看出,从提高气密性的效果来看,对空调能耗的影响较小,而对减少供暖能耗有明显的作用。

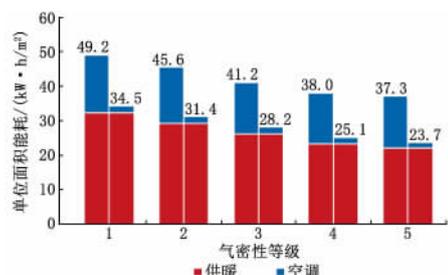


图4 北京窗可开与不可开能耗比较

3) 夏热冬冷地区

上海处于夏热冬冷地区,相比于北京和哈尔滨,上海夏季炎热,对空调需求高。而该地区建筑通风换气量要求达到 1 h^{-1} ,对于该模型在气密性等级为1时,通风量已经为 1 h^{-1} ,提高气密性等级已经不能达到通风换气量要求。如图5所示,在可开窗的情况下,空调用能大大减少,每 m^2 空调用能从 $24.1\text{ kW}\cdot\text{h}$ 减少到 $8.5\text{ kW}\cdot\text{h}$,减少了 64.7% 。

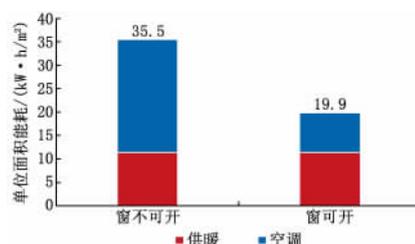


图5 上海窗可开与不可开能耗比较

4) 夏热冬暖地区

与夏热冬冷地区一样,该地区通风换气量应该在 1 h^{-1} 以上,因此如果不引入机械通风,不宜继续提高建筑气密性。该地区冬季月平均温度高于 10°C ,基本不需要供暖。以广州为例,如图6所示,外窗可开启可以使空调用能从 $49.3\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 减少到 $17.4\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 。

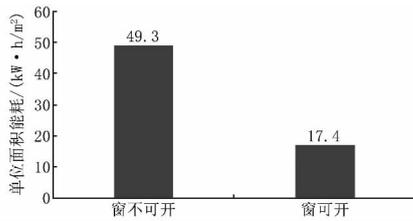


图6 广州窗可开与不可开能耗比较

综上,建筑外窗可开启,可以充分利用室外温度合适时段的自然通风,调节室内热舒适,减少空调能耗,对于寒冷地区、夏热冬冷地区和夏热冬暖地区,均有显著的效果;提高气密性对于降低严寒地区和寒冷地区的能耗有明显的作

3.2 机械通风下的能耗

对于哈尔滨和北京地区,当建筑物门窗气密性等级大于5级时,换气次数已经小于 0.5 h^{-1} ,如气密性等级达到6级时,换气次数为 0.37 h^{-1} 。为了满足通风换气次数要求,需要采用机械通风装置,这时可以通过室内外空气热回收装置回收热量,减少空调或供暖能耗,但同时增加了风机的能耗。上海和广州地区,因标准给出的换气次数要求为 1 h^{-1} ,所以在气密性等级达到2级时,就需要引入机械通风。本节分析提高气密性对建筑用能的影响,图7~10给出了哈尔滨、北京、上海和广州4个城市该建筑模型不同气密性等级下不可开窗模式(当气密性等级满足新风需求时)和机械通风(当气密性等级不满足新风需求时)的供暖、空调和风机能耗。

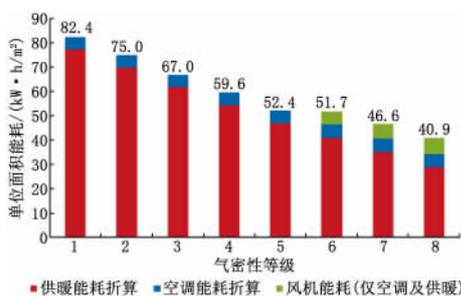


图7 哈尔滨不可开窗模式及机械通风能耗

1) 严寒地区

该地区当建筑物门窗的气密性高于5级时,需要通过机械通风满足室内通风换气要求,由图7可以看出,虽然提高气密性减少了供暖能耗,但同时增加了风机能耗,随着通风量的增加风机能耗也有所增加。提高气密性对于减少供暖能耗有明显的

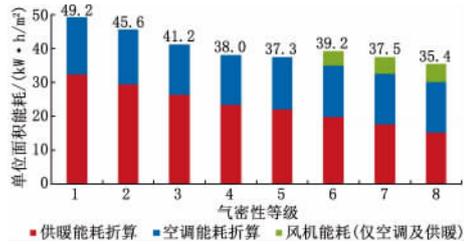


图8 北京不可开窗模式及机械通风能耗

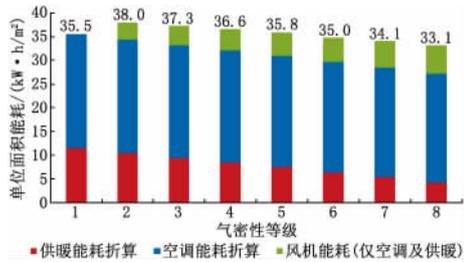


图9 上海不开窗模式及机械通风能耗

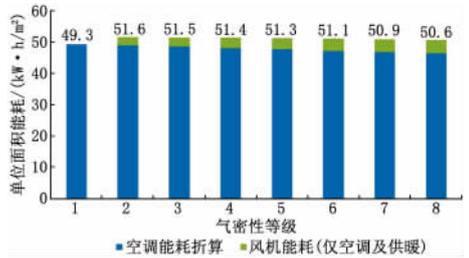


图10 广州不开窗模式及机械通风能耗

作用,但由于风机能耗的影响,整体能耗小幅减少。

2) 寒冷地区

与严寒地区一样,当建筑物门窗气密性达到5级以上时,需要增加机械通风以保证室内换气量需求。如图8所示,当气密性大于5级时,建筑整体用能量高于建筑气密性为5级的能耗,继续提高气密性并不能节省总的用能量。实际上,热回收在室内外温差大时作用更为明显,因此冬季更加适用。而由于气候影响,相比于严寒地区,寒冷地区建筑供暖能耗所占的比例相对较小,能回收的热量也较少,因此采用机械通风加热回收的效果不如严寒地区,甚至如该建筑所示,能耗有可能更高。

3) 夏热冬冷地区和夏热冬暖地区

对于上海地区,提高建筑物门窗气密性能减少供暖能耗,但如上所述,考虑增加的风机能耗,总能耗变化不大,如图9所示。对于广州地区,没有供暖需求,提高门窗气密性对减少空调能耗的作用很有限,而风机能耗明显增加,总能耗不降反升,如图10所示。总之,提高门窗气密性对这两个地区的

建筑不能起到有效的节能作用。

3.3 自然通风和机械通风的比较

考虑满足新风需求,哈尔滨和北京地区建筑物门窗在自然通风模式下能达到的最高的气密性等级为5级,上海地区和广州地区为1级;当各地建筑物门窗的气密性等级高于上述级别时,应采用机械通风加热回收的方式。由以上的分析可见,在自然通风的模式下,随着气密性等级的提高,供暖能耗基本不变,而空调能耗则大大降低,因此从节能的角度来说,满足通风需求的最高气密性等级为自然通风模式下的最优气密性等级。下面分析比较这一气密性等级下的自然通风模式和提高气密性等级以后机械通风模式下的能耗情况。

相关的工况见表6。

表6 自然通风和机械通风的相关工况

	气密性等级	窗户可开与否	通风模式
哈尔滨	5	是	自然通风
	6~8	否	机械通风
北京	5	是	自然通风
	6~8	否	机械通风
上海	1	是	自然通风
	2~8	否	机械通风
广州	1	是	自然通风
	2~8	否	机械通风

1) 严寒地区

如图11所示,当门窗气密性等级为5级时,仅需自然通风即可,几乎没有空调能耗,说明在严寒

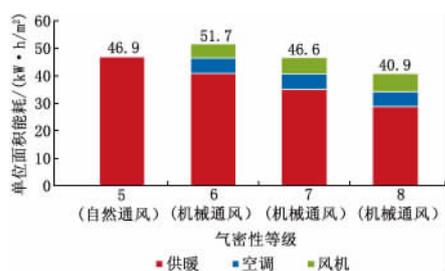


图11 哈尔滨自然通风与机械通风能耗比较

地区,若靠自然通风的调节,夏季可不用空调即能实现室温的调节;门窗气密性等级高于5级时,需要采用机械通风。可见,在机械通风模式下,随着气密性等级的提高能耗将降低,但是和自然通风模式相比,能耗降低并不明显,只有当气密性等级达到8级时采用机械通风才能有节能效果。

2) 寒冷地区

寒冷地区情形与严寒地区类似,不同的是空调能耗所占的比例相对较高。如图12所示,门窗气

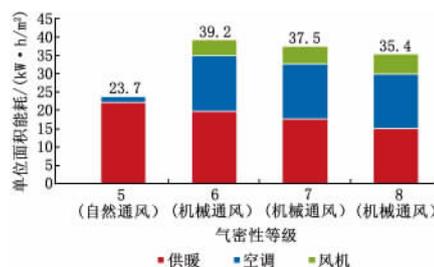


图12 北京自然通风与机械通风能耗比较

密性等级为5级时采用自然通风,空调能耗较小。与严寒地区有类似结论,即机械通风模式和5级气密性等级下的自然通风模式相比能耗更高,并且因为空调能耗大大增加,而热回收效果在夏季不明显,总体上机械通风的能耗要大大高于自然通风模式的能耗,门窗气密性8级时能耗达到自然通风模式的1.5倍。

3) 夏热冬冷地区

在该地区,当门窗气密性等级高于1级时采用机械通风;气密性等级为1级时,采用自然通风即可,供暖和空调能耗相当。提高门窗气密性等级,不能开窗通风,将造成空调能耗大大增加,随着气密性等级的提高,冬季的供暖能耗逐渐减小,空调能耗基本不变,风机能耗略有增加,总体上能耗逐渐减小。如图13所示,各较高气密性等级机械通风模式下的能耗均高于自然通风模式下的能耗,门窗气密性等级为8级下的能耗相当于自然通风模式的1.7倍。

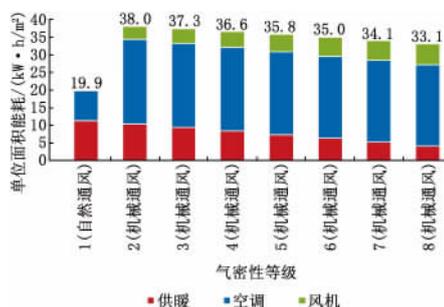


图13 上海自然通风与机械通风能耗比较

4) 夏热冬暖地区

与夏热冬冷地区的结果类似,但由于没有供暖能耗,随着门窗气密性等级的提高,空调能耗略有减少,风机能耗略有上升,总体上能耗变化很小。如图14所示,各较高气密性等级机械通风模式下的能耗均高于自然通风模式下的能耗,门窗气密性等级为8级下的能耗相当于自然通

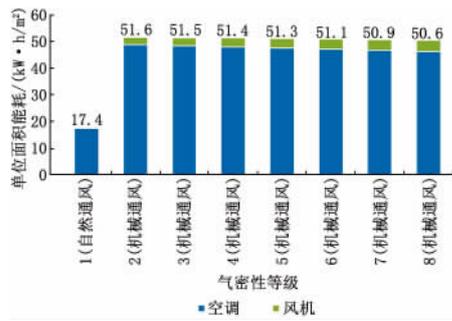


图 14 广州自然通风与机械通风能耗比较

风模式的 2.9 倍。

3.4 机械通风,同时可开窗充分利用自然通风的模式研究

门窗气密性较好时,需要采用机械通风,同时假设可开窗充分利用自然通风改善室内热环境。此时未考虑窗户密闭性的工艺要求,即认为窗可开且密闭性好,分析通风模式进一步的节能潜力。

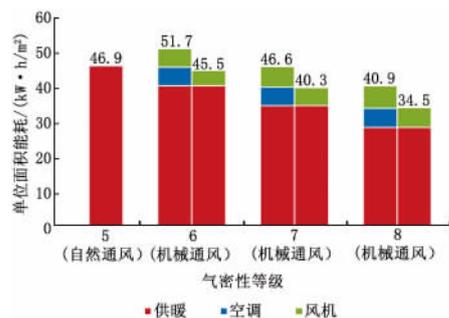
相关的工况见表 7。

表 7 机械通风同时可开窗模式中的相关工况

	气密性等级	窗户可开与否	通风模式
哈尔滨	5	是	自然通风
	6~8	是	不考虑密闭性工艺要求
北京	5	是	自然通风
	6~8	是	不考虑密闭性工艺要求
上海	1	是	自然通风
	2~8	是	不考虑密闭性工艺要求
广州	1	是	自然通风
	2~8	是	不考虑密闭性工艺要求

1) 严寒地区

各气密性等级下建筑物供暖能耗和全年机械通风模式能耗完全相同,几乎没有夏季空调能耗,所以总能耗有所下降,如图 15 所示。与自然通风模式相比,当门窗气密性达到 8 级时,总能耗为 34.5 kW·h/m²,自然通风模式下为 46.9 kW·h/m²。



注:机械通风下,左侧一栏为供暖与空调均采用机械通风,右侧一栏为机械通风同时充分利用自然通风的模式

图 15 哈尔滨 3 种通风模式能耗比较

h/m²,可见通过加强建筑门窗气密性,在严寒地区具有节能潜力。

2) 寒冷地区

相比于全年采用机械通风的模式,该通风模式大大减少了空调能耗,而风机电耗约为全年机械通风能耗的 60%,总体上能耗降低较多。但是由于自然通风模式相比于全年机械通风的模式,本身已能将空调能耗大大降低,并且无风机电耗,所以总体上这种通风模式与自然通风模式相比没有明显的节能优势可言,如图 16 所示。例如,在门窗气密性等级为 8 级时,总能耗为 20.6 kW·h/m²;自然通风模式下,总能耗为 23.7 kW·h/m²。

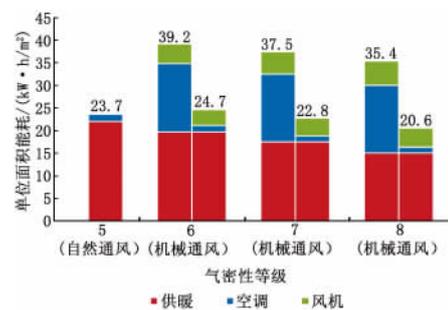


图 16 北京 3 种通风模式能耗比较

3) 夏热冬冷地区

当门窗气密性等级高于 1 级时,需考虑机械通风,分析这种通风模式下的能耗。随着气密性等级的提高,建筑物能耗逐渐降低;与同等等级下全年采用机械通风模式对比,大大减少了空调能耗,因此总能耗大大降低;与气密性等级为 1 级时的自然通风模式相比,总能耗在气密性等级较高时可能更小。如图 17 所示,当门窗气密性等级达到 8 级时,总能耗为 14.7 kW·h/m²;自然通风模式下总能耗为 19.9 kW·h/m²。

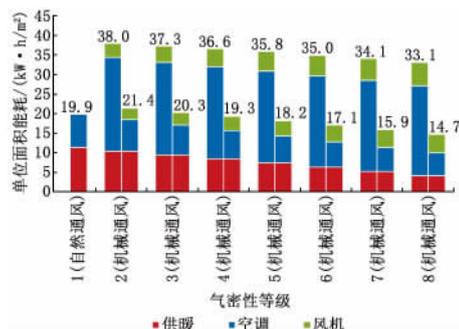


图 17 上海 3 种通风模式能耗比较

4) 夏热冬暖地区

与夏热冬冷地区比较类似,因为没有供暖能耗,该通风模式相比于全年机械通风模式的节能优势更加明显。与自然通风模式相比,当门窗气密性等级较高时,能耗也有可能降低。如图 18 所示,在气密性等级为 8 级时,空调能耗为 $13.8 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$,低于自然通风模式下的空调能耗 ($17.4 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$)。

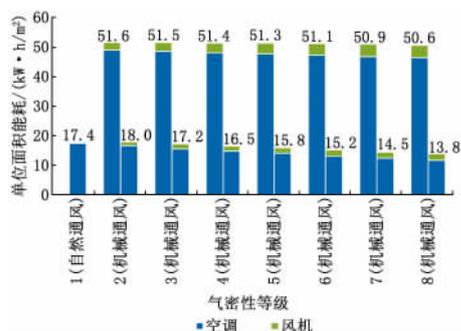


图 18 广州 3 种通风模式能耗比较

这种通风模式能同时满足换气次数和节能的要求,相比于冬夏季均采用机械通风加热回收的模式有节能效果。在该种模式下,门窗气密性等级提高时,总能耗有可能小于需满足通风换气次数要求下的自然通风模式(5级或1级)。但是从以上计算结果可以看出,除哈尔滨地区因为冬季供暖能耗所占比例很大,热回收效果明显以外,其他地区这部分节能量相对较小,从绝对量上来看为 $3 \sim 5 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$,而随着气密性等级的增加,对窗的密闭性能要求提高,要同时满足高密闭性和可开启性是十分困难的。因此,这种通风模式节能潜力一般,而且难以在技术上实现。

4 结论

4.1 在满足换气次数要求的前提下,随着门窗气密性等级的提高,可开窗和不可开窗两种模式下,供暖能耗明显降低,空调能耗基本不变,总能耗逐级降低;在同一个气密性等级下,可开窗模式与不可开窗模式相比,空调能耗显著减小。

4.2 在气密性等级较高时,为了满足通风换气次数要求,需要采用机械通风装置,这时可以通过室内外空气热回收装置回收热量,减少空调或供暖能耗,但同时增加了风机的能耗。采用机械通风,相比于气密性等级满足新风要求并不可开窗的模式,节能效果不佳,能耗甚至可能更高。

4.3 在满足新风量要求的前提下,适当提高门窗气密性等级并采用自然通风,其能耗低于进一步提高气密性并采用机械通风加热回收的通风模式。气密性等级在刚好满足通风条件的情况下,采取自然通风时,空调供暖能耗最低。

4.4 门窗气密性高时,在严寒地区回收热量多,具有较大的节能潜力;而在其他地区节能量相对较小,同时随着门窗气密性等级的增加,对窗的密闭性能要求也提高,要同时满足高密闭性和可开启性是十分困难的。因此,这种通风模式节能潜力一般,而且难以在技术上实现。

参考文献:

- [1] Younes C, Shdid C A, Bitsuamlak G. Air infiltration through building envelopes: a review[J]. Journal of Building Physics, 2012, 35(3): 267-302
- [2] Caffey G E. Residential air infiltration [G] // ASHRAE Trans, 1979, 85(9): 41-57
- [3] Persily A K. Understanding air infiltration in homes [M]. Center for Energy and Environmental Studies, Princeton University, 1982
- [4] 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, 19(2): 17-19
- [5] Wargoeki P, Sundell J, Bischof W, et al. Ventilation and health in non-industrial indoor environments: report from a European multidisciplinary scientific consensus meeting (EUROVEN) [J]. Indoor Air, 2002, 12(2): 113-128
- [6] Oie L, Nafstad P, Botten G, et al. Ventilation in homes and bronchial obstruction in young children [J]. Epidemiology, 1999, 10(3): 294-299
- [7] Dimitroulopoulou C. Ventilation in European dwellings; a review[J]. Building and Environment, 2012, 47(1): 109-125
- [8] Pan W. Relationships between air-tightness and its influencing factors of post-2006 new-build dwellings in the UK[J]. Building and Environment, 2010, 45(11): 2387-2399
- [9] Ryynanen K. Air tightness of buildings in the arctic circle housing fair, Rovaniemi, Finland [C] // Aerospace/Defense Sensing, Simulation, and Controls. International Society for Optics and Photonics, 2001: 252-260
- [10] 中国建筑科学研究院. GB/T 7106—2008 建筑外门窗、水密、抗风压性能分级及检测方法[S]. 北京:

- 中国标准出版社, 2009
- [11] Oie L, Stymne H, Boman C A, et al. The ventilation rate of 344 Oslo residences[J]. *Indoor Air*, 1998, 8(3): 190-196
- [12] 中国建筑科学研究院. JGJ 26—2010 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
- [13] 上海市建筑科学研究院(集团)有限公司, 上海市建筑建材业市场管理总站. DGJ 08-205—2011 上海市居住建筑节能设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011
- [14] 中国建筑科学研究院, 广东省建筑科学研究院. JGJ 75—2003 夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003
- [15] Chen S, Levine M D, Li H, et al. Measured air tightness performance of residential buildings in North China and its influence on district space heating energy use[J]. *Energy and Buildings*, 2012, 51(8): 157-164
- [16] Jokisalo J, Kurnitski J, Korpi M, et al. Building leakage, infiltration, and energy performance analyses for Finnish detached houses[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(2): 377-387
- [17] Kalamees T. Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia[J]. *Building and Environment*, 2007, 42(6): 2369-2377
- [18] Wall M. Energy-efficient terrace houses in Sweden: simulations and measurements [J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38(6): 627-634
- [19] 班广生. 大型公共建筑围护结构节能改造的几项关键技术[J]. *建筑技术*, 2009, 40(4): 294-300
- [20] 张金玲. 北方采暖地区既有居住建筑窗体节能改造措施[J]. *山西建筑*, 2009, 35(30): 238-239
- [21] 刘正权, 刘海波, 董人文, 等. 建筑外门窗气密性及空气渗透热损失对实际保温效果的影响[J]. *门窗*, 2009(5): 25-28
- [22] 周燕, 闫成文, 姚健, 等. 居住建筑外窗气密性对建筑能耗的影响[J]. *宁波大学学报: 理工版*, 2007, 20(2): 248-250
- [23] Emmerich S J, McDowell T P, Anis W. Investigation of the impact of commercial building envelope airtightness on HVAC energy use[M]. US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, 2005
- [24] 张才才, 李振海. 上海市集合住宅气密性能实测及换气性能分析[J]. *节能*, 2005(2): 35-37
- [25] Tommerup H, Svendsen S. Energy savings in Danish residential building stock[J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38(6): 618-626
- [26] 曹福永. 芬兰低能耗建筑物[J]. *太阳能*, 2003(1): 18
- [27] Simonson C. Energy consumption and ventilation performance of a naturally ventilated ecological house in a cold climate[J]. *Energy and Buildings*, 2005, 37(1): 23-35
- [28] Schnieders J, Hermelink A. CEPHEUS results: measurements and occupants' satisfaction provide evidence for passive houses being an option for sustainable building [J]. *Energy Policy*, 2006, 34(2): 151-171
- [29] 森德(中国)暖通设备有限公司. 热回收新风系统 [EB/OL]. [2013-04]. <http://file.co188.com/ebook/openEBook2.action?bookId=1289202467806&pageNo=0>

(上接第 94 页)

参考文献:

- [1] Muraya N K, O'Neal D L. Thermal interference of adjacent legs in a vertical U-tube heat exchanger for a ground-coupled heat pump[G]// *ASHRAE Trans*, 1996, 102(2): 12-21
- [2] 范军, 胡玉秋, 孙奉仲, 等. 竖直双 U 型埋管地热换热器支管间热短路分析[J]. *可再生能源*, 2011, 29(4): 95-97
- [3] 沈国民, 张虹. 竖直 U 型埋管地热换热器热短路现象的影响参数分析[J]. *太阳能学报*, 2007, 28(6): 604-607
- [4] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001
- [5] 袁艳平, 雷波, 余南阳, 等. 地源热泵埋管换热器传热研究(2): 传热过程的完全数学描述[J]. *暖通空调*, 2009, 39(7): 9-12
- [6] Svec O J. Potential of ground-coupled heat source system [J]. *International Journal of Energy Research*, 1987(4): 571-581
- [7] 杨正武. U 型埋管换热器热短路特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009
- [8] 马健, 郑中援. 单 U 形和双 U 形埋管换热器传热模拟[J]. *暖通空调*, 2012, 42(5): 108-112
- [9] 连小鑫, 刘金祥, 陈晓春, 等. 垂直 U 型埋管换热器的数值模拟分析[J]. *太阳能学报*, 2012, 33(1): 48-54