

超细粉煤灰水泥浆液可注性试验研究

方冉,庞建勇,黄金坤,姚韦靖,王凌燕

(安徽理工大学 土木建筑学院,安徽 淮南 232001)

摘要:超细粉煤灰作为电厂废弃物具有分布广、细度模数小的特点,将其掺入水泥中配制成超细粉煤灰水泥浆液,可以提高浆液的流动性和可注性。以水灰比、超细粉煤灰掺量和水玻璃掺量为主要因素进行正交试验,测定了所配浆液的胶凝时间、黏度、结石率等物理性能指标,并对结果进行极差分析、方差分析和回归分析;研制出一种新型胶凝时间可控的超细粉煤灰水泥浆液,并回归出胶凝时间预测公式;对所配浆液进行可注性模型试验。结果表明:在水灰比为0.8、超细粉煤灰掺量为70%、水玻璃掺量为15%时,超细粉煤灰水泥浆液具有良好的胶凝时间和黏度,与普通水泥浆液相比具有更好的可注性。

关键词:超细粉煤灰;粉煤灰水泥浆液;可注性;水玻璃;正交试验

中图分类号:TV42

文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2019)09-0150-05

Groutability of Ultra-fine Fly Ash Cement Slurry

FANG Ran, PANG Jian-yong, HUANG Jin-kun, YAO Wei-jing, WANG Ling-yan

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: As the waste of power plant, widely distributed ultra-fine fly ash is of small modulus of fineness, hence improves the fluidity and groutability of cement slurry by mixing with cement. In this paper, orthogonal tests were carried out with water cement ratio, ultra-fine fly ash content and sodium silicate content as main factors. The physical properties such as gelation time, viscosity and stone rate of the slurry were determined. On the basis of range analysis, variance analysis and regression analysis results, a new type of fly ash cement slurry with controllable gelling time was developed, and the formula of predicting gelling time was regressed. Finally, the groutability of the slurry is examined through model test. The research findings demonstrate that ultra-fine fly ash cement slurry with water cement ratio as 0.8, ultra-fine fly ash dosage 70%, and sodium silicate content 15% is of fast gellation and good viscosity, and better grouting performance compared with ordinary cement slurry.

Key words: ultra-fine fly ash; cement slurry dosed with fly ash; groutability; sodium silicate; orthogonal test

1 研究背景

地下工程在施工中,经常会受到不良地层的影响,发生突泥突水等灾害,注浆可以很好地解决这个问题^[1]。

许多学者在注浆机理、注浆材料、注浆工艺等领

域作了深入的研究,并取得了丰硕的科研成果。邹金锋等^[2]推导出劈裂注浆压力沿着裂缝衰减的规律和裂缝本身在土体中的扩散规律,并运用数值分析进行了检验,证明了其推导的正确性;俞文生等^[3]研发了变倾角小比例裂隙动水注浆模型进行试验研究,并使用 COMSOL 软件进行数值模拟,对裂隙动水注浆理论进行了补充;一些学者通过研发

收稿日期:2017-12-04;修回日期:2018-02-06

基金项目:国家安全监管总局安全生产重大事故防治关键技术科技项目(Anhui-0003-2016AQ);安徽省高校自然科学基金重大项目(KJ2015ZD20);安徽理工大学研究生创新基金项目(2017CX1006)

作者简介:方冉(1994-),男,安徽合肥人,硕士研究生,研究方向为岩土工程。E-mail:fangran2496@163.com

模型试验装置研究注浆过程中裂隙产生及发展的机理和浆液的分散性等,取得了很好的成果^[4-5];还有一些学者在水泥基基础上不断研究,通过改变水泥细度、加入掺合料等方式利用正交试验研制一些新型的浆液,并对其进行模型试验或现场测试,效果好^[6-10]。

粉煤灰作为燃煤电厂的主要废弃物,具有分布广、产量大、对环境存在污染等特点。超细粉煤灰作为粉煤灰的一种,还具有细度模数较小的特性。本文将超细粉煤灰和水玻璃作为主要掺和料掺入水泥中配置一种新型超细粉煤灰水泥浆液,研究了超细粉煤灰掺量、水玻璃掺量、水灰比对浆液黏度、胶凝时间等物理性能的影响,并通过模型试验对比了新型超细粉煤灰水泥浆液和普通水泥浆液的可注性差异。

2 试验材料与设计

2.1 正交试验材料

水泥采用淮南永科新型建材有限公司生产的P·O42.5级复合硅酸盐水泥;超细粉煤灰采用淮南永科新型建材有限公司生产的超细粉煤灰,其直径分布在32 μm以下,化学成分见表1;水玻璃采用淮南市宏瑞建材科技有限公司生产的水玻璃,化学成分见表2;试验用水为普通自来水。

表1 超细粉煤灰化学成分质量百分比

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃	烧失量
58.48	27.69	4.48	2.99	0.77	3.83	1.00	0.76

表2 水玻璃化学成分

铁质量/分数/%	水不溶物质/量分数/%	NaCl质量/分数/%	SiO ₂ 质量/分数/%	模数/M	密度/(g·cm ⁻³)
0.05	0.60	10.2	25.7	2.6	1.453

2.2 正交试验设计

根据各种物理力学性能对浆液性能的影响,选择水灰比、水玻璃掺量、超细粉煤灰掺量作为试验主要因素。为了表示方便,用因素A表示水灰比,因素B表示超细粉煤灰掺量,因素C表示水玻璃掺量。初步选取各因素的影响范围,水灰比取0.8~1.2,超细粉煤灰掺量取70%~90%,水玻璃掺量取5%~15%。试验选取的测试因素为3个因素,每个因素一共有3个水平,故采用正交试验设计表L9(3⁴),试验方案见表3。

研究超细粉煤灰水泥浆液的最佳配合比,其评价指标为浆液的相对密度、黏度、析水率、结石率、胶

表3 试验方案

Table 3 Test schemes

试验编号	因素A	因素B/%	因素C/%
1	0.8	90	5
2	0.8	80	10
3	0.8	70	15
4	1.0	90	10
5	1.0	80	15
6	1.0	70	15
7	1.2	80	15
8	1.2	90	5
9	1.2	70	10

凝时间和稳定性。根据《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG E30—2005)分别测定了超细粉煤灰水泥浆液的相对密度、黏度、析水率、结石率、胶凝时间、稳定性系数等。

2.3 正交试验结果

通过试验测量得到各试验指标的数值,见表4。

表4 试验指标值

Table 4 Values of test indexes

试验编号	相对密度	黏度/s	胶凝时间/h	析水率/%	结石率/%	稳定性系数
1	1.401	36	11.75	1.9	97.5	0.003
2	1.418	37	11.53	2.3	98.2	0.008
3	1.429	37	10.25	1.8	98.9	0.005
4	1.381	38	11.77	2.2	95.3	0.009
5	1.393	36	10.93	2.4	97.6	0.006
6	1.412	39	11.35	2.1	96.8	0.004
7	1.368	38	12.30	2.3	89.2	0.013
8	1.382	35	12.68	2.2	90.1	0.016
9	1.398	36	13.42	2.5	91.7	0.021

由表4的数据可以得出:注浆浆液相对密度为1.368~1.429,黏度为35~39 s,析水率为1.8%~2.5%,结石率为89.2%~98.9%,稳定性为0.003~0.021,其中1—3号,4—6号,7—9号相对密度逐渐增大;4,6,7号的黏度较大,浆液比较黏稠;1—6号的结石率均达到90%以上,结石效果良好;从析水率和稳定性来看,浆液析水率增大伴随着浆液稳定性的降低。总体来看,各组所测得的相对密度、黏度、结石率、析水率、稳定性数据离散性较小,满足浆液性能基本要求,各组所测得的胶凝时间离散性较大。

3 试验结果与分析

由表4所测得的数据可以知道,这9组试样中胶凝时间离散性很大。下面考虑水灰比、超细粉煤灰掺量、水玻璃掺量3个因素对浆液物理性能指标的影响,对结果进行极差分析、方差分析和回归分析^[11-12]。

3.1 极差分析

对正交试验结果进行极差分析,得出各试验因素对胶凝时间的极差 R 值,见表 5。

表 5 极差分析结果

Table 5 Result of range analysis

物理性能指标	各试验因素的极差 R		
	因素 A	因素 B	因素 C
相对密度	0.015	0.030	0.030
黏度	1.333	1.333	0.333
胶凝时间	1.620	0.270	1.080
析水率	0.133	0.167	0.267
结石率	7.867	1.800	0.433
稳定性	0.011	0.002	0.005

对表 5 分析可得:期望注浆浆液的胶凝时间尽可能短,针对胶凝时间,极差 R 值从大到小依次为水灰比、水玻璃掺量、超细粉煤灰掺量,故水灰比的影响最大,其次是水玻璃掺量,超细粉煤灰掺量的影响最小。所以,以胶凝时间为指标的最佳配比为:水灰比 0.8,超细粉煤灰掺量 70%,水玻璃掺量 15%。

3.2 方差分析

极差分析是直观分析,不能估计误差的大小,也不能精确地估计各因素对试验结果影响的重要程度。故用方差分析继续研究水灰比、超细粉煤灰掺量、水玻璃掺量对胶凝时间的影响,方差分析结果见表 6。

表 6 胶凝时间方差分析结果

Table 6 Result of variance analysis of gelation time

方差来源	偏差平方和 S	自由度 f	平均偏差平方和 V	F 值	临界值	显著性	影响顺序
因素 A	5	2	2.380	14.13	$F_{0.10}(2,2)=9$	(*)	
因素 B	0.12	2	0.062	0.37	$F_{0.05}(2,2)=19$	—	A>C>B
因素 C	1.85	2	0.926	5.49	$F_{0.01}(2,2)=99$	—	
误差 e	0.34	2	0.170				
总和 T	7.31	8					

注:(*)表示有一定影响。

由表 6 结果分析可知:因素 A、因素 B、因素 C 的 F 值分别为 14.13, 0.37, 5.49, 根据显著性排列出各因素对胶凝时间的影响顺序为:水灰比大于水玻璃掺量大于超细粉煤灰掺量,其中水灰比显著性较大,而超细粉煤灰掺量和水玻璃掺量的显著性都较小,这和上面的极差分析结果具有一致性。

3.3 回归分析

以水灰比、水泥掺量、水玻璃掺量为自变量 X_1, X_2, X_3 , 胶凝时间作为因变量 Y , 对其进行线性回归分析,得到拟合公式为

$$Y = 8.702 + 4.219 X_1 + 0.019 X_2 - 0.136 X_3 \quad (1)$$

公式适用条件为:水灰比 0.8~1.2、超细粉煤灰掺量 70%~90%、水玻璃掺量 5%~15%。对所拟合

的公式进行评价,通过计算得到回归方差分析结果,如表 7 所示,试验误差与回归统计结果如表 8 所示。

表 7 回归方差分析结果

Table 7 Result of regression analysis of variance

方差来源	偏差平方和	自由度	方差	F 值	临界值	显著性
回归	S_R	3	5.92	8.50	$F_{0.10}(3,5)=3.62$	*
残差	S_e	5	1.16		$F_{0.05}(3,5)=5.41$	
总和	S_T	8	7.08	$F_{0.01}(3,5)=12.06$		

注:*表示影响显著。

表 8 试验误差与回归统计

Table 8 Test errors and regression statistics

项目	回归系数	标准误差	t 统计量	P 值	R	R^2
常数项	8.702	1.140	7.636	0.000 612 7	0.914	0.836
X_1 项系数	4.219	1.000	4.217	0.008 355 3		
X_2 项系数	0.019	0.022	0.880	0.418 901 6		
X_3 项系数	-0.136	0.048	-2.821	0.037 055 1		

根据表 7 的回归方差分析可知,所得回归公式(1)的 F 值为 8.50,与查 F 分布表所得的临界值相比较,可得 $F_{0.01} > F > F_{0.05}$,说明因变量 Y 与 X_1, X_2, X_3 之间有显著的线性关系,回归方程可信。根据表 8 的结果可知, R 值为 0.914 表明因变量 Y 与自变量 X_1, X_2, X_3 之间为高度正相关; R^2 值为 0.836 表明自变量 X_1, X_2, X_3 可以解释因变量变差的 83.6%; P 值表示回归系数 t 统计量的 P 值, P 值的大小反映对应自变量与因变量之间相关性的大小, X_1 和 X_3 对应的 P 值均远小于显著性水平 0.05,而 X_2 对应的 P 值远 > 0.05,表明 X_1 和 X_3 与 Y 的相关性大, X_2 与 Y 的相关性小,即相关性顺序为 $X_1 > X_3 > X_2$,这和上文极差分析以及方差分析的结果一致。

综上所述,通过对正交试验结果的处理,找出了胶凝时间短、黏度好的超细粉煤灰注浆浆液的配比,即水灰比 0.8,超细粉煤灰掺量 70%,水玻璃掺量 15%。成功回归出水灰比、超细粉煤灰掺量、水玻璃掺量与胶凝时间之间的公式,可以为日后配取一定胶凝时间的浆液提供掺合料配比的参考。下面采取模型试验的方法,对具有可控胶凝时间的超细粉煤灰水泥浆液与普通水泥浆液的可注性进行对比。

4 模型试验

4.1 模型试验装置

为了测试超细粉煤灰水泥浆液的可注性,根据相似理论相关知识,设计模型试验与试验装置^[13-15]。试验装置的实物和模型结构见图 1。

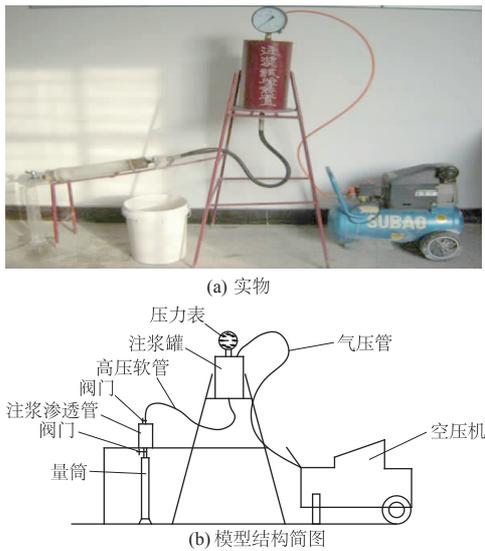


图1 试验装置的实物与结构

Fig.1 Photo and schematic diagram of test device

试验装置的主要系统如下:

(1)动力供应系统。给注浆浆液施加压力,保证注浆材料在注入岩土体时具有一定的动力。

(2)浆液渗流系统。根据相似理论的原理,通过选取模型材料、设定初始条件和边界条件来模拟工程现场的实际情况,提供渗流模型试验过程中的渗流通道。

(3)检测系统。通过检测系统的布置,可以对浆液的流动状态、孔隙水压、流量、速度等试验所需数据进行采集。

4.2 模型试验材料

注浆材料所采用的超细粉煤灰和水泥与上文正交试验相同,水灰比取0.8,受注体采用淮河天然细砂,浆液指标和细砂的相关参数见表9、表10和表11。

表9 浆液性能指标

Table 9 Indexes of slurry performance

注浆材料	水灰比	旋转黏度/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	体积质量/ ($\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	28 d 结石强度/MPa
超细粉煤灰注浆材料	0.8	32	45	2.79
普通硅酸盐水泥	0.8	6	58	4.12

表10 细砂试验参数

Table 10 Parameters of test fine sand

孔隙比	泊松比	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	渗透系数/ ($10^{-2} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	含水率/%
0.36	0.3	13.8	2.16	10

表11 细砂筛余量

Table 11 Sieve allowance of fine sand

筛子孔径/mm	5.0	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16
细砂筛余量/g	0	7.4	6.5	56.1	347.4	79.8

4.3 模型试验步骤

模型试验的主要步骤分为:

(1)试验准备。配制浆液、检查各组件是否完好,管道线路是否堵塞。

(2)受注体装填。对选取的受注岩土体进行预压和振捣后装填到注浆渗透装置中,直到装填满注浆渗透装置的塑料管为止,并施加一定的压力使其趋于稳定状态。

(3)组装与调试。对模型试验装置进行组装,将水注入到注浆罐的2/3处让水在装满砂的塑料管中自由渗流,直到从另一端阀门口流出,检查整个装置的气密性,调试各个系统保证其可以正常运行,待水完全流出后进行注浆试验。

(3)注浆。将配置好的浆液加入到注浆罐中,设定好注浆压力,接通空气压力机打开阀门进行注浆,保证注浆压力在设定值之间浮动,分别进行0.2, 0.4, 0.6 MPa压力下的3组试验;在浆液渗流的同时用量筒量取渗流装置的泄流量,并用秒表计时,按照设计的时间间隔记录泄流量,直到达到一定时间或者渗流装置无水流为止。

(4)后续操作。待注浆浆液完全注入到注浆渗流系统以后关闭阀门,保持各个系统状态不变持续1~2 min后停止工作,静放一段时间后排水、拆样观察注浆状况,并对数据进行分析处理。

4.4 模型试验结果及分析

将普通水泥浆液和超细粉煤灰水泥浆液的泄流量进行分析对比,并将注浆装置静置一段时间后拆模观察浆液的扩散情况。处理泄流量数据并拍摄浆液扩散情况照片,得到0.2, 0.4, 0.6 MPa下超细粉煤灰水泥浆液和普通水泥浆液的泄流量和扩散情况对比分别如图2、图3所示。

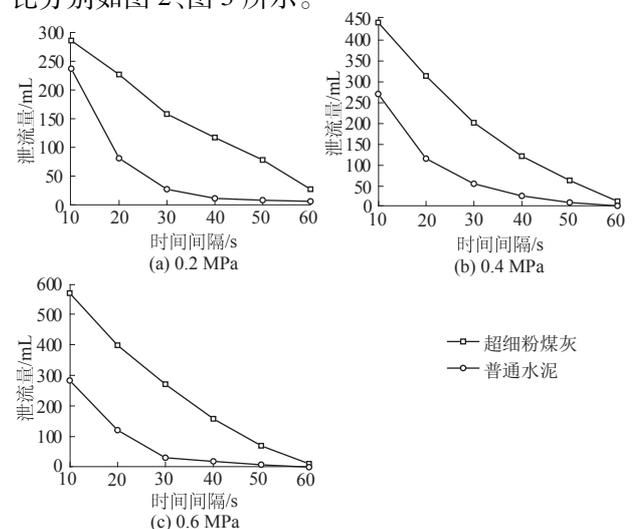


图2 超细粉煤灰水泥浆液和普通水泥浆液的泄流量对比
Fig.2 Comparison of discharge between ultrafine fly ash cement slurry and ordinary cement slurry

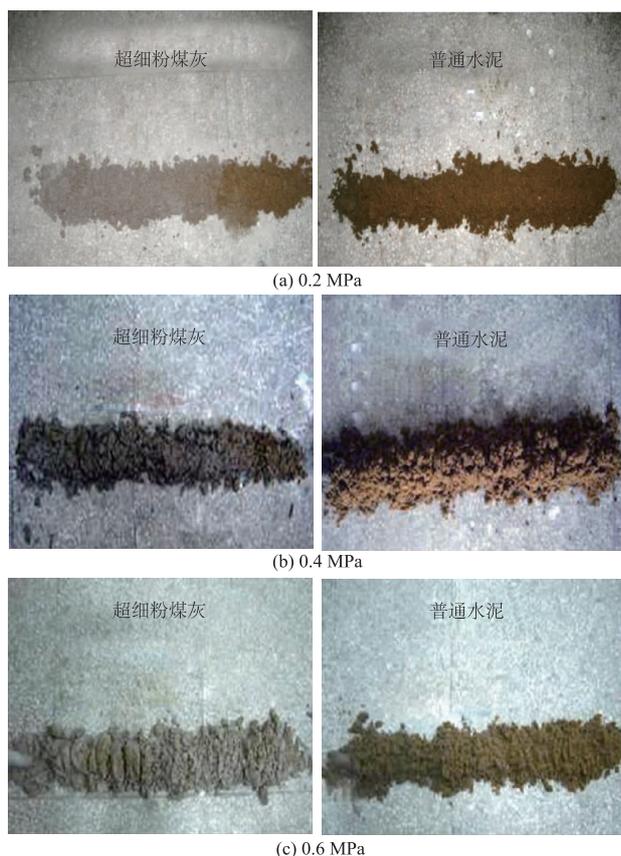


图3 超细粉煤灰水泥浆液和普通水泥浆液的扩散性对比
Fig.3 Comparison of diffusivity between ultrafine fly ash cement slurry and ordinary cement slurry

对图2、图3分析可得:超细粉煤灰水泥浆液和普通水泥浆液在相同压力条件下,随着时间的增加,相同时间间隔内的泄流量减小;相同压力和对应的时间间隔内,超细粉煤灰水泥浆液的泄流量比普通水泥浆液大;相同注浆压力条件下,超细粉煤灰水泥浆液的扩散长度明显大于普通水泥浆液,注浆压力为0.4 MPa时,超细粉煤灰水泥浆液近乎注满了整个土体,0.6 MPa时已注满整个土体,并已经开始固结,反观普通水泥浆液注入的最长距离仅约为整个受注体的1/6。

5 结论

(1)对试验结果进行极差和方差分析,得出水灰比、超细粉煤灰掺量、水玻璃掺量对超细粉煤灰水泥浆液胶凝时间、黏度影响的大小顺序,即水灰比>超细粉煤灰掺量>水玻璃掺量,确定以胶凝时间为指标的最佳配合比为:水灰比0.8、超细粉煤灰掺量70%、水玻璃掺量15%。

(2)通过回归分析,得出在水灰比为0.8~1.2、超细粉煤灰掺量为70%~90%、水玻璃掺量为5%~

15%条件下,胶凝时间(Y)与水灰比(X_1)、超细粉煤灰掺量(X_2)以及水玻璃掺量(X_3)的线性拟合公式: $Y = 8.702 + 4.219 X_1 + 0.019 X_2 - 0.136 X_3$ 。依据此公式,可以对满足使用条件的超细粉煤灰浆液的胶凝时间进行预测;同时还可以调整掺和料的比重,配制出满足试验或工程需要的胶凝时间的浆液。

(3)通过模型试验,对比相同注浆压力下,超细粉煤灰水泥浆液与普通水泥浆液在相同时间间隔的泄流量及其最终扩散情况。与普通水泥浆液相比超细粉煤灰水泥浆液的泄流量更大,注入受注体的深度更长且固结效果更好,表明超细粉煤灰水泥具有良好的可注性。

参考文献:

- [1] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945-1956.
- [2] 邹金锋, 李亮, 杨小礼. 劈裂注浆扩散半径及压力衰减分析[J]. 水利学报, 2006, 37(3): 314-319.
- [3] 俞文生, 李鹏, 张霄, 等. 可变倾角单裂隙动水注浆模型试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2137-2143, 2149.
- [4] 张忠苗, 邹健, 贺静漪, 等. 黏土中压密注浆及劈裂注浆室内模拟试验分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1818-1824.
- [5] 袁敬强, 陈卫忠, 谭贤君, 等. 速凝浆液抗分散性质与凝胶性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(5): 960-967.
- [6] 刘人太, 李术才, 张庆松, 等. 一种新型动水注浆材料的试验与应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1454-1459.
- [7] 王胜, 黄润秋, 陈礼仪. 锦屏一级水电站深部裂隙控制性灌浆技术研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(2): 276-282.
- [8] 王乾, 曲立清, 郭洪雨, 等. 青岛胶州湾海底隧道围岩注浆加固技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 790-802.
- [9] 李利平, 李术才, 崔金声. 岩溶突水治理浆材的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3642-3648.
- [10] 黄金坤, 庞建勇, 王凌燕, 等. 可注超细粉煤灰水泥砂浆正交试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(5): 1671-1815.
- [11] 邱铁兵, 张文利, 闵凡飞, 等. 试验设计与数据处理[M]. 合肥: 中国科学技术出版社, 2008.
- [12] 丁庆军, 管学茂, 胡曙光. 混合材对超细灌浆水泥流变性能的影响[J]. 长江科学院院报, 2002, 19(2): 23-26, 37.
- [13] 赵选民. 试验设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [14] 徐挺. 相似理论与模型试验[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1982.
- [15] 黄金坤, 姚韦靖, 王凌燕, 等. 一种室内注浆模型试验装置: 中国, CN201620928818.4[P]. 2017-02-22.