K^+与PVA协同作用对膨胀土水化膨胀的抑制作用

于进庆[1]，胡瑞林[1]，尚海敏[1]，崔芳鹏[1]，杨明亮[2]

（1. 中国科学院地质与地球物理研究所工程地质力学重点实验室，北京 100029；2. 中建铁路建设有限公司，北京 100037）

摘 要：从晶层膨胀与渗透膨胀的微观角度分析了膨胀土的水化膨胀机理，在此基础上提出了以抑制水化膨胀和减少环境负担为目的的K^+与聚乙烯醇（PVA）合成剂。通过自由膨胀率试验、颗分试验与水化崩解试验证实K^+与PVA能产生协同抑制作用，可有效降低膨胀土的自由膨胀率、改善其粒度成分并提高其水稳性，而0.6%的PVA溶液与7% KCl溶液组合被认为是一种经济合理的配比选择。

关键词：晶层膨胀；渗透膨胀；PVA；K^+；协同作用

中图分类号：TU443 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－4548(2008)06－0900－06

作者简介：于进庆(1981－)，男，山东海阳人，硕士研究生，现主要从事膨胀土化学改良研究。E-mail: yujq01@163.com。

Synergistic reaction of K^+ and pllyvinyl alcohol on restraing swelling and hydrating behavior of expansive soil

YU Jin-qing[1]，HU Rui-lin[1]，SHANG Hai-min[1]，CUI Fang-peng[1]，YANG Ming-liang[2]

（1. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2.China Construction Railway Construction Ltd., Beijing 100037, China）

Abstract: K^+ and pllyvinyl alcohol were choosen as the inhibition reagent on the hydrating and swelling behavior of expansive soil on the basis of the studies on crystalline swelling and osmosis swelling. Synergistic reaction of K^+ and pllyvinyl alcohol which were thought friendly to the environment was proved by a series of tests. It would reduce the free swelling ratio, improve the granularity ingredient and enhance the stability in water. The composition of KCI solution of 7% with pllyvinyl alcohol of 0.6% was regarded as a reasonable proportion.

Key words: crystalline swelling; osmosis swelling; pllyvinyl alcohol; K^+; synergistic reaction

0 引 言

膨胀土是一种富含膨胀性黏土矿物且随环境的干湿变化而具有明显湿胀干缩特性的黏土，全球每年因膨胀土的工程问题而造成的经济损失巨大[1]，研究膨胀土水化、膨胀和分散的抑制作用在路基建设、石油钻探及环境治理中有着积极的理论和实际意义。从早期汤普森方法的石灰、水泥到现阶段有机高分子材料的树脂、纤维、生物酶等，人类对膨胀土改性研究的探索从未停止过，而理论上的不成熟、不完善加上经济、环保、地域等因素的限制使得这一探索之路显得尤为漫长[2]。

长期以来，由于K^+具有常见阳离子中（Na^+，Ca^{2+}，Mg^{2+}等）最低的水化能而一直被视为最佳水化膨胀抑制剂[3]，但其应用前提是已经水化膨胀的黏土，因而其单独作用的效果受到了限制[4]；聚乙烯醇（PVA）在抑制水化膨胀方面的研究鲜有报道，但被发现能与亲水性岩石表面形成氢健吸附[5]，相对于亲水性更强的膨胀性黏土理论上讲应有更好的溶合能力，且PVA能与层状黏土吸附的阳离子形成复杂的复合物提高其耐水性[6]。岩土工程化学的发展表明一种化学物质的单独作用已很难满足岩土工程的需要，多种物质的协同作用通常能达到更好的效果[7]。为此，笔者尝试合成KCl与PVA的混合溶液对膨胀土进行改性处理，并根据其水化膨胀特性对改性前后的土样进行了一系列试验加以验证，以期对膨胀土地区的岩土工程建设有一定的借鉴和指导意义。

1 理论依据

1.1 膨胀土的水化膨胀机理

在膨胀土中，水分子同时存在于黏土晶层之间（内表面）和黏土颗粒之间（外表面）。Norrish[8]与Madsen[9]

基金项目：“十一五”国家科技支撑资助项目（2006BACo4B02）；国家重点基础研究发展规划（973项目）（2002CB412702）
收稿日期：2007－09－24

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

等学者将黏土水化膨胀分为两个阶段：晶层膨胀和渗透膨胀。晶层膨胀主要是由膨胀土中可交换阳离子的水化引起的：在完全干燥的膨胀土中，可交换阳离子位于晶层表面；随着环境中水分子的增加，层间阳离子发生水化，层间水的含量从零增加到几个分子层，晶层间距随水分子层数的增加而阶梯性增大[10-12]（如图 1）。

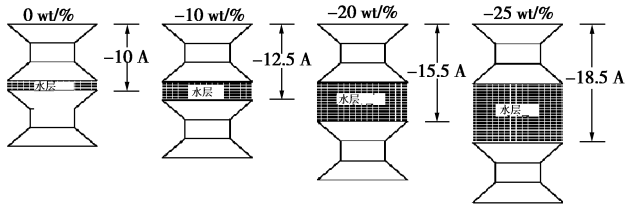


图 1 随含水率增加蒙脱石晶层膨胀示意图

Fig. 1 Crystalline swelling of montmorillonite with an increase of water content

当层间阳离子充分水化并从黏土表面脱离形成扩散双电层时，晶层膨胀结束，渗透膨胀开始。黏土表面与孔隙水之间的高浓度梯度使得黏土表面存在的高负电荷势能是渗透膨胀的驱动力，从而引起水分子向晶层之间进一步扩散，黏土晶层间距急剧增大，直至完全分散[3]。渗透膨胀引起的体积膨胀比晶层膨胀要大的多，二者可相差 20 多倍[10, 13]（如图 2）。

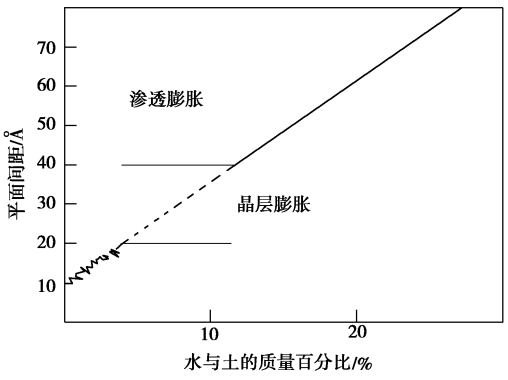


图 2 晶层膨胀与渗透膨胀

Fig. 2 Crystalline swelling and osmosis swelling

1.2　水化膨胀的抑制原理

膨胀土水化膨胀的原因是黏土晶层间黏聚力的衰减和晶层间距的进一步扩大，因此抑制其水化膨胀应从抑制晶层膨胀和渗透膨胀两方面考虑。

（1）晶层膨胀的抑制

Boek 等[12]运用 MC 模型对不同蒙脱土晶层膨胀过程的研究表明在相同含水率下 K-MMT 的晶层间距明显小于 Li-MMT 和 Na-MMT，且 Na^+，Li^+一旦充分水化即离开黏土表面形成扩散双电层，而 K^+吸附水化后仍然吸附于黏土表面。Karaborni[10]对 Na-MMT 水化进行了 MC 和 MD 模拟研究，认为蒙脱土的水化膨胀是由水分子两种状态的竞争平衡决定的：一种是偶极性水分子的—H 与硅氧四面体底面裸露的—O—形成氢健，另一种是水分子进入晶层的六角形网孔与铝氧八面体的—OH 形成氢健；当水分子的吸附完全倾向于一种作用时，膨胀达到平衡。K^+半径（0.133 nm）因与黏土晶体的六角形网孔半径（0.13 nm）相当而能够“嵌入”其中从而阻止了水分子与铝氧八面体的结合，使膨胀较快达到平衡，这也从另一方面解释了 Boek 模拟中“K^+吸附水后仍然吸附于黏土表面”的现象。

（2）渗透膨胀的抑制

杨红等[14]认为线形高分子稀溶液在固－液界面吸附时，孤立大分子可形成单层吸附；高分子成膜阻止水向黏土内部的渗入，降低黏土表面负电荷势，既可抑制黏土表面水化又可以增加黏土黏聚力且过程不可逆。聚乙烯醇（PVA）结构上可以看作在交替相隔的碳原子上带有羟基的多元醇，同时具有亲水基、疏水基两种官能基团。作为一种界面活性物质，由于其良好的成膜性、乳化性对多孔、亲水表面有极强的溶合能力，甚至岩石表面都可与 PVA 重复单元上极性极强的羟基可形成氢键[5, 15]。相对于多孔性、亲水性更强的膨胀土，理论上 PVA 应该有更好的溶合能力，而 PVA 的高分子一旦成膜即可以阻止水向黏土内部的进一步渗透即抑制渗透膨胀。

协同作用是医药、化工领域的一个专业术语，指两种或两种以上药物的协作作用比一种药物单独使用的作用更大、甚至高于几种药物单独作用之和。既然 K^+被认为可以抑制晶层膨胀而 PVA 对抑制渗透膨胀有一定作用，那么二者能否产生协同作用从而抑制膨胀土的水化膨胀就成为研究重点。

2　试验方案

为探索 K^+与 PVA 共同作用的效果，分别将不同浓度的 KCl 溶液、PVA 溶液单独作用对膨胀土水化膨胀的抑制效果与二者共同作用的抑制效果进行对比，并通过以下试验加以验证：

（1）自由膨胀率试验

取风干土样 30 g 分别在相同质量的水中、KCl 溶液（1%～11%）、PVA 溶液（0.1%～1%）及 KCl 与 PVA 混合液（试验用 0.5%，0.6%的 PVA 溶液分别与 1%～11%的 KCl 溶液形成混合液）中浸泡 24 h 后，在 60℃条件下烘干，其余步骤按《岩土工程试验监测手册》[16]进行，测定土经不同浓度不同介质浸泡后的自由膨胀率。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

（2）颗粒分析试验

将风干土样在水中、7%KCl 溶液、0.6%PVA 溶液及 7%KCl 与 0.6%PVA 的混合溶液中分别浸泡 12 h，其余步骤按照《岩土工程试验监测手册》用重力沉降法测定土经不同浓度不同介质浸泡后粒度成分的变化。

（3）崩解性试验

土的崩解性在有关文献[17-18]中都有所论述，但相应的试验规范却鲜有提及。试验中先将风干土按其天然含水率闷料均匀，在轻型击实筒中制作一组（12 块）试样（直径 6 cm，高 2 cm），于 110℃条件下烘干 24 h。试验在李守定博士研制的岩石静态崩解过程仪[19]中进行，测定试样在水中、7%KCl 溶液中、0.6%PVA 溶液中以及 7%KCl 与 0.6%PVA 混合溶液中的崩解时间、崩解速度、崩解特征，并测定残留在孔径 5 mm 筛上土样的烘干质量。

试验用土取自云南蒙新高速公路沿线两侧灰白色黏土，其天然含水率 w=27.1%，塑限 w_p=32.5%，液限 w_l=66%；北京化工厂提供的分析纯氯化钾 500 g，北京益利精细化学品有限公司提供的聚乙烯醇 500 g，平均聚合度 1750±50。配制 KCl 与 PVA 的混合溶液时，先将定量的 KCl 溶解而后加入 PVA 絮状粉丝缓慢加热溶解，整个过程需要不断搅拌。

3 试验结果分析

3.1 自由膨胀率变化

自由膨胀率表明土在无结构力影响下的膨胀特性，反映了土膨胀的可能趋势。

PVA 溶液的浓度对膨胀土自由膨胀率的影响见图 3。原始土样的自由膨胀率为 80%，随着 PVA 浓度的增大，膨胀土的自由膨胀率呈逐渐降低的趋势（见表 1）；自由膨胀率曲线斜率在 PVA 浓度为 0.6%处发生明显转折，随着 PVA 浓度的增加曲线趋于平缓：PVA 浓度从 0.6%增至 1%，自由膨胀率仅从 61%降至 58%，可以认为 0.6%的 PVA 浓度是实际应用中的一个理想的性价比选择点。

KCl 溶液浓度及其与 PVA 协同作用对自由膨胀率的影响见图 4。从图 4 可看出随着 KCl 溶液浓度增加膨胀土自由膨胀率也呈降低的趋势，但这种趋势逐渐趋于平缓；经 11%KCl 溶液处理过的土样自由膨胀率为 47%。KCl 与 PVA 溶液的协同作用对膨胀土的水化膨胀抑制作用明显（见表 2 所示）： 0.5%PVA 与 0.6% PVA 溶液处理过的土样自由膨胀率仅仅相差 3%，而在 7%KCl 溶液协同作用下，二者的自由膨胀率差可达 11%；0.6%PVA 溶液与 11%的 KCl 溶液协同作用下土样自由膨胀率仅为 31%，已经低于弱膨胀土的下限 40%。

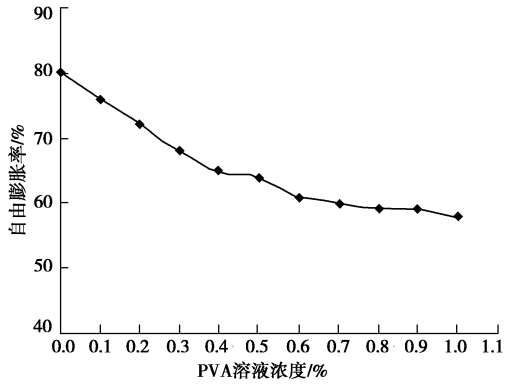


图 3 PVA 溶液浓度对自由膨胀率的影响

Fig. 3 Influence of content of PVA on free swelling ratio of the expansive soil

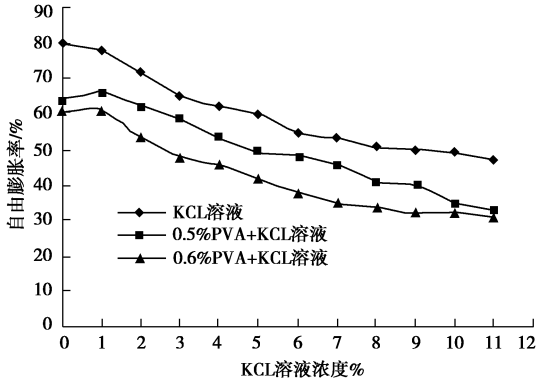


图 4 KCl 溶液浓度及其与 PVA 协同作用对自由膨胀率的影响

Fig. 4 Influence of content of KCl and synergistic reaction of K^+ and PVA on free swelling ratio of the expansive soil

从试验结果可以看出，KCl 与 PVA 的协同作用对土样自由膨胀率的影响要远远高于二者的单独作用。PVA 作为一种大分子材料虽能有效抑制渗透膨胀，但由于自身体积较大经黏土吸附后仍然占据较大的晶层空间，因此对自由膨胀率的影响并不显著；而对二者协同作用的解释是 PVA 能促进 K^+的晶层吸附，同时抑制了晶层膨胀与渗透膨胀，从而大大降低了土样的自由膨胀率。从表 2 可以看出，7%KCl 溶液与 0.6% PVA 溶液是一种较为经济实用的配比组合。

表 1 膨胀土在不同浓度的 PVA 溶液中的自由膨胀率

Table1 Free swelling ratio of the expansive soil in PVA solution with different content

PVA 溶液浓度/%	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
自由膨胀率/%	80	76	72	68	65	64	61	60	59	59	58

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2 膨胀土在不同浓度组合的溶液中的自由膨胀率

Table 2 Free swelling ratio of the expansive soil in different solutions

PVA 溶液浓度/%	KCl 溶液浓/%											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	80	78	72	65	65	60	55	53	51	50	49	47
0.5	64	66	62	59	54	49	48	46	41	40	35	33
0.6	61	61	54	48	46	42	38	35	34	32	32	31

3.2　粒度分析

就一般水化膨胀规律而言，水化是本质，而分散和膨胀是其外部的宏观表现，直接测定黏土颗粒的粒度变化是判断水化作用更有效更合理的手段[3]。

图 5 是试验测得经不同溶液处理过的土样颗粒累积分布图，经整理可得土样各粒组成分的分布图 6。

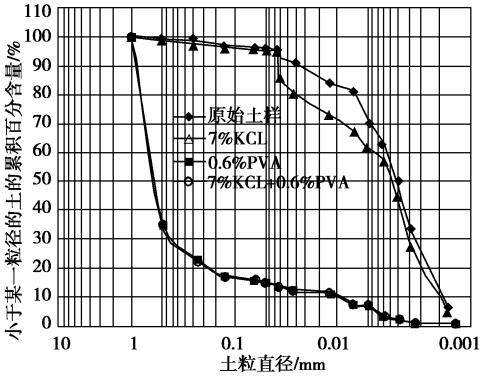


图 5 不同溶液中土样粒度累积百分含量

Fig. 5 Accumulative distrubution of expansive soil in different solutions

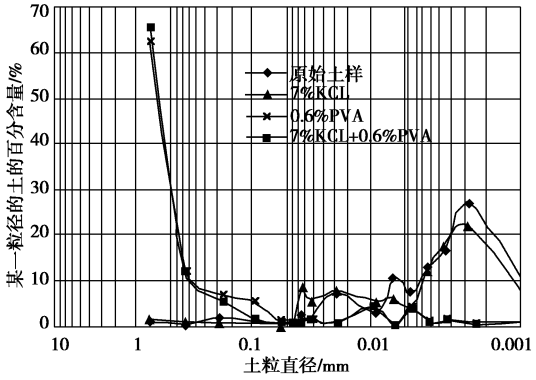


图 6 不同溶液中的土样粒度分布曲线

Fig. 6 Size distribution of expansive soil in different solutions

从图 5，6 可以看出：经 7%KCl 溶液处理过的土样 0.075 mm 以下部分的颗粒团聚增大，原始土样在 0.003 mm，0.01 mm 处的峰值含量均有降低（分别降低 4.54%、4.68%），而在 0.0625～0.074 mm 出现新的峰值（增量为 9.04%），0.075 mm 以下部分颗粒所占的比重由原始土样的 95.5%迅速降低至 14.34%，而 0.075 mm 以上土颗粒所占比重骤然上升，特别是 10～20 mm 的颗粒比重由原始土样的 3.2%骤升至 62.93%；7%KCl 与 0.6%PVA 溶液共同作用与 0.6%溶液单独作用对粒度成分的影响相差无几，从图 5，6 可以看出二者的粒度分布曲线几乎重合。

可见，高分子化合物 PVA 与无机电解质 KCl 对黏土颗粒水化分散的抑制作用有明显不同：K^+可压缩黏粒双电层变薄，通过聚沉作用使颗粒聚集，但双电层的压缩变化有限且颗粒间通过较弱电荷作用力联结，因此 KCl 溶液对粒度成分的影响主要体现在细颗粒的变化上；PVA 溶液可通过大分子的絮凝作用使颗粒聚集在一起，并在黏土层间及表面形成氢健，这种影响体现在整个粒度成分的变化上；由于 PVA 分子这种对粒度成分的决定性影响，使其与 KCl 溶液共同作用时 K^+对粒度成分本来就较弱的影响作用更是几乎无从体现。

3.3　崩解性的变化

崩解性体现了土在干湿变化条件下的水稳性。黏土浸水后，由于水进入孔隙或裂隙中情况不平衡，从而引起粒间扩散层增厚的速度不平衡，导致粒间斥力超过引力的情况也不平衡，故产生应力集中，使土体沿着斥力超过吸力最大的面崩落[18]。表 3 是本次崩解试验的结果。

从表 3 可以看出，KCl 溶液对土样的崩解特性几无影响，土样在其中几乎完全崩解，崩解时间在 17 min 左右；0.6%PVA 溶液能显著提高土样的水稳性，48 h 后土样仍保持整体稳定，烘干至恒重残余干土质量百分比为 96.94%，但是土样经再次烘干后水稳性明显下降，5 mm 筛上的残余干土质量比降为 63.42%；0.6% PVA 与 7%KCl 混合液在提高土样水稳性方面体现了更优异的性能，土样经过再次 24 h 烘干后放入水中仍不发生崩解，而后烘干至恒重土样的烘干质量几乎不发生变化。值得一提的是经过混合溶液浸泡的土样烘干至恒重残余干土质量比为 101.36%，高于原始土样的质量，对比 PVA 溶液单独作用时的干土残余质量比，笔者认为这是由于 PVA 促进了黏土对 K^+的吸收，但对此解释的合理性尚需要进一步验证。

图 7 为本次崩解试验测得的土样水化崩解曲线，其中纵轴表示的残余质量比并非真实的干土残余质量比，而是残余土样在崩解仪中的浮重比，不过仍能反映土样在崩解过程中的质量变化与时间的关系。土样在水中、KCl 溶液中的崩解曲线均出现先升后降的现

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3 崩解试验结果

Table 3 Results of hydrolysis tests

介质	耐崩解性指数/%	崩解时间/min	崩解特征	备注
水	0.58	15	压实土样放入清水中，有气泡从土样中冒出，土样表面出现细小裂纹并迅速扩大，有片状、粒状碎屑物从土样上表面边缘崩落，土样小范围内出现浑浊现象；崩解速度开始较慢，接着进入较稳定的快速崩解阶段；整个崩解过程都有气泡产生。	无
7%KCL 溶液	0	17	同上。	无
0.6%PVA 溶液	96.94	2880*	压实土样放入 0.6%PVA 溶液中，有气泡从土样中冒出，土样边缘附有串状小液泡；整个过程溶液澄清，48 h 后土样出现细小裂纹但保持完整，土样周围有少许从土样边缘崩解的小块状碎屑物。	将浸泡土样取出放入清水中，无崩解现象发生；同一土样再经 60℃条件下烘干至恒重重新放入水中，24 h 后土样沿裂纹崩解成几块较大的块体，5 m 筛上残余干土质量比 63.42%。
0.6%PVA 溶液+ 7%KCl 溶液	101.36	2880*	压实土样放入 0.6%PVA 与 7%KCl 混合溶液中，有气泡从土样中冒出，土样边缘附有串状小液泡；整个过程溶液澄清，48 h 后土样出现微细裂纹，无崩解现象发生。	浸泡土样取出放入清水中无崩解现象发生；同一土样经再经 60℃条件下烘干至恒重重新放入水中，24 h 样微细裂纹稍有扩大，无崩解现象发生，整体稳定可以用手拿起；5 m 筛上残余干土质量比 99.87%。

注：①*并非土样在 PVA 溶液中的崩解时间，而是作为终止试验的一个时间点；②“耐崩解性指数”区别于岩石的耐崩解性指数，它在数值上等于烘干土样在溶液中经过崩解时间的浸泡后残留于 5 mm 筛上的土样与原土样的质量百分比。

象，这是由于土样一开始崩解缓慢，水迅速进入土中，进入土中的水的质量大于崩解掉的土样质量，曲线上升；随后土样进入较稳定的快速崩解阶段曲线下降。由于土样在 PVA 溶液及 PVA 与 KCl 混合溶液中的水稳性得到有效改善，溶液进入土样裂隙但土体不发生崩解，土样浮重增加，因此土样在 PVA 溶液及 PVA 与 KCl 的混合溶液中崩解曲线呈稳定的上扬形态。林蔚[6]等认为层状黏土吸附的阳离子可以与有机物形成复合物，使 PVA 分子中活性的－OH 与水接触大大降低，从而提高其耐水性。土样经 0.6%PVA 溶液处理后表现出良好的水稳性，但经过再次干燥后水稳性明显降低，而经过 0.6%与 7%KCl 混合溶液处理过的土样经二次干燥后几乎不发生崩解，证明二者的确能够通过协同作用提高土样的水稳性。

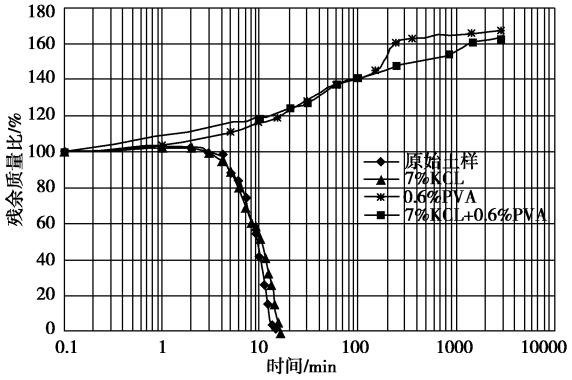


图 7 水化崩解曲线

Fig. 7 Curve of hydrolysis

4 结 论

（1）K^+并不能改善膨胀土的水稳性，对 0.075 mm 以下的黏土粒径有一定的团聚作用，作为一种一价阳离子，其主要作用是体现在能在一定程度上降低膨胀土的自由膨胀率；PVA 溶液能有效改善膨胀土的水稳性并显著提高膨胀土中粗颗粒的比重，但由于 PVA 作为一种大分子材料自身体积较大并不能明显降低膨胀土的自由膨胀率。

（2）虽然试验结果表明 K^+与 PVA 的协同作用并不比 PVA 单独作用时更能改善膨胀土的粒度成分，但二者的协同作用却能显著降低膨胀土的自由膨胀率并提高其水稳性；0.6%PVA 与 7%KCl 混合溶液是一种较为理想的溶液配比，在此基础上增加溶液的浓度效果并无明显改善。

（3）从整个试验过程来看，K^+与 PVA 二者通过协同作用能促进黏土对 K^+的吸收，但这一作用机制及其对水化膨胀的微观影响尚不清楚。

本文仅从抑制水化膨胀的角度验证了 K^+与 PVA 的协同作用的效果，作为一种改性试验的开始，二者协同作用在改良膨胀土物理力学性质等方面的效果还需要在后续的工作中加以验证。K^+作为一种植物生长必需的元素，PVA 作为一种安定、无毒、为数不多的生物可降解水溶性高分子材料，二者的使用均不会增加环境负担[20]，因此本文结果对于以后的工程应用具有一定的参考启发意义。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献：

[1] 袁广林, 田立柱. 膨胀土对建筑物的危害及防治[J]. 煤矿设计, 1999, **4**: 30－32. (YUAN Guang-lin, TIAN Li-zhu. Prevention and cure of damage caused by expansive soil to the construction[J]. Journal of Coal Mine Engineering, 1999, **4**: 30－32. (in Chinese))

[2] 王艳萍. 膨胀土化学改性实验研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007(6). (WANG Yan-ping. Research of improving test by chemical methods on expansive soil[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Scineces, 2007(6). (in Chinese))

[3] 黄　春, 刘尚营, 张春光, 等. NH_4^+、尿素和聚乙二醇对蒙脱土的抑制膨胀作用[J]. 化学学报, 2003, **61**(7): 983－988. (HUANG Chun, LIU Shang-ying, ZHANG Chun-guang, et al. Inhibition behavior of NH_4^+, urea and polyethylene glycol on swelling of montmorillonite[J]. Acta Chimica Sinica, 2003, **61**(7): 983－988. (in Chinese))

[4] 孙明波, 候万国, 孙德军, 何　涛. 钾离子稳定井壁作用机理研究[J]. 钻井液与完整井, 2005, **22**(5): 7－9. (SUN Ming-bo, HOU Wan-guo, SUN De-jun, HE Tao. Mechanism study on the potassium ion stabilizing well-bore[J]. Drilling Fluid and Completion Fluid, 2005, **22**(5): 7－9. (in Chinese))

[5] 严瑞宣. 水溶性高分子[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001. (YAN Rui-xuan. Macromolecule of water-solubility[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001. (in Chinese))

[6] 林　蔚, 刘海涛, 胡　勇. MMT 改性 PVA 内墙涂料的研究[J]. 齐齐哈尔大学学报, 2002, **17**(3): 43－44. (LIN Wei, LIU Hai-tao, HU Yong. Sdudy on MMT which can change the property of PVA indoor coating[J]. Journal of Qiqihar University, 2002, **17**(3): 43－44. (in Chinese))

[7] 熊厚金, 林天健, 李　宁. 岩土工程化学[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (XIONG Hou-jin, LIN Tian-jian, LI Ning. Geotechnical engineering chemistry[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))

[8] NORRISH K. The swelling of montmorillonite[J]. Faraday Discussions, 1954, **18**: 120－134.

[9] FRITZ J Aadsen, MAX Muller-Vonmoos. The swelling behavior of clays[J]. Applied Clay Science, 1989, **4**: 143－156.

[10] KARABORNI S, SMIT B, HEIDUG W, et al. The swelling of clays: molecular simulations of the hydration of montmorillonite[J]. Science, 1996, **271**: 1102－1104.

[11] LIKOS William J, LU Ning. Pose-scale analysis of bulk volume change from crystalline interlayer swelling in Na^+- and Ca^{2+}-smectite[J]. Clays and Clay Minerals, 2006, **54**(4): 515－528.

[12] BOEK E S, COVENEY P V, SKIPPER N T. Monte Carlo molecular modeling sdudies sdudies of hydrated Li-,Na-, and K-smectites: understanding the role of potassium as a clay swelling inhibitor[J]. Jorunal of the American Chemical Society, 1995, **117**: 12608－12617.

[13] 王欣婷. 缓冲材料在深层处置场模拟近场环境下回胀行为的基础研究[D]. 台湾: 国立中央大学土木工程研究所, 2004. (WANG Xin-ting. Research on swelling behavior of cushion material used in deep disposition simulating close field environment[D]. Taiwan: Department of Civil Engineering of National Central University, 2004. (in Chinese))

[14] 杨　红, 孙建荣, 李英全. 采用水溶性高分子溶液抑制黏土膨胀[J]. 煤炭科学技术, 2004, **32**(5): 58－60. (YANG Hong, SUN Jian-rong, LI Ying-quan. Water-solubility macromolecule solution applied to control clay swelling[J]. Coal Science and Technology, 2004, **5**: 58－60. (in Chinese))

[15] 吉林化学工业公司设计院. 聚乙烯醇生产工艺[M]. 北京: 轻工业出版社, 1975. (Jilin Chemical Engineering Department. Manufacture techniques of pllyvinyl alcohol[M]. Beijing: China Light Industry Press, 1975. (in Chinese))

[16] 林宗元. 岩土工程试验监测手册[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1994. (LIN Zong-yuan. Geothchnical testing and monitoring manual[M]. Shengyang: Liaoning Science and Technology publishing House, 1994. (in Chinese))

[17] 胡广韬, 杨文远. 工程地质学[M]. 北京: 地质出版社, 2002. (HU Guang-tao, YANG Wen-yuan. Engineering and geotechnics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002. (in Chinese))

[18] 唐大雄, 刘佑荣, 张文殊, 等. 工程岩土学[M]. 北京: 地质出版社, 1999. (TANG Da-xiong, LIU You-rong, ZHANG Wen-shu, et al. Engineering of rock and soil[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999. (in Chinese))

[19] 李守定. 岩石静态崩解过程仪: 中国, 200410083684.2[P]. 2005.3.30. (LI Shou-ding. Processing apparatus for rock hydrolyz-ation in still state: China, 200410083684.2[P]. 2005.3.30. (in Chinese))

[20] 杨晓雄, 闻荻江. 聚乙烯醇对环境影响的研究进展[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2005, **18**(1): 9－13. (YANG Xiao-xiong, WEN Di-jiang. Development on environmental influence of PVA[J]. Journal of University of Science and Technology of Suzhou (Engineering and Technology), 2005, **18**(1): 9－13. (in Chinese))

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net