

文章编号: 1673-9469 (2018) 04-0016-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.04.004

# 黄土窑洞在水作用下的变形过程机理研究

李康<sup>1</sup>, 倪万魁<sup>1</sup>, 刘魁<sup>2</sup>, 赵阳<sup>1</sup>

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西西安710054; 2. 信息产业部电子综合勘察研究院, 陕西西安710054)

**摘要:** 在实地调查和模拟黄土窑洞在不同黄土含水率条件下各主要部位应力与位移发展特征的基础上, 对黄土窑洞的敏感部位及其变形破坏发展过程进行了研究, 并将黄土窑洞的变形发展过程归纳为四个阶段, 得出黄土窑洞抗力主要来源于黄土自身结构和窑洞拱形结构提供的抗力, 并在此基础上提出经过验证的经济可行的防护措施。

**关键词:** 黄土窑洞; 黄土含水率; 窑洞变形; 窑洞防护

**中图分类号:** TU361

**文献标识码:** A

## Study on deformation mechanism of loess cave under water action

LI Kang<sup>1</sup>, NI Wankui<sup>1</sup>, LIU Kui<sup>2</sup>, ZHAO Yang<sup>1</sup>

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, 710054, China; 2. Research Institute of electronic comprehensive survey of the Ministry of information industry, Xi'an, 710054, China)

**Abstract:** Based on field investigations and simulations of stress and displacement characteristics of loess cave dwelling under different water content conditions of loess, this paper studies the sensitive parts of loess cave dwelling and their deformation and destruction processes. The process of the deformation of loess caves is summarized into four stages. It is concluded that the resistance of the loess cave dwelling comes mainly from the loess' own structure and the resistance provided by the arch structure of the cave. Finally, the economically feasible protective measures are put forward.

**Key words:** loess cave dwelling; Loess moisture content; Cave deformation; Cave protection.

窑洞作为生土建筑的代表, 迄今已有 6000 年的历史, 它是我国黄土高原地区最为原始和广泛的居住形式之一<sup>[1]</sup>。然而, 其病害多、安全性不易保证的突出问题近年来愈发严重<sup>[2-3]</sup>。以往的灾害表明, 大面积窑洞病害的发生与阴雨天气有着密切的关系。现代窑洞建筑的理论研究起步较晚, 自 1980 年开始吸引了无数生土建筑研究的专家和学者的关注<sup>[2-19]</sup>。以往研究中, 人们将研究重点集中于影响黄土窑洞的因素探讨中, 并根据影响因素提出改进措施, 而对于黄土窑洞的变形破坏过程则鲜有研究。本文从黄土窑洞在不同黄土含水率条件下各主要部位应力与位移的发展特征入手, 对黄土窑洞的变形破坏机理进行研究, 并在此基础上提出相应的防护措施。

## 1 黄土窑洞破坏的位置和主要形式

调查研究发现, 黄土窑洞的破坏如图 1 所示, 发生部位主要为窑顶、窑腿和立壁, 变形破坏均有其各自的特点。窑底及窑底脚处因人们认为整平和铺砖等措施, 未见明显破坏现象, 破坏形式主要为裂缝和渗水。

(1) 窑顶裂缝主要有两种形式, 当窑洞覆土厚度较厚时, 拱顶黄土在上部土体压力下向窑内松胀变形, 因此在拱顶处竖向的挤压和变形等效为水平向的张拉作用, 在不利的环境条件下, 易在拱顶处形成沿拱轴向发育的裂缝, 并由窑拱逐渐向上发展; 当窑洞覆土厚度较薄时, 黄土中水平作用力较低, 拱顶土体整体下沉, 造成窑拱与窑腿、立壁接触部

收稿日期: 2018-06-11

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划(2014KTDZ03-01-02); 陕西省重点研发计划(2017ZD-SF-087)

作者简介: 李康(1989-), 男, 黑龙江鹤岗人, 硕士, 从事地质灾害、岩土工程方面的研究。

位发育的竖向裂缝。显然，这两种形式的破坏为逐步发展的局部变形破坏，易造成窑脸土体碎落、窑顶局部滑塌甚至坍塌等灾害，是窑洞破坏的主要形式。

(2) 窑腿因其特殊的受力特征，其破坏形式主要为表层土体脱落。从图1中可以看出，该类破坏的面积较大，但脱落土层较薄。并逐渐向窑腿内部发展。窑腿的破坏使其承受上部土体压力的能力降低，不仅加剧窑顶的破坏，更易导致窑洞的整体滑塌。

(3) 立壁的破坏与窑腿不同，表现为立壁与窑顶的过渡处形成裂隙，并逐步发展。从图1中可以看出，该类裂隙与窑顶裂隙不同，由于立壁的压缩变形使窑拱与立壁过渡处形成张拉作用，因立壁的变形发展缓慢且在整个立壁纵深范围内不均匀发育，因此该类裂隙表面较为粗糙，一般不呈直线形，而是弧状发育，易造成窑洞坍塌、冒顶等灾害。

(4) 窑内渗水主要表现为强降雨或灌溉作用下，水体沿结构面或植物孔隙入渗，最后渗出窑洞拱顶或后壁<sup>[5]</sup>。

(5) 窑洞的急性破坏包括窑洞滑塌、坍塌等灾害，窑洞所在边坡失稳或窑洞的变形破坏持续发展，都可导致黄土窑洞急性破坏的发生。

## 2 黄土窑洞在水作用下的变形破坏特征

### 2.1 模型参数的选择

本文通过对陕北地区窑洞尺寸的调查和统计，采用该地区广泛应用的窑洞尺寸，即窑拱宽度3 m，立壁高2 m，窑拱高1.5 m，窑腿宽度2 m，进深6 m，上覆土层厚10 m。以双孔窑洞为研究对象，黄土物理学指标采用延安地区多项勘察报告成果，见表1。

### 2.2 黄土窑洞的应力与位移场特征

本文以15%含水量为例，通过Midas GTS NX数值模拟软件对窑腿宽度为2 m时，双窑洞竖向和水平向的应力、位移情况进行模拟，黄土窑洞的应力与位移特征如图2。

从图2中我们可以看出，开挖窑洞后，洞壁失去了原有黄土支撑，黄土窑洞进行了应力重分布，窑洞土体因土拱作用承受水平和竖直方向压力。黄土窑洞的应力与位移场主要表现为以下方面：

窑腿承受较大的竖向压应力，受力范围自窑腿中心向窑内逐渐增大，并存在一定程度的竖向位移。窑腿承受的水平应力则较小，同时，水平位移异常

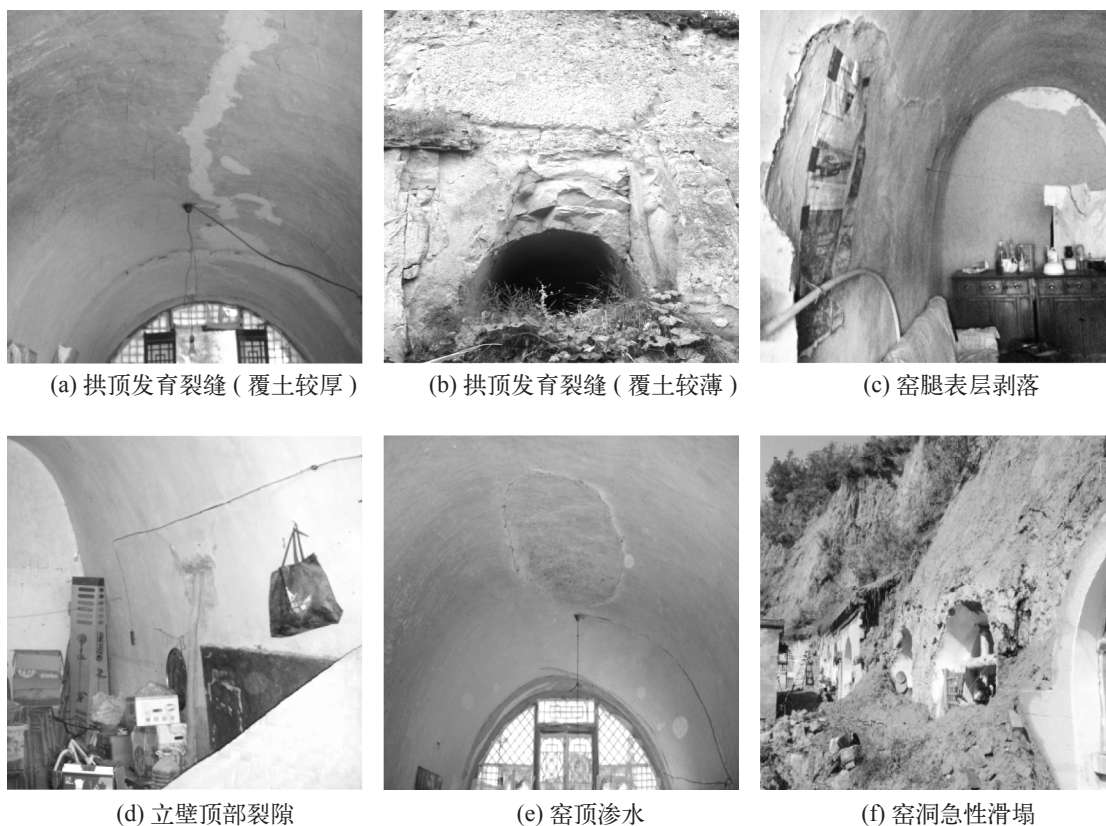


图1 黄土窑洞的变形破坏

Fig.1 Deformation damage of loess cave

表1 延安地区原状黄土力学指标  
Tab.1 Mechanical index of undisturbed loess in Yan'an

含水量 $\omega$ /%	压缩模量 $E$ /MPa	泊松比 $\mu$	粘聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\varphi$ /°	重度 $\gamma$ /(kN·m <sup>-3</sup> )
10	36.5	0.25	142	25.6	15.60
12	32.2	0.25	125	25.6	16.20
15	14.6	0.25	114	25.6	16.50
17	13.9	0.2	72	25.8	16.74
19	10.5	0.26	46	25.5	17.20
21	8.8	0.3	35	25.2	17.45

区仅集中在窑腿表面,反映出窑腿虽有向窑洞内变形的趋势,但该趋势仅限于窑腿表面,这与实地调查中窑腿的破坏形式相符。

两侧立壁承受的竖向应力的分布面积均低于窑腿。因立壁土体厚度较大,其水平应力和水平位移的大小与范围均远大于窑腿,反映出立壁大范围的均匀变形,仅在拱顶、窑底与立壁接触处存在一定程度的应力集中。立壁的应力、位移特征揭示了实地调查中立壁破坏发生的原因。

因窑腿、立壁与窑底过渡处并非圆滑过渡,而是形成了一个直角,因此窑洞在窑底两侧产生较强的应力集中,受它影响,窑底拐角处,极易失稳,发生水平与垂直方向的位移,从而使窑洞失稳。

窑顶与窑底具有相似的应力、位移变化规律,表现在二者竖向应力极低,竖向位移均较大。拱顶越靠近拱轴线,其竖向位移越大,而窑底则因下部土体的顶起,使其存在较高的水平拉应力。以上作用下,窑顶易形成掉块和裂缝,而窑底则易形成隆起,使地面不平,影响居民正常生活和窑洞安全。

当存在多个窑洞时,窑洞上方土体在一定高度处形成整体的竖向位移场,同时,窑洞上方土体表面则形成水平位移场,使窑洞上方一定范围内的土体表现为竖向下沉和沿窑洞轴向开裂的趋势,这一趋势使窑洞上方土体形成新的裂隙或使原闭合节理张开,从而形成软弱面。很好地解释了前文调查中窑洞的局部渗水和开裂现象。

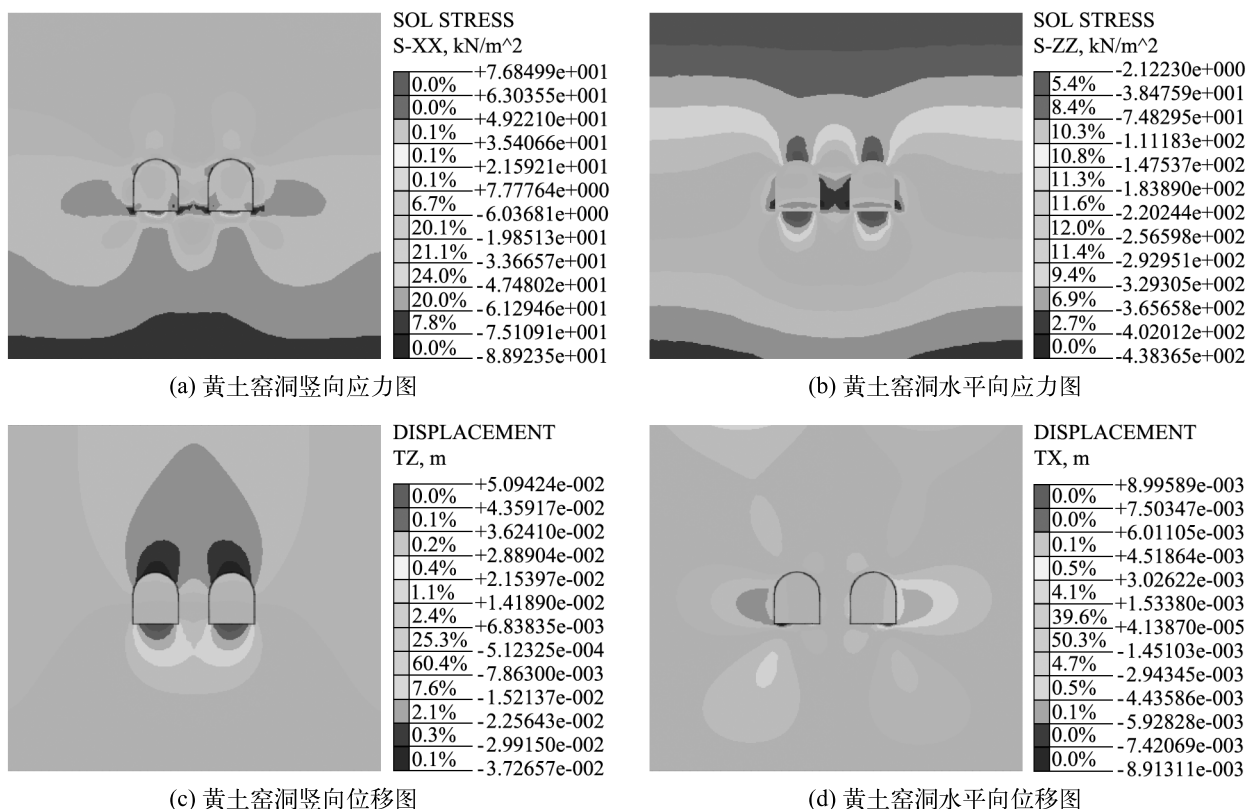


图2 黄土窑洞应力位移特征图

Fig. 2 Stress and displacement characteristics of loess caves

### 2.3 不同含水率黄土对窑洞安全的影响

为研究黄土窑洞水毁破坏的发展规律，本文对不同含水率条件下黄土窑洞的力学特征和位移特点进行了模拟和统计，选取窑洞典型部位的应力与位移特征，见图3。

根据以上的统计结果，我们可以将黄土窑洞在黄土含水率增加时黄土窑洞变形破坏的发展过程概括为以下几个阶段：

(1) 当黄土含水率低于12%时，窑顶与窑腿底脚处竖向位移较小，黄土含水率增加表现为窑洞上方土体自重的增加，黄土的性质受影响较小，窑洞黄土依靠自身结构抗力，承受窑洞上方土重，变形以空隙闭合和弹性变形为主。

(2) 当黄土含水率为12%~15%时，窑顶与窑腿底脚处竖向位移变化幅度增大，窑腿和立壁的水平应力较为稳定，此时黄土窑洞除依靠黄土自身结构抗力外，窑洞拱形结构与黄土自身结构共同发挥作用，这一阶段内，窑腿、立壁、窑腿底脚、立壁底脚处的各向应力与位移变化均较小，黄土窑洞处于理想的“正常使用状态”。

(3) 当黄土含水率为15%~17%时，黄土窑洞表现为整体应力的重分布，窑腿底脚处竖向应力开始逐渐减小，窑腿与立壁的水平应力开始逐渐增大，因窑腿同时承受应力作用较大，因此它的应力与位移变化稍早于立壁，同时窑顶、窑腿底脚的竖向位移趋稳。此阶段中，由于黄土水敏性的影响，一方

面增加土体容重，另一方面降低土体的力学性质，已有研究表明，相对于低含水率时的值，黄土的黏聚力和抗拉强度降低很多，可达80%~100%，而内摩擦角则降低约30%左右<sup>[16]</sup>。此时黄土窑洞主要依靠拱形结构来抵抗上部土体自重和高含水率对黄土物理力学性质的不利影响，此时的黄土窑洞变形主要来自于挤压和破坏原状黄土结构，在含水率降低后无法恢复。

(4) 当黄土含水率大于17%时，黄土窑洞各主要部位变形不断发展，拱形结构的整体性不断遭到破坏，黄土窑洞已处于失稳状态。当遇到连阴雨天气时，黄土窑洞长时间处于这一状态中，极易发生整体滑塌和坍塌。

### 3 保持黄土窑洞稳定的对策

通过以上研究可知，黄土窑洞的防护应从加强黄土自身结构抗力和窑洞拱形结构抗力两方面入手：

(1) 加强黄土自身结构抗力：采取措施使窑洞黄土长时间处于较低含水率状态下对窑洞的安全是十分必要的，由于黄土窑洞建于原状黄土中，因此，窑洞选址很大程度上决定原状黄土自身抗力。对于窑洞选址已有共识，即黄土含水率较低且变化不大的背风向阳处，争取良好朝向，避开裂隙、洞穴、蚁穴等易渗水地段。辨认土质也是很重要的一个环节。有经验的窑洞匠师能够用“握土法”估计土的

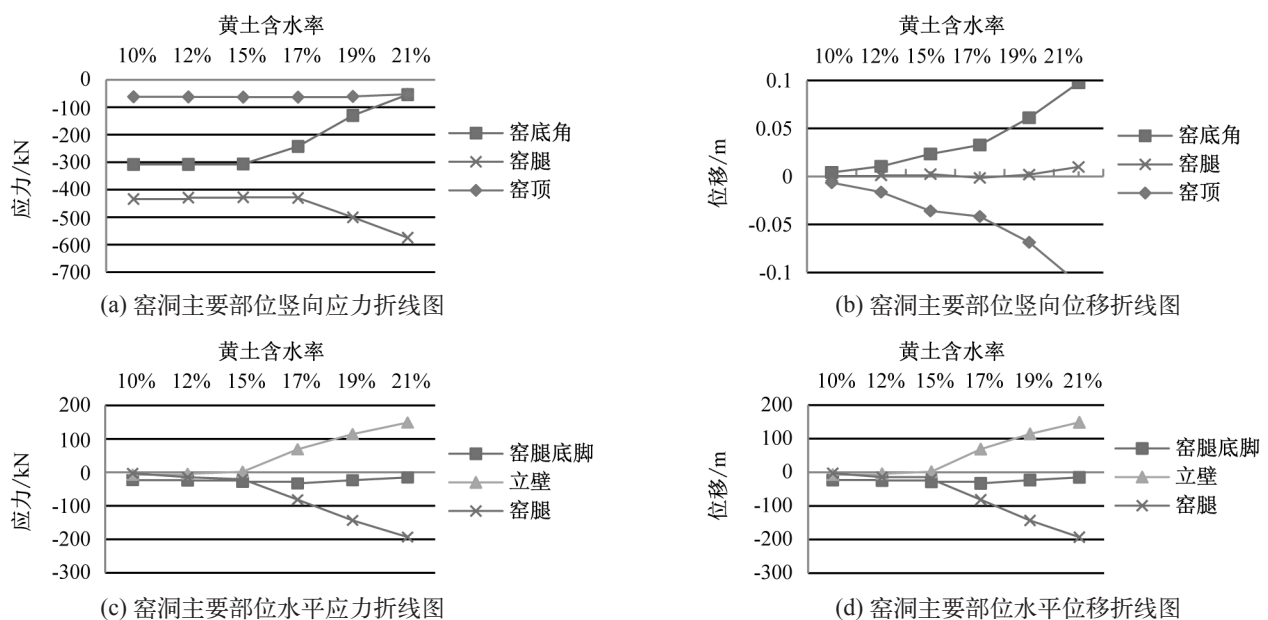


图3 不同含水率条件下黄土窑洞应力位移折线图

Fig. 3 Stress and displacement line diagram of loess cavern under different water content conditions

含水量,用“指捻法”知道土的坚实性能,用“拳击法”知道土的抗剪能力,凭“饭撮”反作用于手的力量了解土的强度<sup>[15]</sup>。

窑洞的防护措施,窑顶可采用“双层结构”防水<sup>[14]</sup>,窑脸采用砖石砌筑并勾缝,设木板或薄水泥板窑檐防止流水的直接冲刷,窑洞主要部位的防排水措施已有前人进行了研究,因此文本不再赘述<sup>[6-10]</sup>。针对窑腿底脚和立壁底脚,实地调查中发现,模仿房屋中的踢脚线,采用砖石及水泥砂浆将其与窑底砌筑为一体,可有效控制窑底凸起变形和窑腿底脚与立壁底脚位移。

(2)加强拱形结构抗力:对于黄土窑洞,衬砌可极大的提高窑洞的安全性与稳定性这一点已为前人工作所证实。另外,本次调查发现,部分地区正探索使用“柳船”来加固窑洞,居民采用将柳树枝弯成拱圈的形状,压入黄土对窑洞进行加固,该方法可与衬砌配合使用,使它的韧性特征与衬砌的脆性不耐变形的特征相结合。承受窑顶压力后,一方面“柳船”本身作为拱形结构通过自身韧性为窑拱提供抗力,另一方面其变形弯曲使衬砌受力更为均匀,防止衬砌局部受力集中而开裂。当窑顶有掉块风险时,柳船也可顶住掉块处土体,延缓其发展破坏。实际应用中,可使用其他材料代替柳树枝,如PVC管,预制钢圈等,提高“柳船”结构的力学特征和耐久性。

## 4 结论

1)实地调查发现,黄土窑洞的破坏发生部位主要为窑顶、窑腿和立壁。窑顶裂缝主要有两种形式,当窑洞覆土厚度较厚时,易在拱顶处形成沿拱轴向发育的裂缝,并由窑拱逐渐向上发展;当窑洞覆土厚度较薄时,窑顶裂缝表现为窑拱与窑腿、立壁接触部位发育的竖向裂缝。窑腿因其特殊的受力特征,其破坏形式主要为表层土体脱落。立壁的破坏表现为立壁与窑顶的过渡处形成不规则裂隙,并逐步发展。

2)根据不同含水率条件下黄土窑洞变形特征将黄土窑洞变形破坏分为四个阶段。

3)从加强黄土自身结构抗力和窑洞拱形结构抗力两方面入手提出黄土窑洞的防护措施,模仿现代房屋中的踢脚线,可有效控制窑底凸起变形和窑腿底脚与立壁底脚位移。采用“柳船”与衬砌相结合的方式,使二者相互配合达到加固拱圈的效果。

## 参考文献:

- [1] 陈莉粉.黄土地区窑洞建筑中结构稳定性的研究[D].西安:西安科技大学,2012.
- [2] 许方义.用ADINA软件对庆阳地区黄土窑洞的模拟计算与分析[D].兰州:兰州理工大学,2010.
- [3] 张玉香,田兴运.窑洞破坏的原因及其防治措施[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2004,32(Z)146-149.
- [4] 刘小军,王铁行,韩永强,等.黄土窑洞病害调查及分析[J].地下空间与工程学报,2007,3(6):996-999.
- [5] 孟龙,倪万魁,唐丽莎,等.节理对黄土窑洞灾害的影响性研究[J].工程地质学报,2012,20(S):102-107.
- [6] 王念秦,张帅.基于正交设计的窑洞稳定性敏感性分析[J].科学技术与工程,2017(28):119-124.
- [7] 张永双,张士运,曲永新,等.黄土高原北部坍塌窑洞灾害的形成机理分析[J].地球学报,2004,25(5):565-569.
- [8] 吴成基,甘枝茂,孟彩萍.陕北黄土丘陵区窑洞稳定性分析[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2005,33(3):119-122.
- [9] 童丽萍,张晓萍.濒于失传的土窑居营造技术探微[J].施工技术,2007,36(11):90-92.
- [10] 童丽萍,韩翠萍.传统土窑洞的土拱结构体系[J].施工技术,2008,37(6):113-116.
- [11] 姬栋宇.土窑洞结构体系的力学分析[J].中国建设教育,2009,10(10):23-25.
- [12] 黄才华,王泽军.窑洞建筑的结构分析[J].长春工程学院学报:自然科学版,2009,10(1):46-48.
- [13] 杨志威.黄土窑洞构造防水技术的工程试验研究[J].灾害学,1997,12(2):77-81.
- [14] 王娟.榆林南部地区城镇中传统窑居建筑更新与发展[D].西安:西安建筑科技大学,2008.
- [15] 梁庆国,李杰,李德武.黄土隧道围岩分级研究的若干问题[J].岩土工程学报,2011,33(Z1)170-176.
- [16] 郝军洲,武长贵.黄土公路隧道围岩级别划分浅论[J].青海交通科技,2012(3):20-22.
- [17] 杜世回.基于稳定性概念的铁路隧道围岩分级研究[J].铁道标准设计,2012(9):77-80.
- [18] 陈寿堂,吴秋军,杨家熙,等.特殊隧道围岩的分级方法探讨[J].隧道建设,2011(3):307-310.
- [19] 朱登武.陕北黄土隧道围岩分级指标研究与开挖过程数值模拟分析[D].西安:长安大学,2017.

(责任编辑 王利君)