

# 关中地区下沉式窑洞冬季室内热环境测试研究

李雪平, 崔羽

(西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 为掌握关中地区下沉式窑洞冬季室内热环境传热效应及影响成因, 对三原县典型下沉式窑洞进行空气温湿度、壁面温度、太阳辐射强度等热环境参数测试, 依据 *PMV-PPD* 热评价体系进行分析, 并基于土体水热耦合理论对窑洞传热机制展开探讨。结果表明: 下沉式窑洞冬季防寒保温性能较差, 窑洞内部与室外通风不畅, 长期处于较潮湿环境中; 内壁面温度低于室内约 3℃, 对人体易造成冷辐射影响, 室内热舒适性较低; 冬季窑洞周围土体容积热容量降低, 热扩散系数增大, 导致土体传热敏感, 窑洞内部保温性能减弱; 居民对窑洞预测热感觉投票 *PMV* 的均值为 -2.01, 预测不满意百分比 *PPD* 高达 67% 以上, 室内热环境急需改善。结论可为关中地区下沉式窑洞室内热环境改善及可持续发展提供依据。

**关键词:** 下沉式窑洞; 室内热环境; 热舒适

中图分类号: TU 201.5

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)04-0591-06

## Field study on indoor thermal environment of sinking cave in Guanzhong Area in winter

LI Xueping, CUI Yu

(Architectural and Civil Engineering college, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In order to know the indoor thermal environment heat transfer effect and its influencing factors of sinking cave dwellings in Guanzhong area in winter, such thermal environment parameters of typical sinking cave dwellings in Sanyuan county, as air temperature and humidity, wall temperature and solar radiation intensity, were tested and analyzed according to *PMV-PPD* thermal evaluation system, and the heat transfer mechanism of cave dwellings was discussed based on soil hydrothermal coupling theory. Results show that the cold-proof and heat-preservation performance of the sinking cave is poor in winter, the ventilation inside and outside the cave is not smooth, and the cave is caught in a humid environment for a long time. The temperature of the inner wall surface is about 3℃ lower than in the room, which is easy to cause cold radiation to human body, and the indoor thermal comfort is low. In winter, the volume heat capacity and thermal diffusivity of the soil around the cave decreased, which resulted in the heat transfer sensitivity of the soil and decrease of the internal heat insulation performance of the cave. The average *PMV* of residents' prediction of thermal sensation vote in cave dwellings was -2.01, and the percentage of *PPD* was over 67%, so the indoor thermal environment needed to be improved urgently. The conclusion can provide basis for improving indoor thermal environment and sustainable development of subsidence cave dwelling in Guanzhong area.

**Key words:** sinking cave; indoor thermal environment; thermal comfort

随着绿色建筑不断被提倡, 节能、环保已成为 21 世纪建筑学科的热点问题, 解决建筑高能耗问题也是我国建筑行业的重点。传统民居作为环保、低能耗建筑, 其传承和发展备受关注。为此, 越来越多的学者也投身到研究传统民居居住环境的工作中。杨柳提出寒冷地区农村现有住宅可利用吊炕改善冬季热舒适问题<sup>[1]</sup>。吴志刚研究得出增加缓冲空间可改善夏季民居的热环境<sup>[2]</sup>。高翔翔通过对寒冷地区民居建筑的热环境研究得出冬季火

炕对民居室内供暖的重要性<sup>[3]</sup>。赵西平、刘元等人通过实验测试研究传统民居的围护结构, 得出夯土墙具有良好的热工性能, 提出冬季保温的改进方法<sup>[4]</sup>。以上学者对传统民居的室内热环境问题已有广泛研究, 但对于下沉式窑洞冬季室内热环境的研究资料尚且不足, 下沉式窑洞作为关中地区常见的一种传统民居, 其夏季主要考虑用树木遮阳、天井、绿化等措施改善室内热舒适性, 而冬季阴冷潮湿, 窑洞室内热舒适性较差, 对当地居

民冬季生活影响严重. 因此开展该地区下沉式窑洞冬季室内热环境的研究对提高当地居民居住舒适性及绿色建筑可持续发展具有重要意义.

本文以三原县典型下沉式窑洞为研究对象, 开展室内热环境研究, 在其冬季 1 月份进行空气温湿度、

壁面温度、太阳辐射强度等热环境参数测试, 依据 *PMV-PPD* 热评价体系进行分析, 讨论其传热机制, 并提出相应优化建议, 所得结论可为当地下沉式窑洞室内热环境的优化与改善提供理论依据.

## 1 测试对象及方案

### 1.1 测试对象

测试地点位于三原县柏社村. 三原县位于关中地区, 属于我国建筑热工分区中的寒冷地区. 冬季干燥寒冷, 常有冬旱; 夏季炎热, 降雨量大. 窑洞的天井长宽 10 m 左右、深约 7~8 m. 窑顶上的地面夯实, 向外有倾斜小坡, 保证下雨时不积水, 保护窑顶土层稳定. 入户通道长约 15 m, 供居民平时出入. 内外墙体用草泥抹面、裱糊处理. 门窗洞口用黏土砖砌筑. 窑内地面采用素土夯实, 上层铺设黏土砖, 天井采用黏土砖铺设宽约 1 m 的通道. 门窗材料均为铁质、单层玻璃制成.



图 1 下沉式窑洞

Fig. 1 Sinking cave dwelling

### 1.2 测试方案

本次测试天气均为晴天, 主要测试不采暖的房间 3, 房间门窗关闭, 有棉质门帘, 测试期间居民正常活动, 房间 1、2、4 为三组平行试验. 2018 年 1 月 10 日 13:30 开始测量该房间 24 h 室内温湿度. 其他温湿度测点包括房间 1 测点 A、房间 2 测点 B、房间 4 测点 D 和室外测点 E, 各布置一个温湿度记录仪, 房间 3 测点 F、G 为壁面温度测

点, 置两台表面温度计, 与房间 3 温湿度测点 C 同时记录, 并同时监测当天室外太阳辐射强度. 仪器布置如图 2 所示.

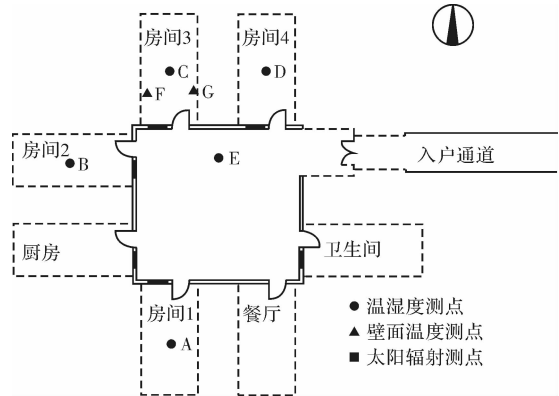


图 2 窑洞平面及测点布置

Fig. 2 Cave dwelling plane and measuring point arrangement

## 2 测试数据及传热机制分析

### 2.1 太阳辐射强度

太阳辐射强度测试点选择在房间 3 门口, 房间 3 坐北朝南, 仪器受到的遮挡较少, 有利于准确记录当天辐射强度. 数据记录从早上 8:00 至下午 6:00 左右, 日照时间约 10 h. 总辐射强度平均为  $0.36 \text{ kJ/m}^2$ , 最高点出现在下午 1:00 左右, 其值约为  $0.52 \text{ kJ/m}^2$  (如图 3). 通过测试数据可以得出, 太阳总辐射强度较高, 持续日照时间较长, 可有效利用太阳能.

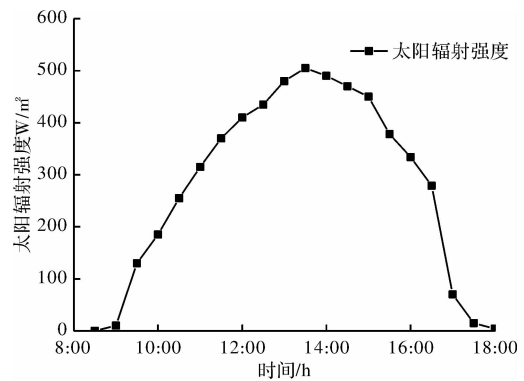


图 3 太阳辐射强度变化

Fig. 3 Changes of the solar radiation intensity

### 2.2 空气温度

由图 4 中的温度测试结果可以得出: 测试期间 (为 24 h), 室外温度随时间呈周期性变化, 在 11 日早上 7:30 分左右温度最低, 为  $-6.8^\circ\text{C}$ , 最高气温  $3.2^\circ\text{C}$  出现在 10 日午后约 14:00, 平均温度  $-2.7^\circ\text{C}$ , 日温度波幅约  $10^\circ\text{C}$ , 室外温度有较大波动. 室内各房间平均温度均在  $6^\circ\text{C}$  左右, 波幅

3℃左右,温度较为平稳.房间3平均温度6.2℃,最高温度7.3℃,最低气温4.5℃,波幅2.8℃.依据《室内空气质量标准》(GB/T18883-2002)<sup>[5]</sup>规定,冬季有采暖场所的温度为16~24℃,农村住宅虽然与城市供暖要求不同,但也应在15~18℃才能满足人的热舒适需要<sup>[6]</sup>.

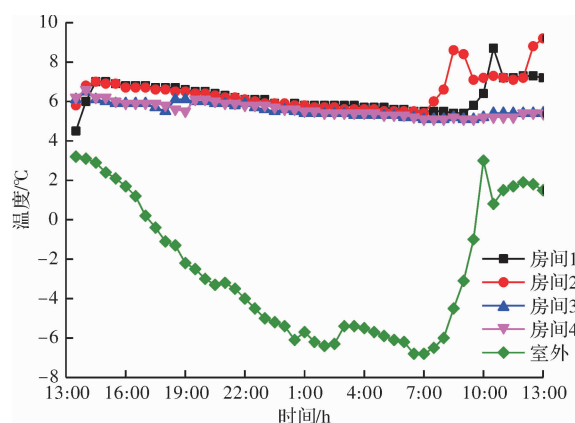


图4 室外及各房间温度对比

Fig. 4 Outdoor and room temperature comparison

### 2.3 相对湿度

从图5相对湿度测试结果可以得出:室外相对湿度在45%~70%左右,平均相对湿度为57%,在11日10:00到13:00有较大波动,夜间波动较小.室外温度波动规律与相对湿度波动规律相反,即相对湿度越高,温度越低.室内湿度受朝向影响,朝南房间室内相对湿度在同一时间低于朝北房间,房间3相对湿度最高为55.4%,最低44.5%,平均50.6%,波幅为10.9%.朝向为北的房间1室内相对湿度最高60.8%,平均为57.2%,相比于房间3较高,各房间相对湿度均在50%以上.室内相对湿度波动幅度较小,处于较平稳状态,房间通风不良,室内外空气交换效率较低.

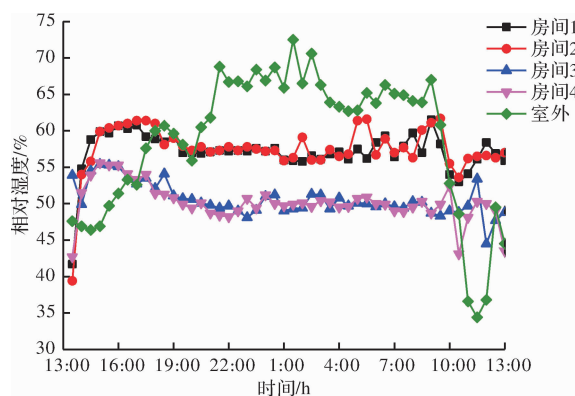


图5 室外及各房间相对湿度对比

Fig. 5 Comparison of outdoor and room relative humidity

### 2.4 壁面温度与平均辐射温度

通过图6中的测试数据可知,房间3的东、西壁面温度均较低,两侧墙面温度接近,室内温度高于壁面温度约3℃,人体会产生辐射吹风感,热舒适性低.人体辐射传热量主要受室内壁面温度的影响<sup>[7]</sup>.根据平均辐射温度MRT(Mean Radiant Temperature)公式<sup>[7]</sup>对数据进行处理:

$$MRT = \frac{\sum_{i=1}^n A_i T_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (1)$$

式中:  $A_i$  为各表面可以看到的面积;  $T_i$  为该表面温度.

处理数据得到房间3平均辐射温度变化(见图7),房间3的平均辐射温度MRT处于1.8~4.1℃之间,与室内温度最大差4℃左右,平均辐射温度与室温均较低.当地居民冬季若要满足热舒适度要求,需采用辅助采暖等方式.

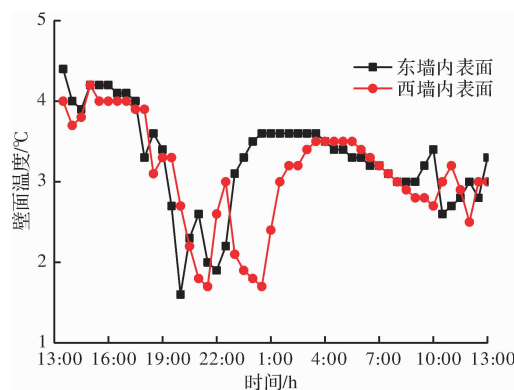


图6 室内壁面温度变化

Fig. 6 Changes of the indoor wall temperature

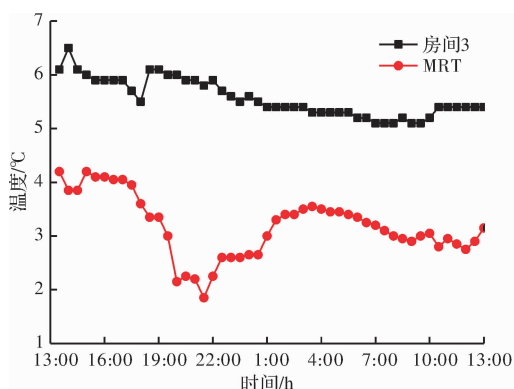


图7 房间3平均辐射温度(MRT)变化

Fig. 7 Average radiation temperature (MRT) changes of Room 3

### 2.5 水蒸气分压力

根据预测热感觉投票PMV公式,水蒸气分压力也是分析室内热环境舒适性中的一项重要参数,参照温度-水蒸气分压力对照表,通过Excel表格拟合出两者的线性关系(见图8),图中可以看出温度在0~100℃左右拟合较为准确,水蒸气压力随

温度升高呈指数增长:

$$P = 1.1147e^{0.0435T} \quad (2)$$

式中:  $P$  为水蒸气分压力;  $T$  为温度.

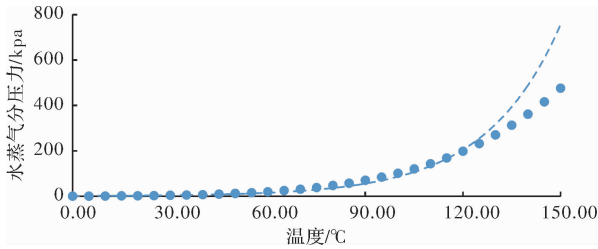


图 8 温度-水蒸气分压力拟合曲线

Fig. 8 Temperature-water vapor partial pressure fitting curve

处理数据得到房间 3 室内水蒸气分压力变化曲线(见图 9), 房间 3 的水蒸气分压力基本在 1.4~1.6 kPa 之间, 平均为 1.48 kPa, 波动幅度较小.

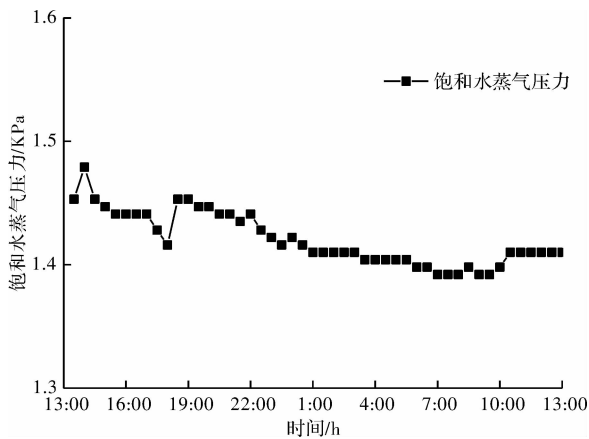


图 9 房间 3 水蒸气分压力

Fig. 9 Water vapor partial pressure of Room 3

## 2.6 基于土体水热耦合理论的窑洞传热机制分析

依据传热学<sup>[8]</sup>公式对下沉式窑洞周围土体进行分析.

土体容积热容量公式.

$$C_V = C_1 \rho_1 + C_2 \rho_2 + C_3 \rho_3 \quad (3)$$

式中:  $C_1$  为土体颗粒比热容;  $\rho_1$  为干密度;  $C_2$  为水的比热容;  $\rho_2$  为水的密度;  $C_3$  为空气比热容;  $\rho_3$  为空气密度.

热扩散系数公式.

$$K = \frac{\lambda}{C_V} \quad (4)$$

式中:  $\lambda$  为土体热导率;  $C_V$  容积热容量.

根据上文数据分析, 对下沉式窑洞土体传热机制进行分析, 得出结论如下:

(1) 依据式(3), (4)得出土体传热效应随其湿度增长呈上升趋势, 水容积热容量为 4.19 kJ/(kg·K), 土体颗粒容积热容量为 2.05~2.43 kJ/(kg·K), 冰的容积热容量为 1.886 kJ/(kg·K). 三原

县冬季平均气温在 0℃ 以下, 土体处于 0℃ 以下时所含水分转化为冰, 土体容积热容量降低, 热扩散系数增大, 结果导致冬季窑洞周围土体传热敏感, 窑洞内部保温性能减弱.

(2) 相比于土体容积热容量, 空气容积热容量仅为 0.0013 kJ/(kg·K), 土壤中空气含量对土体容积热容量对窑洞室内热环境影响极小.

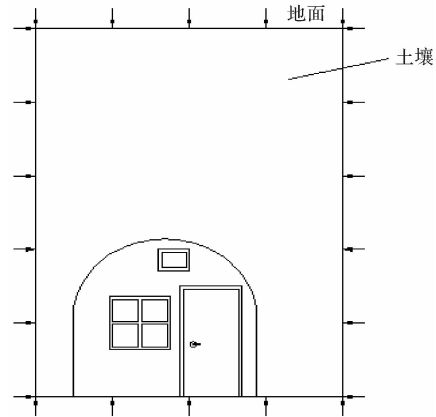


图 10 土体传热机制

Fig. 10 Soil heat transfer mechanism

## 3 室内热舒适评价及优化方案

### 3.1 室内热舒适评价

PMV-PPD 热评价体系是由 Fanger 教授提出用来评价室内热环境质量及人体热舒适的方法<sup>[9]</sup>. PMV 表示预测平均投票数, 代表同一环境人的热感觉平均值, 根据人体热平衡公式计算得来. PMV=0 时表示室内热环境为最佳热舒适状态, ISO7730 对 PMV 的推荐值为 PMV 值在 -0.5~+0.5 之间. PPD 为预测一组人对同一环境热感觉感到不舒适的人数所占总人数的百分比, 是预测平均投票数 PMV 的函数, 即使在舒适条件 PMV=0 时, PPD 曲线也有 5% 的人反映出不满意.

测试期间房间 3 门窗均关闭, 取室内风速为 0 m/s. 其中服装热阻通过调查当地居民冬季室内着装情况设定为 1.7 clo, 依据国际标准化组织 ISO7730 标准<sup>[10,11]</sup>的规定值进行计算, 新陈代谢率以人体坐姿、轻微活动设定为 1.2 met. 利用所得数据: 房间 3 室内温度、相对湿度、平均辐射温度、饱和水蒸气压力等, 基于 Matlab 软件将对应参数输入计算得到同一时刻 PMV, PPD 值(图 11~12). 窑洞预测热感觉投票 PMV 的均值为 -2.01, 预测不满意百分比 PPD 均高达 67% 以上. 结果表明, 三原县柏社村下沉式窑洞室内人体热

感觉偏冷,无辅助采暖时,室内热舒适度差。

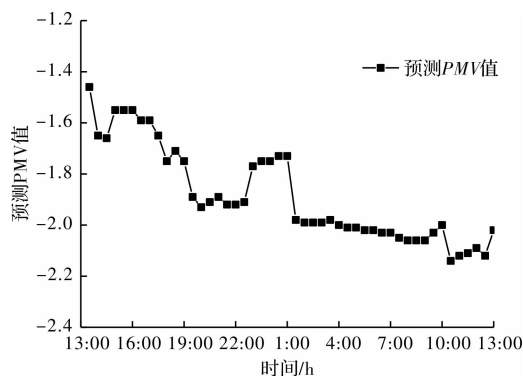


图 11 房间 3 PMV 曲线

Fig. 11 PMV curve of Room 3

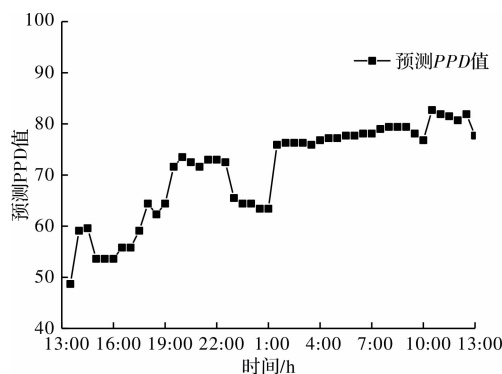


图 12 房间 3 PPD 曲线

Fig. 12 PPD curve of Room 3

### 3.2 优化方案

依据实测数据及传热机制分析,并结合三原县下沉式窑洞建筑特点,对其室内热环境提出以下四点建议:

(1)下沉式窑洞在选址期间,可通过减少周围地形、树木等环境对太阳能的利用,以此解决当地下沉式窑洞冬季部分采暖问题。

(2)窑洞冬季周围土体热扩散系数增大,土体传热敏感,可通过对其内壁面及地面增加保温隔热材料,以此减少周围土体降温对窑洞室内的影响。

(3)窑洞冬季室内温度较低,可使用火炉、电热毯等辅助取暖设施,以此满足居民对室内热舒适性的要求。

(4)窑洞与室外空气交换较差,可同时打开门窗,保持单面通风,利用室外空气脉动与室内外温差的热压进行室内外空气交换。

## 4 结论

(1)三原县下沉式窑洞冬季防寒效果较差,室内温度较低,相对湿度较大。窑洞室内与外部环境通风不畅,室内长期处于较潮湿的环境。

(2)窑洞内壁面温度低于室内温度约  $3^{\circ}\text{C}$ ,对人体易造成冷辐射影响,室内人体热舒适性较低,居民日常活动受到影响。

(3)冬季窑洞周围土体容积热容量降低,热扩散系数增大,导致土体传热敏感,窑洞内部保温性能减弱。依据 PMV-PPD 热评价体系进行分析,窑洞室内预测热感觉投票 PMV 均值为 -2.01,预测不满意率 PPD 达 67% 以上,室内热环境问题仍需改善。

(4)依据实测数据及水热耦合机制分析,并结合三原县下沉式窑洞建筑特点,对其室内热环境的改善提出四点建议。

## 参考文献 References

- [1] 杨柳,赵云兵. 寒冷地区农村住宅冬季室内热环境研究[J]. 建筑节能,2013(7):1-7.  
YANG Liu, ZHAO Yunbing. Study on winter indoor thermal environment of rural houses in cold regions [J]. Building Energy Efficiency,2013 (7):1-7.
- [2] 吴志刚,肖毅强. 闽东传统民居夏季热环境实测分析:以长乐“九头马”古民居群为例[J]. 建筑节能,2017(7):16-20,103.  
WU Zhigang, Xiao Yiqiang. Analysis of the Summer Thermal Environment of the traditional dwellings in east fujian: taking the ancient folks of jiudou horse as an example [J]. Building Energy Conservation, 2017 (7):16-20,103.
- [3] 高翔翔,胡冗冗,刘加平,等. 北方炕民居冬季室内热环境研究[J]. 建筑科学,2010(2):37-40.  
GAO Xiangxiang, HU Xiaoquan, LIU Jiaping, et al. Study on the indoor thermal environment of the northern folk dwellings in winter [J]. Building Science, 2010 (2):37-40.
- [4] 赵西平,刘元,刘加平. 秦岭山地传统民居冬季热工能分析[J]. 太原理工大学学报,2006(5):565-567.  
ZHAO Xiping, LIU Yuan, LIU Jiaping. Winter thermal energy analysis of traditional residential houses in Qinling Mountains [J]. Journal of Taiyuan University of Technology,2006 (5):565-567.
- [5] 中国疾病预防控制中心. 室内空气质量标准:GB/T18883-2002[S]. 北京:中国标准出版社,2002.  
China Center for Disease Control and Prevention. indoor air quality standards:GB/T 18883-2002 [S]. Beijing: China Standard Press,2002.
- [6] 金虹,赵华,王秀萍. 严寒地区村镇住宅冬季室内热舒适环境研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2006(12):2108~2111.  
JIN Hong, Zhao Hua, Wang Xiuping. Study on indoor

- thermal comfort environment of villages and towns in severe cold regions[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006 (12): 2108~2111.
- [7] 刘加平. 建筑物理[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- LIU Jiaping. Building Physics [M]. 4th ed. Beijing: China Building Industry Press, 2010.
- [8] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- YANG Shiming, TAO Wenzhao. Heat transfer theory [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [9] 金招芬, 朱颖心. 建筑环境学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- JIN Zhaofen, ZHU Yingxin. Building environmental science [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2001.
- [10] IOS. Moderate Thermal Environments, Determination of the PMV and PPD indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort; ISO Standard 7730 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1984.
- [11] 刘抚英, 厉天数, 赵军. 绿色建筑设计的原则与目标[J] 建筑技术, 2013(3): 212-215.
- LIU Fuying, LI Tianshu, ZHAO Jun. Principles and Objectives of Green Building Design [J] Architecture Technology, 2013 (3): 212-215.

(编辑 桂智刚)

(上接第 510 页)

- WANG Zhi, DU Shouji, ZHANG Wenbo, et al. Analysis of construction settlement of shallow railway tunnel under crossing the highway[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(3): 531-535+572.
- [9] 姜波. 浅埋暗挖法地铁施工对周围建筑物影响规律[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2016, 35(5): 484-487.
- JIANG Bo. Surrounding buildings influence law under the condition of subway construction used by shallow tunnel[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2016, 35(05): 484-487.
- [10] 陈建平, 吴立. 地下建筑工程设计与施工[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2000.
- CHEN Jianping, WU Li. Underground engineering design and construction[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2000.
- [11] 袁竹, 陈勇, 王柱. 山区单线铁路隧道下穿高速公路影响分区研究[J]. 隧道建设, 2016, 36(2): 164-169.
- YUAN Zhu, CHEN Yong, WANG Zhu. Study on influence zoning of single-track railway tunnel underpassing expressway tunnel at mountainous areas[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(2): 164-169.
- [12] 雷位冰. 温福铁路垆头岭隧道下穿公路隧道施工技术[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(4): 758-764.
- LEI Weibing. Construction technology for Wenfu railway guantouling tunnel under crossing the highway tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(4): 758-764.
- [13] 陈彬科, 陈林杰, 吴建辉, 等. 新建地铁下穿既有轨道车站施工方案研究[J]. 中外公路, 2018, 38(6): 186-189.
- CHEN Binke, CHEN Linjie, WU Jianhui, et al. Study on construction schemes of new metro downpassing existing metro station[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(6): 186-189.
- [14] 李春清, 梁庆国, 吴旭阳, 等. 复合式衬砌初期支护刚度及影响因素分析[J]. 隧道建设, 2014, 34(8): 754-759.
- LI Chunqing, LIANG Qingguo, WU Xuyang, et al. Analysis on rigidity of primary support of composite lining and its influencing factors[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(8): 754-759.
- [15] 晏勤, 李树忱, 谢璨, 等. 锚杆加固作用下圆形隧道复合岩体围岩特征曲线解析方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 3021-3027.
- YAN Qin, LI Shuchen, XIE Can, et al. Analytical solution for ground characteristic curve of composite rock mass reinforced by bolts in circular tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(12): 3021-3027.

(编辑 桂智刚)