

西北农村住宅建筑热工性能及节能策略分析

马 超, 刘艳峰, 王登甲, 王莹莹

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 针对西北地区农村住宅建筑, 以问卷调查方法对建筑形态、围护结构构造形式进行调查统计, 对建筑体形系数、窗墙比、外围护结构热工性能和建筑能耗进行分析, 提出了适宜于西北农村住宅建筑节能及采暖策略。研究表明: 建筑平均体形系数约为 0.9; 南、东、西和北向窗墙比平均值约为 0.17、0.14、0.14 和 0.12; 外墙、屋顶、外窗、外门、周边及非周边地面传热系数分别约为 1.98、2.52、4.74、4.65、0.34 和 0.08 W/(m²·K)。住宅建筑外墙耗热量较大, 约占建筑总耗热量 51%, 其次为屋顶, 约占 33%。住宅建筑节能和采暖可采用外围护结构保温、主被动太阳能和辅助热源采暖相结合的策略, 节能策略以提高外围护结构保温性能为主, 尤其是外墙和屋顶。

关键词: 农村建筑; 热工参数; 问卷调查; 节能策略

中图分类号: TU111.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)03-0427-06

Analysis of Thermal performance and Energy Saving Strategy of Rural Residence Building in Northwest China

MA Chao, LIU Yanfeng, WANG Dengjia, WANG Yingying

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: The building size and structure types of rural residence building were investigated by questionnaire method in Northwest China. The building shape coefficient, window-wall ratio, thermal performance of external envelope and building energy consumption were analyzed. Energy saving policy and heating strategies were proposed for the rural residence building in Northwest China. The survey results show that the average building shape coefficient is about 0.9 and the average window-wall ratio of south, east, west and north is about 0.17, 0.14, 0.14, 0.12, respectively. The heat transfer coefficient of walls, roofs, windows, doors, peripheral and non-peripheral ground is about 1.98, 2.52, 4.74, 4.65, 0.34, 0.08 W/(m²·K). The heat consumption of walls of rural building is the largest, accounting for 51% of the total building heat consumption. The second factor is the roof, which accounts for 33%. The combination of thermal insulation of external envelope, active and passive solar heating and auxiliary heat source constitute the building energy saving and heating strategy, which mainly improves the thermal insulation performance of the external envelope, especially the external wall and roof.

Key words: rural building, thermal parameter, questionnaire survey, energy saving strategy

我国西北大部分地区处于严寒和寒冷气候区, 冬季室外空气温度较低, 采暖期较长, 农村地区受经济发展水平限制, 且农村住宅建筑节能设计缺少相关设计标准做指导, 农村住宅建筑热工性能较差, 导致住宅建筑室内热环境差, 建筑能耗大^[1-2]。农村建筑面积大, 随着经济的发展, 人们对室内热环境要求的提高, 建筑能耗所占比例越来越大, 农村建筑节能越来越受到重视, 然而, 西北地区太阳能资源丰富, 农村住宅建筑的节能潜力较大。

文献[2-4]通过对西北地区乡村建筑室内热环境的调查分析, 发现住宅建筑冬季室内温度低、热舒适性差且采暖能耗高。研究指出在西北地区采用被动式太阳能采暖技术可有效改善室内热环境^[4-5]。对于农村建筑可通过提高建筑围护结构的保温隔热性能、门窗的密闭性能、充分利用太阳能等措施来

降低建筑能耗^[6-7]。然而目前尚未形成对西北农村住宅建筑热工现状的典型描述, 仍缺少开展农村住宅建筑节能技术的热工基础。

西北地区地域跨度大, 各地农村住宅建筑形式和围护结构构造形式等有其地域性特点, 然而同类型建筑, 如砖瓦建筑, 其围护结构材料相差不大, 且建筑能耗评价的方法和参数一致。因此, 可以西北地区农村住宅热工参数和能耗分析统一归纳处理。本文以问卷调查的方法对西北地区农村住宅建筑形态、围护结构构造形式及材料进行调查统计, 并对建筑体形系数、窗墙比、外围护结构热工性能和建筑能耗进行分析, 提出适宜于西北农村住宅建筑节能和采暖策略, 同时也为西北农村建筑具体节能技术实施提供基础热工参数。

收稿日期: 2014-12-11

修改稿日期: 2015-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51378411, 51408462)

作者简介: 马超 (1983-), 男, 博士研究生, 主要从事建筑材料热湿物性参数及建筑节能研究。E-mail: machao9108@163.com

1 调查统计

于 2011 年 12 月至 2012 年 3 月以及 2012 年 11 月至 2013 年 3 月,通过问卷调查的方式对西北农村住宅建筑形态、围护结构构造形式、建筑热工条件等进行问卷调查。调查共收回有效问卷 360 份,调查地区涵盖陕西、甘肃、宁夏、青海和新疆西北五省农村地区。

问卷具体调查内容包括建筑形态、建筑朝向,建筑外墙、屋顶、外窗、外门、地面等围护结构构造形式、尺寸、材料、厚度等。通过对问卷统计分析,获得建筑体形系数、窗墙比、围护结构传热系数等热工性能等。

2 调查结果分析

西北农村住宅建筑主要分为砖瓦建筑、生土建筑和窑洞建筑。西北地区农村住宅建筑中砖瓦建筑所比例最大,约为 67.4%,生土建筑和窑洞建筑分别约为 24.8%和 7.8%。由于窑洞建筑具有明显的地区性,建筑围护结构形式和热工性能与其他住宅建筑不同,其节能技术措施有别于其他建筑类型,因此,研究对象主要为砖瓦建筑和生土建筑,不包括窑洞建筑。

2.1 建筑体形系数

根据调查分析,西北农村住宅建筑体形系数平均值约为 0.9。体形系数大于 0.9 的建筑,所占比例约为 45.5%。西北农村建筑多为独立式建筑,层数较少,多为一层,一般建筑有二面或三面外墙,因此体形系数较大。

2.2 窗墙比

西北农村住宅建筑大多是正面开窗。南、东、西和北向窗墙比平均值分别约为 0.17、0.14、0.14 和 0.12。可见西北农村建筑窗墙比相对较小。在西北太阳能资源丰富地区及较丰富地区,冬季窗户太阳辐射得热量和窗户与室外空气传热失热量之差随窗墙比变大而变大^[8]。因此,增大南向窗墙比,同时增强夜间外窗保温,有利于建筑被动太阳能利用以及降低建筑能耗。

2.3 建筑围护结构热工性能分析

统计分析获得外墙、屋面、外窗、地面和外门类型及传热系数,其传热系数值根据文献[9-10]取值或计算而得。

2.3.1 建筑外墙热工性能

在西北地区农村住宅建筑中,外墙类型主要有实心砖、生土、石材、混凝土、空心砖、多孔砖墙等,外墙内壁面多进行水泥砂浆或草泥浆抹灰,基本未

进行保温。如图 1,外墙中实心砖墙所占比例最高,约 53.8%,其次为生土墙,所占约为 28.5%。实心砖墙中,240 墙和 370 墙所占比例较大,分别约为 68.6%和 20.0%。生土墙厚度主要在 300~600 mm 之间,且主要以 400 mm 为主,所占生土墙比例约 51.4%。空心砖和多孔砖墙所占比例较少约为 4.6%。可见外墙多为厚重型墙体,墙体材料蓄热性能好。

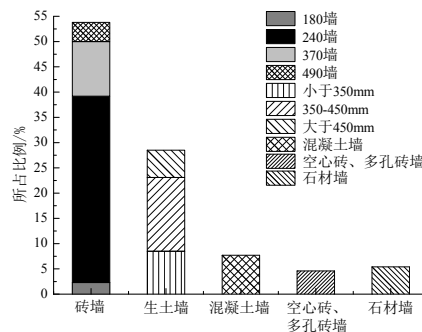


图 1 外墙类型

Fig.1 The types of exterior wall

在农村住宅建筑中,由于外墙类型较多,且以砖墙居多,为对比外墙的热工性能,根据砖墙传热系数大小对外墙进行分类,如表 1。由表 1 可知,外墙类型一所占比例最大,约为 52.3%,且传热系数大于等于 $2.15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,其次为类型三,所占比例为 23.1%,所占比例最小为类型四,约为 5.4%。由于外墙基本未进行保温,外墙热工性能整体较差,外墙传热系数平均值约为 $1.98 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,平均热惰性指标为 4.14。

表 1 外墙类型及热工参数

Tab.1 The types and thermal parameter of external walls

外墙分类	包括类型	传热系数 $/\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	所占 比例/%
类型一	240 砖、180 砖、混凝土、石材墙	$2.15 \leq K$	52.3
类型二	370 砖、生土墙(厚度<350mm)	$1.60 \leq K < 2.15$	19.2
类型三	490 砖、生土墙(厚度 350~450 mm)、空心砖、多孔砖	$1.29 \leq K < 1.60$	23.1
类型四	630 砖、生土墙(厚度>450 mm)	$1.06 \leq K < 1.29$	5.4

2.3.2 建筑屋顶热工性能

在西北地区,建筑屋顶的形式主要有坡屋顶和平屋顶。坡屋顶所占比例较多,约为 59.7%,坡屋顶结构主要为小青瓦/红机瓦+草泥浆+木板,并多以木构架作为屋顶骨架,坡屋顶厚度主要为 120 mm 左右。平屋顶约占比例为 40.3%,平屋顶结构主要以浇筑混凝土和楼板为主,其中楼板使用率较高,约占平屋顶 58.3%,平屋顶厚度主要在 150~200 mm 之间。

从调查中可知,屋顶大多未不进行保温,因此

传热系数相对较大,坡屋顶和平屋顶的传热系数约 2.27 W/(m²·K)和 3.05 W/(m²·K).屋顶平均传热系数约为 2.52 W/(m²·K),平均热惰性指标为 3.87.住宅建筑中,有吊顶的屋顶建筑约占 51%,吊顶的材料是以石膏板和木板为主,吊顶的设置增强了屋顶隔热性能.

表 2 主要屋顶类型及热工参数
Tab.2 The main types and thermal parameter of roofs

屋顶类型	主要构造形式 (从外到内)	传热系数 /W·m ⁻² ·K ⁻¹	热惰性 指标
坡屋顶	20 mm 小青瓦+80 mm 草泥浆 +20 mm 木板	2.27	4.76
	20 mm 水泥砂浆+120 mm 楼板 +10 mm 水泥砂浆	2.77	1.98
平屋顶	20 mm 水泥砂浆+150 mm 钢筋 混凝土+10 mm 水泥砂浆	3.43	1.89

2.3.3 建筑外窗热工性能

1) 外窗热工性能

住宅建筑外窗窗框材料主要有木质、塑料、铝合金和铁质窗框等,其中木质框利用率最高,约为 68.0%,其次为铁质和铝合金框,约为 27.8%.外窗层数主要为单层和双层,其中单层窗使用率最高,约为 79.9%.

由表 3 可知,外窗整体热工性能较差,外窗传热系数平均值为 4.74 W/(m²·K).

表 3 外窗类型及热工性能
Tab.3 Types and thermal parameter of external windows

窗框材料	窗户类型	传热系数 /W·m ⁻² ·K ⁻¹	所占比例 /%
木质和塑料	单层玻璃窗	4.7	65.3
	单框双层玻璃窗	2.8/2.5	9.7
	/双层玻璃窗		
铁质和铝合金	单层玻璃窗	6.4	14.6
	单框双层玻璃窗	3.7/3.5	13.2
	/双层玻璃窗		

2) 外窗内置窗帘的类型

住户建筑中,外窗设置窗帘建筑所占比例约 81.2%;外窗无窗帘的建筑所占比例约 18.7%.内置窗帘主要有布帘、棉帘和纱帘,其中以布窗帘为主,所占比例约 75.0%,棉帘和纱帘所占比例分别约为 14.3%和 11.6%.

在冬天夜间,外窗设置窗帘更能有效的减少冷风渗透和冷风侵入耗热量,内置窗帘使窗户内侧与窗帘之间形成空气层,从而增大了外窗热阻,文献[11]显示外窗内置窗帘后,对于单层窗,设置棉帘、布帘和纱帘,其附加热阻值分别大约 0.22, 0.19 和 0.18 m²·K/W,外窗总传热系数分别可减小约 55%,

54%和 50%;对于双层窗,其附加热阻值分别可增大约 0.21, 0.17 和 0.16 m²·K/W,外窗总传热系数分别减小约 40%, 32%和 30%.可见外窗夜间设置窗帘可有效增强外窗热工性能.

2.3.4 建筑外门热工性能

住宅建筑的外门主要以木门为主,所占比例为 71.0%,铁门和铝合金门所占比例分别为 26.1%和 2.9%木质外门传热系数在 4.65 m²·K/W 左右,铁门和铝合金门传热系数一般要大于木质外门.可见住宅建筑外门热工性能较差.在冬季,约 55.1%的住户外门设置保温棉帘,保温门帘设置可有效减少外门传热损失.

2.3.5 建筑地面热工性能

在西北农村住宅建筑中,地面结构从上到下主要是面层、结合层、垫层和地基.地面按面层材料分主要有生土地面、实心砖地面、瓷砖地面、水泥地面和水磨石地面等.生土和实心砖地面垫层主要为生土,垫层厚度约 300 mm;瓷砖、水泥、水磨石地面垫层主要为碎石混凝土,垫层厚度约 100 mm.建筑主要以砖和生土地面为主,所占比例的约 52.3%,瓷砖、水泥和水磨石地面,占总比例约 37.7%.地面均未进行保温,根据文献[12]可得周边地面和非周边地面传热系数分别约为 0.34 和 0.08 W/(m²·K).

3 建筑能耗分析

根据对西北农村建筑形式和热工现状调查分析结果以及相关文献[13-14]对西北农村建筑形式描述,选择典型住宅建筑,并确定其建筑体形系数、窗墙比和围护结构热工参数,对其进行能耗分析.典型建筑为平屋顶、三开间独立式建筑.建筑长宽高分别为 12、4.5 和 3.5 m.建筑体形系数为 0.9,南向和北向窗墙比为分别为 0.17 和 0.12.根据西北农村住宅建筑围护结构热工现状,确定围护结构热工参数如表 4.

表 4 典型建筑围护结构热工参数
Tab.4 Envelope thermal parameter of the typical building

围护结构	外墙	屋顶	地面		外窗	外门
			周边	非周边		
传热系数/W·m ⁻² ·K ⁻¹	1.98	2.52	0.34	0.08	4.74	4.65

为改善农村住宅建筑室内热环境状况,使室内采暖设计达到城市住宅建筑水平,取建筑室内采暖设计温度为 18℃,根据文献[12,15]建筑物耗热量指标和采暖耗煤量指标计算方法,可得到西北主要城市农村住宅建筑外围护结构耗热量、建筑耗热量和

采暖耗煤量如表 5。

由表 5 可知,西北农村住宅建筑采暖能耗平均值约为 150.1 W/m^2 ,年均耗煤量约为 97.4 kg/m^2 。其中外墙热损失较大,约占建筑总耗热量 51.2%,其次为屋顶,约占 32.8%,外窗热损失相对较小,约占 7.9%。我国 20 世纪 80 年代初居住建筑通用设计

采暖能耗为年采暖耗煤量为 25 kg/m^2 。可见西北农村住宅建筑达到城市建筑采暖设计水平时,农村住宅建筑能耗比 80 年代城市居住建筑能耗高 3 倍,农村建筑热工设计远未达到城市建筑没进行节能设计前水平。

表 5 外围护结构及建筑耗热量(W/m^2)
Tab.5 The external envelope and heat consumption of the building

耗热量及耗煤量	q_{Hw}	q_{Hr}	q_{Hg}	q_{Hwin}	q_{Hd}	q_{inf}	q_{ih}	q_{H}	q_{C}
乌鲁木齐	96.02	60.51	7.86	16.39	3.12	9.35	3.80	189.44	135.99
西宁	79.52	49.22	6.74	11.48	1.72	8.01	3.80	152.88	118.58
银川	76.65	48.63	6.45	11.68	1.93	7.67	3.80	149.20	100.63
兰州	71.32	46.87	5.97	10.11	1.49	7.10	3.80	139.06	84.41
西安	60.97	40.07	5.10	9.82	1.73	6.07	3.80	119.95	47.39

注:表中, q_{Hw} 为单位时间内通过外墙的传热量, W/m^2 ; q_{Hr} 为单位时间内通过屋顶的传热量, W/m^2 ; q_{Hg} 为单位时间内通过地面的传热量, W/m^2 ; q_{Hwin} 为单位时间内通过外窗的传热量; q_{Hd} 为单位时间内通过外门的传热量, W/m^2 ; q_{inf} 为单位时间内建筑物空气渗透耗热量, W/m^2 ; q_{ih} 为单位时间内建筑物内部得热量, W/m^2 ; q_{H} 为单位时间建筑耗热量, W/m^2 ; q_{C} 为建筑年均耗煤量, kg/m^2 。

4 建筑节能策略建议

通过对西北农村住宅建筑热工性能和能耗分析,可知建筑体形系数较大、围护结构热工性能较差,建筑能耗大,单纯使用某项建筑节能和采暖措施很难达到住宅室内热舒适需求。因此,可采用多项节能和采暖技术相结合方式。

1) 外围护结构保温

良好的围护结构热工性能是建筑节能的前提,西北地区建筑节能措施首先应以改善外围护结构热工性能为主,且重点为提高外墙和屋顶保温性能。然而,农村住宅建筑体形系数及围护结构热工性能与城市住宅建筑均有较大差异,以当前节能设计标准^[12]中围护结构热工参数限值来要求农村住宅建筑围护结构热工性能,并不合理,且难以实现。我国建筑节能措施主要通过采用增强建筑围护结构保温隔热性能和提高采暖、空调系统能效等方法,其中围护结构承担份额大于等于 50%。借鉴城市建筑节能思路,对于农村住宅建筑通过改善外围护结构保温隔热性能,可使其承担 50%~55%左右能耗,建筑剩余能耗以其他节能技术措施或采暖系统承担。由于外围护结构中主要失热部件是外墙和屋顶,因此,应主要加强其保温性能。

2) 被动太阳能采暖

西北农村地区经济条件相对较差,且该地区太阳能资源丰富,因此,可充分利用被动太阳能采暖技术减少建筑能耗,该措施是较为经济且节能效果较好。在西北地区,考虑到住宅建筑围护结构采用保温技术之后,被动式采暖技术可使建筑能耗降低 15%~30%^[16-18],建议取 20%~25%。

采用被动式采暖应注重房间的集热和蓄热,由于被动式采暖建筑透明部件较大,因此,需加强集热部件自保温和夜间保温性能。同时还需根据地区气候特点选择及房间类型选择适宜的被动采暖形式。

3) 主动太阳能采暖

由于西北地区多处于严寒和寒冷地区,采用被动式采暖技术,通常很难到达采暖设计要求。因此,可以采用主动式太阳能采暖方式,其与被动式采暖相结合使用,可更好发挥太阳能采暖效率。根据文献[19-20]太阳能采暖保证率可取 50%~60%,主动式太阳能系统可承担 15%~20%左右建筑能耗,约 20~30 W/m^2 ,根据相关文献[21-22]研究结果,西北地区太阳能资源及住宅建筑条件可满足该要求。

4) 辅助热源

建筑剩余能耗相对较少,可用辅助热源系统承担,其约承担 10%~15%左右能耗。

西北农村住宅建筑节能和采暖可使用外围护结构保温(尤其以外墙和屋顶为主)、主被动太阳能和辅助热源采暖相结合的策略。建议各部分承担建筑能耗份额和能耗承担量如表 6 所示,然而西北地区区域较大,各地区气象条件和建筑形式也有所不同,可根据各地区的特点对节能采暖策略进行调整。

表 6 住宅建筑节能及采暖策略
Tab.6 The residential building energy and heating strategies

节能/采暖措施	外围护结构保温	被动式太阳能采暖	主动式太阳能采暖	辅助热源采暖
能耗承担份额/%	50~55	20~25	15~20	10~15
能耗承担量/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	75~85	30~40	20~30	15~20

5 结论

针对西北地区农村住宅建筑,以问卷调查方法对其建筑尺寸、围护结构构造形式进行调查分析,并对建筑体形系数、窗墙比、外围护结构热工性能以及建筑能耗进行分析,提出了适宜的建筑节能和采暖策略建议,得到结论主要有:

(1) 住宅建筑平均体形系数约为 0.9;南、东、西和北向窗墙比平均值约为 0.17、0.14、0.14 和 0.12;外墙、屋顶、外窗、外门、周边以及非周边地面传热系数分别约为 1.98、2.52、4.74、4.65、0.34 和

0.08 W/m².

(2) 住宅建筑外墙耗热量较大,约占建筑总耗热量 51%,其次为屋顶,约占 33%.

(3) 西北农村住宅建筑节能和采暖可使用外围护结构保温(尤其以外墙和屋顶为主)、被动式太阳能、主动太阳能和辅助热源采暖相结合的策略,建议各项措施承担的建筑能耗份额分别约为 50%~55%、20%~25%、15%~20%和 10%~15%.

参考文献 References

- [1] 朱轶韵,刘加平.西北农村建筑冬季室内热环境研究[J].土木工程学报,2010,43(S1):400-403.
ZHU Yiyun, LIU Jiaping. Research on the indoor thermal environment of rural architecture in winter in northwestern areas[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(S1): 400-403.
- [2] 王登甲,刘艳峰,刘加平,等.西北村镇建筑热工及冬季室内热环境分析[J].工业建筑,2010,40(S1):24-27.
WANG Dengjia, LIU Yanfeng, LIU Jiaping, et al. Analysis of thermal performance and indoor thermal environment in winter of rural buildings in north west of China[J]. Industrial Construction, 2010, 40(S1): 24-27.
- [3] 朱文睿,杨柳,谢栋.陕西汉中乡村建筑热环境与建筑能耗研究[J].建筑技术,2012,43(7):615-618.
ZHU Wenrui, YANG Liu, XIE Dong. Thermal environment and building energy consumption study of rural architecture in shanxi hanzhong[J]. Architecture Technology, 2012, 43(7): 615-618.
- [4] 张群,梁锐,刘加平.乡村民居被动式太阳能设计与热环境分析[J].西安科技大学学报,2011,31(2):172-176.
ZHANG Qun, LIANG Rui, LIU Jiaping. Practice and thermal environment analysis of passive solar house for rural areas in Ningxia[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2011, 31(2): 172-176.
- [5] LIU Y F, WANG D J, MA C. A numerical and experimental analysis of the air vent management and heat storage characteristics of a trombe wall[J]. Solar Energy, 2013, 91: 1-10.
- [6] 龙利军.西北地区农村住房建筑节能技术研究[D].兰州:兰州理工大学,2012.
LONG Lijun. The research on technology for rural housing building energy efficiency in Northwest China[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012.
- [7] 高新宇,范伯元,张红光.太阳能采暖系统在新农村建设中的应用研究[J].太阳能学报,2009,30(12):1653-1657.
GAO Xinyu, FAN Boyuan, ZHANG Hongguang. Study on in application of solar heating system new countryside construction[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2009, 30(12): 1653-1657.
- [8] 杜玲霞.西北居住建筑窗墙面积比研究[D].西安:西安建筑科技大学,2013.
DU Lingxia. Study on the ratio of window to wall of residential buildings in northwestern region of China[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.
- [9] 陆耀庆.实用供热空调设计手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.
LU Yaoqing. Practical heating air conditioning design manual[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50176-93 民用建筑热工设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,1993.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50176-93 Thermal design code for civil building[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1993.
- [11] 高珍.内置窗帘外窗热工特性研究[D].西安:西安建筑科技大学,2012.
GAO Zhen. Study on the thermal properties of external windows with inside curtains[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. JGJ 26-2010 Design standard for energy efficiency of residential buildings in severe cold and cold zones[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [13] 曹亚婷.西北传统民居适宜性节能技术的科学化分析[D].西安:西安建筑科技大学,2013.
CAO Yating. Scientific analysis of suitability of energy-saving technologies in northwest of traditional dwellings[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.
- [14] 黄睿.西北民居分时段局部采暖研究[D].西安:西安建筑科技大学,2013.
HUANG Rui. Study on intermittent local heating of rural house in northwest China[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.
- [15] 中国建筑科学研究院. JGJ 26-95 民用建筑节能设计标准(采暖居住建筑部分)[S].北京:中国建筑工业出版社,1995.
China Academy of Building Research. JGJ 26-95 Energy conservation design standard for new heating residential buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1995.

- [16] 张健, 周文和, 丁世文. 被动式太阳房供暖实验研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(8): 861-864.
ZHANG Jian, ZHOU Wenhe, DING Shiwen. Experimental study on heating of passive solar house[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2007, 28(8): 861-864.
- [17] 王登甲, 刘艳峰, 刘加平, 等. 青藏高原地区 Trombe 墙式太阳房供暖性能测试分析[J]. 太阳能学报, 2013, 34(10): 1823-1828.
WANG Dengjia, LIU Yanfeng, LIU Jiaping, et al. Measuring study of heating performance of passive solar house with trombe wall in Qinghai-Tibet plateau[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2013, 34(10): 1823-1828.
- [18] 陈明东, 史宇亮, 刘学兵. 附加阳光间型被动式太阳房供暖实验研究[J]. 太阳能学报, 2012, 33(6): 944-947.
CHEN Mingdong, SHI Yuliang, LIU Xuebing. Heating study of passive solar house with sunspace[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2012, 33(6): 944-947.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50495-2009 太阳能供热采暖工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50495-2009 Technical code for solar heating system[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [20] 郑瑞澄, 路宾, 李忠, 等. 太阳能供热采暖工程应用技术手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012, 344-346.
ZHENG Ruicheng, LU Bin, LI Zhong, et al. Technical handbook for solar heating[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012, 344-346.
- [21] 李元哲, 单明, 何端练. 太阳能主动式采暖实测与分析[J]. 太阳能学报, 2009, 30(7): 1469-1473.
LI Yuanzhe, SHAN Ming, HE Duanlian. Analysis and thinking of active solar heating house[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2009, 30(7): 1469-1473.
- [22] 刘艳峰, 鱼亚丽, 孔丹. 西北地区居住建筑太阳能采暖保证率[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2011, 43(2): 272-276.
LIU Yanfeng, YU Yali, KONG Dan. Solar fraction of residential building in north-west China[J]. J Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2011, 43(2): 272-276.

(编辑 桂智刚)

(上接第 417 页)

- [8] 孙爱国, 梁路军. 水源热泵机组地下水变流量运行特性研究[J]. 暖通空调, 2010, 40(11): 83-85.
SUN Aiguo, LIANG Lujun. Research on groundwater variable flow operationing characteristics of water source heat pump unit[J]. Heating Ventilation and Air Conditioning, 2010, 40(11): 83-85.
- [9] 余延顺, 马娟. 负荷分布对地源热泵系统长期运行特性的影响[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2011, 35(2): 155-159.
YU Shunyan, MA Juan. Effect of Load distribution on long period operating characteristics of ground source heat pump system[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science, 2011, 35(2): 155-159.
- [10] 刘逸, 李炳熙, 付忠斌, 等. 寒冷地区土壤源热泵系统供暖运行特性研究[J]. 太阳能学报, 2012, 10: 025.
LIU Yi, LI Bingxi, FU Zhongbin, et al. Research on heating operation characteristics of ground-coupled heat pump in cold region[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2012, 10: 025.
- [11] MAGRANER T, MONTERO Á, QUILIS S, et al. Comparison between design and actual energy performance of a HVAC-ground coupled heat pump system in cooling and heating operation[J]. Energy and buildings, 2010, 42(9): 1394-1401.
- [12] MONTAGUD C, CORBERAN J M, MONTERO A, et al. Analysis of the energy performance of a ground source heat pump system after five years of operation[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(12): 3618-3626.
- [13] HACKEL S, PERTZBORN A. Effective design and operation of hybrid ground-source heat pumps: Three case studies[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(12): 3497-3504.
- [14] CHUNG J T, CHOI J M. Design and performance study of the ground-coupled heat pump system with an operating parameter[J]. Renewable Energy, 2012, 42: 118-124.
- [15] MICHPOPOULOS A, ZACHARIADIS T, KYRIAKIS N. Operation characteristics and experience of a ground source heat pump system with a vertical ground heat exchanger[J]. Energy, 2013, 51: 349-357.
- [16] MING L, QING G, YAN J, et al. The big challenge of ground source heat pumps (GSHPs) application in China[C]//Intelligent System Design and Engineering Application (ISDEA), 2010 International Conference on. IEEE, 2010, 2: 594-597.

(编辑 吴海西)