

## 黏土水泥浆材特性的试验研究

邱浩浩<sup>1</sup>, 王晓明<sup>2</sup>, 梁经纬<sup>3</sup>

(1. 贵州省质安交通工程监控检测中心有限责任公司, 贵州贵阳 550000; 2. 河北地质大学, 河北省高校生态环境地质应用技术研发中心, 河北石家庄 050031; 3. 河北地质大学, 城市地质与工程学院, 河北石家庄 050031; 4. 湖南省水利水电科学研究院, 湖南长沙 410007)

**[摘要]**黏土水泥浆材是采空区处治的优选注浆材料,但目前关于优化浆材配比的研究较少。针对毕威高速公路水塘隧道出口段采空区处治工程,提出采用黏土水泥浆液进行注浆处理,并进行室内试验研究,得到了不同配比浆液的凝结时间、结石率、结石密度、结石体抗压强度、渗透系数及冲蚀率等性能指标。试验结果表明,固相比较低的浆液凝结时间较短,抗压强度较高,渗透系数较大;随原浆比重增加,浆液的凝结时间缩短,强度提高且渗透系数降低;偏铝酸钠可有效缩短浆液的凝结时间;最终确定了黏土水泥浆材的配比和原浆比重。本次研究可为高速公路下伏采空区的注浆治理提供设计依据。

**[关键词]** 采空区 黏土水泥浆液 室内试验 配比

**[中图分类号]** P64 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2020)06-06

Qiu Haohao, Wang Xiaoming, Liang Jingwei. Experimental study on the properties of clay - cement grout[J]. *Geology and Exploration*, 2020, 56(6): 1272-1277.

### 0 引言

我国幅员辽阔,由于开采矿产资源(如煤矿等)而形成的采空区分布较广,山西、新疆、青海等省或自治区均有分布。随着我国高速公路、铁路的持续修建,采空区的变形、沉降、塌陷等灾害给这些基础设施建设和运营带来了较为严重的安全隐患。注浆作为一种既可以加固岩土体又可以防渗堵水的处治方法,在采空区等地质灾害治理领域得到了广泛的应用(李坚, 2002; 童立元等, 2004; 李晓红等, 2005; 邓洪亮等, 2007; 彭永良, 2007; 梁经纬, 2010; 刘涛, 2010; 冉景太, 2010; 李召峰等, 2016)。注浆材料作为注浆处理的重要组成部分,直接影响注浆效果和工程造价。目前,常见的注浆材料主要有水泥、水泥砂浆、水泥黏土浆、水泥粉煤灰浆液和化学类材料等(Anagnostopoulos, 2007; Widmann, 1996; 陈永贵等, 2007; 李利平等, 2009; 李汉光, 2011; 李召峰等, 2016; 张聪等, 2018)。黏土水泥浆液具有良好稳定

性、渗透性及抗水稀释性,且黏土易于就地取材,成本低,环境友好。因此,黏土水泥浆材是耗浆量大的地质条件下防渗加固的优选注浆材料,相关人员也对黏土水泥浆材的特性开展了一些研究工作。王兴华(1997)、刘杰等(2016)、张贵金等(2017)对黏土水泥浆的流变性进行了试验研究。冉景太(2010)对黏土水泥浆液的流变性、稳定性、结石率、可注性、渗透性及结石体的抗压强度等特性进行了试验研究,利用正交分析法确定了浆液的合理配比范围。张贵金等(2012)研制出一种可控性黏土水泥稳定浆材,其性能指标满足一般工程的防渗要求,而且浆液流变参数、凝结过程和结石体参数等能够进行较大调整。张贵金等(2015)通过室内试验,研究了水灰比、龄期、黏土加量、压滤效应等对黏土水泥浆材结石无侧限抗压强度的影响。梁经纬等(2015)研究表明压滤效应对黏土水泥浆液结石强度影响显著。冯思佳和张贵金(2016)采用浸析法测得CaO累计溶出量,利用扫描电镜照片和吸水动力学法研

[收稿日期] 2019-09-26; [改回日期] 2020-09-01; [责任编辑] 郝情情。

[基金项目] 国家自然科学基金项目(编号:41902298)、河北省自然科学基金项目(编号:D2019403151)和河北地质大学博士科研启动基金项目(编号:1714023)联合资助。

[第一作者] 邱浩浩(1984年-),男,硕士,高级工程师,2010年毕业于长沙理工大学,岩土工程专业,获得硕士学位,主要从事地质灾害防治工作。E-mail:286979129@qq.com。

[通讯作者] 王晓明(1984年-),男,博士,高级工程师,2013年毕业于中国地质大学(北京),地下水科学与工程专业,获得博士学位,主要从事地质灾害防治方面的研究和教学。E-mail:wangxiaoming@hgu.edu.cn。

究浆液结石孔隙结构,评价黏土水泥浆材的抗溶蚀性。张飞等(2018)对黏土水泥浆材的黏度进行了试验研究,得到一种黏度时变数学模型。

现有的研究成果多为黏土水泥浆材特性的理论成果,而从工程应用的角度来优化黏土水泥浆材配比的研究较少。本文依托毕威(毕节-威宁)高速公路水塘隧道出口段采空区注浆工程,通过开展室内试验研究黏土主材与水泥、偏铝酸钠等材料配比对浆液性能的影响,并优化确定注浆材料的配比,以期高速公路下伏采空区的注浆治理提供设计依据。

1 注浆材料来源及指标

注浆处治的两个采空区位于毕威高速公路水塘隧道出口段。场区上覆第四系崩塌堆积层、人工填土、残坡积碎石土,下伏三叠系下统飞仙关组泥质粉砂岩、二叠系上统长兴组、大隆组粉砂质泥岩,二叠系上统龙潭组煤系地层泥质粉砂岩间夹泥岩及煤等,黏土料源充足。综合考虑现场情况,选择黏土作为注浆浆材的主要原料,水泥和偏铝酸钠为外加剂。对黏土的 pH 值、天然含水率、界限含水量、密度、矿物成分等进行试验分析,结果见表 1。由于注浆材料所需黏土的含量比较大,为了保证注浆材料有较高的强度,试验选用的水泥为 P. O42. 5,其性能见表 2。为了改善注浆材料的初、终凝时间,需要加入一定量的改性剂,本试验所选改性剂为天津天一公司生产的偏铝酸钠(SA)。

表 1 黏土的物理化学指标  
Table 1 Physical and chemical properties of clay

| 物理指标   |             | 主要矿物化学组成/%                     |      |
|--------|-------------|--------------------------------|------|
| pH 值   | <7          | SiO <sub>2</sub>               | 45.8 |
| 天然含水率  | 20% ~ 30%   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 37.3 |
| 塑性指数   | >14         | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.5  |
| 液限指数   | 0.30 ~ 0.45 | K <sub>2</sub> O               | 0.1  |
| 土粒相对密度 | 2.73        | 烧失量                            | 14.5 |
| 矿物含量   | 74.96%      |                                |      |

表 2 水泥的物理化学指标  
Table 2 Physical and chemical properties of cement

| 物理指标         |                       | 主要矿物化学组成/%                     |      |
|--------------|-----------------------|--------------------------------|------|
| 密度           | 2.9 g/cm <sup>3</sup> | SiO <sub>2</sub>               | 20.2 |
| 初凝时间         | 90 min                | CaO                            | 41.8 |
| 终凝时间         | 325 min               | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4.7  |
| 3 d 无侧限抗压强度  | 19.1 MPa              | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 7.2  |
| 28 d 无侧限抗压强度 | 48.57 MPa             | 其他                             | 26.1 |

2 浆材配比及试验分析

2.1 浆材配比

根据相关规范(山西省交通规划设计院,2011;中国电力企业联合会,2012)及经验,通过计算黏土、水泥及偏铝酸钠的加入量,共配制了 18 种黏土水泥浆液,其配比见表 3。其中,原浆比重是指黏土与水混合后浆液的比重;固相比指黏土与水泥的质量比,偏铝酸钠含量是指偏铝酸钠占水泥质量的比例。

表 3 浆材配比  
Table 3 Grouting materials with different mixture ratios

| 编号 | 原浆比重 | 固相比   | 偏铝酸钠含量 |
|----|------|-------|--------|
| 1  | 1.23 | 70:30 | 0      |
| 2  | 1.25 | 70:30 | 0      |
| 3  | 1.27 | 70:30 | 0      |
| 4  | 1.29 | 70:30 | 0      |
| 5  | 1.31 | 70:30 | 0      |
| 6  | 1.33 | 70:30 | 0      |
| 7  | 1.23 | 50:50 | 0      |
| 8  | 1.25 | 50:50 | 0      |
| 9  | 1.27 | 50:50 | 0      |
| 10 | 1.29 | 50:50 | 0      |
| 11 | 1.31 | 50:50 | 0      |
| 12 | 1.33 | 50:50 | 0      |
| 13 | 1.23 | 50:50 | 1%     |
| 14 | 1.25 | 50:50 | 1%     |
| 15 | 1.27 | 50:50 | 1%     |
| 16 | 1.29 | 50:50 | 1%     |
| 17 | 1.31 | 50:50 | 1%     |
| 18 | 1.33 | 50:50 | 1%     |

2.2 试验结果与分析

浆液的性能指标主要包括浆液的初、终凝时间、结石率、结石密度、结石体的单轴抗压强度、结石渗透系数及抗水流冲释性等。

2.2.1 浆液凝结时间

浆液的凝结时间既要满足注浆作业时间的要求,又需尽快凝结成具有一定强度的结石体。不同配比浆液的初、终凝时间如图 1 和图 2 所示。

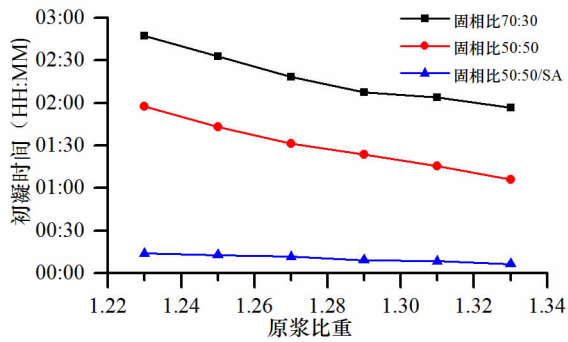


图1 不同配比黏土水泥浆液的初凝时间

Fig. 1 Initial setting time of clay - cement grouts with different mixture ratios

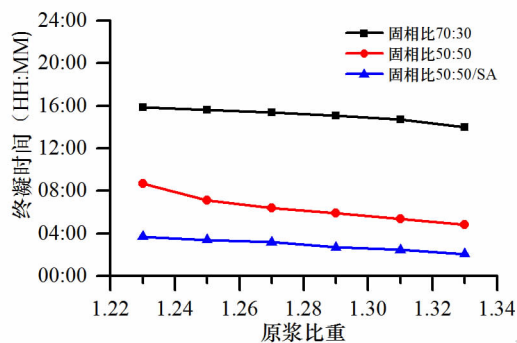


图2 不同配比黏土水泥浆液的终凝时间

Fig. 2 Final setting time of clay - cement grouts with different mixture ratios

从图1~2可以得出:(1)具有相同固相比的黏土水泥浆液其初、终凝时间均随原浆比重的增大(水固比减小)而缩短;固相比较低时,浆液的初凝、终凝时间明显缩短。

(2)黏土水泥浆液掺入偏铝酸钠后,初、终凝时间均大幅缩短,说明外加剂偏铝酸钠的速凝作用显著。

(3)相比掺加1%的偏铝酸钠,水泥掺量的增加,对浆液终凝时间的影响更加显著。

### 2.2.2 浆液结石率及结石密度

浆液结石率是指浆液凝结后的结石体体积与浆液体积之比。在强度指标满足要求时,结石率越高加固效果越好。通过试验得到,黏土水泥浆液的结石率基本接近100%,表明浆液的结石率极高,预计具有良好的加固效果。

黏土水泥浆液的结石密度,如图3所示。可以看出,浆液的结石密度随着原浆比重的增大(或水固比减小)而增加,随着固相比的增加而增加;掺入

偏铝酸钠后,结石密度略微减少。

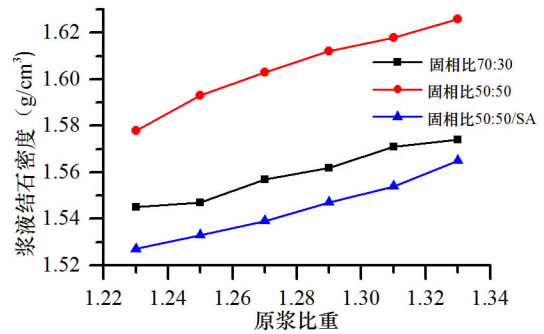


图3 不同配比浆液的结石密度

Fig. 3 Concretion density of grouts with different mixture ratios

### 2.2.3 浆液结石体的抗压强度

浆液结石体试件的抗压强度包括单轴抗压强度和三轴抗压强度,本次试验测定最常用的单轴抗压强度。试验结果表明,浆液结石抗压强度与固相比、原浆比重及偏铝酸钠掺入量等因素均有一定关系,不同龄期的结石体抗压强度见图4、图5。

(1)具有相同固相比的黏土水泥浆液,随着原浆比重增大,即水固比减小,结石体强度提高,固相比越低,原浆比重对结石体强度影响越明显。

(2)随固相比减小(水泥含量增加),浆液结石体的抗压强度增大,7d龄期强度的增长幅度明显小于28d龄期的增幅,7d龄期强度增长幅度最大值超过200%,28d龄期增幅达到300%。

(3)黏土水泥浆液的结石体28d的强度大于7d强度,即强度随龄期增长而提高,且固相比愈小,强度增长幅度愈高,增长率最大可达350%。

(4)原浆比重和固相比相同条件下,黏土水泥浆液掺入偏铝酸钠后,浆液结石体强度有一定变化,但变化幅度较小,尤其是28d龄期,可以忽略不计。

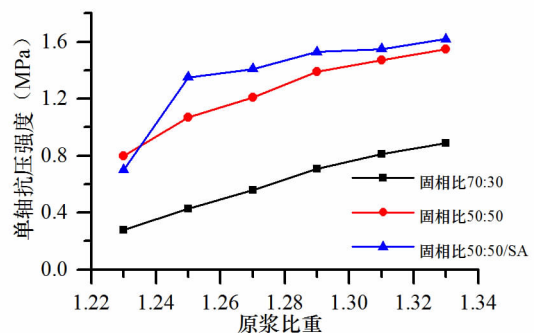


图4 结石体7d龄期抗压强度

Fig. 4 7d compressive strength of concretions

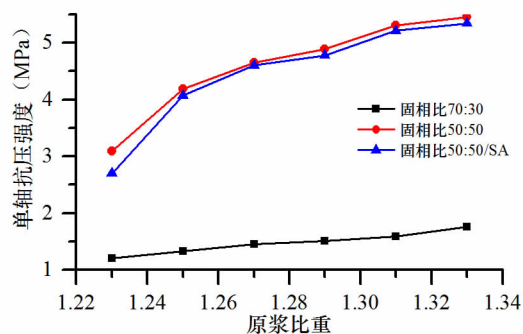


图5 结石体28d龄期抗压强度

Fig. 5 28d compressive strength of concrections

### 2.2.4 浆液结石抗渗性能

灌浆材料的抗渗性能是浆材结石体最重要的参数之一,抗渗性能不仅与浆材结石体耐久性有很大的关系,还直接影响整体灌浆效果。目前黏土水泥浆液的加固机理、力学性能等还未形成统一完善的理论,故借鉴混凝土抗渗方法来进行测量。采用ZH-201A自动控制渗透仪来测定注浆材料结石的渗透系数,结果如图6所示。可以看出,随着原浆比重提高,固相比提高,浆液结石渗透系数减小;固相比为50:50时,偏铝酸钠的加入使浆液结石渗透系数降低。

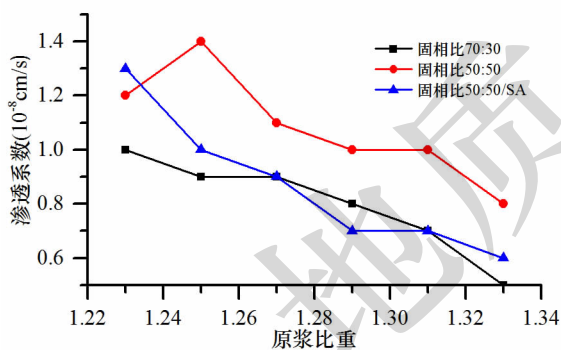


图6 不同配比浆液结石渗透系数

Fig. 6 Permeability coefficients of grouts with different mixture ratios

### 2.2.5 浆液抗冲释性能

由于采空区存在一定开度的空洞以及大孔隙,且富含地下水,因此浆液必须具有一定的抗水流冲释能力。为了测定掺加偏铝酸钠的黏土水泥浆液抗水流冲释性能,在室内进行了不同流速下浆液的抗冲模拟试验。在试验水槽中,用泵的开度来调节水流的流速和流量,流速用OA型直读式测速仪测定,用冲蚀率(即浆液被水流冲释的重量差与初始重量之比)来衡量其抗水流冲释的性能,试验结果见图

7。随着水流流速的增加,浆液的冲蚀率也随之增大,当流速增加到1.3 m/s时,浆液的冲蚀率为35%,表明掺加偏铝酸钠的黏土水泥浆液具有较好的抗水流冲释性能。

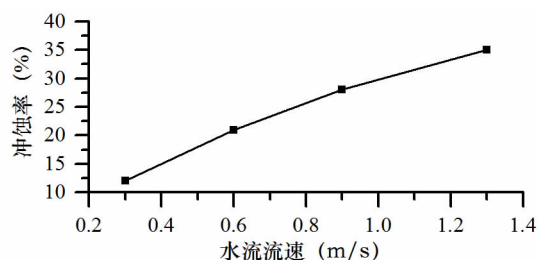


图7 不同流速下浆液的冲蚀率

Fig. 7 Erosion ratio of grouts under different flow velocities

## 3 注浆材料选取

根据上述试验结果,综合考虑采空区不同部位的注浆需求,确定的黏土水泥浆液配比如下:

帷幕孔浆液的固相比为70:30,注浆孔固相比为50:50,全孔平均原浆比重 $\geq 1.25$ 。在大面积施工时,一般孔注浆量单孔平均原浆比重不应低于1.25。

对于空洞以及大孔隙,为缩短注浆浆液在地下的凝结时间,保证浆液在地下动水条件下有一定的抗水流冲释性能,确保注浆工程的帷幕效果,宜在黏土水泥浆液中加入1%的偏铝酸钠。而对于孔隙较小的注浆孔,为保证浆液的可注入性,宜先注入稀浆(约占总量的30%~50%,原浆比重1.15),后注入稠浆(约占总量的50%~70%,水固比1.25)。

## 4 结论

黏土水泥浆液是采空区处治时常有的注浆材料,作者开展室内试验研究黏土主材与水泥、偏铝酸钠等材料配比对浆液性能的影响,并最终优化确定注浆材料的配比。

(1)原浆比重相同时,固相比较低(即水泥含量较高)时,浆液的凝结时间显著缩短;具有相同固相比的黏土水泥浆液凝结时间随原浆比重的增大而缩短,偏铝酸钠的速凝作用显著。

(2)黏土水泥浆液的结石率基本接近100%,结石体抗压强度,随浆液中固相比减小而增大;随着原浆比重增加,即水固比减小,结石体强度提高。

(3)随着原浆比重提高,固相比提高,浆液结石渗透系数减小;掺入偏铝酸钠后,浆液结石渗透系数增大;掺加偏铝酸钠的黏土水泥浆液具有良好的抗水流冲释性能。

(4)综合确定帷幕孔浆液的固相比为 70:30, 注浆孔固相比为 50:50, 全孔平均原浆比重  $\geq 1.25$ , 注入空洞及大孔隙的浆液加入 1% 的偏铝酸钠, 以保证浆液快速凝固。

## [References]

- Anagnostopoulos C A. 2007. Cement - clay grouts modified with acrylic resin or methyl methacrylate ester: Physical and mechanical properties[J]. Construction and Building materials, 21: 252 - 257.
- Bai Zhaopeng. 2008. Study on grouting treatment technology of goaf underlying speedway[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology: 1 - 59 (in Chinese).
- Chen Yonggui, Zou Yinsheng, Zhang Keneng. 2007. Study on anti - seepage curtain of tailing dam in copper mine[J]. Geology and Exploration, 43(3): 108 - 111 (in Chinese with English abstract).
- China Electricity Council. 2012. Technical specification for cement grouting construction of hydraulic structures[S]. Beijing: China Electric Power Press: 1 - 59 (in Chinese).
- Deng Hongliang, Xie Xiangwen, Guo Yusong. 2007. Study of grouting treatment to abandoned stope under speedway[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 3(6): 1182 - 1186 (in Chinese with English abstract).
- Feng Sijia, Zhang Guijin. 2016. Experimental study of anti - corrosion properties of the clay cement grout[J]. Yellow River, 38(4): 117 - 120 (in Chinese with English abstract).
- Hu Anbing, Ruan Wenjun, Liu Xuesong. 2002. Experimentation and research on cement - acrylate composite grout[J]. Geology and Exploration, 38(3): 93 - 95 (in Chinese with English abstract).
- Li Hanguang. 2011. Experiment on mixing ratio of grouting material for treatment of coal mine goaf[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 28(8): 35 - 40 (in Chinese with English abstract).
- Li Jian. 2002. The application of geophysical prospecting to check grouting quality on treating disasters in karst area[J]. Geology and Exploration, 38(1): 90 - 92 (in Chinese with English abstract).
- Li Liping, Li Shucui, Cui Jinsheng. 2009. Experimental research on chemical grout for treating water inrush in rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 30(12): 3642 - 3648 (in Chinese with English abstract).
- Li Xilin, Wang Laigui, Zhao Na, Hao Zhe. 2014. Experimental research on mixing ratio of grouting material for goaf under railway[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 33(3): 651 - 655 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaohong, Jiang Deyi, Liu Chun, Ren Song. 2005. Study on treatment technology of highway tunnel through working out area[J]. Rock and Soil Mechanics, 26(6): 910 - 914 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhaofeng, Li Shucui, Liu Rentai, Jiang Yujing, Zhang Qingsong, Yang Lei, Sha Fei, Chen Bohan, Wang Hongliang. 2016. Development of the grouting material for reinforcing water - rich broken rock masses and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 37(7): 1937 - 1946 (in Chinese with English abstract).
- Liang Jingwei. 2010. Mechanical properties of clay - cement slurry and simulation of the application to dam anti - seepage curtain in karst area[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology: 1 - 77 (in Chinese).
- Liang Jingwei, Song Zilong, Wang Xiang, Zhang Guijin. 2015. Pressure filtration effect of clay - cement grout and its influence on strength[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 46(10): 133 - 137 (in Chinese with English abstract).
- Liu Tao. 2010. Grouting study of the under gob of Tai - Jia freeway[D]. Xi'an: Northwest University: 1 - 77 (in Chinese).
- Liu Jie, Zhang Guijin, Yang Dongsheng, Zhong Ping. 2016. Rheological properties of clay - cement grouting material and influence on grouting[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 35(8): 2581 - 2589 (in Chinese with English abstract).
- Peng Yongliang, Hu Xiewen, Song Dage, He Xin. 2007. Inspection method for grouting effect in treating large complicated cavities due to mining[J]. Journal of Engineering Geology, 21(4): 664 - 671 (in Chinese with English abstract).
- Ran Jingtai. 2010. Study of performance of clay - cement slurry[D]. Kunming: Kunming University of Sciences and Technology: 1 - 86 (in Chinese).
- Ruan Wenjun, Jing Xiangdang, Wang Biao. 2002. Optimization of phosphate used as retarder and performance of composite cement grout[J]. Geology and Exploration, 38(4): 83 - 86 (in Chinese with English abstract).
- Shanxi Province Communication and Design Institute. 2011. Guidelines for design and construction of highway engineering in the mined - out area[S]. Beijing: China Communications Press: 1 - 127 (in Chinese).
- Tong Liyuan, Liu Songyu, Qiu Yu, Fang Lei. 2004. Current research state of problems associated with mined - out regions under expressway and future development[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 23(7): 1198 - 1202 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xinghua. 1997. Study of rheological properties of clay - cement pastes and their effect factors[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 19(5): 43 - 48 (in Chinese with English abstract).
- Widmann R. 1996. International society for rock mechanics commission on rock grouting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 33(8): 803 - 847.
- Zhang Cong, Yang Junsheng, Zhang Guijin, Ye Xintian, Zhang Yi, Zhang Zhibo, Su Baozhu. 2018. Experiment and application research on stability performance of filling grouting slurry[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 37(S1): 3604 - 3612 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Fei, Liu Jie, Fang Shangwei, Han Qin. 2018. Study on viscosity time - varying characteristics of clay cement series slurry used in loose and soft ground[J]. Yangtze River, 49(19): 94 - 99 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guijin, Liu Jie, Hu Dake, Wang Jiangying. 2017. Rheological properties of plaster slurry of clay - cement and its influence on grouting engineering[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 34(3): 119 - 125 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guijin, Liu Jie, Kuang Chufeng, Yang Dongsheng, Fu Xiaoshu. 2017. Rheological properties of series clay - cement grouting material[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 36(1): 126 - 133 (in Chinese).

- nese with English abstract).
- Zhang Guijin, Yang Dongsheng, Liang Jingwei, Zhang Cong, Pan Ye. 2015. Study on strength of clay - cement grouting material[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 46(1): 52 - 56 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guijin, Yang Songlin, Chen Anzhong, Zhang Qun. 2012. Development and quick - preparing of controllable clay cement stable slurry adapt to anti - seepage grouting in deep complex rock and soil stratum [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 31(S1): 3428 - 3436 (in Chinese with English abstract).
- [附中文参考文献]
- 白昭鹏. 2008. 高速公路下伏采空区注浆治理技术研究[D]. 西安: 西安理工大学: 1 - 59.
- 陈永贵, 邹银生, 张可能. 2007. 铜矿山尾矿坝帷幕防渗技术研究[J]. 地质与勘探, 43(3): 108 - 111.
- 邓洪亮, 谢向文, 郭玉松. 2007. 公路隧道穿越采空区注浆加固技术研究[J]. 地下空间与工程学报, 3(6): 1182 - 1186.
- 冯思佳, 张贵金. 2016. 黏土水泥浆材抗溶蚀性能试验研究[J]. 人民黄河, 38(4): 117 - 120.
- 胡安兵, 阮文军, 刘雪松. 2002. 水泥-丙烯酸盐复合浆液的实验性研究[J]. 地质与勘探, 38(3): 93 - 95.
- 李汉光. 2011. 煤矿采空区注浆处治浆液材料配比试验[J]. 公路交通科技, 28(8): 35 - 40.
- 李坚. 2002. 物探在岩溶工程整治注浆质量检测工作中的应用[J]. 地质与勘探, 38(1): 90 - 92.
- 李利平, 李术才, 崔金声. 2009. 岩溶突水治理浆材的试验研究[J]. 岩土力学, 30(12): 3642 - 3648.
- 李喜林, 王来贵, 赵娜, 郝哲. 2014. 铁路下伏采空区注浆材料配比试验研究[J]. 硅酸盐通报, 33(3): 651 - 655.
- 李晓红, 姜德义, 刘春, 任松. 2005. 公路隧道穿越采空区治理技术研究[J]. 岩土力学, 26(6): 910 - 914.
- 李召峰, 李术才, 刘人太, 蒋宇静, 张庆松, 杨磊, 沙飞, 陈泊涵, 王宏亮. 2016. 富水破碎岩体注浆加固材料试验研究与应用[J]. 岩土力学, 37(7): 1937 - 1946.
- 梁经纬. 2010. 黏土固化浆液力学性能研究及在岩溶坝区防渗帷幕中的应用效果模拟[D]. 长沙: 长沙理工大学: 1 - 77.
- 梁经纬, 宋子龙, 王祥, 张贵金. 2015. 黏土水泥浆液的压滤效应及其对强度的影响[J]. 水利水电技术, 46(10): 133 - 137.
- 刘涛. 2010. 太佳高速公路下伏采空区注浆研究[D]. 西安: 西北大学: 1 - 84.
- 刘杰, 张贵金, 杨东升, 钟平. 2016. 黏土水泥浆材流变性能及其对灌浆的影响[J]. 硅酸盐通报, 35(8): 2581 - 2589.
- 彭永良, 胡卸文, 宋大各, 何鑫. 2007. 大型复杂采空区注浆效果检测方法研究[J]. 工程地质学报, 21(4): 664 - 671.
- 冉景太. 2010. 黏土水泥浆液性能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学: 1 - 86.
- 阮文军, 靖向党, 王彪. 2002. 磷酸盐缓凝剂的优选与水泥复合浆液性能研究[J]. 地质与勘探, 38(4): 83 - 86.
- 山西省交通规划设计院. 2011. 采空区公路设计与施工技术细则[S]. 北京: 人民交通出版社: 1 - 127.
- 童立元, 刘松玉, 邱钰, 方磊. 2004. 高速公路下伏采空区问题国内外研究现状及进展[J]. 岩石力学与工程学报, 23(7): 1198 - 1202.
- 王星华. 1997. 黏土-水泥浆流变性能及其影响因素研究[J]. 岩土工程学报, 19(5): 43 - 48.
- 张聪, 阳军生, 张贵金, 叶新田, 章怡, 张智博, 苏保柱. 2018. 充填注浆浆液稳定性能试验研究与工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 37(S1): 3604 - 3612.
- 张飞, 刘杰, 方尚伟, 韩勤. 2018. 黏土水泥系列浆材黏度时变特性研究[J]. 人民长江, 49(19): 94 - 99.
- 张贵金, 刘杰, 胡大可, 王江营. 2017. 黏土水泥膏浆流变性能及其对灌浆的影响[J]. 长江科学院院报, 34(3): 119 - 125.
- 张贵金, 刘杰, 匡楚丰, 杨东升, 傅小妹. 2017. 黏土水泥系列浆材流变性能研究[J]. 硅酸盐通报, 36(1): 126 - 133.
- 张贵金, 杨东升, 梁经纬, 张聪, 潘焱. 2015. 黏土水泥复合浆材强度研究[J]. 水利水电技术, 46(1): 52 - 56.
- 张贵金, 杨松林, 陈安重, 张群. 2012. 适应深厚复杂岩土层防渗灌浆的可控性黏土水泥稳定浆材其快速配置[J]. 岩石力学与工程学报, 31(S1): 3428 - 3436.
- 中国电力企业联合会. 2012. 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范[S]. 北京: 中国电力出版: 1 - 59.

## Experimental Study on the Properties of Clay - Cement Grout

QIU Haohao<sup>1</sup>, WANG Xiaoming<sup>2</sup>, LIANG Jingwei<sup>3</sup>

- (1. Guizhou Province Quality and Safety Traffic Engineering Monitoring and Inspection Center Co. Ltd, Guiyang, Guizhou 550000;  
2. School of Exploration Technology and Engineering, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031; 3. Hunan Institute of Water Resources and Hydropower Research, Changsha, Hunan 410007)

**Abstract:** Clay - cement grout is the preferred grouting material for the treatment of goafs, but few studies focus on optimizing the mixture ratio. Aiming at the treatment of goafs in the exit section of the Shuitang Tunnel of Biwei Expressway, this study suggests to adopt clay - cement grout in grouting treatment and conducts laboratory tests to determine the setting time, concretion ratio, concretion density, compressive strength of concretion, permeability coefficient and erosion ratio of grouts with different mixture ratios. The test results show that the grout with a lower solid phase ratio has a shorter setting time, higher compressive strength and larger permeability coefficient. With the increasing specific gravity, the setting time shortens; the compressive strength increases and the permeability coefficient decreases. The sodium metasilicate can effectively shorten the setting time of the grout. Finally, the mixture ratio and specific gravity of the clay - cement grouting materials are determined. This study provides a design basis for the grouting treatment of the goafs underlying highways.

**Key words:** goaf, clay - cement grout, laboratory test, mixture ratio