



移动扫码阅读

柏东良,张文,王宝生.孔隙型含水岩层中封水衬砌的水力荷载试验研究[J].煤炭科学技术,2020,48(12):39-44. doi:10.13199/j.cnki.est.2020.12.003  
BO Dongliang,ZHANG Wen,WANG Baosheng.Study on hydraulic load test of waterproof lining in pore type water-bearing rock[J].Coal Science and Technology,2020,48(12):39-44. doi:10.13199/j.cnki.est.2020.12.003

# 孔隙型含水岩层中封水衬砌的水力荷载试验研究

柏东良<sup>1</sup>,张文<sup>2</sup>,王宝生<sup>2</sup>

(1.江苏建筑职业技术学院 建筑管理学院,江苏 徐州 221116;2.中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,江苏 徐州 221116)

**摘要:**地下水是影响地下工程安全的重要隐患,在孔隙含水岩层中,由于目前的注浆技术无法有效封堵孔隙水,故高压孔隙水的不利影响尤为显著。为研究岩层孔隙水对封水衬砌上的水力荷载,掌握水力荷载与影响因素之间的变化规律,通过模型试验的方法,以金属圆管作为封水衬砌模型,以配制的多孔材料为孔隙围岩模型,获取不同孔隙水压作用下衬砌的应变数据,反算作用于衬砌的水力荷载,并分析了水力荷载与围岩孔隙率及围岩与衬砌接触状态的关系。分析发现:①当围岩与衬砌未发生剥离时,高压孔隙水的影响较小;②孔隙水压影响系数约为2倍围岩孔隙率,水力荷载显著小于孔隙水压;③当围岩与衬砌逐步发生剥离时,高压孔隙水影响急剧增大。研究结果表明:①高压孔隙水对封水衬砌的荷载作用与衬砌和围岩的接触状态有关,接触面积越大,直接与衬砌接触的孔隙水作用面积越小,孔隙水压的影响就越小,因此,降低接触面孔隙率,避免接触面发生剥离,高压孔隙水的荷载作用可控制在较低水平;②采用微膨胀混凝土,降低围岩的空帮时间,进行壁后注浆等设计、施工措施,加强衬砌与围岩的联结强度,提高衬砌与围岩间的相互作用力,可以降低接触面发生剥离的风险,进而把高压孔隙水的影响控制在较低水平。

**关键词:**防水衬砌;孔隙水压;水力荷载;加载试验

**中图分类号:**TD315.3      **文献标志码:**A      **文章编号:**0253-2336(2020)12-0039-06

## Study on hydraulic load test of waterproof lining in pore type water-bearing rock

BO Dongliang<sup>1</sup>, ZHANG Wen<sup>2</sup>, WANG Baosheng<sup>2</sup>

(1. School of Construction Management, Jiangsu Vocational Institute of Architectural Technology, Xuzhou 221116, China;

2. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Groundwater is a great risk in the construction of underground engineering. In pore water bearing rock, because of poor plugging result of the grouting technology, the adverse effects of high-pressure pore water is particularly significant. To research the hydraulic load on the waterproof lining surrounded in pore water bearing rock, a model test which waterproof lining was simulated by a metal tube and the surrounding rock was substituted by a porous similar material was carried out. The hydraulic load was calculated by the measured strain data of the similar lining under different pore water pressure. Also, the relationship between the hydraulic load and the porosity of surrounding rock as well as the contact state between surrounding rock and the lining were analyzed. The results show that when the surrounding rock and lining are fully in contact, the hydraulic load on the waterproof lining is significantly smaller than the pore water pressure, the influence coefficient of pore water pressure is about twice of the rock porosity. After the lining gradually peels off the surrounding rock, hydraulic load increases rapidly and the load value can reach the value of the pore water pressure. Furthermore, the hydraulic load is negative correlation of the contact ratio between waterproof lining and the surrounding rock. Therefore, reducing the porosity and avoiding the stripping of contact surface can decrease the hydraulic load. Finally, the design principle of the waterproof lining in pore water bearing rock is put forward, that improving the bond strength between the lining and the surrounding rock to increase the interaction of them can reduce the risk of the construction of underground engineering.

**Key words:** waterproof lining; pore water pressure; hydraulic load; loading test

收稿日期:2020-06-12;责任编辑:曾康生

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0600904)

作者简介:柏东良(1986—),男,满族,河北承德人,讲师,博士。Tel:0516-83889516, E-mail:dlbcd@cumt.edu.cn

0 引言

地下空间开发热度持续升高,地下工程的埋深不断刷新纪录。河北省磁县磁西一号煤矿副井井筒深度达1 340 m,辽宁省本溪市思山岭铁矿副井井筒深度为1 510 m,四川省雅安雅西高速公路泥巴山隧道最大埋深1 648 m,新疆南疆铁路吐库二线中天山隧道最大埋深1 728 m,四川省凉山彝族自治州锦屏山引水隧道最大埋深2 375 m。随着埋深的增加,高压地下水的不利影响逐渐凸显<sup>[1-4]</sup>。

地下水荷载的处理方式在逐渐演变和完善,早期指导思想是“以排为主”。主要通过采取疏排水措施降低作用于衬砌上的水压,从而降低地下水荷载,降压效果与排水量成正比<sup>[5-6]</sup>,但对环境影响较大。近年来,随着环境保护要求的提高,“以排为主”的指导思想已不适用,“以堵为主、限量排放”成为降低衬砌水荷载的设计原则。王廷亮<sup>[7]</sup>分析了隧道排水可能导致的不良环境地质效应,倡导工程设计、施工中合理考虑水资源和环境保护。赵瑜等<sup>[8]</sup>采用遗传算法获得了工程埋深、排水量对地下水环境的影响规律,为施工期和运营期制定保护地下水环境措施提供科学依据。王芳其等<sup>[9]</sup>研究了岩溶地区隧道建设引起的地下水漏失对周围环境的影响,研究表明如果采取“以排为主”的方式建设隧道会造成地表植物显著衰退,而采取“以堵为主、限量排放”的方式则对地表植物的影响相对较小。李强等<sup>[10]</sup>在春天门隧道工程中贯彻生态环保理念,采用了“以堵为主”的有压隧道设计方法,地下水在施工和运营阶段得到较好的保护。以矿山井筒为代表的一类深部地下工程,由于排水条件差且费用高昂,设计要求采用封水衬砌,即衬砌要严格封水。只要衬砌不透水,则作用于衬砌上的水压为静水压,无论是否进行壁后注浆,水压均不能折减<sup>[11-15]</sup>。传统观念认为地层水压作用于衬砌全部外表面,根据衬砌设计理论,衬砌厚度随水压的增加迅速增大,过厚的衬砌不仅带来一系列的施工难题,而且不经济。因此,开展地下结构水力荷载的研究十分迫切。

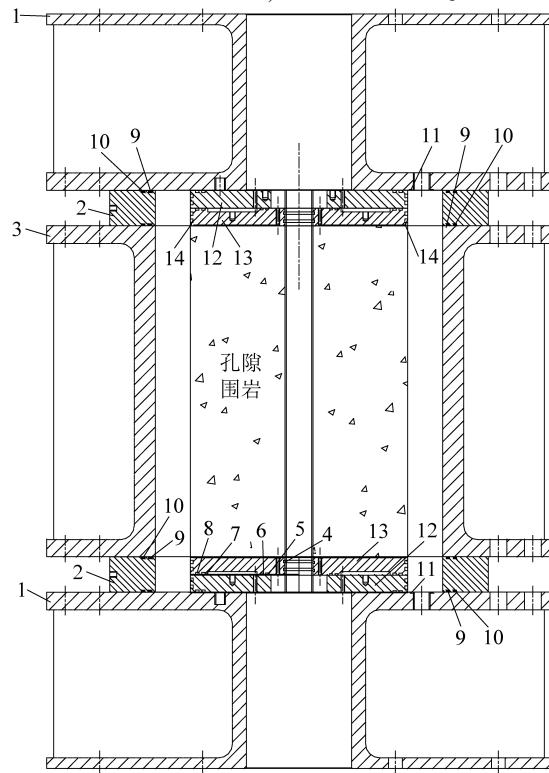
文献[16-18]认为结构衬砌上的应力与水力荷载的历史过程有关,衬砌与围岩有条件的联合对抵抗水力荷载有积极作用。王建宇<sup>[19]</sup>讨论了衬砌与围岩密贴时的外水荷载,认为地下水只在通过岩体节理张开的宽度范围内对衬砌结构施加荷载,而节理宽度总和相对衬砌周长来说又非常小,地下水压可折减到静水压的5%左右,此时的外水荷载对衬砌的影响是极其有限的。BLACK等<sup>[20]</sup>认为水压是

在衬砌与围岩形成密闭结构，进水量大于渗水量时才逐渐形成的，当衬砌的变形使衬砌与围岩间隙充满地下水时，此时水荷载是衬砌的主要荷载。

笔者所在团队长期从事深部地下工程实测和设计理论研究,研究发现:作用于衬砌的水压和衬砌受到的水力荷载并不等同,衬砌和围岩接触面的接触状态、围岩连通孔隙率、衬砌和围岩的相对刚度等因素会影响作用于衬砌的水力荷载。笔者通过建立封水衬砌和孔隙围岩相互作用物理模型,研究作用于衬砌上的水力荷载的形成机理和影响因素,为控制高压孔隙水的不利影响、合理设计封水衬砌提供理论参考。

## 1 衬砌受力试验装置

1) 试验平台。试验平台选择中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室的高压界面力学特性试验台,如图1所示。试验台设计加载压力24 MPa,最大加载压力32 MPa,可模拟埋深1 000 m处衬砌荷载情况,满足试验需要。



1—盖板;2—垫环;3—承压桶;4—O型密封圈 $80\text{ mm}\times 5.3\text{ mm}$ ;  
5—O型密封圈 $180\text{ mm}\times 5.3\text{ mm}$ ;6—O型密封圈 $220\text{ mm}\times 5.3\text{ mm}$ ;  
7—O型密封圈 $545\text{ mm}\times 7.0\text{ mm}$ ;8—O型密封圈 $590\text{ mm}\times 7.0\text{ mm}$ ;  
9—O型密封圈 $843\text{ mm}\times 7.0\text{ mm}$ ;10—O型密封圈 $883\text{ mm}\times 7.0\text{ mm}$ ;  
11—O型密封圈 $58\text{ mm}\times 3.5\text{ mm}$ ;12—垫板;13—加压板;14—乳胶膜密封堆

图 1 高压界面力学特性试验台

Fig.1 Test bed of interface mechanics characteristic under high pressure

2)衬砌模型。衬砌模型选择精加工的铝合金圆管,实测弹性模量68.9 GPa,泊松比0.33,材料满足作为衬砌模型的封水要求,衬砌外径80 mm,内径72 mm。

3)围岩模型。围岩材料采用经水洗的河砂、POX42.5普通硅酸盐水泥、水、聚羧酸高效减水剂、纯度98%以上的甲酸钙早强剂配制。其中河砂的细度模数为2.95,颗粒级配曲线如图2所示。以内蒙古鄂尔多斯市某煤矿副井深660~680 m处粗粒砂岩为原型(连通孔隙率为0.1~0.2),配制的围岩参数见表1。围岩模型内径80 mm、外径820 mm,高度820 mm。

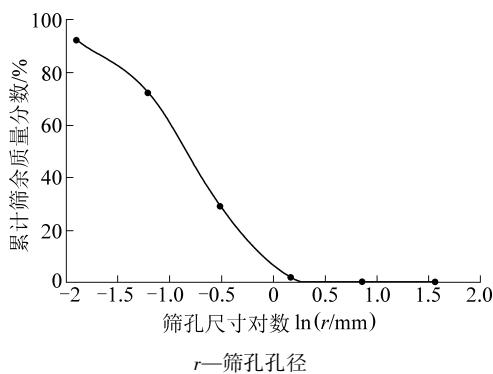


图2 砂颗粒级配曲线

Fig.2 Sand particle gradation curves

表1 孔隙型围岩基本参数

Table 1 Basic parameters of pore type surrounding rock

编号	孔隙 维数	渗透系数/ ( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ )	孔隙率/%	骨架密度/ ( $\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ )
1	2.794	213.33	12.8460	2.087 8
2	2.820	250.75	12.669 7	2.076 9
3	2.805	149.51	11.837 0	2.105 2
平均	2.806	204.53	12.450 9	2.089 9

4)测试。在衬砌模型内壁粘贴双向电阻应变计,利用衬砌内壁的应变测量值,根据衬砌模型的几何和物理参数反算作用于衬砌上的水力荷载值。利用液体压力计采集孔隙水压和作用于围岩模型外侧的围压。

5)模型衬砌应变计检定。衬砌内壁粘贴4层共计24个双向电阻应变计(图3),测试衬砌轴向和切向应变。为检验应变计粘贴质量,自制标定设备,在平面应力条件下对衬砌模型施加围压,根据理论计算数据和实测数据对比分析,评估应变计粘贴质量。检定合格即可用于试验。



图3 衬砌模型内壁应变计布置

Fig.3 Diagram of strain gauges on model lining inner wall

## 2 水力加载模型试验

### 2.1 试验流程

试验过程中2个关键环节对试验影响较大。  
①围岩外表面密封:围岩外表面密封是否有效关系到围压和孔隙水压能否独立加载,密封一旦失效,围压和孔隙水压将趋于一致,无法真实模拟地层应力条件,围岩外表面首先采用密封胶处理,然后利用定制的一体成型大型乳胶膜包裹,试验证明此方法是有效的;②围岩饱和度:围岩的饱和度影响到试验数据分析的准确性,利用真空饱和方法对围岩进行饱和度处理,采用大功率真空泵对围岩进行抽真空,关闭阀门24 h 真空表压力降低小于0.1 kPa时,围岩饱和度满足试验要求。

### 2.2 试验加载

在分析孔隙水压对结构的影响时,需要剔除作用于围岩径向外侧边界的围压变化产生的干扰,因此加载分为围压加载和围压-孔隙水压联合加载2个阶段。

1)围压加载。试验加载曲线如图4所示,加载过程中衬砌内缘的环向应变曲线如图5所示,第2层监测不同测点测点环向应变数据分析表见表2。

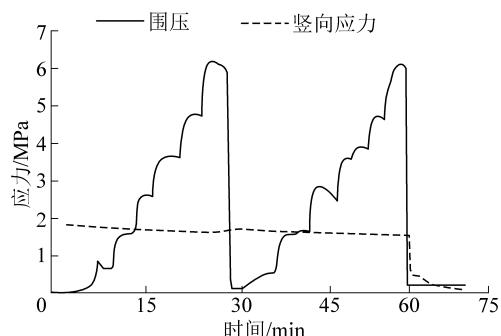


图4 围压和竖向压力加载曲线

Fig.4 Loading curves of vertical pressure and confining pressure

表2 环向应变数据计算

Table 2 Calculation sheet of tangential strain under vertical pressure and confining pressure

序号	围压变化量/MPa	累计围压/MPa	应变/ $10^{-6}$					应变/围压
			第1层	第2层	第3层	第4层	平均值	
1	1.08	1.57	-40.67	-40.00	-43.42	-45.80	-42.47	-39.32
2	1.22	2.79	-57.82	-54.23	-57.99	-59.39	-57.36	-47.02
3	1.04	3.83	-54.15	-47.27	-45.65	-46.58	-48.41	-46.55
4	0.95	4.78	-64.64	-69.97	-66.98	-65.78	-66.84	-70.36
5	1.35	6.13	-68.97	-92.95	-90.95	-87.35	-85.06	-63.01

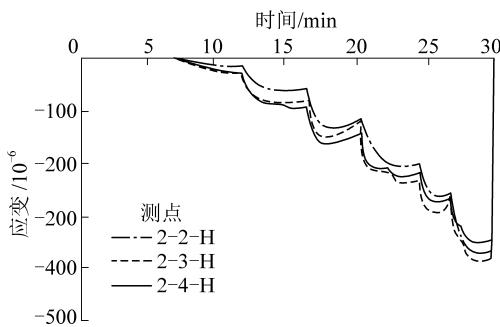


图5 第2监测层位环向应变

Fig.5 Tangential strain curves of the second layer

定义孔隙水压影响系数

$$\zeta = nK = p_0/p_w \quad (1)$$

式中: $n$ 为围岩孔隙率; $K$ 为与衬砌、围岩的几何、物理力学参数有关的参数; $p_0$ 为作用于衬砌外表面的当量荷载, MPa; $p_w$ 为作用于衬砌外表面的孔隙水压, MPa。

利用式(2)进行孔隙水压力影响系数及系数 $K$ 计算

$$\kappa_p \Delta p + \kappa_{p_w} \Delta p_w + \zeta \Delta p_w = \xi_\theta \quad (2)$$

式中: $\kappa_p$ 为单位围岩外边界压力导致模型衬砌内缘切向应变变化, 随围压的不同而变化, 计算中取相邻围压的差值计算; $\Delta p$ 为围压变化; $\Delta p_w$ 孔隙水压力变化量; $\kappa_{p_w}$ 为模型衬砌外均匀满布单位荷载时内缘

表3 孔隙水压影响系数 $\zeta$ 和系数 $K$ 计算Table 3 Influence coefficient of pore water pressure  $\zeta$  and  $K$  caculation

编号	围压变化量/MPa	累计围压/MPa	孔隙水压力变化量/MPa	累计孔隙水压力/MPa	井壁内缘切向应变/ $10^{-6}$	$\zeta$	$K$
1	-0.12	1.64	0.43	0.52	-8.97	0.249 3	2.00
2	0.81	2.45	0.50	1.02	-53.51	0.226 3	1.82
3	0.64	3.09	0.36	1.38	-41.99	0.248 6	2.00
4	-0.02	3.07	0.17	1.55	-10.16	0.478 7	3.84
5	1.14	4.21	0.71	2.26	-95.24	0.435 8	3.50
6	1.12	5.33	1.16	3.42	-136.22	0.363 1	2.92
7	0.28	5.61	0.13	3.55	-24.70	0.398 3	3.20
8	0.62	6.23	0.49	4.04	-67.74	0.429 3	3.45
9	1.23	7.46	0.72	4.76	-106.22	0.292 7	2.35

切向应变变化值; $\xi_\theta$ 为衬砌内缘切向应变实际变化值。

2)综合加载。典型的试验加载曲线和衬砌应变曲线如图6、图7所示。根据围压加载结果, 得到的孔隙水压影响系数 $\zeta$ 和系数 $K$ 见表3。

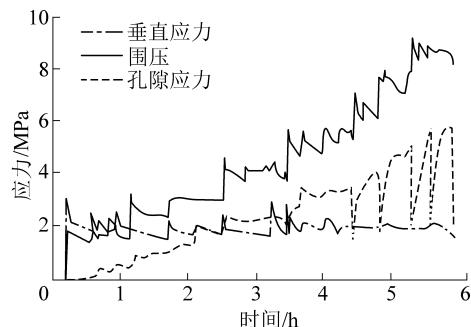


图6 衬砌加载曲线

Fig.6 Loading curves of vertical pressure, confining pressure and pore water pressure

### 2.3 试验结果

由试验数据可知:当孔隙水压力和围压处于较低水平时(第1—第3组数据),孔隙水压力影响系数在小范围内波动,数值基本在两倍围岩孔隙率(围岩孔隙率为0.12),即 $K\approx 2$ ;当孔隙水压力继续增大时,受孔隙水压加载过程中的脉冲压力影响,井壁与围岩部分接触面发生剥离,孔隙水压力影响系数 $\zeta$ 迅速增加至0.478 7,近似为4倍围岩孔隙率,即 $K\approx 4$ ,

并在后续的加载过程中系数  $K$  在 3~4 波动,但影响仍小于静水压力,说明接触面未完全发生剥离。试验结果中  $K$  始终大于 1.0,说明孔隙水压除在直接接触面部分对衬砌产生直接作用外,还通过围岩传递产生间接作用。

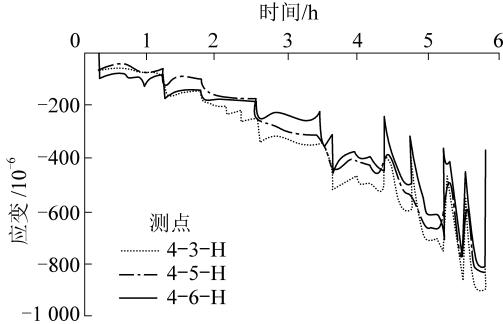


图 7 第 4 监测层位环向应变

Fig.7 Tangential strain curves of the fourth layer

由上述分析可知,当衬砌与围岩未发生剥离时,孔隙水压的影响是较小的;当孔隙水压力作用下衬砌与围岩发生剥离时,孔隙水压力的影响随接触面剥离面积的增加而急剧增大。

在设计衬砌时,将衬砌设计为贴壁式衬砌,减少开挖时空帮时间,降低围岩压力卸载率,采取措施提高围岩与衬砌的粘结强度,适当提高衬砌刚度,适度增加衬砌与围岩的接触力,降低接触面发生剥离的风险,可以有效控制高压孔隙水的不利影响。

### 3 结 论

1) 当衬砌与围岩接触面未完全剥离时,孔隙水压除通过与衬砌直接接触部分产生直接作用外,还通过围岩传递产生间接作用,但孔隙水压影响系数  $\zeta$  始终小于 1.0。

2) 当衬砌与围岩接触良好时,作用于衬砌上的当量水力荷载要显著小于衬砌外缘的静水压力,孔隙水压影响系数  $\zeta$  约为 2 倍围岩孔隙率,表明采取适当措施可以降低封水衬砌的水力荷载。

3) 衬砌与围岩接触面未发生剥离前,衬砌的水力荷载处于较低水平,接触面一旦发生剥离,孔隙水压力的影响迅速增加,表明接触面的接触状态对衬砌水力荷载影响显著。

4) 采取措施降低接触面孔隙率的同时,适度增加接触面相互作用力,保持接触面不发生剥离,是孔隙含水岩层中封水衬砌水力荷载治理的关键。

### 参考文献(References):

- [1] 任胜文.大采深煤层弱胶结厚层砾岩突水溃砂灾害研究[J].煤炭科学技术,2019,47(9):249-255.

REN Shengwen. Study on disaster of water and sand inrush of weakly cemented thick conglomerate on deep mining coal seam [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 249-255

- [2] 王海,王晓东,曹祖宝,等.冻结井壁解冻过程中突水溃砂机理及防治技术[J].煤炭科学技术,2019,47(2):21-26.  
WANG Hai, WANG Xiaodong, CAO Zubao, et al. Mechanism and prevention technology of water inrush and sand in-rush occurred in thawing process of mine freezing shaft wall [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(2): 21-26.
- [3] 袁世冲,郑国胜,钱自卫,等.斜井突水涌砂机理及井壁破裂修复技术研究[J].煤炭科学技术,2019,47(1):113-118.  
YUAN Shichong, ZHENG Guosheng, QIAN Ziwei, et al. Research on water and sand inrush mechanism and repair technology of shaft rupture in inclined shaft [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 113-118.
- [4] 靳德武.我国煤矿水害防治技术新进展及其方法论思考[J].煤炭科学技术,2017,45(5):141-147.  
JIN Dewu. New development of water disaster prevention and control technology in China coal mine and consideration on methodology [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5): 141-147.
- [5] LUNARDI P. Action to reduce the hydrogeological impact produced by underground works [C]//Proceeding of the AITES-ITA 2001 World Tunnel Congress, Milan, Italy, 2001: 509-515.
- [6] RUSSELL Henry A, BRIAN P E, ISKE J. The control of groundwater in underground structures [C]. Boston: North American Tunelling, 2000: 589-597.
- [7] 王廷亮.隧道工程地下水处理的环境地质效应[J].工程勘察,2010(12):43-47.  
WANG Tingliang. The geo-environmental effect of the groundwater treatment in tunnel engineering [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010(12): 43-47.
- [8] 赵瑜,胡波,陈海林,等.岩溶隧道工程修建对地下水环境的影响[J].土木建筑与环境工程,2018,40(5):1-8.  
ZHAO Yu, HU Bo, CHEN Hailin, et al. Impact of tunnel engineering on groundwater environment in karst area [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(5): 1-8.
- [9] 王芳其,郑炜,徐华,等.岩溶山区隧道地下水漏失对植物生长的影响分析及对策[J].隧道建设,2018,38(6):915-923.  
WANG Fangqi, ZHENG Wei, XU Hua, et al. Influence of groundwater loss induced by karst tunnel construction on growth of surrounding vegetation and its countermeasures [J]. Tunnel Construction, 2018, 38(6): 915-923.
- [10] 李强,陈扬勇,李信臻,等.春天门隧道地下水保护设计研究[J].公路交通技术,2019,35(3):100-107.  
LI Qiang, CHEN Yangyong, LI Xinzen, et al. Study on groundwater protection design of Chuntianmen Mountain highway tunnel [J]. Technology of Highway and Transport, 2019, 35(3): 100-107.
- [11] 郑波.隧道衬砌水压力荷载的实用化计算研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2010.
- [12] 王梦恕,皇甫明.海底隧道修建中的关键问题[J].建筑科学与

- 工程学报,2005,22(4):1-4.
- WANG Mengshu, HUANG Fuming. Key problems on subsea tunnel construction [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005,22(4):1-4.
- [13] 孙 钧.海底隧道工程施工若干关键技术的商榷 [J].岩石力学与工程学报,2004,25(8):1513-1521.
- SUN Jun. Discussion on some key technical issues for design and construction of undersea tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,25(8):1513-1521.
- [14] 李 伟,杨 丹,李 庆.高水压山岭隧道衬砌结构水压力特征研究[J].铁道工程学报,2013(11):57-61.
- LI Wei, YANG Dan, LI Qing. Study on the characteristic of water pressure upon lining in subject to high hydraulic pressure mountain tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013(11):57-61.
- [15] 张晓华.深埋山岭隧道帷幕注浆段衬砌外水压力研究[J].铁道标准设计,2015,59(10):119-122.
- ZHANG Xiaohua. Study on external water pressure of lining in curtain grouting section of deep - buried tunnel [J]. Railway Standard Design, 2015,59(10):119-122.
- [16] 张有天,张武功.隧洞水荷载的静力计算[J].水利学报,1980(3):52-62.
- ZHANG Youtian, ZHANG Wugong. Static calculation of water load acting on tunnels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1980(3):52-62.
- [17] 柳昭星,尚宏波,石志远,等.岩溶裂隙发育地层帷幕注浆材料性能及适用性研究 [J].煤炭科学技术,2020,48(4):256-265.
- LIU Zhaoxing, SHANG Hongbo, SHI Zhiyuan, et al. Research on performance and applicability of curtain grouting material in karst crack development stratum [J]. Coal Science and Technology, 2020,48(4):256-265.
- [18] 张有天,张 武功,王 锰.再论隧洞水荷载的静力计算[J].水利学报,1985,16(3):22-32.
- ZHANG Youtian, ZHANG Wugong, WANG Lei. Further study on static calculation of water load acting on tunnels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985,16(3):22-32.
- [19] 王建宇,胡元芳.对岩石隧道衬砌结构防水问题的讨论[J].现代隧道技术,2001,38(1):20-35.
- WANG Jianyu, HU Yuanfang. Discussion on waterproofing in tunneling [J]. Modern Tunneling Technology, 2001,38(1):20-35.
- [20] BLACK J C , AULD F A .Current and future UK practice for the permanent support of shaft excavations [J]. International Journal of Mining Engineering, 1985(3):35-48.