

DOI:10.12170/20190227002

马波, 雷进生, 涂保林, 等. 膨胀复合浆液的物理力学性能试验研究 [J]. 水利水运工程学报, 2020(3): 92-98. (MA Bo, LEI Jinsheng, TU Baolin, et al. Experimental study on physical and mechanical properties of expanded composite slurry[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(3): 92-98. (in Chinese))

# 膨胀复合浆液的物理力学性能试验研究

马波<sup>1,2</sup>, 雷进生<sup>1,2</sup>, 涂保林<sup>2</sup>, 戴康<sup>2</sup>, 程爽<sup>2</sup>

(1. 防灾减灾湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北宜昌 443002; 2. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北宜昌 443002)

**摘要:** 目前普通硅酸盐水泥浆液是水利工程中最常用的注浆加固材料, 针对其存在流动性差、析水率高、结石率低、结石体强度低、抗渗性能差等问题, 采用单因素控制变量法和正交试验法, 对制备的不同配合比的水泥基膨胀复合浆液进行黏度、密度以及结石体力学性能试验。试验结果表明: 掺加粉煤灰可以增加浆液的和易性和流动性; 掺加膨润土可以提高浆液的结石率和稳定性, 同时降低浆液的析水率; 掺加粉煤灰和膨润土的浆液流动性和结石率性能都有所改善, 但是前期结石体强度较低, 而后后期强度主要靠粉煤灰的水化作用进行补充; 水泥浆液掺加适量的膨胀剂对结石体的膨胀影响较大, 并且可以提高结石体的抗渗性能。合理选择和控制在粉煤灰、膨润土和膨胀剂掺量, 可以明显改善和提高注浆效果。

**关键词:** 注浆材料; 水泥; 粉煤灰; 膨润土; 膨胀剂; 防渗加固

中图分类号: TU592

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2020)03-0092-07

由于我国堤防和水库大坝工程较多是 20 世纪 50 年代初期所建, 存在设计不合理、施工质量差等问题, 常导致渗漏和渗透破坏等病害。对于多种复杂地质条件的地基加固, 注浆技术的应用最为广泛, 注浆可使岩土体成为强度高、抗渗性好、稳定性高的新结构体, 以达到加固或防渗的目的, 是防渗、堵漏、地基加固和纠偏的重要方法<sup>[1-2]</sup>。近年来, 随着注浆理论体系的不断完善, 不同情况下的注浆模型以及注浆扩散规律的研究日渐成熟<sup>[3-4]</sup>。水泥作为最常用的注浆材料, 具有胶结性能好、结石强度高、施工方便等优点, 同时普遍存在凝结时间过长、早期强度不高等缺陷, 并且硬化时常伴有析水和固相体积收缩, 使硬化结石与被注介质的粘结强度降低, 形成新的渗水、窜气通道, 不能完全满足灌浆的要求<sup>[5-7]</sup>, 研制出高性能的注浆材料显得尤为重要。

本文通过在水泥浆液中掺加纳基膨润土、一级粉煤灰以及 SY-G 型高性能膨胀剂等材料, 研究其对浆液的流动性、可注性、结石率以及结石体强度等的改善效果, 从而为浆液选型和配制提供参考依据。

## 1 膨胀复合浆液配比和物理性能

本文采用的基本材料是湖北宜昌三峡牌水泥, P·O 42.5, 其化学成分及物理性能如表 1 所示。本研究中掺加纳基膨润土的主要成分为蒙脱石, 其吸蓝量为 37 g/100 g, 湿压强度为 129 kPa, 热湿拉强度 3.74 kPa, 膨润值 67 mL/g, 水分 9.05%; 粉煤灰主要是燃煤电厂排出来的废弃物质, 其化学成分和物理性能如表 2 所示; 膨胀剂的主要成分有氧化钙和硫酸铝钙, 其主要作用是防止浆液结石体的体积干缩效应, 其化学成分和物理性能如表 3 所示。

收稿日期: 2019-01-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51709155, 51279092)

作者简介: 马波 (1990—), 男, 河南南阳人, 硕士, 主要从事地基与基础工程加固等领域的研究。

E-mail: mabo\_1027@163.com 通信作者: 雷进生 (E-mail: Lei-jinsheng@163.com)

表 1 水泥的化学成分和物理性能  
Tab. 1 Chemical composition and physical properties of cement

密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	MgO/%	SO <sub>3</sub> /%	Cl <sup>-1</sup> /%	烧失量/%	比表面积/ (m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	初凝时间/ min	终凝时间/ min	强度/MPa	
								3 d	28 d
2.9	<3.5	<5.0	<0.06	<5.0	312	221	304	22.4	43.2

表 2 粉煤灰的化学成分和物理性能  
Tab. 2 Chemical composition and physical properties of fly ash

细度2.6 um 方孔筛筛余/%	烧失量/%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%	SiO <sub>2</sub> /%	水/%	Cl <sup>-1</sup> /%	SO <sub>3</sub> /%	CaO/%	碱/%	铁/%	游离氧化 钙/%	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	堆积密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )
16	6.5	48.6	29.1	0.85	0.015	2.1	5.6	1.2	0.95	0.85	2.55	1.12

表 3 膨胀剂的化学成分和物理性能  
Tab. 3 Chemical composition and physical properties of expansive agent

比表面积/ (cm <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	细度		水/%	MgO/%	总碱量/%	增强剂/%	聚丙烯纤维/%	Cl <sup>-1</sup> /%	凝结时间	
	0.08 mm筛筛余/%	1.25 mm筛筛余/%							初凝/min	终凝/min
≥2 500	≤7.2	≤0	≤2.92	≤1.8	≤0.478	0.3	0.2	≤0.009	≥155	≤245

浆液的黏度及密度对浆液的渗透特性具有重要影响。一般情况下黏度小, 密度低, 流动性大, 渗透较好, 但是在土石坝注浆工程中, 浆液黏度和密度较低时容易被坝体内的渗流水冲刷和稀释, 从而不能达到理想的注浆效果。通过单因素控制变量法对不同配合比的膨胀复合浆液进行试验, 总结出不同水固比以及膨润土、粉煤灰、膨胀剂的掺量等因素对浆液黏度和密度的影响规律。

试验对不同水固比及不同膨润土、粉煤灰、膨胀剂掺量的浆液采用 1006 型泥浆黏度计进行黏度测试, 利用黏度试验配合比搅拌好浆液并测其密度 3 次, 取 3 次的平均值作为该膨胀复合浆液的密度。结果如表 4 及图 1 所示。

通过对表 4 和图 1 的分析可知, 随着水固比的增大, 浆液的黏度和密度降幅明显, 当水固比为 0.6 时, 浆液几乎不流动, 用标准漏斗无法测量其黏度, 当水固比从 0.8 增大到 1.0 时, 浆液黏度下降幅度为 30.65%; 随着膨润土掺量的增加, 浆液的黏度和密度随之增大; 随着粉煤灰掺量的增加, 浆液的黏度呈现先减小后增大的趋势, 密度随之减小; 膨胀剂掺量的变化对浆液流动性影响较小。

粉煤灰是经过高温燃烧后形成的煤灰, 本身不具有水硬性, 但与水泥水化作用生成的 Ca(OH)<sub>2</sub> 发生反应, 能生成稳定的硅酸钙和氯酸钙产物。其中, 水化硅酸钙和水化氯酸钙具有较好的胶凝效应, 保证了浆液结石体后期的强度, 并且其来源广泛, 可以替代部分水泥, 从而降低成本。通常情况下粉煤灰呈球型颗粒, 且粒径比较小, 具有光滑而致密的外壳, 有较好的润滑减阻特性, 故可提高浆液的和易性、可注性<sup>[8]</sup>。

表 4 不同配合比膨胀复合浆液的黏度和密度  
Tab. 4 Viscosity and density values of expanded composite slurry with different mixing ratios

试验 编号	水固 比	膨润土掺 量/%	粉煤灰掺 量/%	膨胀剂掺 量/%	浆液黏 度/s	浆液密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )
1	0.6	20	30	10	几乎不 流动	1.50
2	0.8	20	30	10	31.22	1.42
3	1.0	20	30	10	21.65	1.36
4	0.8	15	30	10	26.47	1.43
5	0.8	20	30	10	27.53	1.44
6	0.8	25	30	10	28.34	1.46
7	0.8	20	20	10	33.78	1.46
8	0.8	20	30	10	29.25	1.44
9	0.8	20	40	10	31.09	1.43
10	0.8	20	30	5	28.47	1.45
11	0.8	20	30	10	28.72	1.44
12	0.8	20	30	15	30.59	1.45

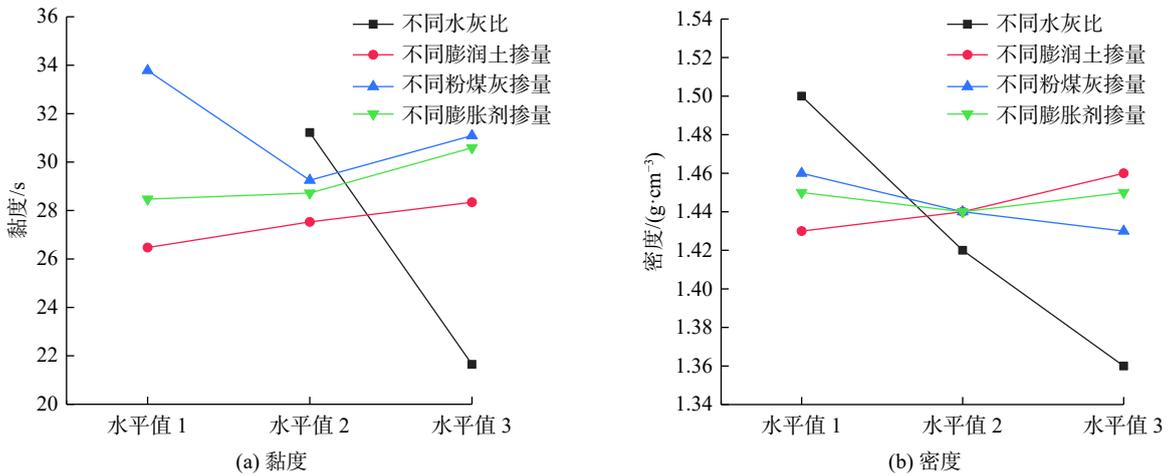


图 1 不同配合比的膨胀复合浆液黏度及密度值

Fig. 1 Viscosity and density of expanded composite slurry with different mixing ratios

施工时浆液黏度太大容易堵塞注浆管,黏度太小容易被冲刷稀释,施工时需合理控制浆液的流动性。加入适量的粉煤灰,同时控制膨润土的掺量,有利于提高浆液的可注性。

## 2 膨胀复合浆液结石体力学性能试验

### 2.1 结石体强度试验

注浆浆液结石体抗折强度是力学性能的重要参数之一。以水泥作为主要材料,掺加不同比例的膨润土、粉煤灰及膨胀剂在不同水固比的条件下测其抗折强度的变化规律。采用 NJ-160 水泥净浆搅拌机、水泥试件养护箱、电动抗折试验机、水泥胶砂振动台等仪器,并依据规范《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T 17671—1999)分别对 7, 14 和 28 d 抗折强度进行试验,试验结果如表 5 所示。

由表 5 可知,水固比对结石体的抗折强度影响最大,养护 7 d 的结石体抗折强度在水固比为 0.8 时出现了拐点,降幅为 69.53%,水固比继续增大,强度下降较为平缓,降幅为 38.92%。不同水固比的抗折强度在前 14 d 增加较快,后期强度趋于稳定。

掺入粉煤灰和膨润土后,虽然前期结石体的抗折强度有所降低,但是随着养护龄期的增加,水化作用会对结石体的强度进行补充,不会影响结石体强度作用的发挥。

无侧限抗压强度是注浆浆液结石体的另一重要力学指标,关乎着注浆材料的用途。抗压强度高的注浆材料可以用来注浆加固地基,抗压强度低的材料主要用来防渗堵水注浆<sup>[9]</sup>。依据规范《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T17671—1999)分别对 7, 14 和 28 d 抗压强度进行试验,结果如表 6 所示。

分析表 6 可知,掺加膨润土和粉煤灰对膨胀复合浆液结石体的强度有一定的影响,在相同的水固比条

表 5 膨胀型复合浆液结石体抗折强度

Tab. 5 Fold resistance of expansive composite slurry stone body

试验编号	浆液组分				7 d抗折强度/MPa	14 d抗折强度/MPa	28 d抗折强度/MPa
	水固比	膨润土/%	粉煤灰/%	膨胀剂/%			
1	0.6	20	30	10	2.133	2.505	2.678
2	0.8	20	30	10	0.650	1.153	1.675
3	1.0	20	30	10	0.397	0.695	1.015
4	0.8	15	30	10	0.990	1.495	2.425
5	0.8	20	30	10	0.785	1.465	1.690
6	0.8	25	30	10	0.645	1.323	1.600
7	0.8	20	20	10	1.045	1.870	2.045
8	0.8	20	30	10	0.630	1.317	1.475
9	0.8	20	40	10	0.485	1.060	1.315
10	0.8	20	30	5	0.825	1.503	2.090
11	0.8	20	30	10	0.720	1.475	1.877
12	0.8	20	30	15	0.522	1.265	1.555

件下, 随着膨润土和粉煤灰掺量的增加, 在前期会大幅降低结石体的抗压强度, 但后期粉煤灰的水化作用会对结石体的强度进行补充, 保证结石体后期的强度; 加入膨胀剂虽能使水泥、粉煤灰的水化更加充分, 但相当于减小了浆液水灰比<sup>[10]</sup>, 因此前期结石体抗压强度也会因为膨胀剂的加入而降低, 而后期结石体抗压强度趋于稳定。但是, 粉煤灰的加入会在一定程度上抑制膨胀剂的反应, 所以随着粉煤灰掺量的增加, 结石体的抗压强度会有所减小。

综合分析抗折和抗压试验结果可以看出, 水固比对结石体的强度影响最大, 水固比从 0.6 变化到 0.8 的强度降幅比水固比从 0.8 变化到 1.0 的降幅更大, 说明膨胀复合浆液的性能在水固比为 0.8 时发生了突变; 随着膨润土掺量的增加, 强度也逐渐降低, 掺量从 15% 增加到 20% 的降幅比掺量从 20% 增加到 25% 的降幅大, 膨润土的掺量为 15% 时后期强度增长较快, 如果单独从强度因素考虑, 该掺量最优; 随着粉煤灰掺量的增加, 强度也逐渐下降, 掺量从 20% 增加到 30% 的降幅比掺量从 30% 增至 40% 的降幅大, 粉煤灰掺量为 20% 时后期强度增长较快, 达 6 MPa 以上, 掺量在 30% 和 40% 时, 强度降幅明显, 所以掺量 20% 最优; 膨胀剂的加入, 虽能使水泥与粉煤灰的水化更加充分, 但相当于增大了浆液水灰比, 因此结石体抗压强度也会因为膨胀剂的加入而降低, 当掺量超过 10% 时, 降幅明显, 所以要控制膨胀剂的掺量在 10% 左右。且本次试验膨胀复合浆液结石体 28 d 的抗折强度均大于 1.0 MPa、抗压强度均大于 3.0 MPa, 能满足注浆材料的防渗堵水要求。

由于膨润土不溶于水, 但能够在水中搭接成网络结构, 使得周边大量的自由水转化为束缚水, 整体形成具有一定黏度的非牛顿流体类型的均匀胶体, 对浆液稳定性有一定的影响。在剪切力存在并搅动时, 结构氢键受到破坏, 胶体黏度降低, 转化为悬浮液; 停止搅动时, 会自动逐渐恢复胶体状态, 不发生离析现象, 黏度随之增大。在外界作用下悬浮液和胶体可以无限相互转化, 即为浆液掺加膨润土后稳定性提高的原因<sup>[11]</sup>。

## 2.2 结石体自由膨胀率试验

通过正交试验法对不同配合比的膨胀复合浆液结石体进行试验, 膨胀性能通过测量 1, 3, 7, 14, 21 和 28 d 试体长度的变化来确定。试验主要仪器设备有 NJ-160 水泥净浆搅拌机、水泥试件养护箱、水泥比长仪 (ISOBY-160 型) 等。参照《膨胀水泥膨胀率试验方法》(JC/T 313—2009) 进行试验, 结果如表 7 及图 2 所示。

表 6 膨胀型复合浆液结石体抗压强度

Tab. 6 Compressive strength of expansive composite slurry stone body

试验编号	浆液组分				7 d抗压强度/MPa	14 d抗压强度/MPa	28 d抗压强度/MPa
	水固比	膨润土/%	粉煤灰/%	膨胀剂/%			
1	0.6	20	30	10	6.25	8.30	10.04
2	0.8	20	30	10	2.93	3.12	4.21
3	1.0	20	30	10	2.29	2.42	3.04
4	0.8	15	30	10	3.68	4.31	5.54
5	0.8	20	30	10	3.61	3.81	4.89
6	0.8	25	30	10	3.53	3.63	4.32
7	0.8	20	20	10	4.31	4.68	6.32
8	0.8	20	30	10	3.08	3.33	4.86
9	0.8	20	40	10	2.62	3.14	4.24
10	0.8	20	30	5	3.60	3.87	4.82
11	0.8	20	30	10	3.57	3.85	4.87
12	0.8	20	30	15	2.17	3.38	4.66

表 7 膨胀型复合浆液结石体不同龄期的自由膨胀率

Tab. 7 Free expansion rates of expansive composite slurry stone body at different ages

试验编号	浆液组分				自由膨胀率/%					
	水固比	膨润土/%	粉煤灰/%	膨胀剂/%	1 d	3 d	7 d	14 d	21 d	28 d
1	0.6	15	20	5	0.042 4	0.051 6	0.053 6	0.085 6	0.086 8	0.087 6
2	0.6	20	30	10	0.068 8	0.078 0	0.080 4	0.104 8	0.118 8	0.123 6
3	0.6	25	40	15	0.099 6	0.149 2	0.153 6	0.187 2	0.198 0	0.200 4
4	0.8	15	30	15	0.032 4	0.070 8	0.074 0	0.086 8	0.089 6	0.092 8
5	0.8	20	40	5	0.024 4	0.036 4	0.047 2	0.050 0	0.051 6	0.052 4
6	0.8	25	20	10	0.030 0	0.051 6	0.062 8	0.072 4	0.074 4	0.075 2
7	1.0	15	40	10	0.021 2	0.028 4	0.036 4	0.049 6	0.050 4	0.051 2
8	1.0	20	20	15	0.025 2	0.056 0	0.067 6	0.075 2	0.077 2	0.078 4
9	1.0	25	30	5	0.020 4	0.027 2	0.034 8	0.044 8	0.044 0	0.046 0

由表 7 及图 2 可知, 3#结石体的膨胀率比其他结石体的膨胀率高很多, 从配合比来看, 3#结石体的水固比最小, 膨胀剂掺量最多, 初步判断水固比和膨胀剂掺量影响较大; 整个膨胀过程在前 7 d 较为明显, 第 14 d 基本达到稳定, 后期膨胀值较小; 对 14 d 的膨胀值通过正交分析可以得到, 各因素对膨胀率的影响大小排序依次为: 水固比>膨胀剂掺量>膨润土掺量>粉煤灰掺量。

### 2.3 结石体抗渗试验

评价浆液结石体渗透性能效果的指标主要有两种, 一种是在一定压力下、一定时间内试件渗出的水量来表示; 另一种是在一定压力下、一定时间内看试件是否被水压击穿。本试验采用前者并结合正交试验法对膨胀复合浆液进行抗渗性能评价。将试件放入温度(20±2)℃、湿度 90% 以上的养护室养护至 28 d, 试件取出待表面干燥后, 采用密封材料密封装入 SS-15 砂浆渗透仪中采取重复加压的方式进行抗渗试验, 参照 JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》, 结果如表 8 所示。

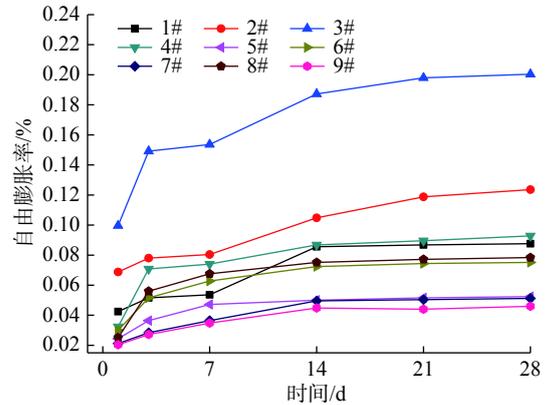


图 2 不同配合比的结石体随时间变化的自由膨胀率

Fig. 2 Free expansion rates of stone bodies with different proportions varied with time

表 8 不同配合比的膨胀复合浆液结石体的渗透系数

Tab. 8 Permeability coefficients of expanded composite slurry stone bodies with different proportions

试验编号	水固比	膨润土掺量/%	粉煤灰掺量/%	膨胀剂掺量/%	渗水时的压力/MPa	搜集渗水量/mL	搜集时间/s	渗透系数/(10 <sup>-8</sup> cm·s <sup>-1</sup> )
1	0.6	15	20	5	0.90	1.000	3 600	0.184
2	0.6	20	30	10	未渗水	/	/	/
3	0.6	25	40	15	未渗水	/	/	/
4	0.8	15	30	15	0.20	1.180	1 800	1.957
5	0.8	20	40	5	0.20	1.850	1 800	3.069
6	0.8	25	20	10	0.30	0.810	1 800	0.896
7	1.0	15	40	10	0.20	2.065	1 800	3.425
8	1.0	20	20	15	0.20	1.290	1 200	3.210
9	1.0	25	30	5	0.20	5.600	600	27.866

由表 8 可见, 随着浆液水固比的增大, 渗透系数逐渐增大, 在水固比从 0.6 增加到 0.8 时变化尤为明显。1#试块在 0.9 MPa 时才出现渗透, 2#和 3#试块在水压达到最大时还未出现渗透; 4#~9#试块出现渗透的压力基本相同, 通过一定时间搜集的水量可以得出每个配合比试块的渗透系数; 4#, 5#, 6#试块中渗透系数最大的是 5#试块, 该试块的膨胀剂掺量最小, 防渗性能最差, 6#的渗透系数最小, 膨润土掺量是最多的, 膨胀剂掺量适中, 该配合比的浆液防渗效果最好; 7#, 8#, 9#试块的水固比都为 1.0, 但 9#试块的渗透系数增加十分明显, 和 7#, 8#相差一个数量级, 更加明显地反映出膨胀剂掺量对浆液渗透系数的影响。

通过结石体自由膨胀率试验和抗渗试验可知, 膨胀剂对浆液的膨胀及抗渗性能影响较大。这是由于掺加膨胀剂的水泥浆液, 其早期水化产物主要是钙矾石及少量的 Ca(OH)<sub>2</sub>, 且水化的 Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub> 和 CaSO<sub>4</sub> 比较少, 膨胀剂的加入促进了硅酸盐水泥 Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub> 的水化, 消耗了 Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub> 水化生成的 Ca(OH)<sub>2</sub>, 同时膨胀剂中的活性矿物组分与 CaSO<sub>4</sub> 参与水化并生成了钙矾石; 后期水化产物与早期相同, 由于膨胀剂中还有一定数量的矿物组分参与水化反应, 水化产物还有少量的钙矾石生成。膨胀剂参与反应生成的钙矾石填充了部分复合浆液的空隙, 提高了复合浆液的致密度, 起到了较为稳定的膨胀效果, 增强了浆液结石体的抗渗性能<sup>[12-13]</sup>。

## 2.4 膨胀复合浆液配合比确定

试验研究可知,水泥作为浆液的主要材料,可以保证膨胀复合浆液结石体的强度;膨润土的掺加可以提高浆液的结石率并降低结石体的渗透系数;粉煤灰的掺加可以改变浆液的流动性,提高其可注性,并且保证了结石体的后期强度;膨胀剂的掺加可以很好地解决灌浆材料的收缩问题,在中后期效果尤为明显。确定最优配合比为水固比 0.8,膨润土掺量 25%,粉煤灰掺量 30%,膨胀剂掺量 10% 的膨胀复合浆液。但是,膨胀复合浆液配制时,并非外加剂的掺量越多越好,要根据实际工程问题进行配合比试验,以合理确定各组分的含量,才能更好地满足工程需要。

## 3 结 语

通过对膨胀复合浆液黏度和密度试验、结石体抗折强度、抗压强度、自由膨胀率、抗渗试验以及复合浆液配合比试验,可以得出如下结论:

(1) 在物理性能试验中,水固比对浆液的黏度和密度影响最大,水固比为 0.6 时,可注性较差;随着膨润土掺量的增大,浆液黏度和密度随之增大;合适的粉煤灰掺量有利于提高浆液的流动性,粉煤灰与膨胀剂需要掺量合适才能使浆液的性能达到最优;膨胀剂的掺量对浆液的密度和黏度影响不大。

(2) 在强度试验中,膨胀复合浆液结石体 28 d 的抗折强度都在 1.0 MPa 以上,抗压强度都在 3.0 MPa 以上,能满足注浆材料的防渗堵水要求;在自由膨胀率试验中,水固比和膨胀剂掺量对结果影响较大,整个膨胀过程在前 7 d 较为明显,在 14 d 基本达到稳定,后期膨胀值较小,对 14 d 的膨胀值通过正交分析可以得到,各因素对膨胀率的影响大小排序依次为:水固比>膨胀剂掺量>膨润土掺量>粉煤灰掺量;在结石体抗渗试验中,掺加膨胀剂和膨润土能显著降低浆液结石体的渗透系数,用来注浆防渗可以达到很好的防渗效果。

(3) 在设计了几种配合比中,注浆防渗膨胀复合浆液的最优配合比为:水固比 0.8,膨润土掺量 25%,粉煤灰掺量 30%,膨胀剂掺量 10%。

## 参 考 文 献:

- [1] 《岩土注浆理论与工程实例》协作组. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (Collaboration Group of Rock and Soil Grouting Theory and Engineering Examples. Rock and soil grouting theory and engineering examples[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [2] 孙子正, 李术才, 刘人太, 等. 软流塑地层注浆加固作用定量化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊1): 3385-3393. (SUN Zizheng, LI Shucai, LIU Rentai, et al. Quantitative research on grouting reinforcement of soft fluid-plastic stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Suppl1): 3385-3393. (in Chinese))
- [3] 张忠苗, 邹健, 何景愈, 等. 考虑压滤效应下饱和黏土压密注浆柱扩张理论[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(11): 1980-1984. (ZHANG Zhongmiao, ZOU Jian, HE Jingyu, et al. Cavity expansion theory of compaction grouting in saturated clay considering pressure filtration[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2011, 45(11): 1980-1984. (in Chinese))
- [4] 邹健, 张忠苗. 考虑压滤效应饱和黏土压密注浆球孔扩张理论[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(12): 119-123. (ZOU Jian, ZHANG Zhongmiao. Spherical cavity expansion theory of compaction grouting in saturated clay considering pressure filtration[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(12): 119-123. (in Chinese))
- [5] 袁进科, 陈礼仪. 普通硅酸盐水泥与硫铝酸盐水泥复配改性灌浆材料性能研究[J]. 混凝土, 2011(1): 128-130. (YUAN Jinke, CHEN Liyi. Performance research on the multienzyme system grouting material of portland cement and sulphoaluminate cement[J]. Concrete, 2011(1): 128-130. (in Chinese))

- [6] APPAH D, REICHETSEDER P. Selection and use of CaO-expanding cements[J]. *Energy, Exploration & Exploitation*, 2001, 19(6): 581-591.
- [7] LI P, LU W X, LONG Y Q, et al. Seepage analysis in a fractured rock mass: the upper reservoir of pushihe pumped-storage power station in China[J]. *Engineering Geology*, 2008, 97(1/3): 53-62.
- [8] CHOI W S, KANG B C, SHIN D C, et al. Experimental study on grouting materials of grout column method for reinforcement technology in groundwater-saturated mined cavity[J]. *Tunnel and Underground Space*, 2016, 26(5): 418-430.
- [9] 罗永忠. 水泥-粉煤灰浆液试验及工程应用[J]. *公路交通技术*, 2005(2): 26-29, 117. (LUO Yongzhong. Test of cement fly ash grout and its application[J]. *Technology of Highway and Transport*, 2005(2): 26-29, 117. (in Chinese))
- [10] 庞琼, 王士军, 谷艳昌, 等. 土石坝垂直防渗加固措施综述[J]. *水利水电工程学报*, 2014(4): 28-37. (PANG Qiong, WANG Shijun, GU Yanchang, et al. A review of vertical anti-seepage reinforcement measures for earth and rockfilled dam[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2014(4): 28-37. (in Chinese))
- [11] 张毅, 李伟, 张菁燕, 等. UEA膨胀剂对水泥基灌浆料性能的影响及机理分析[C]//第五届全国商品砂浆学术交流会论文集(5th NCCM). 南京: 中国硅酸盐学会房材分会, 中国建筑学会建筑材料分会, 中国硅酸盐学会水泥分会, 2013: 7. (ZHANG Yi, LI Wei, ZHANG Jingyan, et al. Study on the effect of UEA expansive agent on the performance of cement-based grouting mortar and mechanism analysis[C]//The Fifth Proceedings of the Commercial Mortar Academic Conference (5th NCCM). Nanjing: Room at the Chinese Academy of Silicate Materials, Architectural Society of China Building Materials Association, the Chinese Society of Silicate Cement Branch, 2013: 7. (in Chinese))
- [12] 史建峰. 膨润土的性质及其对水泥浆溶液的影响[J]. *山西建筑*, 2010, 36(8): 116-117. (SHI Jianfeng. The properties of bentonite and its influence on the cement slurry solution[J]. *Shanxi Architecture*, 2010, 36(8): 116-117. (in Chinese))
- [13] 杨红辉, 郝培文, 戴经梁. 掺膨胀剂水泥稳定碎石路用性能[J]. *交通运输工程学报*, 2006, 6(1): 48-51. (YANG Honghui, HAO Peiwen, DAI Jingliang. Road performance of cement-stabilized aggregate mixture with expansion agent[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2006, 6(1): 48-51. (in Chinese))

## Experimental study on physical and mechanical properties of expanded composite slurry

MA Bo<sup>1,2</sup>, LEI Jinsheng<sup>1,2</sup>, TU Baolin<sup>2</sup>, DAI Kang<sup>2</sup>, CHENG Shuang<sup>2</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** At present, ordinary Portland cement slurry is the common grouting reinforcement material in water conservancy engineering. In view of its poor fluidity, high drainage rate, low stone rate as well as its low strength and poor permeability performance problems, based on the preparation of different mixing ratios of cement-based expanded composite slurry, we adopted the single factor controlling variable method and the orthogonal experiment method to test the viscosity, density and mechanical performance of stone body. The experiment results reflect that adding fly ash could increase the workability and fluidity of slurry, and the bentonite could improve the stone rate of grouting and slurry stability. At the same time, bentonite also could reduce the drainage rate and slurry fluidity. The slurry mixed with bentonite and fly ash got improvement with its fluidity and stone rate, but the stone body strength was poor in the early stage. In the later stage, its strength was mainly supplemented by the hydration of fly ash. Cement slurry mixed with appropriate expansion agent had a great influence on the expansion of the stone body and could also improve the anti-permeability of the stone body. Consequently, reasonable selection and control of fly ash, bentonite and expansive agent can obviously improve the grouting effect.

**Key words:** grouting material; cement; fly ash; bentonite; expansive agent; anti-seepage reinforcement