

# 普通硅酸盐-硫铝酸盐复合水泥浆液流变特性试验

王 胜, 华 绪, 徐世桐, 汪靖扉

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

**摘要:**普通硅酸盐-硫铝酸盐复合水泥浆液在地质灾害快速治理工程中具有广阔的应用前景,但复合浆液的流变特性直接影响到应用效果。采用理论分析与试验相结合的方法对不同配合比的普通硅酸盐-硫铝酸盐复合水泥浆液的流变特性进行了研究。根据试验结果绘制了复合水泥浆液的剪切应力-剪切速率变化曲线;通过测定浆液的表现粘度随时间的变化情况分析了水泥浆液粘度的时变特性。试验结果表明,水灰比对复合水泥浆液的流型有较明显的影响,减水剂对浆液的流型无明显影响,但对浆液的流变参数的数值影响较大,研究结果对于工程应用具有一定的指导意义。

**关键词:**地质灾害治理;灌浆;普通硅酸盐-硫铝酸盐复合水泥浆液;流变特性;粘度时变性

中图分类号:P634.6 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2016)10-0063-05

**Rheological Characteristics of Portland-sulphur Aluminate Composite Cement Slurry/WANG Sheng, HUA Xu, XU Shi-tong, WANG Jing-fei** (State Key Laboratory of Geohazard Prevention & Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu Sicuan 610059, China)

**Abstract:** Portland-sulphur aluminate composite cement slurry has broad application prospect in rapid geological disaster management project, but the rheological properties directly affects the application effect. By combining theoretical analysis with test, the research on the rheological properties of portland-sulphur aluminate composite cement slurry with different mixing proportion was carried out. According to the test results, the curves of shear stress and shear rate of composite cement slurry were drawn; by measuring the time-dependent change of apparent viscosity of the slurry, the time-varying property of cement slurry viscosity was analyzed. The test results show that the water cement ratio has obvious influence on the flow pattern of composite cement slurry; water-reducing agent has no obvious rule to the flow pattern, but has great influence on the rheological parameters of the slurry.

**Key words:** geological disaster treatment; grouting; portland-sulphur aluminate composite cement slurry; theoretical properties; time-varying property of viscosity

## 0 引言

近年来,地质灾害越加频发,在地质灾害快速治理工程中,具有特殊性能的水泥基材料应用前景广阔<sup>[1-2]</sup>。在采用水泥浆液用于地灾治理灌浆工程中,浆液的流变性是灌浆材料配方设计的核心及安全施工的前提<sup>[3-5]</sup>。普通硅酸盐水泥相对于硫铝酸盐水泥来说其凝结时间长,早期强度也较低,易被孔内地下水冲蚀。添加外加剂的普通硅酸盐水泥虽然可以在一定程度上缩短其凝结时间,但在有大量地下水存在的情况下,凝结硬化效果和结石强度大大降低,影响了其应用效果。而硫铝酸盐水泥因其具有快硬、早强、收缩小、抗冻和抗渗性能好等优点,适于抢修工程、防渗及低温工程。但单独将硫铝酸盐

水泥用于地质灾害快速治理工程,其流变性、凝结时间以及结石强度等关键性能指标往往无法满足,并且也存在价格偏贵的问题。

复合化是改善水泥性能的有效途径<sup>[6-7]</sup>。各系列水泥和辅助性胶凝材料复合方面的研究和成功应用的经验已很多,而不同系列水泥之间的复合研究则起步较晚。前期研究成果表明,将普通硅酸盐水泥与硫铝酸盐水泥复合,不仅可以充分发挥各自的特点,而且还具有“水化协同效应”。主要表现为浆液快速凝结,初凝与终凝间隔很短,浆液在开始时流动性很好,到达某时间点后,突然凝结硬化,即具有“直角稠化”特点。在充分利用普通硅酸盐-硫铝酸盐复合水泥的水化协同效应基础上,进一步解决

收稿日期:2016-07-19; 修回日期:2016-09-11

基金项目:地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自由探索课题“硅酸盐-硫铝酸盐水泥水化协同效应与钻孔铸壁技术研究”(编号:SKLGP2015Z010);四川省教育厅重点项目“硅酸盐-硫铝酸盐水泥基钻孔铸壁材料研究”(编号:16ZA0099)

作者简介:王胜,男,土家族,1982年生,副教授,博士,研究方向为岩土钻掘工程,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,158588951@qq.com。

其流变性、凝结时间与结石强度之间的协调统一问题,成为解决地质灾害快速治理提供新的思路<sup>[8]</sup>。目前关于普通硅酸盐与硫铝酸盐水泥的研究尤其是对其流变性的专门研究甚少<sup>[9-11]</sup>。因此,根据相关问题的科学意义和工程需求,对普通硅酸盐-硫铝酸盐复合水泥浆液的流变特性开展试验研究是十分必要的。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

普通硅酸盐水泥(P. O. 42.5)选用华润水泥厂产品,以下简称P。硫铝酸盐水泥(R. SAC42.5)选用中泰硫铝酸盐水泥厂产品,以下简称R。减水剂(JSS)为成都理工大学钻掘工程材料实验室自主研发的高效减水剂,此减水剂具有减水率高、混凝土拌合物的流动性好等优点。试验表明此减水剂在加量为3‰时,其作用效果较好,因此本次试验直接选取减水剂加量为3‰。

### 1.2 试验仪器

此次试验使用的主要仪器有:ZNN-D6型电动六速旋转粘度计,规格为200 mL的量筒,精度为0.1 g的天平等。

### 1.3 试验方法

按照水泥浆液流变性的测量方法,在常温条件下,测量出不同转速下粘度计的读数。为了进行粘度时变特性研究,针对不同水灰比的水泥浆液,每隔一定的时间测量并记录一次。连续测量直至水泥浆液无法测量为止。每次测量前要用低速搅拌水泥浆液1 min,以防水泥浆液发生沉淀影响测量精度。根据已有的资料,复合水泥浆液比常规单一水泥浆液的凝结时间要短。所以试验时,要密切注意测量的时间间隔。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 流变模式

为了研究复合水泥浆液的流变特性,本次试验选取了普通硅酸盐-硫铝酸盐复合水泥浆液的配合比P:R为1:4、1:1、4:1。每个配合比均设置水灰比(W/C)为0.4、0.5、0.5+3‰JSS、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0。试验处理结果如图1所示。

从图1可以看出,无论在哪种配合比下,水泥浆液的剪切应力均随剪切速率的增大而增大。而且

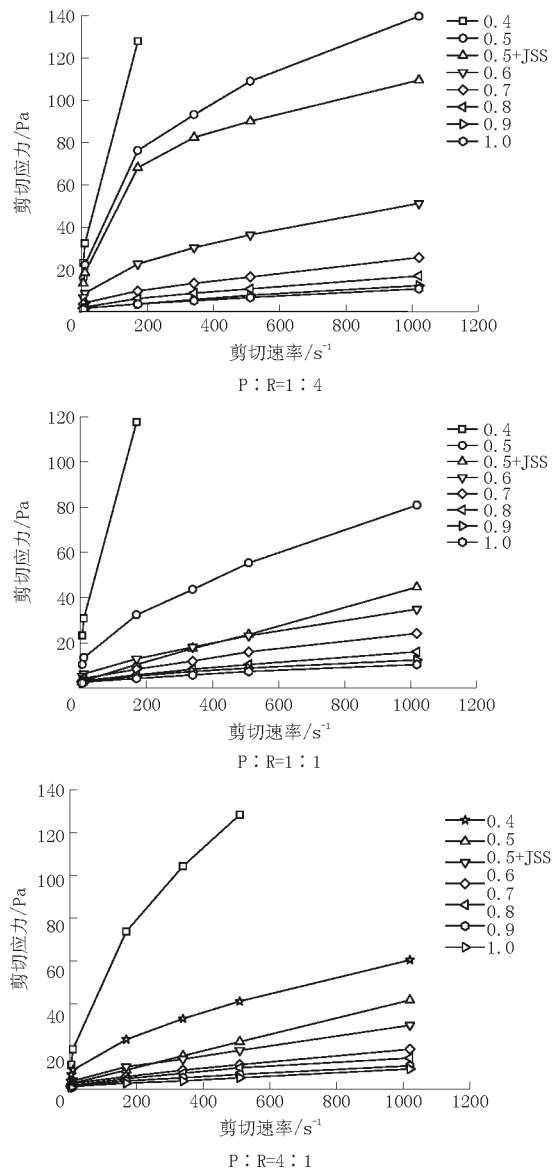


图1 复合水泥浆液流型图

几乎所有浆液的流型图均随水灰比的增大而更接近于线性形式。

普通硅酸盐-硫铝酸盐复合水泥浆液流变方程和所属流型见表1、表2、表3。

通过对上述水泥浆液的流型及流变模式分析,可以初步得到以下几方面认识。

对于复合水泥浆液而言,取用配合比P:R为4:1、1:1以及1:4三组比较有代表性的拟合结果。研究发现,配合比P:R为1:1时,水灰比为0.4和0.5时的水泥浆液幂律模式精度更高;而水灰比为0.6~1.0时的水泥浆液宾汉模式精度更高。在水灰比为0.5时,未加减水剂的浆液更适用于幂律模式,加减水剂后,水泥浆液更适用于宾汉模式。

表 1 复合水泥浆液流变方程和所属流型(配合比 P: R=1: 1)

水灰比	塑性粘度/(mPa·s)	动切力/Pa	流变方程	相关系数 R <sup>2</sup>	拟合流型	
0.4	558.33	22.51043	$\tau = 558.33\gamma + 22.51043$	0.99580	宾汉模式	
0.5	67.89	15.87713	$\tau = 67.89\gamma + 15.87713$	0.95405		
0.5 + JSS	40.9	2.82771	$\tau = 40.9\gamma + 2.82771$	0.99910		
0.6	28.79	6.7259	$\tau = 28.79\gamma + 6.7259$	0.97727		
0.7	20.32	4.18235	$\tau = 20.32\gamma + 4.18235$	0.98085		
0.8	12.89	3.15591	$\tau = 12.89\gamma + 3.15591$	0.98572		
0.9	9.86	2.91698	$\tau = 9.86\gamma + 2.91698$	0.98756		
1.0	7.9	2.57037	$\tau = 7.9\gamma + 2.57037$	0.97445		
	稠度系数/(Pa·sn)	流性指数				
0.4	10.39884	0.47196	$\tau = 10.39884\gamma^{0.47196}$	0.99981		幂律模式
0.5	3.03521	0.46863	$\tau = 3.03521\gamma^{0.46863}$	0.98132		
0.5 + JSS	0.13373	0.83624	$\tau = 0.13373\gamma^{0.83624}$	0.98961		
0.6	1.15745	0.48449	$\tau = 1.15745\gamma^{0.48449}$	0.96014		
0.7	0.58379	0.53137	$\tau = 0.58379\gamma^{0.53137}$	0.96047		
0.8	0.54794	0.47749	$\tau = 0.54794\gamma^{0.47749}$	0.94112		
0.9	0.72608	0.40169	$\tau = 0.72608\gamma^{0.40169}$	0.97089		
1.0	0.69342	0.37808	$\tau = 0.69342\gamma^{0.37808}$	0.92398		

表 2 复合水泥浆液流变方程和所属流型(配合比 P: R=1: 4)

水灰比	塑性粘度/(mPa·s)	动切力/Pa	流变方程	相关系数 R <sup>2</sup>	拟合流型	
0.4	616.63	22.8204	$\tau = 616.63\gamma + 22.8204$	0.65456	宾汉模式	
0.5	116.78	35.80438	$\tau = 116.78\gamma + 35.80438$	0.81224		
0.5 + JSS	89.71	32.74655	$\tau = 89.71\gamma + 32.74655$	0.71813		
0.6	42.57	11.28078	$\tau = 42.57\gamma + 11.28078$	0.92049		
0.7	21.24	4.80338	$\tau = 21.24\gamma + 4.80338$	0.9735		
0.8	14.74	2.60645	$\tau = 14.74\gamma + 2.60645$	0.98961		
0.9	10.92	1.5336	$\tau = 10.92\gamma + 1.5336$	0.98617		
1.0	9.29	1.58114	$\tau = 9.29\gamma + 1.58114$	0.98254		
	稠度系数/(Pa·sn)	流性指数				
0.4	10.33027	0.48952	$\tau = 10.33027\gamma^{0.48952}$	1		幂律模式
0.5	10.19059	0.37932	$\tau = 10.19059\gamma^{0.37932}$	0.99577		
0.5 + JSS	10.59373	0.34269	$\tau = 10.59373\gamma^{0.34269}$	0.97879		
0.6	2.62816	0.42454	$\tau = 2.62816\gamma^{0.42454}$	0.99237		
0.7	0.81961	0.48962	$\tau = 0.81961\gamma^{0.48962}$	0.96753		
0.8	0.37044	0.5472	$\tau = 0.37044\gamma^{0.5472}$	0.98897		
0.9	0.1385	0.6447	$\tau = 0.1385\gamma^{0.6447}$	0.98019		
1.0	0.18119	0.58447	$\tau = 0.18119\gamma^{0.58447}$	0.97461		

表 3 复合水泥浆液流变方程和所属流型(配合比 P: R=4: 1)

水灰比	塑性粘度/(mPa·s)	动切力/Pa	流变方程	相关系数 R <sup>2</sup>	拟合流型	
0.4	231.2	19.18256	$\tau = 231.2\gamma + 19.18256$	0.94486	宾汉模式	
0.5	51.87	10.89886	$\tau = 51.87\gamma + 10.89886$	0.95149		
0.5 + JSS	38.81	1.92568	$\tau = 38.81\gamma + 1.92568$	0.99939		
0.6	25.66	4.22461	$\tau = 25.66\gamma + 4.22461$	0.98293		
0.7	15.91	2.63014	$\tau = 15.91\gamma + 2.63014$	0.99037		
0.8	13	1.92583	$\tau = 13\gamma + 1.92583$	0.95974		
0.9	9.75	1.2526	$\tau = 9.75\gamma + 1.2526$	0.96787		
1.0	8.25	0.83114	$\tau = 8.25\gamma + 0.83114$	0.9737		
	稠度系数/(Pa·sn)	流性指数				
0.4	5.40132	0.50789	$\tau = 5.40132\gamma^{0.50789}$	0.99975		幂律模式
0.5	1.88804	0.49635	$\tau = 1.88804\gamma^{0.49635}$	0.98844		
0.5 + JSS	0.09229	0.88029	$\tau = 0.09229\gamma^{0.88029}$	0.99438		
0.6	0.46744	0.59389	$\tau = 0.46744\gamma^{0.59389}$	0.97516		
0.7	0.26049	0.61023	$\tau = 0.26049\gamma^{0.61023}$	0.96829		
0.8	0.23791	0.59064	$\tau = 0.23791\gamma^{0.59064}$	0.99247		
0.9	0.13956	0.62435	$\tau = 0.13956\gamma^{0.62435}$	0.99433		
1.0	0.04672	0.75943	$\tau = 0.04672\gamma^{0.75943}$	0.97701		

配合比 P: R 为 1: 4 时,水灰比为 0.4、0.5、0.6 时的水泥浆液幂律模式精度更高;当水灰比为 0.7 ~ 1.0 时,水泥浆液宾汉模式精度更高,此时浆液更适用于宾汉模式。而加减水剂后,浆液幂律模式精度更高,未改变流变模式。但浆液的流变参数值的改变较前几组发生了较大变化,其塑性粘度、动切力和流性指数均减小,稠度系数增大。

当配合比 P: R 为 4: 1 时,水灰比为 0.6、0.7 时的水泥浆液宾汉模式精度更高,而水灰比为 0.4、0.5、0.8、0.9 和 1.0 时幂律模式精度更高;但从整体来看,水灰比 0.4 ~ 1.0 的所有水泥浆液在幂律模式下的相关系数都高于 0.95。未加减水剂的浆液更适用于幂律模式,外加减水剂后,水泥浆液更适用于宾汉模式。

## 2.2 复合浆液粘度的时变性

水泥浆液粘度的时变性是指浆液粘度随时间的变化而不断增大的特性。前人已经研究证明了水泥基浆液的粘度存在时变性<sup>[12]</sup>,但对复合水泥浆液的粘度时变性研究较少。根据试验测得数据,对普通硅酸盐-硫铝酸盐复合水泥浆液的粘度时变性进行了模拟。为了便于比较,对 600 r/min 下的表观粘度时变性进行了分析。

### 2.2.1 水灰比对复合水泥浆液粘度时变特性的影响

对不同水灰比的水泥浆液的表观粘度随时间变化曲线来表征水泥浆液粘度时变性。水灰比对复合水泥浆液的粘度时变特性的影响如图 2 所示。

(1)从图 2(a)中可以看出,配合比 P: R 为 1: 4 时,随着时间的改变,不同水灰比下的复合水泥浆液表观粘度均随着时间的增大而增加。当水灰比为 0.7 和 0.8 时,复合浆液表观粘度的时变性曲线表现为指数函数形式;当水灰比为 0.9 和 1.0 时,复合浆液表观粘度的时变性曲线图表现为对数函数形式。

(2)从图 2(b)中可以看出水灰比在 0.5 ~ 0.6 时,表观粘度的时变性表现为线性,即表观粘度随着时间的增大而成比例增加;但在水灰比为 0.7 及以上时,不同水灰比下的复合水泥浆液表观粘度的时变性表现为对数函数形式,即表观粘度随着时间的增大而增加,但增加的趋势在不断减小。

(3)从图 2(c)中可以看出,水灰比越大的复合水泥浆液,相同时刻下其表观粘度变化越小。但所有水灰比下的复合水泥浆液,其表观粘度的时变性

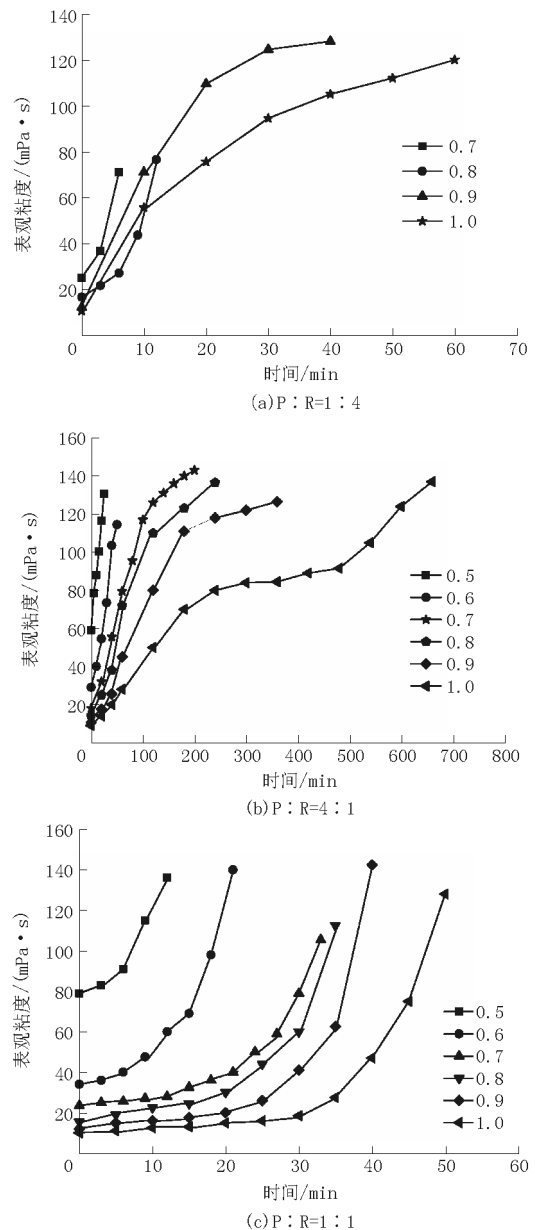


图 2 水灰比对复合水泥浆液粘度时变特性的影响

均表现为指数函数形式,特别是对水灰比 0.7 及以上的复合浆液,时变曲线表现出一定的“直角稠化”现象。且随着水灰比的增大,“直角稠化”现象更为显著。

### 2.2.2 减水剂对复合水泥浆液粘度时变特性的影响

减水剂对配合比 P: R 为 1: 1 和 4: 1 的复合水泥浆液粘度时变特性的影响如图 3 所示。

从图 3 可以看出,添加减水剂能显著降低复合水泥浆液的表观粘度,延长水泥浆液的凝结时间,但对原有浆液的粘度时变性趋势的影响不明显。其中,

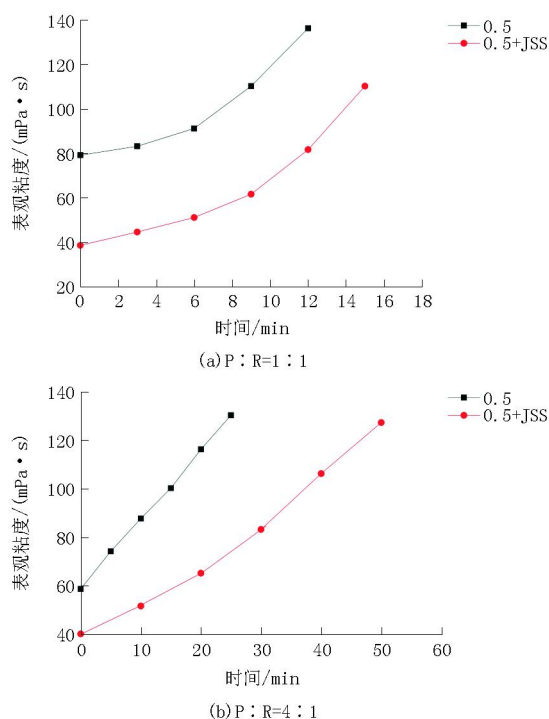


图3 减水剂对复合水泥浆液粘度时变特性的影响

图3(a)中无论是否添加减水剂,复合水泥浆液表观粘度的时变特性趋势大致相同,均呈现为指数函数形式;图3(b)中可以看出无论是否添加减水剂,水泥浆液表观粘度的时变特性趋势大致相同,且都近似呈现为线性关系。

### 3 结论

(1)外加减水剂会使复合水泥浆液宾汉模式精度更高,随水灰比的增大复合水泥浆液总体更倾向于宾汉模式。

(2)普通硅酸盐-硫铝酸盐复合水泥浆液体系

表现出了复合水泥浆液水化凝结速度加快,在配合比为1:4和1:1时普通硅酸盐-硫铝酸盐复合水泥浆液体系的凝结速度甚至快于相同试验条件下的硫铝酸盐水泥。当配合比P:R值越接近于1时,复合浆液的粘度时变性的“直角稠化”特点显著。

(3)添加减水剂对原有浆液粘度时变性趋势的影响不明显。

### 参考文献:

- [1] 叶青. 纳米复合水泥结构材料的研究与开发[J]. 建筑石膏与建筑材料, 2001, (11): 4-6.
- [2] 阮文军, 王文臣, 胡安兵. 新型水泥复合浆液的研制及其应用[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 212-216.
- [3] 陈娟, 李北星, 卢亦焱. 硅酸盐-硫铝酸盐水泥混合体系的试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(4): 121-124.
- [4] 崔素萍. 硅酸盐-硫铝酸盐复合体系水泥研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2005.
- [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.
- [6] 王复生, 关瑞芳, 秦晓娟, 等. 新拌水泥浆体流变性能及流变模型的探讨[J]. 硅酸盐通报, 2004, (6): 34-37.
- [7] 毕耀. 聚羧酸减水剂吸附特性及其影响水泥浆体流变性能机理研究[D]. 湖北武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [8] 王星华. 粘土-水泥浆流变特性及其影响因素研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 5(19): 43-48.
- [9] 李术才, 刘人太, 张庆松, 等. 基于黏度时变性的水泥-玻璃浆液扩散机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2415-2421.
- [10] 刘泉声, 卢超波, 刘滨, 等. 考虑温度及水化时间效应的水泥浆液流变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 3730-3740.
- [11] 程鹏达. 孔隙地层中粘性时变注浆浆液流动特性研究[D]. 上海: 上海大学, 2011.
- [12] 阮文军. 基于浆液粘度时变性的岩体裂隙注浆扩散模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2709-2712.