

# 无机粘结剂对工程弃渣的物理性状和稳定性的影响

陈述悦<sup>1</sup>, 顾卫<sup>1</sup>, 戴泉玉<sup>2</sup>

(1. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 中国农村技术开发中心, 北京 100045)

**摘要:** 为了确定无机粘结剂对工程弃渣物理性状和抗雨水侵蚀能力的影响, 将工程弃渣与自然土壤混合配制成植物生长基质喷附在坡面模型上, 开展不同降雨强度下的侵蚀实验。结果表明: 无机粘结剂用量小于  $40 \text{ kg/m}^3$  时, 提高了工程弃渣的水分渗透但对水分蒸发有抑制作用, 用量大于  $40 \text{ kg/m}^3$  时无机粘结剂增加了工程弃渣的透气性, 但导致工程弃渣保墒能力下降, 硬度随之增加。少量的无机粘结剂对于工程弃渣的抗雨蚀能力并无提高, 只有在无机粘结剂用量增加到  $50 \text{ kg/m}^3$  (含) 以上时才会显著降低泥沙流失量。无机粘结剂  $40 \text{ kg/m}^3$  的用量为对工程弃渣物理性状影响的分水岭。而当用量达到  $50 \text{ kg/m}^3$  临界值时, 无机粘结剂开始起到帮助工程弃渣抵御雨水侵蚀的作用。

**关键词:** 自然资源; 植生基材; 人工模拟降雨; 无机粘结剂; 工程弃渣

**中图分类号:** S152.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2013)05-0086-06

## Influence of Inorganic Adhesive on the Physical Properties and Stability of Engineering Spoil

CHEN Shu-yue<sup>1</sup>, GU Wei<sup>1</sup>, DAI Quan-yu<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Earth Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. China Rural Technology Development Center, Beijing 100045, China)

**Abstract:** The engineering spoil and natural soil were mixed into a plant growth substrate. In order to determine the influence of inorganic adhesive on engineering spoil's physical properties and ability of resistance to rain erosion, the plant growth substrate was sprayed onto the rock-slope model and erosion experiments were carried out under different rain intensity. The results are as follows: when the amount of inorganic binder was less than  $40 \text{ kg/m}^3$ , inorganic adhesive could inhibit water evaporation and improve the engineering spoil's water penetration and hardness; however, more inorganic adhesive ( $\geq 40 \text{ kg/m}^3$ ) would increase breathability, decrease ability of moisture conservation, and increase hardness. The amount of sediment loss showed no reduction until the inorganic adhesive concentrations reached to  $50 \text{ kg/m}^3$ . It could be concluded that the dosage of  $40 \text{ kg/m}^3$  was division of the impact of inorganic binder on the physical properties. And when the amount reached critical value of  $50 \text{ kg/m}^3$ , the inorganic adhesive started to help the engineering spoil resisting rain erosion.

**Key words:** natural resource; plant growth substrate; artificial simulation of rainfall; inorganic adhesive; engineering spoil

工程弃渣是指施工过程中所产生的固体废弃物, 根据施工对象的不同, 其组成和质地、结构、孔隙、结持性、湿度、养分等理化性质也不同<sup>[1]</sup>。中国每年工业固体废物排放量中约 25% 来自道路、水电等工程<sup>[2]</sup>, 尤其是重丘区和山岭区, 建设公路每 1 km 弃渣量可高达 5.78 万 t, 弃渣场堆渣量平均为

15.81 万 t<sup>[3]</sup>。尽管工程弃渣的再利用已经在建筑行业得到认可, 但对其再利用成本、质量、数量以及是否适合作为建筑材料都没有深入研究而限制了工程弃渣的利用<sup>[4]</sup>。只有小部分工程弃渣被现场利用如景观、便利设施、填筑路堤等, 大部分工程弃渣被运往垃圾填埋场<sup>[5]</sup>或弃渣场堆置。堆置的弃渣通过再塑地

形、地貌和改变所在区域产流汇流条件,造成严重的水土流失<sup>[6]</sup>,2001—2005 年间,中国公路建设项目产生的弃渣量达到 42.4 亿 t,所造成水土流失总量为 1.43 亿 t<sup>[7]</sup>。为了减少滑坡、泥石流等水土流失问题并与周围景观相协调,需要对工程弃渣堆实施水土保持工程,包括排水、防护和植被恢复等<sup>[8]</sup>。工程弃渣是经过人为扰动的不成熟土壤,渣石颗粒大且不均匀,保水性能差,有机质和养分缺乏,而且渣体松散,稳定性差,不利于植物生长。研究者利用不同粒径弃渣进行组合并适度压实弃渣等手段来减小渗水系数<sup>[9]</sup>,在四川锦屏水电站渣场开展的植被恢复实验取得了较好的效果<sup>[10]</sup>。但贮存工程弃渣要付出高额的经济(水土保持工程投入)和社会(水土流失、大量占用耕地)成本,最好的办法是研发更多的工程弃渣利用方式,如填充矿井<sup>[11]</sup>、道路工程基础<sup>[12-14]</sup>、水利工程<sup>[15]</sup>、河道堤岸<sup>[16]</sup>等,以减少其产生,从而降低处理成本和环境危害。

本文提出把工程弃渣改造为植物生长基质的设想,用于与工程弃渣伴生的工程创面—岩质坡面的生态恢复。岩质坡面坡度大、坡面岩石硬度高、透水性差、附着条件差,植物生长基质除了要满足植被生长需要,其在坡面上的稳定性也是至关重要的。大量研究和工程实践表明,坡面植物生长基质的稳定性主要受到重力下滑和降雨的影响,坡度较缓时,可以通过机械喷附施压和挂网结合给予植物生长基质一定的粘结力来抵消<sup>[17]</sup>,但随着坡度的增加,下滑分力越来越大,就必须采用空心六棱砖、土工格室加挂三维网等工程措施<sup>[18]</sup>。提高植物生长基质的强度和抗蚀能力是解决降雨侵蚀的主要手段,其与粘结材料密切相关<sup>[19]</sup>。当前应用的粘结材料主要是水泥,随着水泥用量的增加,植物生长基质的粘聚力和抗蚀能力呈上升趋势,但也导致了 pH 值的增长<sup>[20]</sup>,还引起土壤的硬化及最大持水量的显著降低<sup>[21]</sup>。本文拟开展不同无机粘结剂添加量的坡面工程弃渣,在不同雨强条件下物理性状及抗雨蚀能力比较的实验研究,通过分析其物理性状变化和雨水冲蚀效果,从适合植物生长、保持稳定性和最低成本综合考虑,确定无机粘结剂的最佳用量,为工程弃渣用于岩质坡面生态恢复工程实践提供理论依据和数据支持,为解决工程弃渣资源化利用问题,探索一种可行的方向。

# 1 材料与方法

## 1.1 实验地点及实验时间

实验在北京师范大学地表过程与资源生态国家

重点实验室房山试验基地人工模拟降雨大厅内完成。实验时间为 2011 年 6—8 月,2012 年 7—9 月。

## 1.2 实验设计

把工程弃渣、自然土壤、粒径小于 1 cm 的石子放入搅拌机中进行充分混合,三者的体积比为工程弃渣 54%,自然土壤 36%,石子 10%(表 1),然后再掺入不同含量水平的无机粘结剂(表 2)。将混合好的工程弃渣用客土喷播机喷射到坡面模型表面,喷射厚度 10 cm。用人工降雨机模拟 20 mm/h(大雨)、44 mm/h(暴雨)、70 mm/h(大暴雨)、126 mm/h(特大暴雨)4 种降雨强度进行降雨实验,一次降雨历时为 1 h。观测不同降雨强度下不同无机粘结剂含量的基材性状及稳定性变化状况。

表 1 各材料机械组成

材料	机械组成/%				
	2 mm	1 mm	0.5~	0.28~	≤0.28
	~1 cm	~2 mm	1 mm	0.5 mm	mm
自然土壤	34	22	18	12	13
工程弃渣	46	22	14	9	10
石 子	73	24	0.03	—	—

表 2 无机粘结剂添加量

类型	含量/(kg·m <sup>-3</sup> )					
水泥(C32.5)	0	20	30	40	50	60
混凝土绿化添加剂	0	8	12	16	20	24

## 1.3 实验设备和材料

- (1) 人工模拟降雨装置为槽式下喷式人工降雨机,采用 Spraying Systems Co. Veejet 80150 喷头,水压为 0.04 MPa,喷头高度 2.5 m 以上,雨滴可达终点速度。通过控制喷头摆动频率获得不同的雨强,可模拟雨强范围 20~200 mm/h。每台降雨机有效降雨面积为 7.5 m<sup>2</sup>,总有效降雨面积 67.5 m<sup>2</sup>,降雨均匀度可达 95% ;
- (2) 坡面模型为移动可调节小车,规格为宽 1 m,长 2 m,坡度 40°;
- (3) 土壤水分计为美国 Decagon 公司 EM50 土壤含水量数据采集器,传感器为 ECH<sub>2</sub>O 电介质型传感器。在实验前对传感器进行校准,方法按照 Starr 和 Paltineanu 制定的电容式传感器校准方法进行<sup>[22]</sup>,即用传感器测量风干土样到饱和和体积含水量的读数(间隔为 10%),与烘干法测量的数据值拟合建立线性校准方程,后利用校准方程对实验过程中获得的实验数据进行校准;
- (4) 土壤三相仪为日本 DIK-1130 型土壤三相仪;土壤硬度计为日本 DIK-5553 型土壤硬度计;
- (5) 实验所用自然土壤取自北京房山当地,土壤

质地为壤质黏土;实验所用工程弃渣取自河北徐水强风化页岩;石子为花岗岩石子;

(6) 无机粘结剂是由硅酸盐水泥熟料、6%~15%混合材料,适量石膏磨细制成的粉状水硬性无机胶凝材料,称为普通硅酸盐水泥,加水搅拌成浆体后能在空气或水中硬化,用以将砂、石等散粒材料胶结成砂浆或混凝土;

(7) 混凝土绿化添加剂:三峡大学护坡绿化研究所专利产品,其主要原材料为钙粉、磷矿粉、锰矿粉、锌矿粉等,用于改善植被混凝土物理、化学特性,增强护坡基质力学强度和抗暴雨冲刷能力,使植物生长基质层不流失、不龟裂。

### 1.4 观测项目

(1) 径流量和泥沙流失量:记录初始产流时间,并在产流后用塑料小桶承接径流样 1 min,其后每 10 min 取一次径流样,其余径流全收集在径流大桶中,测量塑料小桶中径流样,确定不同时刻的径流量和泥沙流失量(过滤烘干法),以及计算总的泥沙流失量;

(2) 含水量:用土壤水分计分别测量工程弃渣 0~5 cm 和 5~10 cm 体积含水量,数据获取时间间隔为 5 min,测量时间长度为 7 d;

(3) 硬度:每次降雨后,用土壤硬度计(日本山中式土壤硬度计)测定工程弃渣硬度随时间变化;

(4) 三相:降雨实验结束后,控制工程弃渣的含水量基本一致,用 100 ml 容积的环刀取样,在三相仪中测定不同无机粘结剂含量的工程弃渣三相数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 无机粘结剂对工程弃渣物理性质的影响

2.1.1 对工程弃渣三相的影响 工程弃渣三相分布如图 1 所示。可以看出,工程弃渣的固相比比例较大,占总体积的 1/2 以上,液相较小,只占总体积的 1/5,气相与固相中心对称,呈现此消彼长的现象。随着无机粘结剂的含量增加,固相比比例升高,气相比比例降低,这说明,无机粘结剂在一定程度上降低了工程弃渣的透气性。40 kg/m<sup>3</sup> 处理时固相比比例达到最高,而后固相比比例随无机粘结剂含量增加而降低,气相比比例升高。这与不同高分子粘结剂含量工程弃渣的三相分布正好相反<sup>[23]</sup>。

2.1.2 对工程弃渣硬度的影响 无机粘结剂可以明显提高工程弃渣硬度,含无机粘结剂的工程弃渣与 CK(对照)相比,硬度明显增加,并且无机粘结剂对工程弃渣硬度的影响明显大于高分子粘结剂对工程弃渣硬度的影响,降雨当天,无机粘结剂处理的工程弃渣硬度均大于 15 mm,而高分子粘结剂处理的工程

弃渣硬度均小于 15 mm<sup>[23]</sup>。

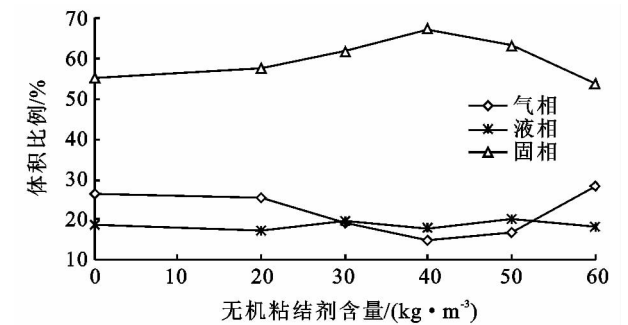


图 1 不同无机粘结剂含量的工程弃渣的三相分布

工程弃渣硬度变化与弃渣含水量成正相关<sup>[24]</sup>,降雨第 21 天的硬度比降雨当天硬度增加很多,由于弃渣中水分蒸发,各处理间含水量趋于一致,除了 CK 外,其他处理工程弃渣硬度差异不明显。降雨当天,不同无机粘结剂含量的工程弃渣硬度差异比较明显,随着无机粘结剂含量增加工程弃渣硬度呈现先升高后降低又升高的趋势,这可能是因为无机粘结剂含量较多时抑制了雨水渗透进入工程弃渣,工程弃渣含水量减少,导致硬度上升(图 2)。

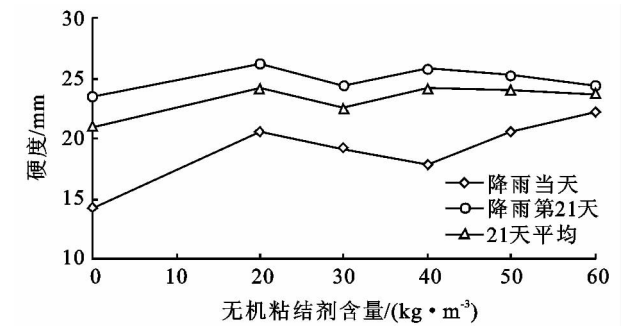


图 2 不同无机粘结剂含量的工程弃渣硬度变化

2.1.3 对工程弃渣渗透能力的影响 如图 3 所示,分别反映了不同雨强下不同无机粘结剂含量工程弃渣表层(0—5 cm)的水分渗透过程。所有雨强下,30 kg/m<sup>3</sup> 处理的表层含水量峰值都要高于其他处理,以 70 mm/h 雨强时含水量峰值最大。

随着雨强增大,表层含水量降低的速度越来越快,各处理的峰值顺序也在发生变化,没有表现出明显的随水泥含量增大,渗透性能减小的规律性(表 3)。

表 3 不同雨强下工程弃渣表层(0—5 cm)含水量峰值顺序

雨强/(mm·h <sup>-1</sup> )	含水量峰值顺序
20	30>20>CK>50>60>40
44	30>60>20>40>50>CK
70	30>60>20>40>50>CK
126	30>60>20>50>40>CK

工程弃渣底层(5—10 cm)的含水量变化见图 4,含水量峰值顺序如表 4 所示。随着雨强增大,各处理含水量到达峰值所需要的时间越来越短,各处理含水

量下降,曲线趋于重合。经比较发现,CK 处理含水量在表层和底层总处于峰值顺序末端,60 kg/m<sup>3</sup> 处理含水量在表层和底层总处于峰值顺序前端,这意味

着无机粘结剂提高了工程弃渣的入渗能力,但这与其他研究结论矛盾,是否混凝土绿化添加剂的使用改变了工程弃渣的含水量,还待进一步验证。

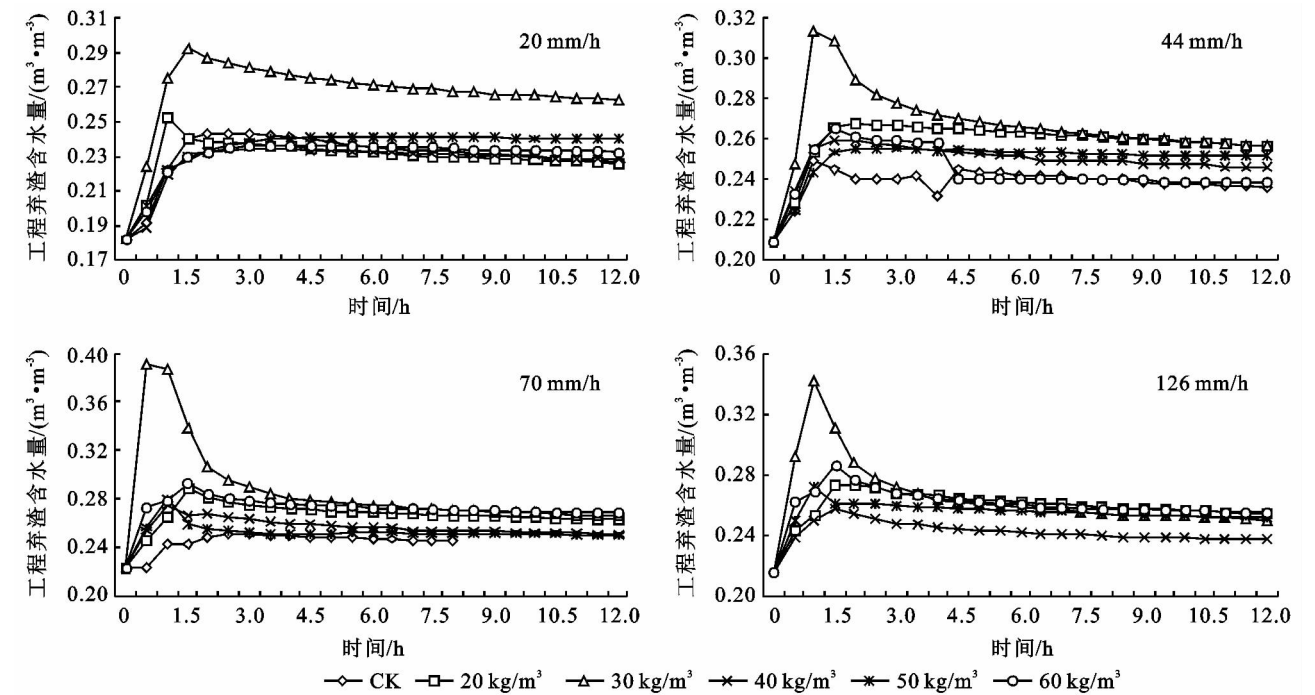


图3 人工降雨条件下不同粘结剂含量工程弃渣表层(0—5 cm)的12 h水分渗透过程

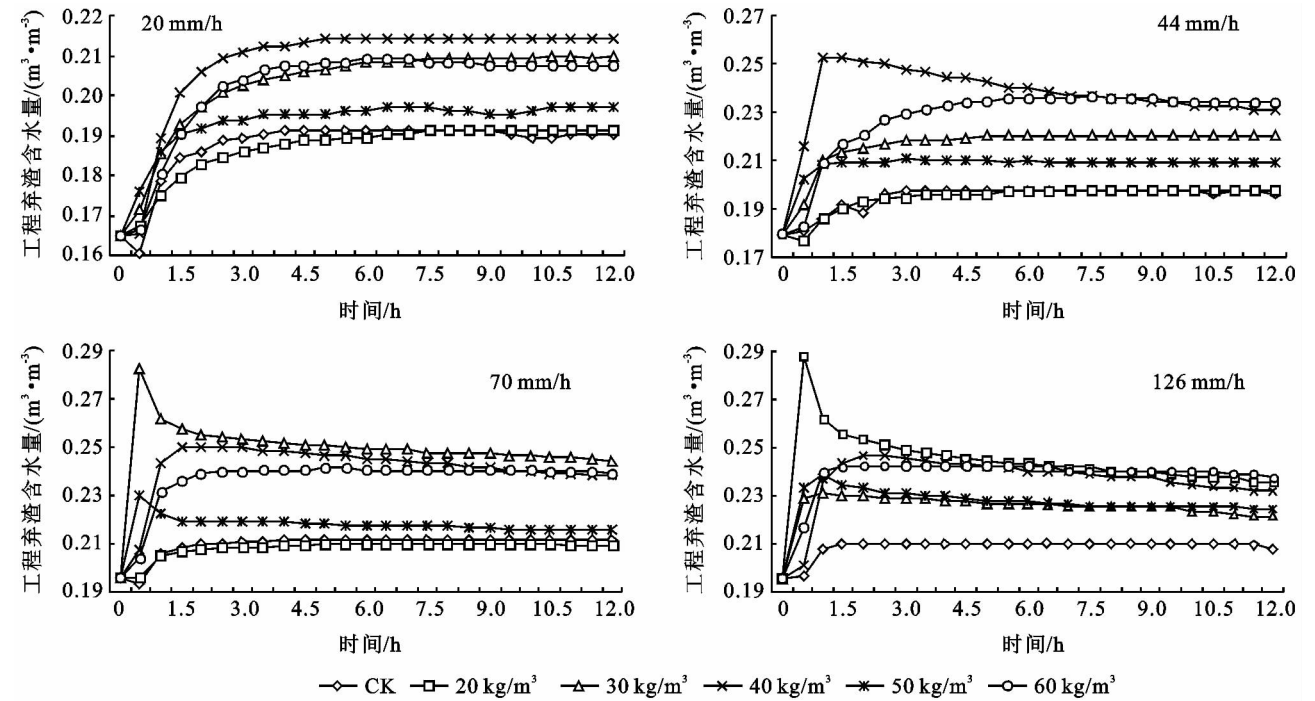


图4 人工降雨条件下不同粘结剂含量工程弃渣底层(5—10 cm)的24 h水分渗透过程

表4 不同雨强下工程弃渣底层(5—10 cm)含水量峰值顺序	
雨强/(mm·h <sup>-1</sup> )	含水量峰值顺序
20	40>60>30>50>CK>20
44	40>60>30>50>CK>20
70	30>40>60>50>20>CK
126	20>40>60>50>30>CK

2.1.4 对工程弃渣保墒能力的影响 图5显示了不同处理工程弃渣表层的水分变化过程。由于仪器故障,CK 失水实验数据没有采集。可以看出,30 kg/m<sup>3</sup> 处理的失水速度最快,失水22 d后,其含水量也最小。20 kg/m<sup>3</sup>,40 kg/m<sup>3</sup>,50 kg/m<sup>3</sup>,60 kg/m<sup>3</sup> 处理在前5天失水曲线重合,后40 kg/m<sup>3</sup> 处理失水曲

线与其他处理曲线分离,失水速度较慢,在第 10~16 天,含水量几乎没有变化;20 kg/m<sup>3</sup>,50 kg/m<sup>3</sup> 和 60 kg/m<sup>3</sup> 处理失水曲线始终保持接近重合的发展趋势,失水速度介于 30 kg/m<sup>3</sup> 和 40kg/m<sup>3</sup> 之间。这说明,施用无机粘结剂,可以抑制水分蒸发,但用量超过 40 kg/m<sup>3</sup> 后,工程弃渣的保墒能力反而降低。

2.2 对工程弃渣抗雨水侵蚀的影响

2.2.1 对径流的影响 从图 6 径流速随时间变化的曲线中可以看出,产流后径流速迅速增加,随后趋于缓慢,最后逐渐稳定。小雨强时,60 kg/m<sup>3</sup> 的处理径流速增加最快也最大,而 CK 处理径流速增加最慢也

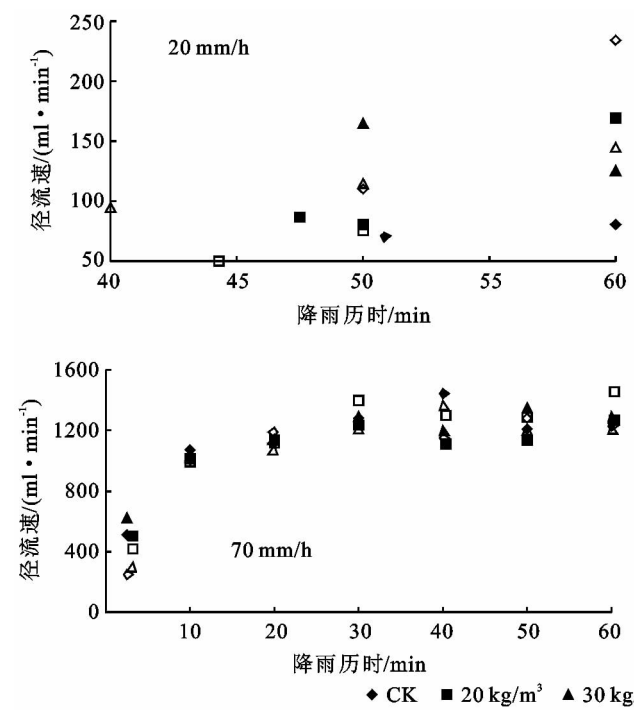


图 6 不同雨强、不同无机粘结剂含量的坡面径流速变化过程

2.2.2 对泥沙流失量的影响 泥沙流失量是衡量侵蚀强弱的直接标志。由表 5 看出,无机粘结剂可以减少泥沙流失量,并以 50 kg/m<sup>3</sup> 无机粘结剂施用量为分

最小,但随着雨强增大,不同粘结剂含量间的径流速差别逐渐变小。

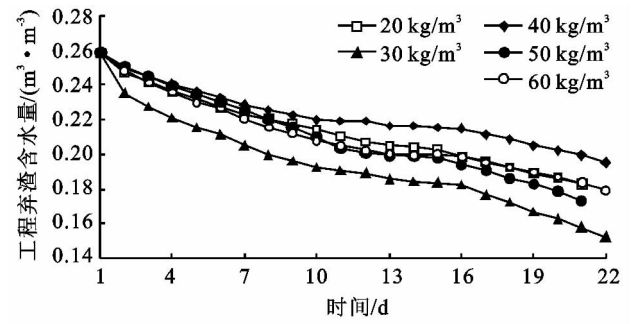


图 5 不同无机粘结剂含量工程弃渣表层的失水过程

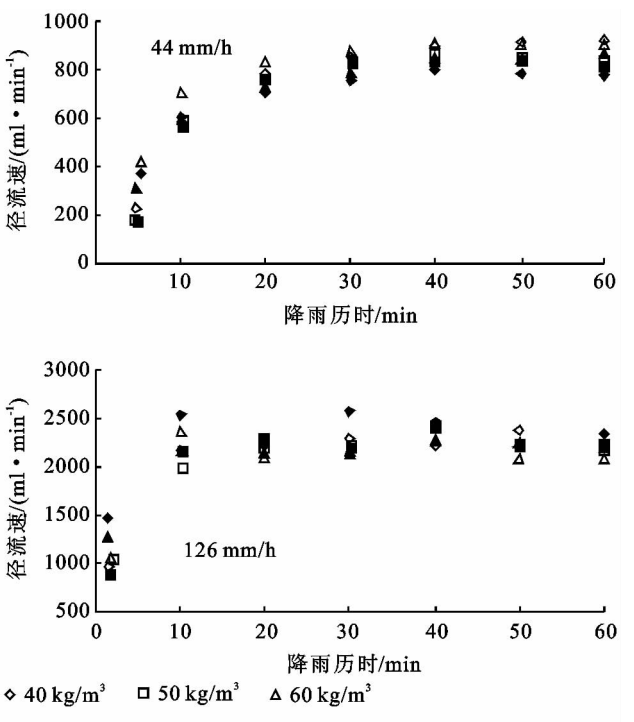


表 5 不同雨强、不同无机粘结剂添加量下泥沙流失总量

g

雨强 /(mm·h <sup>-1</sup> ))	无机粘结剂添加/(kg·m <sup>-3</sup> )					
	CK	20	30	40	50	60
44	5322.02	6847.41	6304.19	4625.57	—	2408.43
70	4364.07	3867.45	—	3885.51	—	3358.95
126	5975.02	6629.48	6606.84	6174.66	4855.99	3393.76

3 结论与讨论

作为人类开发建设工程的副产品,工程弃渣已经存在了很多年,导致了永久占用土地、引发泥石流、地质灾害、水土流失等各种环境类问题,其直接经济投入(水土保持工程)和间接经济投入(灾害后的恢复重建)对于社会是一项庞大的经济负担。直到今天,还没有找到一个行之有效的工程弃渣减量化和资源化

的方法。长期以来,人们习惯于使用自然土壤或以自然土壤为主的混合物作为工程创面生态恢复的生长基质,以无机粘结剂作为粘结材料开展了大量的相关研究和工程实践<sup>[20,25]</sup>,形成了成熟的工艺方法和相关产品。本文所用无机粘结剂即是三峡大学针对工程创面生态恢复所开发的产品。但工程弃渣是复杂的混合物,其中包括了石子、砂粒、土壤、土壤母质等,在理化性质上与土壤具有较大的差异,已无机粘结剂

产品是否适用于作为工程弃渣的粘结材料并不确定。

通过人工模拟降雨实验发现无机粘结剂可以抑制水分蒸发,提高工程弃渣的水分渗透,用量大于  $40 \text{ kg/m}^3$  时可以增加工程弃渣的透气性,但导致工程弃渣保墒能力下降,硬度随之增加。少量的无机粘结剂对于工程弃渣的抗雨蚀能力并无提高甚至会出现泥沙流失量增加的现象,只有在无机粘结剂用量增加到  $50 \text{ kg/m}^3$  (含)以上时才会显著降低泥沙流失量。

但本实验是在室内人工模拟降雨条件下(雨强、降雨时间、各处理接受的降雨量、坡度等实验条件可控)进行的,在自然条件下,实验条件多变,尤其坡度是地形因子中对坡面土壤侵蚀影响最大的因素<sup>[26]</sup>。此外,工程弃渣的 pH 值<sup>[27]</sup>、风化程度<sup>[27]</sup>、有机质含量<sup>[28]</sup>、易溶盐含量<sup>[29]</sup>等都会对水泥的固化强度产生影响。因此,还需进一步实验研究变因素条件下无机粘结剂对工程弃渣物理性状和稳定性的影响。

本文的结论并不一定具有普适性,作者更多地只是想通过这种设计和实验,为解决工程弃渣资源化利用问题提供一种参考。

#### 参考文献:

- [1] 陈述悦,顾卫,戴泉玉. 工程弃渣用作植物生长基质的研究[J]. 水土保持研究,2012,19(3):129-135.
- [2] 陈宁生,周伟,杨成林,等. 工矿弃土弃渣泥石流灾害工程治理模式与应用[J]. 矿业研究与开发,2010,30(4):84-87.
- [3] 张华明,彭冬水,奚同行. 高速公路弃土弃渣防治技术探讨[J]. 水土保持研究,2005,12(4):235-237.
- [4] Guthrie P, Mallett H. Waste Minimisation and Recycling in Construction: A review[M]. London: Special Publication 122, CIRIA, 1995.
- [5] Kwan J C T, Jardine F M. Ground engineering spoil: practices of disposal and reuse[J]. Engineering Geology, 1999, 53: 161-166.
- [6] 韩彩霞,员占英. 工程弃渣对水土流失的影响及其防治[J]. 山西水土保持科技, 2002, 6(2): 26-27.
- [7] 曹子龙,郑翠玲. 我国公路建设项目水土流失现状[J]. 山西建筑, 2009, 35(11): 340-341.
- [8] Skarżyńska K M. Reuse of coal mining wastes in civil engineering. part2: utilization of minestone[J]. Waste Management, 1995, 15(2): 83-126.
- [9] 徐虹. 石渣料级配与渗透性的关系研究[J]. 四川水利, 2004(4): 45-47.
- [10] 杨果,王菁华,张华德. CSR 岩土渣场植被恢复技术原理及应用[J]. 山西建筑, 2009, 35(1): 9-10.
- [11] Leininger D, Erdmann W, Köhling R, et al. Recent development in the utilization of preparation refuse in the Federal Republic of Germany [R]. Tatabanya, Hungary: Symp. on the Utiliz. of Waste from Coal Mining and Preparation; 22, 1983.
- [12] BS-6543/1985. British Standards Guide to the Use of Industrial By-products and Waste Materials in Building and Civil Engineering[S]. British Standards Institute, London, 1985.
- [13] BAST-E9. Verwendbarkeit des Nebengesteins der Steinkohle als Schüttermaterial für den Strassenbau[S]. Bundesanstalt für Strassenwesen, 1971.
- [14] FGSV 616/2. Merkblatt über die Verwendung von Industriellen Nebenprodukten im Strassenbau[S]. Forschungsgesellschaft für Strassen und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe: Mineralstoffe im Strassenbau, Köln, 1984.
- [15] WKE-R-78156. De Toepasbaarheid van mijnsteen in de waterbouw[S]. Deltadienst Werkgroep Keuring Bouwstoffen voor de Waterbouw, Rijkswaterstaat, 1982.
- [16] Čermák L. Wykorzystanie odpadów do budowy wałów ochronnych[J]. Projekty-Problemy, 1972, 12: 4-9.
- [17] 郭允林,余鹏飞,王剑. 浅析岩石边坡生态防护与锚固[J]. 福建建材, 2009(6): 41-42.
- [18] 王宇云. 高速公路岩土边坡植被防护技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [19] 张季如,夏银飞,龚友丽. 生态护坡材料本构关系的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(8): 36-47.
- [20] 王昌全,谢德体,李冰,等. 不同配比护坡营养基材 pH 的动态变化研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 74-78.
- [21] 高桂娟,曾小龙. 添加剂对高陡岩石边坡人工基质性状的影响[J]. 草叶科学, 2009, 26(4): 154-158.
- [22] Starr J L, Paltineanu I C. Methods for measurement of soil water content: capacitance devices[C] // Methods of Soil Analysis: Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America, Inc., 2002: 463-474.
- [23] Chen Shuyue, Gu Wei, Dai Quanyu. Influence of polymer binder on the physical properties and stability of engineering spoil on a slope[J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10(1): 105-115.
- [24] 曹升庚. 水稻土软硬度的指标及其应用[J]. 土壤, 1961(9): 7-12.
- [25] 羽田忠彦, 擁壁工. 土留工の施工例(6)一植生の施工例[J]. 土木技術, 1980, 35(6): 93-100.
- [26] Zingg A. W. Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff[J]. Agricultural Engineering, 1940(21): 59-64.
- [27] 郑刚. 水泥土抗渗性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [28] 郭宏峰. 有机质对水泥土强度影响的机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [29] 储诚富,刘松玉,邓永锋,等. 含盐量对水泥土强度影响的室内试验研究[J]. 工程地质学报, 2007(1): 139-143.