

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.01.004



不同含水率下生土导热系数测试及对建筑能耗的影响

刘大龙, 赵辉辉, 刘向梅, 何泉

(西安建筑科技大学 建筑学院, 西安 710055)

摘要:为研究不同含水率对生土材料热工性能及对生土建筑能耗的影响,分别从陕西西安、新疆吐鲁番、西藏拉萨采集当地土样并加工成同一密度级的土坯试件,测试了从绝干到湿饱和状态下各种生土导热系数的变化规律。采用建筑能耗动态模拟结合敏感性分析,研究了上述3种土样在不同含水率下导热系数变化对建筑能耗的影响规律。结果表明,含水率与生土导热系数成线性相关;含水率对生土建筑耗热量的影响具有显著的地域性差异;新疆生土在墙体湿度增大情况下建筑能耗增加幅度最小。

关键词:生土材料;含水率;导热系数;建筑采暖能耗;敏感性分析

中图分类号:TU111.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)01-0020-06

Thermal conductivity test of adobe materials with different moisture content and its effect on building energy consumption

Liu Dalong, Zhao Huihui, Liu Xiangmei, He Quan

(School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: The soil samples collected respectively from Xi'an in Shanxi, Turpan in Xinjiang and Lhasa in Tibet were processed into three types of adobe specimens according to the same density level to study the effects of different moisture content on the thermal performance of raw soil materials and energy consumption of raw soil building. Then the thermal conductivities of these samples were tested from the vast dry to wet saturated state, and the influence regulation of changes of raw soil thermal conductivity on heating energy consumption in different moisture rate conditions was studied with methods of dynamic energy simulation and sensitivity analysis. The results showed that: There is a linear correlation between moisture content and raw soil thermal conductivity; The regional differences of influence to moisture content on raw soil building heating energy consumption were very significant; In the high humidity conditions, heating energy consumption of Xinjiang adobe building had a minimum amplitude with the addition of moisture content.

Keywords: adobe material; moisture content; thermal conductivity; building heating energy consumption; sensitivity analysis

收稿日期:2016-06-04

基金项目:国家自然科学基金(51590913, 51578439)

作者简介:刘大龙(1976-),男,博士,副教授,主要从事建筑能耗模拟研究,(E-mail)coffevevc@xauat.edu.cn.

Received:2016-06-04

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51590913, 51578439); Postdoctoral Science Foundation of Shaanxi Province

Author brief: Liu Dalong (1976-), associate professor, PhD, main research interest: building energy simulation, (E-mail) coffevevc@xauat.edu.cn.

生土是中国西部地区最常用的民居建筑材料,具有储存和调控热量的能力,是很好的热惰性材料^[1]。生土建筑具有适应西部气候冬暖夏凉,经济实用、建造简便等众多优点。然而,生土材料吸水性很强,在受潮变湿之后,其保温隔热性能显著降低。近年来受气候变暖的影响,中国西部地区的降雨量均有逐渐上升的趋势,其中新疆地区的降雨量变化倾向率在 0.5~2.9 mm/a 之间,西藏多年平均降雨量倾向率约为 1.25 mm/a^[2-3]。传统意义上西部地区干旱半干旱的气候特征正悄然变化。因此,研究生土材料在湿度增大情况下导热系数变化规律及对建筑能耗影响,对于广大西部地区众多的生土建筑可持续发展具有重要意义。

晋华等^[4-6]等采用热探针法对粘土、砂土以及工程常用土的导热系数随含水率的变化做了相关研究。傅志前等^[7]对不同含水率的麦秸秆砖墙导热系数进行了研究。为提升生土材料的热学和力学性能,有学者开展了生土改性研究^[8-11],多以参杂农业废料、水泥、石膏、植物纤维与储能载体等为主。目前,对纯生土材料热物理性能研究较少,特别是针对不同地域的生土热工性能差异研究。以黄土高原(陕西西安)、青藏高原(西藏拉萨)、新疆盆地(新疆吐鲁番)3种西部典型地域的土样为研究对象,探寻不同地域生土的含水率、导热系数和建筑能耗之间的影响关系。

1 不同含水率下生土导热系数测试

1.1 实验过程

针对陕西西安、西藏拉萨和新疆吐鲁番三地土样(见图 1),将其充分过筛后,取适量土样放于烘箱内充分烘干。结合土工试验的做法^[12],分别将烘干后的 3 种土样加 13% 的水,搅拌均匀后倒入试件架的模具(300 mm×300 mm×30 mm)中压成土坯(见图 2)。之后将土坯放于阴凉处晾干,大约 60 d 后将土坯两面打磨平整,最终得到 3 块自然晾干的土坯。分别称重后,再将其放入烘箱中充分烘干再称重,可得到 3 块土坯的自然含水率与干密度的数据如表 1 所示。本试验主要探讨含水率对生土材料导热系数的影响,因此测试中尽量控制了密度相同,由表 1 知 3 块土坯试件密度相差很小。

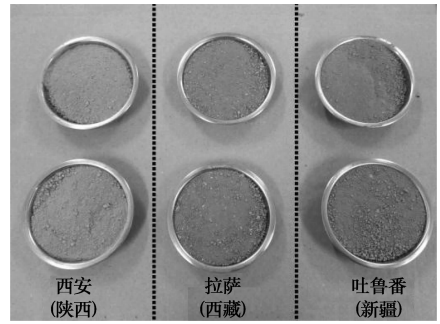


图 1 3 种土样对比

Fig. 1 The comparison of three kinds of soil samples fddsafdsaf

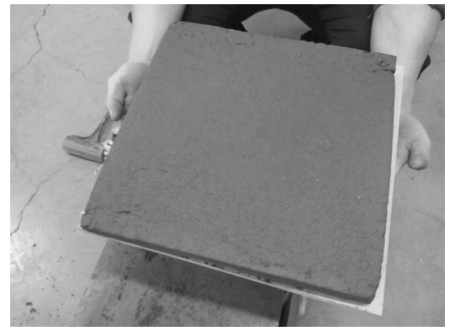


图 2 制作好的土坯试件

Fig. 2 Processed adobe test-specimen

表 1 土坯试件充分烘干后的相关数据

Table 1 The tested data of fully dried adobe test-specimens

试件	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	绝干导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	自然含 水率/%
陕西土坯	1.713	0.576 5	1.08
新疆土坯	1.699	0.538 6	1.65
西藏土坯	1.706	0.517 7	0.28

表 2 不同含水率状态下的 3 种土坯试件导热系数测定结果

Table 2 Tested results for thermal conductivity of three kinds of adobe specimens under different moisture content conditions

重量含水率/%	content conditions ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)		
	陕西	新疆	西藏
烘干(0)	0.576 5	0.538 6	0.517 7
自然状态	0.628 3	0.629 6	0.560 5
2	0.751 3	0.648 4	0.757 9
4	0.912 5	0.770 7	0.937 2
6	1.071 4	0.879 3	1.039 9
8	1.206 5	0.981 3	1.174 8
10	1.302 3	1.019 6	1.373 3
12	1.451 9	1.101 5	1.516 3
14	1.666 9	1.203 4	1.664 9

采用重量湿度的方法控制 3 块土坯的含水率,即用喷壶将烘干后的土坯表面均匀喷洒相应含水率的水量,含水率依次为 2%、4%、6%、8%、10%、12%、14%(当 3 种土坯的重量含水率达到 16%时,已经基本达到各自土样的塑限值,因此,不考虑含水率 16%以后的数据)。然后用塑料保鲜膜充分包裹后密封,养护 8 h 使水分在土坯中均匀渗透。之后用平板导热仪分别对各个含水率状态下的土坯测定其导热系数。在测含水率大于 2%的土坯试件前,先将养护好的试件两面裹上一层保鲜薄膜后再放入导热仪中进行测试,以求在最大程度上减少实验过程中土坯试件内水分的散失。通过这种方法,测试前后均对土坯试件称重,前后损失的水分均在 5 g 以内,误差相对较小,对实验基本不造成影响。最终得出相关数据如表 2 所示,图 3 为 3 种土坯含水率与导热系数的拟合曲线。

1.2 生土导热系数随含水率变化的规律分析

由图 3 可知,拟合曲线与实测数据吻合较好,且 3 条曲线的线性相关系数均大于 0.98(见表 3),表明三地生土材料的导热系数均与含水率间存在显著的线性关系。

图 3 中 3 条曲线的倾斜程度略有不同,即各个土坯导热系数值随含水率增长的变化量不同。陕西曲线与西藏曲线的变化趋势相似,含水率从 0%~14%的变化过程中,同一含水率对应下的导热系数值相近。在绝干状态时,3 块土坯的导热系数均在 $0.5 \sim 0.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 之间,随着含水率的不断增加,新疆土坯的导热系数与陕西、西藏土坯的导热系数相差越来越大。从图中可以明显看出新疆曲线倾斜度最小,陕西曲线与西藏曲线的倾斜度相近,因此在大于自然含水率之后,新疆土坯导热系数始终为三者最低,且随着含水率不断增大,这种差异越来越明显。由此可见,新疆土坯的热工性能明显优于另外两种土坯,在高含水率状态下,这种优势更为显著。

若用变化率来代表曲线的倾斜程度,则其含义为含水率每增加 1%时,导热系数的变化量。变化率越小,则曲线越平缓,土坯导热系数对含水率的敏感程度越差,但该土坯的热工性能则越好。因此从表 3 中 3 条拟合直线的斜率可得出各个土坯导热系数随含水率增长的变化率分别为:陕西 0.075 39,新疆 0.046 63,西藏 0.079 87,陕西与西藏的变化率相近,且均接近新疆变化率的 2 倍,证明了新疆土坯的性能要强于另外两种土坯。

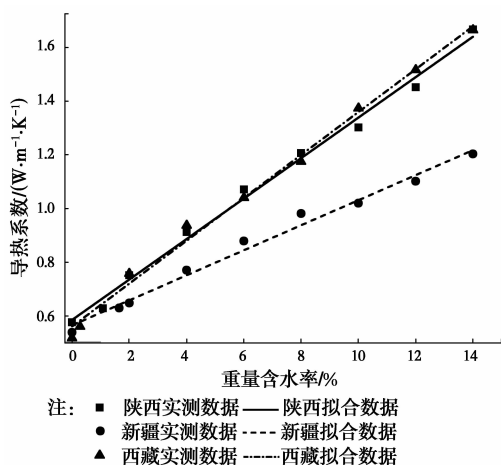


图 3 3 种土坯试件含水率与导热系数的拟合曲线

Fig. 3 Fitting curves of the relationship between moisture content and thermal conductivities of three adobe specimens

表 3 3 种土坯试件导热系数 λ 随含水率 ω 变化的拟合公式
Table. 3 Fitting formulas of the relationship between moisture content ω and thermal conductivities λ of three adobe specimens

土坯类别	拟合公式	R^2
陕西	$\lambda_X = 0.58493 + 7.539\omega(1)$	0.99257
新疆	$\lambda_T = 0.56493 + 4.663\omega(2)$	0.9859
西藏	$\lambda_L = 0.56083 + 7.987\omega(3)$	0.99313

2 含水率对生土房建筑能耗的影响

生土材料导热系数受含水率的影响对生土建筑围护结构的保温隔热性能及建筑能耗产生重要影响。据上述实验数据,含水率增大,生土导热系数明显增大,则生土围护结构传热系数必然增大,这将大大降低生土建筑的保温性能,增加建筑采暖能耗。不同地区生土建筑在墙体受潮变湿后对建筑能耗的影响差异如何?哪种生土材料更适合在未来湿度增大的条件下建造生土建筑?

为此,采用动态模拟计算不同地域生土在含水率增大情况下建筑能耗的变化强度,依据敏感性分析原理,来分析 3 种生土材料所建造生土建筑在应对湿度增大情况下的热反应规律。

2.1 模型与模拟参数设置

模拟建筑为常见的单体建筑形式,体形信息与围护结构热工性能如表 4 所示,表中相关数值(除屋顶与外墙)均符合文献[13]的有关节能要求。选用 EnergyPlus 能耗分析软件模拟在陕西、新疆和西藏三地采暖期内土坯房的单位建筑面积耗热量。

表 4 模拟时所用的模型信息

Table. 4 Model information used in simulation

体形系数 F_0/V_0	窗墙面积 比(南向)	传热系数/($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)			
		屋顶	外墙	外窗	外门
0.78	0.24	0.52~1.67	0.52~1.67	2.8	2.5

注:表中屋顶和外墙的传热系数在模拟时均为变量。

模拟建筑针对民居,所以其围护结构热工性能与热舒适标准按照农村节能规范执行。因此根据文献[13]的相关要求,三地均位于寒冷地区,全天室内计算温度均设为 14℃,并按照按表 2 的标准定义好各自的材料结构。生土墙受潮湿度的增大是个复杂的过程,降雨、太阳辐射、风速等气象条件及构造做法等都会对其产生影响,论文的能耗模拟关注墙体变湿后对建筑能耗的影响,弱化墙体如何增湿的研究。

2.2 含水率对生土建筑采暖能耗的影响分析

模拟计算不同含水率下各地生土建筑采暖能耗强度,即分别模拟各个含水率下,3 种土样在各自地区气候条件下采暖期内的单位建筑面积耗热量,模拟结果如图 4 所示。

在采暖期内,三地生土房单位面积采暖能耗随着含水率的增加而显著增加。主要原因是含水率的增加增大了生土材料的导热系数,使围护结构保温性能下降,导致整个建筑的采暖能耗增加。在大于自然含水率的情况下,由于新疆土坯在相同含水率下的导热系数始终低于陕西,因此图 4 中新疆生土房单位面积能耗显著低于陕西。即便在采暖期较长,

室外平均温度较低的情况下(见表 5),其生土房的采暖能耗仍低于陕西。在围护结构绝对干燥的状态下,西藏土坯房耗热量仅为 0.19 W/m^2 ,陕西和新疆西藏土坯房耗热量均在 5.3~5.8 W/m^2 之间,但从图 2 导热系数的变化规律上看,西藏土坯的热工性能是最差的,这是为什么呢? 西藏太阳能资源丰富,通过围护结构尤其是外窗吸收的太阳能的热量是陕西的 2.4 倍,新疆的 1.4 倍(见表 5)。西藏生土房若无采暖设备,围护结构在自然含水率下,在采暖期的室内平均温度为 15.6℃。在采暖期大部分时间内,西藏太阳辐射热量足以保证白天室内计算温度,仅夜间需要供热。因此,气候因素是造成西藏生土房采暖能耗最低的主要原因。

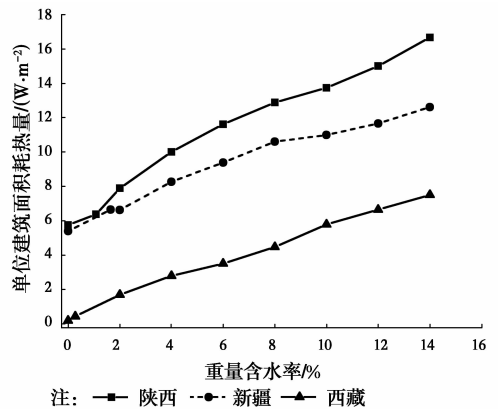


图 4 3 种生土房单位建筑面积耗热量随含水率的变化曲线
Fig. 4 The change curves of heating energy consumption per unit floor area with the change of moisture content in three adobe houses

表 5 3 个地区采暖期内的相关信息

Table. 5 The information during heating period in three regions

地区	采暖天数	采暖期室外平均温度/℃	采暖度日数 HDD18/($^{\circ}C \cdot d^{-1}$)	模拟采暖期室内计算温度/℃	单位建筑面积通过窗口的太阳辐射平均得热量/($W \cdot m^{-2}$)	无采暖设备时室内平均温度/℃
陕西西安	82	2.1	2 178		6.26	11.3
新疆吐鲁番	109	-2.5	2 758	14	10.82	11.8
西藏拉萨	126	1.6	3 425		14.75	15.6

注:1. 表中前三列数值参考标准[14],用于对比研究;后两列数值由 EnergyPlus 软件模拟得到;

2. “单位建筑面积通过窗口的太阳辐射平均得热量”为采暖期内房间通过窗口获得的太阳能总量 $Q(J)$ 比上采暖期总时间 $t(s)$ 与总建筑面积 $S(m^2)$ 的积,用 q 表示,则 $q=Q/(t \cdot s)$,单位为 W/m^2 ;

3. “室内平均温度”选取的是围护结构为自然含水率状态下,室内无采暖设备时的模拟值。

2.3 含水率对生土建筑采暖能耗的敏感性分析

为了消除气候因素对不同生土房采暖能耗的影响,将每一种土坯房分别在三地气候条件下计算采暖能耗,则每一土坯房在同一含水率下都有对应的 3 个值(分别对应三地气候),相加求平均后则可以

得到不同含水率下 3 种土坯房采暖能耗的综合平均值(如图 5),然后采用敏感性分析理论来定量分析建筑耗热量随含水率的变化规律。

敏感性分析理论指观察响应跟随激励变化的方法,其目标是量化对比系统的输入变化量与输出

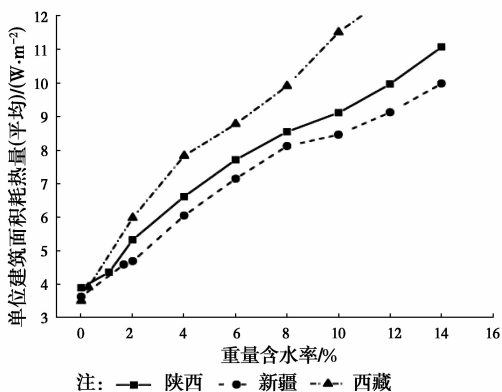


图 5 3 种生土房单位建筑面积耗热量(平均)变化曲线

Fig. 5 The change curves of (average) heating energy consumption per unit floor area of three adobe houses

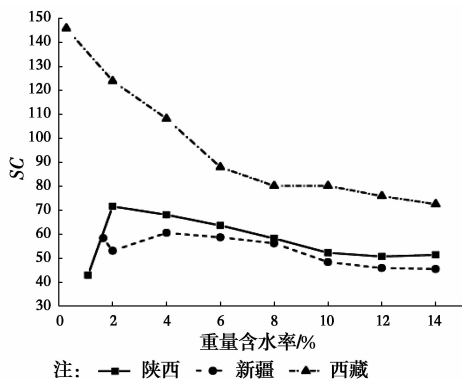


图 6 3 种生土房单位建筑面积耗热量敏感度变化曲线

Fig. 6 The change curves of sensitivities of heating energy consumption per unit floor area of three adobe houses

变化量间的关系^[15],它有助于认识输入与输出间的影响关系^[16]。在建筑节能分析领域,改变某些设计参数后建筑能耗量的变化要远大于其他设计参数,这类参数就具有较高的敏感性,在建筑节能分析中就更加值得关注。敏感系数被用于度量敏感性,它来自于数学和控制工程领域。对于热力系统和建筑能耗模拟,敏感系数计算公式如式(4)所示。

$$SC = \frac{\partial OP}{\partial IP} \approx \frac{\Delta OP}{\Delta IP} \quad (4)$$

式中:SC 为敏感系数;OP 为输出量;IP 为输入量。

敏感系数用来量化含水率对建筑能耗的敏感度,该值越小表明该含水率对建筑能耗的影响越弱。因此,这里以绝干状态下的含水率对应的单位建筑面积耗热量为初始值,再将含水率的变化量作为输入量,单位建筑面积耗热量的变化量作为输出量来计算敏感系数,则可得到如图 6 所示的 3 条曲线。由于各自的自然含水率不同(陕西 1.08%,新疆 1.65%,西藏 0.28%),因此 3 条曲线的第一个点并不在同一条垂直线上。

从图 6 可以看出,3 条曲线在低含水率状态下,各自的敏感系数变化趋势有所不同。对于西藏敏感系数变化曲线,第一点是整条曲线的最高点,且远高于另外两条曲线的第一个点,随着含水率的增加,敏感系数呈单调递减的趋势。对于陕西敏感系数变化曲线,第一点是整条曲线的最低点同时也是所有曲线的最低点,当含水率达到 2% 时,敏感系数达到整条曲线的最高,之后随着含水率的增加而单调递减。对于新疆敏感系数变化曲线,第一点在整条曲线上既非最低点亦非最高点,含水率从自然状态上升到 2% 时,敏感系数呈下降趋势,而在含水率达到为 4% 时,敏感系数则上升到最高,之后随含水率的增

加而单调递减。由此可见,对于各自敏感系数的最高值,3 条曲线虽然均出现在低含水率状态,但并不一致,其中西藏在自然状态,陕西在 2%,新疆在 4%;对于最低点,陕西在自然状态下,而拉萨和新疆均在高含水率状态 14%。

比较图 6 中 3 条曲线整体变化趋势,可得出不同生土房在不同含水率状态下对建筑耗热量变化的影响。西藏生土采暖能耗对含水率敏感系数始终高于陕西和新疆,因此无论在高湿还是低湿环境,西藏生土房对采暖能耗的增加都是最快的。由于陕西生土敏感系数在自然状态下最低,因此陕西生土房在刚受潮时,采暖能耗上升相对较慢,含水率大于 2% 后耗热量上升则比新疆生土房快。对于新疆生土,仅在自然状态下略高于陕西,含水率在 2%~14% 任何一状态下,新疆生土敏感系数则始终低于陕西和西藏。对每个含水率状态下对应的敏感系数求平均,则各地采暖能耗对含水率的平均敏感系数分别为:陕西 57.3,新疆 53.3,西藏 96.8。由此可见,新疆土坯房耗热量对土坯含水率的耗热量敏感度是最差的,其耗热量在含水率增加过程中上升最慢。

在自然状态下,新疆生土房耗热量略高于陕西和西藏生土房,但随着含水率的增加,其采暖能耗对含水率的敏感度越来越差,始终低于陕西和西藏,且采暖能耗也一直低于另外两者。因此,新疆土坯房的热工性能最佳,对降低建筑耗热量最为有利,在高湿环境下这种优势更加显著。

3 结论

1) 含水率与生土导热系数成线性相关,陕西、西藏和新疆的生土含水率与导热系数的线性相关系数都大于 0.98。

2)含水率对生土建筑耗热量的影响具有显著的地域性差异,新疆的生土导热系数随含水率的增长而变化最慢,热工性能最佳,而西藏最差。

3)新疆生土房在不同含水率状态下的采暖能耗最低,且含水率对采暖能耗的敏感性最小,因此新疆生土房在墙体湿度增大情况下建筑能耗增加幅度最小。

参考文献:

- [1] MACDOUGALL C. Natural building materials in mainstream construction: Lessons from the UK [J]. *J Green Build*, 2008, 3: 3.
- [2] 黄小燕,李耀辉,冯建英,等. 中国西北地区降水量及极端干旱气候变化特征[J]. *生态学报*, 2015, 35(5): 1359-1370.
HUANG X Y, LI Y H, FENG J Y, et al. Climate characteristics of precipitation and extreme drought events in Northwest China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(5): 1359-1370. (in Chinese)
- [3] 杨春艳,沈渭寿,林乃峰. 西藏高原气候变化及其差异性[J]. *干旱区地理*, 2014(2): 290-298.
YANG C Y, SHEN W S, LIN N F. Climate change and its regional differences over the Tibet Plateau [J]. *Arid Land Geography*, 2014(2): 290-298. (in Chinese)
- [4] 段妍,晋华,郑强. 含水率对黏土及沙土导热系数的影响[J]. *人民黄河*, 2016(2): 114-116, 120.
DUAN Y, JIN H, ZHENG Q. Testing study on moisture content effect on thermal conductivity for clay and sand [J]. *Yellow River*, 2016(2): 114-116, 120. (in Chinese)
- [5] 皇甫红旺,晋华. 含水率对工程常用土导热系数影响的试验研究[J]. *水电能源科学*, 2015(12): 122-124.
HUANUFU H W, JIN H. Experimental study of thermal conductivity of common engineering soil with different water content [J]. *Water Resources and Power*, 2015(12): 122-124. (in Chinese)
- [6] 郑强,晋华,刘虎,等. 孔隙率与含水率对砂质土样导热系数的影响[J]. *水电能源科学*, 2015(12): 125-128.
ZHENU Q, JIN H, LIU H, et al. Influence of porosity and water content on thermal properties of sandy soil sample [J]. *Water Resources and Power*, 2015(12): 125-128. (in Chinese)
- [7] 傅志前. 不同含水率麦秸砖墙导热系数试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2013(6): 1017-1019.
FU Z Q. Experimental research on thermal conductivity of wheat straw-bale wall of different densities [J]. *Journal of Building Materials*, 2013(6): 1017-1019. (in Chinese)
- [8] MOHAMED B M, AHMED J, AMEL S C, et al. Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB) [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 104(1): 44-51.
- [9] TAHA A, AZRA K, SINAN K, et al. Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum [J]. *Energy and Buildings*, 2015, 104(1): 139-146
- [10] 谭晓倩. 活化生土基低碳节能村镇建筑材料研究[D]. 辽宁大连:大连理工大学, 2011.
TAN X Q. Research on the low carbon emission and energy saving material by using activated clay matrix for rural buildings [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [11] 柏文峰. 云南民居结构更新与天然建材可持续利用[D]. 北京:清华大学, 2009.
BAI W F. Structure renewal and sustainable using of natural building materials on yunnan folk houses [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. (in Chinese)
- [12] 土工试验规程: SL 237—1999[S]. 北京:中国水利水电出版社, 1999.
Specification of soil test: SL237-1999 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 1999. (in Chinese)
- [13] 农村单体居住建筑节能设计标准: CECS332—2012[S]. 北京:中国计划出版社; 2013.
Design standard for energy-efficient of detached rural housing: CECS332-2012 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013. (in Chinese)
- [14] 建筑节能气象参数标准: JGJ/T 346—2014[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2015.
Standard for weather data of building energy efficiency: JGJ/T346-2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [15] JOSEPH C L, SAM C, HUI M. Sensitivity analysis of energy performance of office buildings [J]. *Building and Environment*, 1996, 31(1): 27-39
- [16] GARCIA S, LACARRIÈRE B, MUSY M, et al. Application of sensitivity analysis in building energy simulations: Combining first- and second-order elementary effects methods [J]. *Energy and Buildings*, 2014, 68: 741-750.