水溶性聚氨酯改良砒砂岩的水理性能试验研究

张俊魁[1], 高海鹰[1], 梁止水[1,2]

(1. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 江苏杰成凯新材料科技有限公司, 江苏 南京 210019)

摘 要: [目的] 研究水溶性聚氨酯(W-OH)对砒砂岩水理性能的影响,为砒砂岩高边坡防护提供指导。[方法] 通过 W-OH 改良砒砂岩水稳定性和抗冲刷性的室内试验,初步分析其改良砒砂岩机理。[结果] W-OH 在低浓度下即可明显提高砒砂岩团聚体的水稳定性和抗蚀能力,且团聚体水稳定性 K 值随团聚体粒径的减小而增大;W-OH 喷洒在砒砂岩表面后,明显降低了坡面的产沙速率和产沙量。[结论] 通过胶结沙粒,W-OH 在砒砂岩表面形成固结层,减少了水土流失,对砒砂岩的坡面稳定起到了明显防护效果。

关键词: 水溶性聚氨酯(W-OH); 砒砂岩; 水理性质; 水土流失

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2018)01-0103-04 **中图分类号**: S157.9

文献参数: 张俊魁, 高海鹰, 梁止水. 水溶性聚氨酯改良砒砂岩的水理性能试验研究[J]. 水土保持通报, 2018,38(1):103-106. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.20180125.001. Zhang Junkui, Gao Haiying, Liang Zhishui. Water-physical properties of feldspathic sandstone modified by hydraulic polyurethane [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(1):103-106.

Water-physical Properties of Feldspathic Sandstone Modified by Hydraulic Polyurethane

ZHANG Junkui[1], GAO Haiying[1], LIANG Zhishui[1,2]

(1. *School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu* 210096, *China*; 2. *Jiangsu JCK New Material Technique Co., Ltd, Nanjing, Jiangsu* 210019, *China*)

Abstract: [Objective] To explore the effect of water-physical properties of feldspathic sandstone modified by a kind of hydraulic polyurethane (W-OH), and to provide the theoretical guidances for high slope protection of feldspathic sandstone. [Methods] By tasting indices such as the water stability and erosion resistance of the feldspathic sandstone modified by the W-OH, the modified mechanism was analyzed. [Results] It was indicated that the water stability and erosion resistance of the aggregates in modified feldspathic sandstone were obviously improved with the decrease of the particle size of the aggregates, the K was increase. The addition of W-OH significantly reduced the sediment yield and sediment yield on the slope. [Conclusion] Soil and water loss from the slopes decreased greatly and the slope stability was enhanced by cementing sands which a solidified layer on the surface of the feldspathic sandstone was formed.

Keywords: **hydraulic polyurethane (W-OH); feldspathic sandstone; water-physical property; soil and water loss**

砒砂岩是指分布在黄河流域的晋陕蒙接壤地区,由古生代二叠纪、中生代三叠纪、侏罗纪和白垩纪的厚层砂岩、砂页岩和泥质砂岩组成的岩石互层[1],因其颗粒松散、成岩度低[2],该区域水土流失极为严重。每年向黄河输入泥沙约达 3.50×10^8 t,是造成黄河下游河床不断淤高的主要原因[3-4]。针对该区域的治理,中国先后开展了黄河中游重点(试点)小流域治理工程、沙棘资源建设、国家生态工程建设等水土保持治理项目[5]。在治理措施上由最初的生物措施和工程措施渐渐转变为化学固结与生物防治相结合[6-8]。然而目前现有的固结材料或在耐久性、或在植物亲和性、或在成本方面存在较大的问题,并且多数固结材料尚处于实验室研究阶段[9]。基于此,新型环保化学固结材料和水土保持技术的研制势在必行。

W-OH 是由日本 JCK 株式会社研究开发的水溶性灌浆料系列的聚氨酯产品。以水为溶剂,与水反应

收稿日期:2017-03-13 **修回日期**:2017-04-13

资助项目:国家十二五科技支撑计划项目"砒砂岩固结促生技术研发"(2013BAC05B02); 砒砂岩侵蚀岩性机理研究(2013BAC05B01)

第一作者:张俊魁(1993—),男(汉族),安徽省阜阳市人,硕士研究生,研究方向为水土保持。E-mail:zhangjk.sin@foxmail.com。

通讯作者:高海鹰(1966—),女(汉族),江苏省南京市人,博士,教授,硕士生导师,从事农业面源污染控制和水土保持方面研究。E-mail:gaohaiyingseu@163.com。

生成具有良好力学性能的弹性凝胶体，具有高度安全性。它是在原有亲水性聚氨酯材料的基础上融合纳米改良，组成结构改变及功能材料复合技术，具有高耐久性、自然降解可控性、环保性等特征。本文拟对经 W-OH 改良砒砂岩的水稳定性和抗冲刷性进行试验研究，同时结合该材料在砒砂岩抗侵促生工程项目中的实际效果，以期探讨 W-OH 对砒砂岩的改良机理和效果。

1 材料与方法

试样材料包括试验用土和试验 W-OH。试验用土来自于黄河一级支流皇甫川的二老虎沟小流域的表层土，其液限 WL=32.2%，塑性指数 I_p=10.6，比重 G_s=2.65，最佳含水率 W_{op}=17%，最大干密度 ρ_d=1.71 g/cm^3。W-OH 为由江苏杰成凯新材料科技有限公司提供的 W-OH，外观为黄褐色透明液体，密度 ρ=1.1 g/cm^3，固含量为 60%，黏度(20 ℃，mPa.s)为 200～800，pH 值为 6～7。

(1) 水稳定试验。首先将户外原状土风干后过筛，选出粒径分别为 2～5，5～10，10～20，>20 mm 的团聚体，之后将 0%，3%，5%，7%浓度的 W-OH 稀释液喷洒到团聚体表面。试验时可在土样的表面蒙上一层纱布，乳液最终以渗透的方式透过纱布包裹团聚体，直至试样充分浸湿饱和。之后将试样在室温中养护 1 d，再次过筛，选出不同粒径的团聚体。

(2) 抗冲刷性试验。采用课题组自行设计的冲刷试验模拟装置进行。该装置主要由 3 部分构成：坡面槽、坡面上部供水设备、坡面下部接样装置。土槽为钢制槽，尺寸为 2.0 m×0.5 m×0.5 m(长×宽×高)，坡度为 30°。供水设备主要由恒定水位的贮水箱、控制阀门、流量计以及静水溢流箱组成，接样装置为水桶。填土造坡分层完成，土壤干容重控制在 1.3 g/cm^3，基本接近天然容重。将 W-OH 稀释成 2%，3%，4%浓度以 3 L/m^2 的量均匀喷洒在砒砂岩土坡表面，并设计不添加 W-OH 的清水作为对照试验。放水流量为 2 L/min，冲刷时间 30 min。水从贮水箱流出经溢流箱后均匀、稳定流向坡面，最后出流泥沙通过下端出水口流进底部水桶中，每隔 2 min 更换 1 次接样桶。每组试验重复 3 组，取其平均值。

扫描电镜的试样取自抗冲刷试验改良土，土颗粒风干后用手掰开，取较平整的断面，得到新鲜、完整且保持其原状结构的试样。在试样表面喷镀一层黄金薄膜后，即为扫描电镜的观测断面。

2 结果与分析

2.1 水稳性试验结果分析

团聚体水稳性测定方法多样，其中计算统计法以快速、简便而被广为使用[10]。本试验采用安德里阿诺夫法对团聚体进行统计分析[11]。

团聚体颗粒浸水前，先让滤纸上的团粒通过毛细作用吸水饱和 30 min。之后将团粒浸入水中，测定 l0 min 内每分钟团粒崩解的数量，进行水稳性 K 值的计算。

$$K=\frac{5a_1+15a_2+25a_3+\cdots+95a_{10}+100a_0}{50}$$

式中：a_1，a_2，a_3，…，a_{10}——在水中浸泡 1，2，3，…，10 min 时崩解的土团粒数；a_0——浸泡 10 min 后未崩解的土团粒数。

由表 1 可以看出，未添加 W-OH 的砒砂岩试样抗水侵蚀能力极弱，水稳性较低。W-OH 的添加能明显提高砒砂岩团聚体水稳性。在相同团聚体粒径下，水稳性 K 值随着 W-OH 浓度的增加而不断增大。同时，砒砂岩颗粒的粒径分布与水稳性也有一定的关系，当颗粒粒径较小时，施加相同浓度和质量的 W-OH 时，颗粒较大的更容易造成水蚀，且喷洒过后，形成裂缝的比例较高，在浸水过程中水蚀程度更大，比例更高。

表 1 W-OH 对砒砂岩团聚体水稳性测试值

浓度/%	粒径/mm	不同浸泡时间崩解的土团粒数										水稳性 K/%
		1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	6 min	7 min	8 min	9 min	10 min	
0	5～10	16	25	32	44	50	50	50	50	50	50	21.6
3	5～10	2	3	3	5	7	8	10	13	14	15	85.5
5	5～10	0	0	0	0	1	3	5	5	7	8	95.0
7	5～10	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2	98.4
5	2～5	0	0	0	1	1	1	2	3	3	3	97.5
5	5～10	0	0	0	0	1	3	5	5	7	8	95.0
5	10～20	0	1	2	4	4	5	6	8	11	12	90.6
5	>20	1	4	7	8	8	10	12	15	18	18	81.6

由图 1 可以看出,当团聚体平均粒径为 7.5 mm 时,添加 W-OH 对团聚体水稳性有明显提高,K 值涨幅均在 4 倍以上。当 W-OH 浓度为 7%时,改良团聚体水稳性 K 值为 98.4,此时的团聚体已具备很好的抗水侵蚀能力。此外,从图 2 中可以直观看出,在相同 W-OH 浓度下,随着团聚体粒径的不断增加,水稳性 K 降低趋势越来越明显。

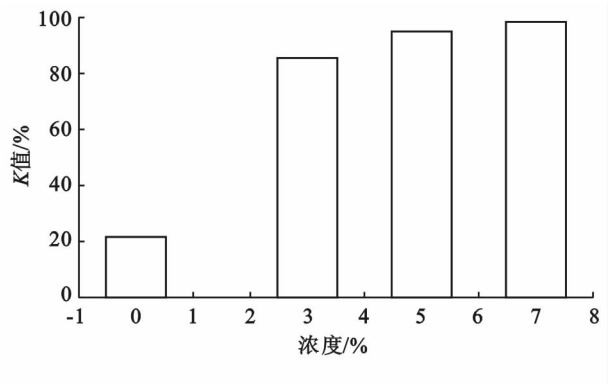


图 1　改良团聚体在不同浓度下的水稳性

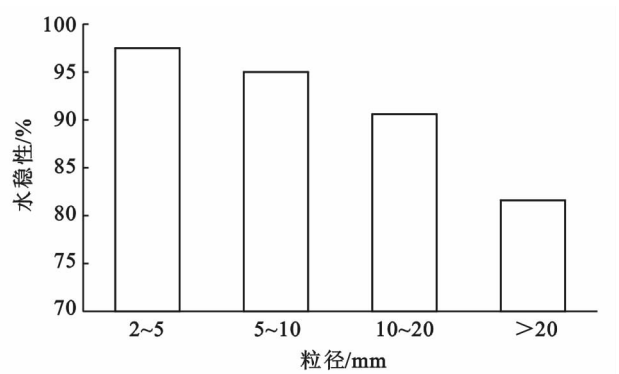


图 2　添加 5%W-OH 后团聚体颗粒大小对其水稳性的影响

试验中观察到未添加 W-OH 的团聚体在水中崩解时首先从其表面的边、棱、角处开始坍塌,随着时间的延长,团聚体逐渐分散解体;添加 W-OH 的团聚体以出现裂缝到裂缝不断变长变宽后突然炸裂的方式在水中崩解。这与刘瑾等所提出的渐进式崩解和炸裂式崩解的 2 种方式相统一[12]。

2.2　抗冲刷性试验结果分析

由图 3 中可以看出,未喷洒 W-OH 的坡面泥沙流失较为严重,前期随着时间延长,产沙速率不断增加,之后产沙速率渐渐趋于稳定,约为 430 g/min。而喷洒 W-OH 的坡面前期产沙速度均得到明显控制,其中 2%浓度的坡面后期产沙速度快速上升,在 23 min左右侵蚀产沙速率开始与对照组保持同一水平,这主要是由于该浓度的 W-OH 在土坡表面形成的弹性凝胶体渐渐被水冲刷破坏;3%浓度的土坡表面部分凝胶体被破坏,但稳定过后的产沙速率低于对照组;4%浓度的 W-OH 坡面弹性凝胶体在试验过程中一直未被破坏,其坡面侵蚀产沙量一直较低且比较稳定。从图 4 中可以看出未喷洒 W-OH 的坡面累计产沙量为 7 563 g,而喷洒 2%,3%和 4%浓度 W-OH 的坡面产沙总量分别为 5 133,3 612 和 894 g。试验结果表明喷洒 W-OH 后,不仅可以减小坡面的产沙速率,降低产沙总量,同时还能降低或抑制产沙峰值。

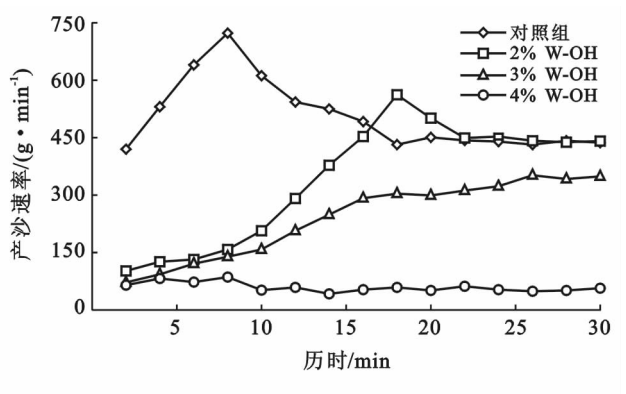


图 3　坡面产沙量随时间的变化

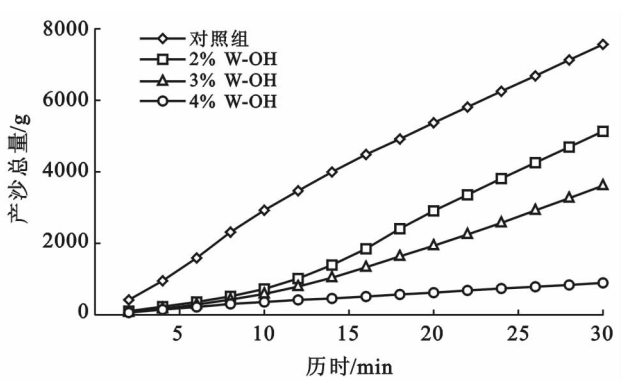


图 4　坡面产沙累积量随时间的变化

3　改良机理分析

如图 5 所示,未添加 W-OH 的砒砂岩呈层状结构分布,类似于五花肉,颗粒间较为松散,内部间隙较多。当砒砂岩与水相互接触后,水分借助砒砂岩相对较高的孔隙度得以快速入渗,部分孔隙被水分子代替,从而使剩余孔隙中空气密度发生明显变化,形成压力差,并以膨胀力形式向周围扩散;此外砒砂岩中膨胀性矿物质遇水后发生快速膨胀,随着水土作用的不断深入,当作用在颗粒间的黏结力不足以抵挡土体内部因气体膨胀和矿物质膨胀所造成的破坏力时,团聚体将逐渐分散崩解。

W-OH 与团聚体接触后,稀释液借助前期的流动性,在砒砂岩表面及颗粒间隙得以迅速铺展、渗透,之后随着材料中异氰酸根与水分子的快速反应,稀释液

黏度逐渐增加，高分子末端大量的活性基团与土颗粒发生物理或化学反应，经过一系列作用后，材料在砒砂岩颗粒表面形成了空间网状结构（如图 6 所示）。随着时间的延长，溶液黏度进一步增大，由之前的流动状态逐渐转变为弹性凝胶体，通过包裹和胶结等作用使原本相互松散的砒砂岩颗粒相互黏结在一起，提高了砒砂岩的水稳性和抗侵蚀能力。W-OH 浓度越大，在砒砂岩表面形成的固结层更加紧实，可以很好地防止水的侵蚀，而喷洒量的增大，则可以使 W-OH 溶液渗入到砒砂岩中的厚度增大，从而全面的包裹在砒砂岩表面，整体抗蚀性效果显著，可以抵抗较长时间的水力侵蚀。

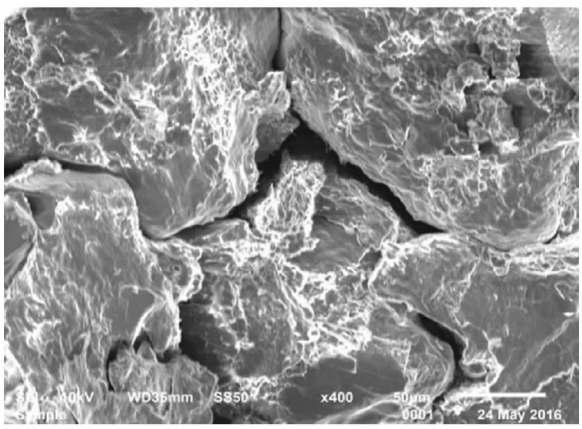


图 5 未添加 W-OH 的团聚体扫描电镜图

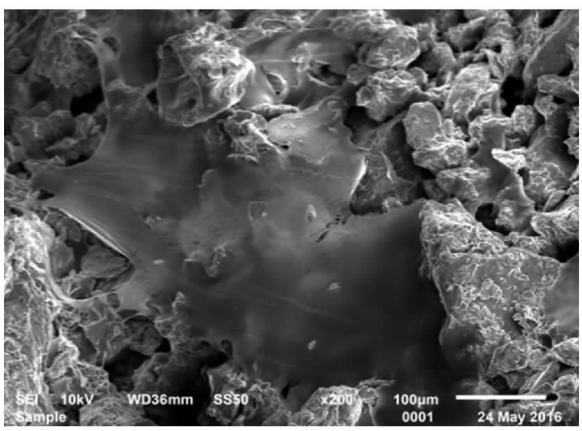


图 6 添加 5%W-OH 的团聚体扫描电镜图

相对于粒径较大的团聚体，在相同 W-OH 浓度下，W-OH 在粒径较小的团聚体表面更容易全面分散包裹，且在相同时间下，W-OH 在粒径较小的团聚体表面浸入深度更深，形成的膜结构强度更大，破坏时所需的膨胀力也越大。因此团聚体粒径与水稳性值成负相关。增加 W-OH 浓度，一方面增加了 W-OH 的黏度，提高了 W-OH 与团聚体的胶结力；同时 W-OH中因含有大量异氰酸酯基(-NCO)能与团聚体中的游离水发生反应使之转化为抗侵蚀能力较强的结合水。将 W-OH 喷洒在砒砂岩土坡表面，相当于给坡面穿上了一层“雨衣”，降低了雨水与土坡面直接接触的面积，从而减轻了雨水对砒砂岩坡面冲刷侵蚀的影响。

4 结 论

从 W-OH 改良砒砂岩的水理性质试验及材料固结砒砂岩后微观扫面电镜图可以看出，W-OH 与水反应后生成的弹性凝胶体通过扩散、渗透、胶结等方式包裹在砒砂岩颗粒周围，提高了颗粒间的黏结力，使改良砒砂岩的水稳性和抗冲刷能力得到了明显提高；在砒砂岩水土流失治理中具有显著成效。这一研究结果对 W-OH 在砒砂岩水土流失治理中的应用提供了科学依据。

[参 考 文 献]

[1] 王愿昌，吴永红，寇权，等. 砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J]. 中国水土保持科学，2007，5(1)：14-18.

[2] 沈鑫. 一种砒砂岩固结促生自然边坡治理技术[J]. 人民黄河，2015，38(8)：90-94.

[3] 姚文艺，吴智仁，刘慧，等. 黄河流域砒砂岩区抗蚀促生技术试验研究[J]. 人民黄河，2015，38(1)：6-10.

[4] 张德全，宋日生，梁俊林，等. 砒砂岩区的侵蚀及危害[C]//中国水土保持学会全国会员代表大会论文集，北京：2006：405-406.

[5] 肖培青，姚文艺，刘慧. 砒砂岩地区水土流失研究进展与治理途径[J]. 人民黄河，2014，37(10)：92-94，109.

[6] 王愿昌，吴永红，闵德安，等. 砒砂岩区水土流失治理措施调研[J]. 国际沙棘研究与开发，2007，5(1)：39-44.

[7] 张腾飞. 砒砂岩侵蚀区水土流失治理新模式探讨[J]. 亚热带水土保持，2016(2)：44-46.

[8] 肖培青，姚文艺，申震洲，等. 黄河中游砒砂岩区抗蚀促生技术研究[J]. 中国水土保持，2016(9)：73-75.

[9] 高卫民，吴智仁，吴智深，等. 荒漠化防治新材料 W-OH 的力学性能研究[J]. 水土保持学报，2010，24(5)：1-5.

[10] 蘭士珍，刘文通，程晉福. 两种水温性团聚体分析法在不同耕作土壤中的表面[J]. 土壤通报，1962(9)：37-43.

[11] 吴增芳. 土壤结构改良剂[M]. 北京：科学出版社，1976：239-244.

[12] 刘瑾，施斌，姜洪涛，等. STW 型高分子土壤 W-OH 改良黏性土团聚体水稳性试验研究[J]. 水文地质工程地质，2009，36(2)：77-80.