一种新型可控黏土复合膏浆在动水地层防渗中的应用

胡焕校，李忠诚，刘 猛

（中南大学 地球科学与信息物理学院，湖南 长沙 410083）

摘 要：[目的] 研究一种新型可控黏土复合膏浆在动水地层中的防渗应用，治理岩溶地区的水库堤坝渗漏以及大量架空结构的土(堆)石围堰的渗漏问题等。[方法] 采用试验的方法，研究掺入新型外加剂具有流动度低，凝结时间可控以及良好的抗水流冲释能力的复合膏浆在动水地层的防渗堵漏效果。[结果] 使用固化剂和速凝剂，其掺入量对膏浆的抗水流冲释能力、初凝时间以及流动度均有显著影响，从而可以通过固化剂和速凝剂掺入量的不同来有效的调节复合膏浆的物理力学性质，使其达到工程要求。[结论] 采用此种可控黏土复合膏浆处理含有强透水砂卵石的动水地层的渗漏问题，可以使渗漏地层的防渗能力有效地大幅度提高，处理效果显著。

关键词：黏土复合膏浆；动水；外加剂；防渗

文献标识码：B **文章编号**：1000-288X(2016)01-0179-05 **中图分类号**：P642

文献参数：胡焕校，李忠诚，刘猛. 一种新型可控黏土复合膏浆在动水地层防渗中的应用[J]. 水土保持通报，2016，36(1)：179-183. DOI：10. 13961/j. cnki. stbctb. 2016. 01. 031

Application of New Controllable Clay Composite Paste-slurry in Seepage-proofing of Strata with Flowing Water

HU Huanxiao, LI Zhongcheng, LIU Meng

(*School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha, Hu'nan* 410083, *China*)

Abstract: [Objective] In order to prevent the seepage problems in reservoir and cofferdams in lots of overhead structures, the paper try to use a new controllable clay composite paste in strata with following water. [Methods] An experiment was designed to study the effect of a new type of compound paste with a new admixture, which has low fluidity, controllable condensing time, good water resistance and water release, on the anti-leakage and sealing process in the soil strata with flowing water. [Results] The content of curing agent and quick condensing agent in the paste has a significant effect on its resistance to water flow, the initial condensing time and the flow rate. Adjusting the content of curing agent and quick condensing agent could effectively change the physical and mechanical properties of the composite paste, thus meet the engineering requirements. [Conclusion] This kind of controllable clay can be used to deal with the leakage problems in the dynamic water stratum with strong permeable sandy pebbles and effectively improve the seepage-proofing ability of the reservoir.

Keywords: **clay composite paste-slurry; flowing water; admixture; seepage-proofing**

目前，在很多的防渗加固等工程中，由于松软的透水岩土体如松散土层、全风化或强风化岩体、节理裂隙发育岩体、砂砾层等存在钻孔易塌孔，平常使用的灌浆技术难以起到作用导致垂向挤密抬动，灌浆容易漏浆串浆而导致耗浆量大，灌浆效果难以控制等工程技术难题[1]。尤其在动水作用下的灌浆浆液极易被水流冲释带走，既没有起到应有的防渗加固作用又造成了大量的浆材浪费。

膏浆灌浆技术是基于浆液特殊性的一种灌浆技术，通常是在传统的水泥浆液中掺入大量的黏土、粉煤灰、膨润土等掺合料，并且通过添加少量减水剂、速凝剂及早强剂等外加剂而构成的流动度小和低水灰比的膏状状态浆液。其基本特征是此种浆液的初始剪切屈服强度值可以克服其本身重力的影响，其主要性能是抗水流冲释性能和自堆积性能，可以用于节理裂隙开度较大的岩体或堆石体的灌浆工程[2]。

收稿日期：2014-10-08 **修回日期**：2015-01-26

第一作者：胡焕校(1968—)，男(汉族)，浙江省慈溪市人，教授，博士生导师，主要从事地质工程、土木工程等方面教学科研工作。E-mail：hhx@csu. edu. cn。

通讯作者：李忠诚(1989—)，男(汉族)，山东省济宁市人，硕士，主要从事地质工程、岩土工程、地质与勘探方面研究工作。E-mail：csulzc163@163. com。

加入黏土的复合类浆液具有良好的流变性和抗水稀释性,结石率高,塑性指数大。优质黏土粒径分布范围主要在3～12 μm,可灌性良好,凝胶时间可控,抗震性能良好。结石体渗透系数可以达到10^{-6} mm/s量级,掺入少量水泥后可使强度级别达到数个兆帕,抗冲蚀、抗渗、抗溶蚀研究成果可证明其耐久性可以满足一般工程的需求[3-14]。

本文通过利用水泥的固化和强度特性、优质黏土的良好性能、水玻璃系浆液黏度和屈服强度低的特点以及外加剂(减水剂、速凝剂和早强剂等)改良后的显著效果,在一定范围内调整膏浆的凝结过程和流变参数,以期研制出一种新型可控黏土复合膏浆用于防渗堵漏。

1 可控黏土复合膏浆的室内研究

1.1 复合膏浆材料选择

膏浆材料的性能试验采用就地取材、节约成本的原则,以四川江油龙凤水电站附近土料场的黏土,并对黏土材料进行了矿物成分、界限含水量、离子含量、酸碱度pH值、密度、颗粒度等室内土工试验。试验结果表明,黏土材料整体呈弱酸性,天然含水率在15%～28%,塑限指数大于15,液性指数为0.28～0.40,平均相对密度为2.72,主要成分均为多水高岭石($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O$),次要成分为石英($SiO_2$)。采用ICDD的$K$值定量相分析法,得出矿物含量为76.51%。其化学组成见表1。

表1 多水高岭石(埃洛石)化学组成

成分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	TiO_2	CaO	MgO	烧失量
含量/%	45.8	37.3	0.5	0.11	0.39	低微	低微	14.5

1.2 复合膏浆的可控机理分析

加入改性剂的目的主要是为了促进黏土水泥复合浆液的凝结,通过调整其配比,可使膏浆的凝胶时间在较大的范围内调整,并能提高复合膏浆浆液的抗剪切屈服强度、黏度、抗水冲释性能以及结石体力学性能等。通过研究黏土和水泥的化学组成成分,并对比类似的研究,外加剂采用A固化剂(PM)+B缓凝剂(采用水玻璃:$Na_2O \cdot nSiO_2$),改性剂加入黏土原浆后会发生一系列物理化学反应[15-16],改变了黏土颗粒表面电荷的特征,降低黏土颗粒间的相斥力,破坏黏土颗粒间的吸附力,并为水泥水化反应提供大量活性离子,激发与黏土原浆中的Na^+,K^+,Ca^{2+}进行离子交换,从而使得黏土胶团表面电流减小,并且胶团所吸附的双电层变薄,电解质浓度增大,颗粒趋于凝聚,减少了黏土原浆的析水率,改善原浆的稳定性能。其中部分水泥水化反应方程式如下:

$$3\,CaO \cdot SiO_2 + nH_2O \longrightarrow 2\,CaO \cdot SiO_2 \cdot (n-1)H_2O + Ca(OH)_2$$

$$3\,CaO \cdot Al_2O_3 + Ca(OH)_2 + nH_2O \longrightarrow 4\,CaO \cdot Al_2O_3 \cdot nH_2O$$

改性剂中的无机盐水解生成大量的SO_4^{2+},AlO_3^{3-}以及OH^-,而AlO_3^{3-}与水泥水化反应后生成的$Ca(OH)_2$溶解后的产生的Ca^{2+}发生反应,生成水化铝酸三钙,降低了浆液中Ca^{2+}的浓度,促进了水泥水化反应的速率;而水化铝酸三钙的结晶体变为后续反应生成物晶体生长的晶核,从而加快了各种水化反应产物的晶体生长,加快了水泥的水化反应速率,提高了固结体早期强度,也缩短了初凝时间。

1.3 复合膏浆的可控性研究

凝胶时间和流变参数是膏浆浆液的最基本也是最重要参数。本试验通过调节外加改性剂配和比和其掺入量,从而达到凝胶时间和流变参数在一定范围内的可控。

流变参数主要通过流动度来衡量确定,流动度的测试采用圆盘流动度测试法。试验设备:金属耐腐蚀截锥圆模,带刻度的玻璃板,尺寸为45 cm×45 cm,厚度0.5 cm,刮刀。试验方法:首先将玻璃板放在水平的桌面上,将金属耐腐蚀截锥圆模置于玻璃板中央,然后将制作好的浆液加到截锥圆模内,使用刮刀将截锥圆模顶部的浆液刮平,之后将截锥圆模垂直提起;等浆液在玻璃板上自由流动30 s后,读取玻璃板上浆液流淌后互相垂直两个方向的最大距离,取其平均值作为浆液的流动度。

凝胶时间又分为初凝时间和终凝时间,本次试验主要测试的是初凝时间。试验设备:水泥稠度凝结测定仪。试验方法:首先浆液试样在湿气养护箱中养护至加水后30 min,测定时,从湿气养护箱里取出试样放到试针下,降低试针和浆液净浆表面接触。拧紧螺丝1～2 s后,突然间放松,试针垂直自由的沉入浆液净浆;观察试针停止下沉或者释放试针30 s时指针的读数;临近初凝时间时每隔5 min测定1次,当试针下降至距底板4 mm±1 mm时,为浆液达到初凝状态;由浆液全部加入水中至初凝状态的时间即为浆液的初凝时间。

试验浆液将固化剂质量定为水泥用量质量的百分之一,然后通过调节速凝剂的添加量,在不同的水泥∶黏土∶水的配合比下得出其试验结果(如表 2 所示)。

表 2　新型可控黏土复合膏浆物理力学性能指标参数

编号	42.5# 水泥/g	黏土/g	水/ml	固化剂/g	速凝剂/g	流动度/mm	初凝时间/h	密度/(g·cm^{-1})
A_1	400	400	600	4	2.0	120	8.5	1.41
A_2					4.0	112	7.0	
A_3					6.0	106	5.8	
A_4					8.0	100	5.0	
A_5					10.0	95	4.5	
A_6					12.0	90	4.0	
B_1	500	500	500	5	2.5	90	4.5	1.53
B_2					5.0	82	3.6	
B_3					7.5	75	3.0	
B_4					10.0	70	2.5	
B_5					12.5	68	2.2	
B_6					15.0	65	2.0	
C_1	600	600	400	6	3.0	75	0.7	1.65
C_2					6.0	70	0.6	
C_3					9.0	67	0.55	
C_4					12.0	65	0.5	
C_5					15.0	65	0.5	
C_6					18.0	65	0.5	

分别作出从不同配合比下浆液流动度曲线图和不同配合比下浆液流动度曲线图。由图 1 可以看出当固化剂掺入量一定时,膏浆的流动度会随速凝剂掺入量的增加而减小;流动度随水灰比减少而减小,当水灰比减小到一定程度后,流动度曲线平缓,速凝剂掺入量的改变对膏浆流动度的影响很小。从图 2 可以得出当固化剂掺入量一定时,膏浆的初凝时间随速凝剂掺入量的增加而减小;初凝时间随水灰比的减少而减小,水灰比较大时,速凝剂掺入量对膏浆的初凝时间影响显著,当水灰比减小到一定程度时,初凝时间曲线平缓,此时速凝剂掺入量对膏浆初凝时间的影响变得很小。

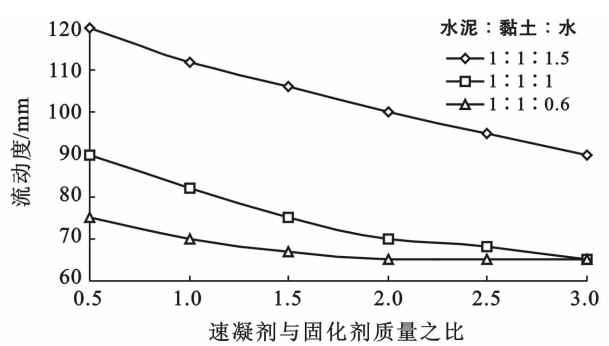


图 1　不同配合比下浆液流动度

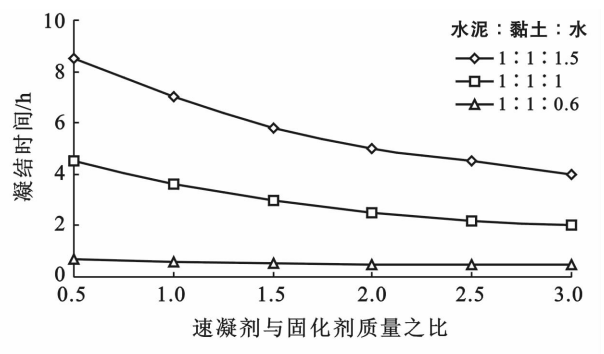


图 2　不同配合比下浆液凝结时间

1.4　复合膏浆的抗水流冲释性的研究

改性的黏土水泥复合膏浆中使用了大量的黏土掺合料,黏土的粘接作用以及抗渗透作用使得膏浆浆液可以自成整体,从而使水流难以进入膏浆的内部,膏浆里的水泥颗粒和黏土颗粒不会轻易产生离析。

为了得到此种复合膏浆的抗水流冲释的能力,在室内进行了不同流速情况下的模拟试验。试验设备:钢化玻璃和角钢组成的长×宽×高=2.5 m×0.4 m×0.3 m 的试验水槽,水泵,塑料水管,注浆泵,注浆管等。试验方法:用水泵调节水流的速度和流量,注浆泵采用一定合适的速率注入复合膏浆,通过调节水流速度,测得不同的浆液的冲释率,从而得到试验结果。

如图 3 所示，膏浆的抗水冲释性随水流速的提高而减小；在不同的配合比下，冲释能力随速凝剂掺入量的增加而得到提高；当水流速达到 1.2 m/s 时，膏浆冲释率为 30%以下；此结果表明加入改性剂的黏土复合膏浆具有良好的抗水冲释性，适合在动水条件下的堵漏加固处理工程中使用。

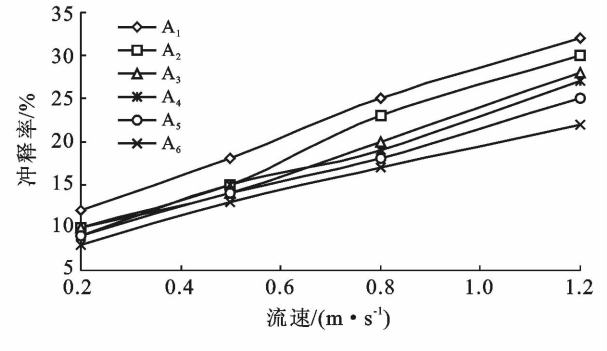


图 3 不同配合比下浆液抗冲释性能

2 工程应用

2.1 地质概况

龙凤水电站防洪堤上游右岸防护堤严重渗水的地层主要是：第四系全新统填土层(Q^{4ml})、河流冲洪积和湖相沉积成因的砂卵石层($Q^{4l+al+pl}$)，侏罗系(J)泥岩和砂岩互层。地层自上而下是：① 第四系全新统填土层(Q^{4ml})：主要为人工回填的砂卵石及漂石，渗透性较大，厚度为 2.9～8.2 m。② 第四系全新统河流冲洪积和湖相沉积成因的砂卵石层($Q^{4l+al+pl}$)：砂卵石层，含漂石、卵石，级配较好，上部透水性较小，底部漂卵石集中段透水性较大，厚度 5.6～12.2 m。③ 侏罗系(J)泥岩和砂岩互层：泥岩为红色，与其互层的砂岩为灰色；顶部为强风化，透水性小，厚度一般为 0.9～2.2 m，下部为中风化，勘察未揭穿。

但由于人为原因如采砂、淘金的掏挖堆积等，右岸上游局部防护堤砂卵石层出现架空严重的现象，堤内外水力联系优良，透水性较强烈，渗漏量大。

2.2 工程现场试验

水电站防洪堤上游右岸堤基部分架空严重，漂石组成多并且大(最大直径达到 50 cm 以上)，河堤内外侧水位落差较大，渗径短，在本次试验前先后进行过单管旋喷、双管旋喷、三管旋喷、压密式排水控制性灌浆、旋喷双液灌浆等施工方法进行处理，但因灌注浆液无法在渗透途径上有效填充透水孔隙以及动水冲蚀原因达不到预期的防渗效果。

根据堤基内漂卵石地层的强透水性，结合膏浆具有粘时变的性质及浆液在灌浆压力下可以快速失水而胶凝性质，可有效控制浆液在扩散途径上抗冲蚀的能力；通过分步、自下而上分段、控制压力和注入量灌浆，形成连续且有效防水防渗幕体。为了验证可控黏土复合膏浆灌浆工艺在龙凤水电站闸坝右岸防护堤内透水砂卵石层的防渗处理效果，进行本次灌浆试验。

(1) 试验设备：履带式潜孔钻机、膏浆制浆机、搅拌桶、膏浆注浆泵、长轴泵、潜水泵等。

(2) 试验材料：黏土、水泥、水、速凝剂以及外加剂等。

(3) 试验方案：按照孔距 2.5 m，排距 0.8 m，钻取 10 个试验孔进行灌浆试验。

(4) 试验过程：a. 试验前准备；b. 钻孔定位；c. 固定相关机具；d. 钻机跟管钻进成孔；e. 进行注浆管的安装；f. 起拔跟进的套管；g. 泵机就位后灌浆开始；h. 自下而上分段灌浆至预定高程；i. 终孔段灌浆过程结束；j. 用浓浆灌浆封孔；k. 相关孔资料整理。

为了检测本次灌浆试验的效果，进行了相关注水试验，表 3 为 7 d 检查孔注水试验结果。

表 3 工程现场注水试验结果

孔号	试验孔径/mm	试验孔深/m	试验段长/m	地下水位/m	流量/(L·min^{-1})	试验结果/(cm·s^{-1})	K 值折算的透水率/Lu
ZK_1	75	1.6～5.9	4.3	4.06	0.16	1.30×10^{-5}	1
ZK_1	75	6.1～10.35	4.25	3.95	0.74	5.80×10^{-5}	4.5
ZK_2	89	10.05～13.76	3.71	4.36	1.56	1.10×10^{-4}	8.5
ZK_3	75	2.6～6.06	3.46	0.84	0.13	5.14×10^{-5}	4
ZK_4	110	2.2～6.0	3.8	4.42	1.0	6.90×10^{-5}	5.3
ZK_4	110	6.2～10.7	4.5	4.67	0.40	2.23×10^{-5}	1.7
ZK_5	89	10.5～14.0	3.5	4.32	0.2	1.31×10^{-5}	1

2.3 试验小结

(1) 试验段分别作了 7 d 检查孔注水试验，注水试验结果都可以满足透水率 $q\leqslant10$ Lu 的防渗要求。本次注水试验结果验证了本次灌浆试验设计孔距、排距、灌浆压力、浆液配比等工艺参数和灌浆材料可以满足该堤段地层的防渗要求。

(2) 根据现场的试验研究结果,并且通过灌浆孔距、排距以及浆液充填量和孔隙率相关计算,可推断出防渗帷幕有效厚度大于 1.2 m,形成了一道防渗效果良好的帷幕墙体。

(3) 对于帷幕体寿命的讨论:黏土是一种惰性物质,在地球表面遭受水流长久的渗透冲刷及风化作用而存在,且由水泥、黏土和固化剂组成的复合膏浆,通过自然条件下养护 28 d 后,浆材结石的强度大于 2 MPa,在压滤条件下则远超 3 MPa,比黏土自身的抗冲蚀、抗渗透能力高很多,所以其寿命主要取决于水泥、帷幕体厚度以及原始地层的挤密程度、帷幕体的渗透系数等,复合膏浆帷幕体寿命会高于纯水泥浆液在一般地层形成的帷幕体的寿命。

3　结 论

(1) 通过工程现场试验表明,采用此种可控黏土复合膏浆处理含有强透水砂卵石的动水地层的渗漏问题,可以使渗漏地层的防渗能力有效地大幅度提高,处理效果显著,并且由于和普通水泥膏浆相比,黏土复合膏浆掺入了大量的黏土可以显著降低浆材的成本,可以在水土流失严重的类似工程中推广应用。

(2) 通过现场试验以及结合室内试验可知,使用固化剂和速凝剂,其掺入量对膏浆的抗水流冲释能力、初凝时间以及流动度均有显著影响,从而可以通过固化剂和速凝剂掺入量的不同来有效的调节复合膏浆的物理力学性质,使其达到工程要求。

(3) 复合膏浆材料通过注浆泵的外部压力作用注入岩土的裂隙或孔隙中,一般情况下,压力越大,注入的浆液越多,扩散距离也就越远,对应的防渗堵漏效果也就越好。但是由于改性膏浆的凝结时间短,早期强度上升快,流动度很低,对膏浆的扩散距离影响较大,相关因素的理论研究还未成熟,其理论研究尚有待加强,以便以后可以更好的指导实际工程。

[参 考 文 献]

[1] 张贵金,许毓才,陈安重,等.一种适合松软地层高效控制灌浆的新工法:自下而上、浆体封闭、高压脉动灌浆[J].水利水电技术,2012(3):38-41.

[2] 符平,张金接,赵卫全,等.速凝膏浆技术研究与应用[J].水利水电技术,2005(1):63-65.

[3] 王星华.黏土固化浆液在地下工程中的应用[M].北京:中国铁路出版社,1998.

[4] 张庆松,韩伟伟,李术才,等.灰岩角砾岩破碎带涌水综合注浆治理[J].岩石力学与工程学报,2012,31(12):2412-2419.

[5] 邝健政,旮月稳,王杰,等.岩土注浆理论与工程实例[M].北京:科学出版社,2001.

[6] Delage P, Cui Y J, Tang A M. Clays in radioactive waste disposal[J]. 岩石力学与岩土工程学报:英文版,2010,2(2):111-123.

[7] 连国经,王雷.粘土固化浆液在强透水层中防渗试验[J].东北水利水电,2006(9):62-63.

[8] 孙斌堂.新型黏土固化浆液研制及其工程防渗应用[D].南京:南京大学,2005.

[9] 勾攀峰,张义顺."水泥—黏土—粉煤灰—生石灰"固化浆液性能试验[J].煤炭学报,2007,27(2):148-151.

[10] 刘健,刘人太,张霄,等.水泥浆液裂隙注浆扩散规律模型试验与数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2012,31(12):2445-2552.

[11] 陈永贵.黏土固化注浆帷幕对渗滤液的阻渗机理与环境效应[D].长沙:中南大学,2004.

[12] 何忠明.裂隙岩体复合防渗堵水浆液试验及作用机理研究[D].长沙:中南大学,2007.

[13] 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.

[14] 李术才,张霄,张庆松,等.地下工程涌突水注浆止水浆液扩散机制和封堵方法研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(12):2377-2396.

[15] 倪宏革,孙峰华,杨秀竹,等.采用黏土固化浆液进行岩溶路基注浆加固试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(7):1242-1247.

[16] 李慎刚,赵文,杜嘉鸿,等.水玻璃注浆材料的耐久性分析[C]//2009 年地基基础工程与锚固注浆技术研讨会论文集.北京:中国水利水电出版社,2009.