

# 含水率和聚丙烯酰胺分子量对重构铁尾矿砂抗剪强度的影响

李涛, 吕春娟, 姜成刚, 张徐, 孙波

(山西农业大学 资源环境学院, 山西 太谷 030801)

**摘要:** [目的] 研究含水率和聚丙烯酰胺(PAM)分子量对重构铁尾矿砂抗剪强度的影响,为铁尾矿砂的边坡稳定和矿区生态修复提供科学依据。[方法] 通过室内重塑铁尾矿砂开展抗剪强度试验,根据掺土率设置 5 种土壤(T)和尾矿砂(S)的重构模式,包括 S(0), S<sub>3</sub>T<sub>1</sub> (25% T), S<sub>1</sub>T<sub>1</sub> (50% T), S<sub>1</sub>T<sub>3</sub> (75% T) 和 T(100%);每种重构模式设置两个含水率水平(15%, 20%),两个聚丙烯酰胺分子量水平(3.00×10<sup>6</sup>, 6.00×10<sup>6</sup> Da)和 3 个紧实状态(疏松、偏紧、致密)。[结果] ①在同一紧实状态下,随含水率的升高,5 种重构模式的内摩擦角、黏聚力和抗剪强度均呈现出下降的趋势;②在同一含水率水平下,随着紧实度的增加,5 种重构模式的内摩擦角、黏聚力、抗剪强度整体呈上升的趋势;③PAM 能有效提高重构铁尾矿砂的抗剪强度,且随着分子量增加,抗剪强度增幅减小;④5 种重构模式中添加 3.00×10<sup>6</sup> Da 分子量的 PAM, S<sub>3</sub>T<sub>1</sub> 模式的抗剪强度提高较大,水分入渗能力也较强。[结论] 含水率 15%, PAM 分子量为 3.00×10<sup>6</sup> Da 时, S<sub>3</sub>T<sub>1</sub> 的重构模式有利于矿区生态环境的修复和铁尾矿稳定性的提高。

**关键词:** 铁尾矿砂; 土体重构模式; 含水率; 聚丙烯酰胺(PAM); 抗剪强度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)02-0089-09

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 李涛, 吕春娟, 姜成刚, 等. 含水率和聚丙烯酰胺分子量对重构铁尾矿砂抗剪强度的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 89-97. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.02.013; Li Tao, Lyu Chunjuan, Jiang Chenggang, et al. Effects of water content and polyacrylamide molecular weight on shear strength of reconstructed iron tailing sand [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 89-97.

## Effects of Water Content and Polyacrylamide Molecular Weight on Shear Strength of Reconstructed Iron Tailing Sand

Li Tao, Lyu Chunjuan, Jiang Chenggang, Zhang Xu, Sun Bo

(College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of water content and molecular weight of polyacrylamide (PAM) on shear strength of reconstructed iron tailing sand were analyzed in order to better understand slope stability and ecological restoration of mining areas. [Methods] An indoor shear strength experiment was conducted by reconstructing iron tailing sand. Five reconstruction soil mixing rate treatments of soil (S) and tailings (T) were established: S (0% T), S<sub>3</sub>T<sub>1</sub> (25% T), S<sub>1</sub>T<sub>1</sub> (50% T), S<sub>1</sub>T<sub>3</sub> (75% T) and T (100% T). Treatments also included two water contents (15%, 20%), two molecular weights of PAM (3.00×10<sup>6</sup>, 6.00×10<sup>6</sup> Da), and three compaction states (loose, tight, and dense) for each reconstruction pattern. [Results] ① Under the same compaction state, the internal friction angle, cohesion, and shear strength for the five reconstruction patterns all decreased with increasing water content. ② Under the same water content, the internal friction angle, cohesion, and shear strength of the five reconstruction patterns increased with increasing compaction. ③ Addition of PAM effectively improved the shear strength of reconstructed iron tailing sand, and shear strength decreased with increasing molecular weight of PAM. ④ When PAM with a molecular weight of 3.00×10<sup>6</sup> Da was added

收稿日期: 2021-12-12

修回日期: 2022-02-25

资助项目: 国家自然科学基金青年基金项目“铁矿干排尾矿坡面生态恢复侵蚀调控机理研究”(41401619); 山西省自然科学基金项目(202103021224143)

第一作者: 李涛(1996—), 男(汉族), 陕西省延安市人, 硕士研究生, 研究方向为矿区生态修复。Email: 1205333744@qq.com。

通讯作者: 吕春娟(1978—), 女(汉族), 山西省运城市人, 博士, 教授, 主要从事土地整治、矿区生态修复、土壤侵蚀研究。Email: lcjcw@126.com。

into the five reconstruction patterns, the shear strength and water infiltration capacity of  $S_3T_1$  were greater than for the other reconstruction patterns. [Conclusion] The reconstruction pattern of  $S_3T_1$  with a water content of 15% and PAM molecular weight of  $3.00 \times 10^6$  Da were conducive to the restoration of the ecological environment in mining areas and to the improvement of the stability of iron tailing sand.

**Keywords:** iron tailing sand; soil reconstruction pattern; water content; polyacrylamide (PAM); shear strength

中国铁矿资源丰富,铁矿资源的开发对于社会经济的发展做出了巨大的贡献。但同时,中国的铁矿石品位较低,铁矿石的开采会产生大量的尾矿,尾矿由于密度大、利用率差、养分低且通气性较差等问题长期堆放不仅会占用一定的土地资源,并且随着尾矿的堆放,尾矿边坡稳定性下降,易发生滑坡等地质灾害,危及地区人民的生命安全,影响当地生态环境。

抗剪强度作为评价土壤侵蚀敏感性,维护耕层土壤结构稳定,反映耕层土壤耕作性能的重要力学指标<sup>[1-3]</sup>,主要受到含水率、密度以及土体自身结构的影响,密度和结构一般由土体自身性质决定变化较小,而含水率一般受到降雨的影响变化较大。因此,探究抗剪强度的变化就要考虑含水率的影响。聚丙烯酰胺(PAM)作为一种已经发现和广泛应用的土壤结构调理剂,具有水溶性好,无毒,絮凝性好等优点,并且能够与土壤颗粒有效的结合,减少径流侵蚀中泥沙的沉积<sup>[4]</sup>,增加土壤团聚体数量<sup>[5-7]</sup>,提高土体临界抗剪强度的作用<sup>[8]</sup>。目前,针对 PAM 的研究主要以改良土壤理化性质为主,王中妮等<sup>[9]</sup>研究发现,PAM 的施加可以提高土壤的抗冲性与抗拉强度。张婉璐等<sup>[10]</sup>研究发现,施用一定浓度的 PAM 可以提高土壤中团聚体的含量、土壤内部孔隙增多、总孔隙度增大、土壤气孔结构得到改善。而将 PAM 应用于铁尾矿砂的研究还相对较少,特别是 PAM 对铁尾矿砂抗剪强度作用效果的研究尚无相关报道。为此,本文以山西省垣曲县铁尾矿砂为研究对象,设计不同的砂土比例重构铁尾矿砂,测定疏松、偏紧、致密 3 种状态下含水率、PAM 分子量变化对重构铁尾矿砂黏聚力、内摩擦角、抗剪强度的影响。通过本文系统性研究,以期对铁尾矿的边坡稳定性防护提供新思路,同时也为矿区生态环境的修复提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验样品为铁尾矿砂和土壤,铁尾矿砂来源于山西省垣曲县国泰矿业集团泉子沟干排铁尾矿库,实地调查测得矿区铁尾矿砂长期自然沉降后表层容重为  $1.65 \text{ g/cm}^3$ 。土壤为矿区周边农田耕层原状土壤,土壤类型为黄褐土。试验样品于 2021 年 4 月采集完毕带回实验室,风干、碾碎、去除杂物过 2 mm 筛备用。试验用阴离子型聚丙烯酰胺(PAM),选取分子量分别为  $3.00 \times 10^6$  和  $6.00 \times 10^6$  Da,质量浓度均为 0.08%。该试验材料由河南众邦环保科技有限公司生产,水解度为 30%,粒径约 5 mm。

### 1.2 试验设计

本试验采用室内重塑土体的方法制备重构铁尾矿砂试样,共设置 S,  $S_3T_1$ ,  $S_1T_1$ ,  $S_1T_3$ , T(S 为铁尾矿砂, T 为土壤)这 5 种重构模式,质量掺土率分别为 0, 25%, 50%, 75%, 100%。由于实测得到铁尾矿砂田间持水量为 14.82%,饱和含水率为 23.49%,故 5 种重构模式均设置 15%, 20% 两个含水率水平。铁尾矿砂在排弃过程中由于受到机械碾压作用容重变化较大<sup>[11]</sup>,为了比较不同容重状态下铁尾矿砂的稳定性,根据每个重构模式的容重变幅设置 3 个容重水平代表疏松、偏紧、致密 3 种状态。本团队在研究 PAM 对铁尾矿砂水分运移的影响中发现,PAM 分子量越大对铁尾矿砂饱和导水率的抑制作用就越强,且 PAM 质量浓度为 0.08% 时,生态修复的效果较好<sup>[12]</sup>。故本次试验选取 PAM 分子量为  $3.00 \times 10^6$  Da,  $6.00 \times 10^6$  Da 两个水平,质量浓度均为 0.08%。试验设计详见表 1,每种处理设 3 组重复。重构铁尾矿砂颗粒分析详见表 2。

表 1 重构铁尾矿砂试验设计

重构模式	容重/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )			含水率	聚丙烯酰胺(PAM)分子量/Da(浓度)
	疏松	偏紧	致密		
S(0%)	1.5	1.6	1.7		
$S_3T_1$ (25%)	1.4	1.5	1.6		
$S_1T_1$ (50%)	1.4	1.5	1.6	15%, 20%	$3.00 \times 10^6$ (0.08%), $6.00 \times 10^6$ (0.08%)
$S_1T_3$ (75%)	1.4	1.5	1.6		
T(100%)	1.3	1.4	1.5		

注:S 为铁尾矿砂,T 为土壤。 $S_3T_1$ ,  $S_1T_1$ ,  $S_1T_3$  分别表示铁尾矿砂的质量掺土率为 25%, 50%, 75%。下同

表 2 重构铁尾矿砂颗粒分析

重构模式	颗粒分级/mm			
	<0.002	0.002~0.005	0.005~0.01	0.01~2
S(0%)	14.43%	7.69%	46.53%	31.35%
S <sub>3</sub> T <sub>1</sub> (25%)	16.95%	7.91%	46.62%	28.52%
S <sub>1</sub> T <sub>1</sub> (50%)	16.66%	6.32%	40.90%	36.12%
S <sub>1</sub> T <sub>3</sub> (75%)	18.64%	6.04%	42.04%	33.28%
T(100%)	24.19%	6.58%	42.34%	26.89%

### 1.3 试验方法

(1) 试样制备。试验于 2021 年 5—8 月于山西农业大学资源环境试验站进行。根据所设重构试样的容重与含水率,称取相应质量铁尾矿砂和土样混匀备用,采用干混法加入 PAM,将加入的 PAM 与重构试样充分混匀后加水,根据公式(1)计算制备试样所需加入的水量,均匀喷洒于试样上,充分混匀后装入盛土容器中并用保鲜膜密封,使其充分湿润 24 h,以配制成不同容重、含水率、不同分子量 PAM 的试样。制备试样所需的加水量计算公式为:

$$m_w = \frac{m_0}{0.01w_0 + 1} \times 0.01(w_1 - w_0) \quad (1)$$

式中: $m_w$  为制样所需加入水的质量(g); $m_0$  为风干重构土体的质量(g); $w_0$  为风干重构土体的含水率(%); $w_1$  为制样所需的含水率(%)。

(2) 剪切过程。制备好的试样采用南京土壤仪器厂生产的 ZJ 型应变控制式直剪仪(四联剪)进行试验。试验中利用环刀进行取样,取样面积为 30 cm<sup>2</sup>,高度为 2 cm。取样完成后直接剪切。试验设置 4 个法向应力分别为 50, 100, 200, 400 kPa, 剪切速率为 0.8 mm/min,使试样在 3~5 min 内剪破。如测力计中的量表指针不再前进,或有明显后退,表示试样已经剪切破坏。但一般宜剪切变形达 4 mm。若量表指针再继续增加,则剪切变形应达 6 mm 为止,直至试样剪破为止,记录量表最终读数,每组载荷做 3 组重复试验。

### 1.4 数据处理

利用 Excel 2019 整理试验数据并作图,SPSS 21.0 软件进行试验数据处理和相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 含水率和 PAM 分子量对重构铁尾矿砂黏聚力的影响

黏聚力的形成主要包括两个部分,一部分是由于土粒间分子引力所形成的原始黏聚力,另外一部分是由于土中化合物的胶结作用形成的固化黏聚力。黏聚力作为影响土体抗剪强度变化的一个重要力学指

标,因此研究铁尾矿砂抗剪强度就需要考虑黏聚力变化产生的影响。含水率和 PAM 分子量对重构铁尾矿砂黏聚力的影响如图 1—3 所示。整体来看,随着掺土量的增加,重构铁尾矿砂的黏聚力呈上升的趋势;随着含水率的增加重构铁尾矿砂黏聚力下降;随着 PAM 分子量的不同,重构铁尾矿砂黏聚力有所变化;3 种状态下随紧实度的增加,重构铁尾矿砂黏聚力增大。

#### 2.1.1 含水率变化对重构铁尾矿砂黏聚力的影响

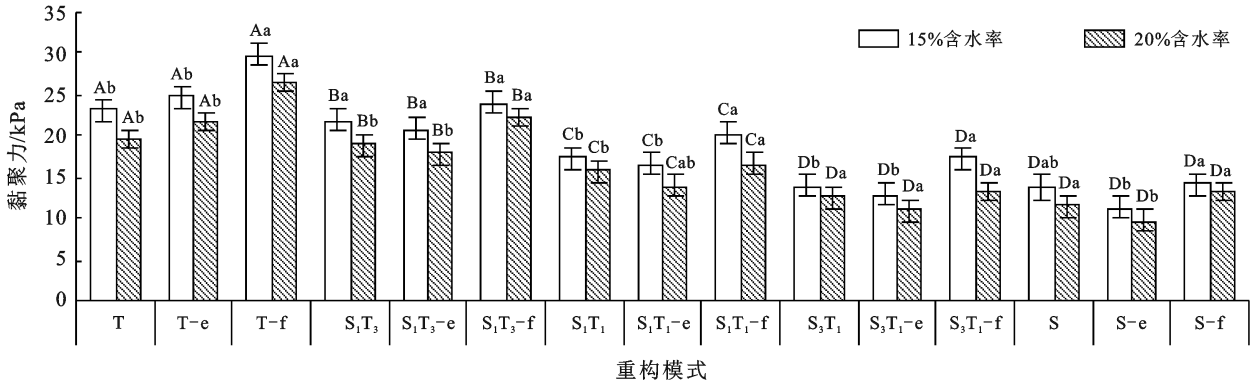
疏松、偏紧、致密 3 种状态下,随着含水率增加,T, S<sub>1</sub>T<sub>3</sub>, S<sub>1</sub>T<sub>1</sub>, S<sub>3</sub>T<sub>1</sub>, S 这 5 种重构模式的黏聚力下降。疏松状态下,含水率由 15% 增至 20% 时,5 种重构模式的黏聚力依次分别降低了 3.47, 3.02, 1.59, 1.37 和 2.23 kPa;受含水率影响,T 模式的黏聚力显著降低( $p < 0.05$ ), S<sub>1</sub>T<sub>3</sub>, S<sub>1</sub>T<sub>1</sub>, S<sub>3</sub>T<sub>1</sub> 3 种重构模式随掺土量的减少,黏聚力降幅减弱。偏紧状态下,含水率由 15% 增至 20% 时,5 种重构模式的黏聚力依次分别降低了 4.53, 3.82, 5.42, 0.82 和 3.30 kPa;受含水率的影响, S<sub>1</sub>T<sub>1</sub> 模式的黏聚力显著性降低( $p < 0.05$ ), S<sub>3</sub>T<sub>1</sub> 模式的黏聚力无显著性变化( $p > 0.05$ )。致密状态下,含水率由 15% 增至 20% 时,5 种重构模式的黏聚力依次降低了 5.89, 1.51, 2.72, 2.56 和 2.50 kPa;受含水率的影响,T 模式的黏聚力显著性降低( $p < 0.05$ ), S<sub>1</sub>T<sub>3</sub> 模式的黏聚力无显著性变化( $p > 0.05$ )。含水率的增加黏聚力降低,分析其原因主要是由于水分进入土壤,在土壤颗粒表面形成水膜,产生一种润滑作用,随着含水率的升高,颗粒表面水膜增厚,润滑作用增强,使得土壤颗粒在外力作用下相对滑动的阻力减小,从而导致黏聚力随含水率的增加而减小<sup>[13]</sup>。

#### 2.1.2 PAM 分子量变化对重构铁尾矿砂黏聚力的影响

疏松、偏紧、致密 3 种状态下,PAM 分子量由 0 增至  $3.00 \times 10^6$  Da 时, S<sub>1</sub>T<sub>3</sub>, S<sub>1</sub>T<sub>1</sub>, S<sub>3</sub>T<sub>1</sub>, S 这 4 种重构模式的黏聚力降低,分子量由  $3.00 \times 10^6$  Da 增至  $6.00 \times 10^6$  Da 时,4 种重构模式的黏聚力增大;T 的黏聚力随 PAM 分子量的增加持续增大。疏松状态下,PAM 分子量由 0 增至  $3.00 \times 10^6$  Da, S<sub>1</sub>T<sub>3</sub>, S<sub>1</sub>T<sub>1</sub>, S<sub>3</sub>T<sub>1</sub>, S<sub>1</sub> 种重构模式在含水率 15% 时黏聚力依次降低了 0.96, 0.61, 1.03 和 2.57 kPa;含水率 20% 时黏聚力依次降低了 0.95, 1.72, 1.68 和 1.79 kPa。PAM 分子量由  $3.00 \times 10^6$  增至  $6.00 \times 10^6$  Da, 4 种重构模式在含水率 15% 时黏聚力依次增加了 3.14, 3.74, 4.43 和 2.92 kPa, S<sub>3</sub>T<sub>1</sub> 模式的黏聚力增幅最大;含水率 20% 时黏聚力依次增加了 4.41, 2.69, 2.34 和 3.40 kPa, S<sub>1</sub>T<sub>3</sub> 模式的黏聚力增长幅度最大。偏紧状态下,PAM 分子量为  $3.00 \times 10^6$  Da, 含水率 15% 时, S 模式的黏聚力 15.65 kPa 高于 S<sub>3</sub>T<sub>1</sub> 的黏聚力 14.55 kPa;

PAM 分子量为  $6.00 \times 10^6$  Da 时, S 模式的黏聚力 19.09 kPa 低于  $S_3T_1$  的黏聚力 20.13 kPa; PAM 分子量为  $3.00 \times 10^6$  Da, 含水率 20% 时, S 模式的黏聚力 12.53 kPa 高于  $S_3T_1$  的黏聚力 12.39 kPa; PAM 分子量为  $6.00 \times 10^6$  Da 时, S 的黏聚力 15.04 kPa 低于

$S_3T_1$  的黏聚力 15.21 kPa。致密状态下, PAM 分子量为  $3.00 \times 10^6$  Da, 含水率 20% 时, S 模式的黏聚力 17.56 kPa 高于  $S_3T_1$  的黏聚力 16.53 kPa; PAM 分子量为  $6.00 \times 10^6$  Da 时, S 模式的黏聚力 20.29 kPa 低于  $S_3T_1$  的黏聚力 18.57 kPa。



注:图中  $S, S_3T_1, S_1T_1, S_1T_3, T$  分别表示 5 种重构模式, 质量掺土率分别为 0.25%, 50%, 75%, 100%; e 表示在不同重构模式中加入  $3.00 \times 10^6$  Da 分子量 PAM, f 表示在不同重构模式中加入  $6.00 \times 10^6$  Da 分子量的 PAM; 大写字母表示不同重构模式、不同含水率对黏聚力影响的差异显著性 ( $p < 0.05$ ), 小写字母表示相同重构模式下不同 PAM 分子量、不同含水率对黏聚力影响的差异显著性 ( $p < 0.05$ )。下同

图 1 疏松状态下含水率和 PAM 分子量变化对重构铁尾矿砂黏聚力的影响

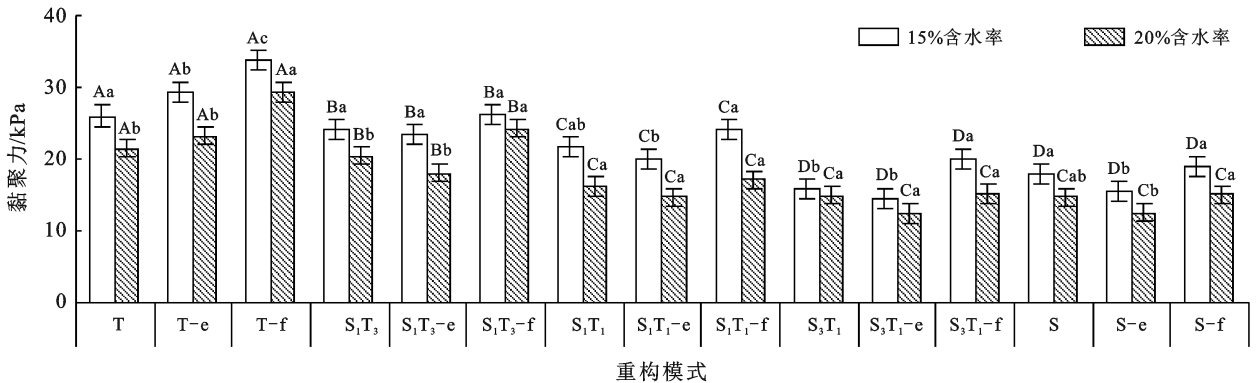


图 2 偏紧状态下含水率和 PAM 分子量变化对重构铁尾矿砂黏聚力的影响

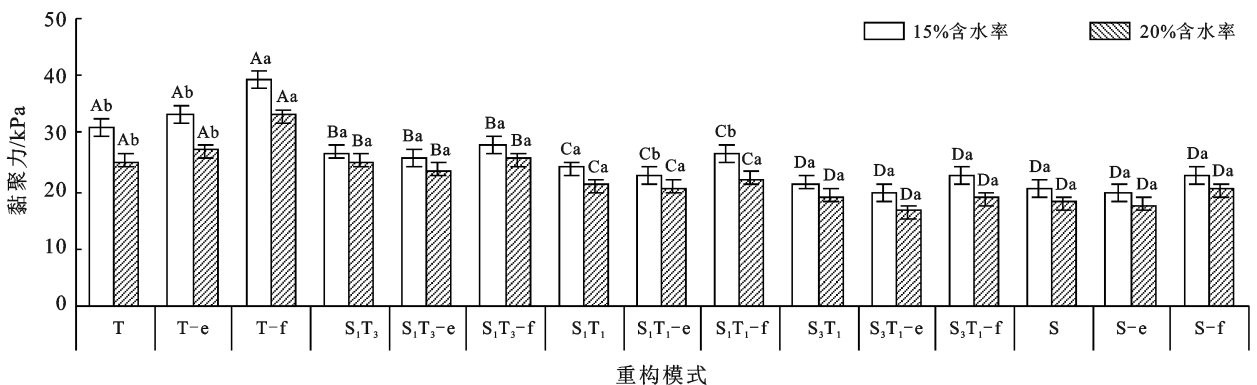


图 3 致密状态下含水率和 PAM 分子量变化对重构铁尾矿砂黏聚力的影响

## 2.2 含水率和 PAM 分子量对重构铁尾矿砂内摩擦角的影响

土壤内摩擦角反映了土壤的摩擦特性, 一般包括

土壤颗粒之间的滑动摩擦力和颗粒间的咬合力两部分<sup>[14]</sup>。内摩擦角作为影响抗剪强度变化的另一重要力学指标。



因此研究铁尾矿砂抗剪强度时就需要考虑内摩擦角变化产生的影响。含水率和 PAM 分子量对重构铁尾矿砂内摩擦角的影响如图 4—6 所示。整体来看,随着含水率的增加,重构铁尾矿砂的内摩擦角在

降低;PAM 的施加可以提高重构铁尾矿砂的内摩擦角,且随 PAM 分子量的不同,内摩擦角有所变化;3 种状态下随紧实度的增加,重构铁尾矿砂的内摩擦角增大。

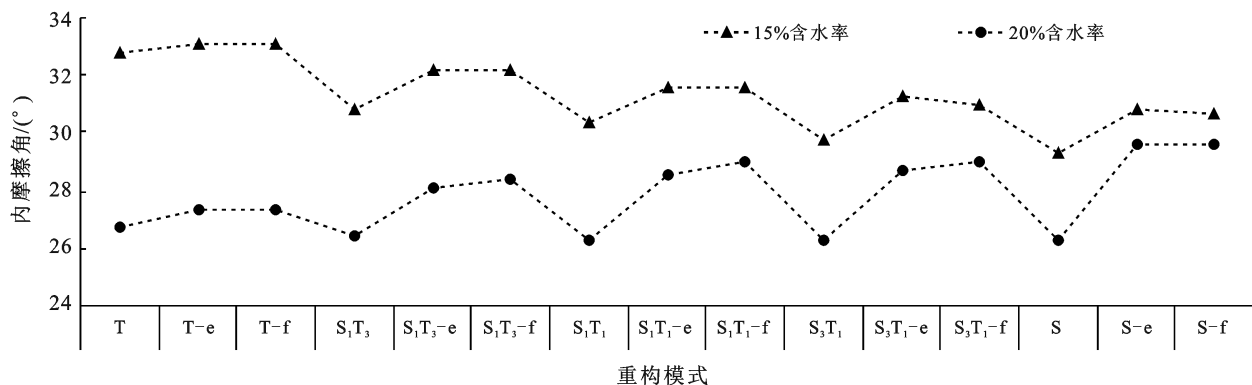


图 4 疏松状态下含水率和 PAM 分子量变化对重构铁尾矿砂内摩擦角的影响

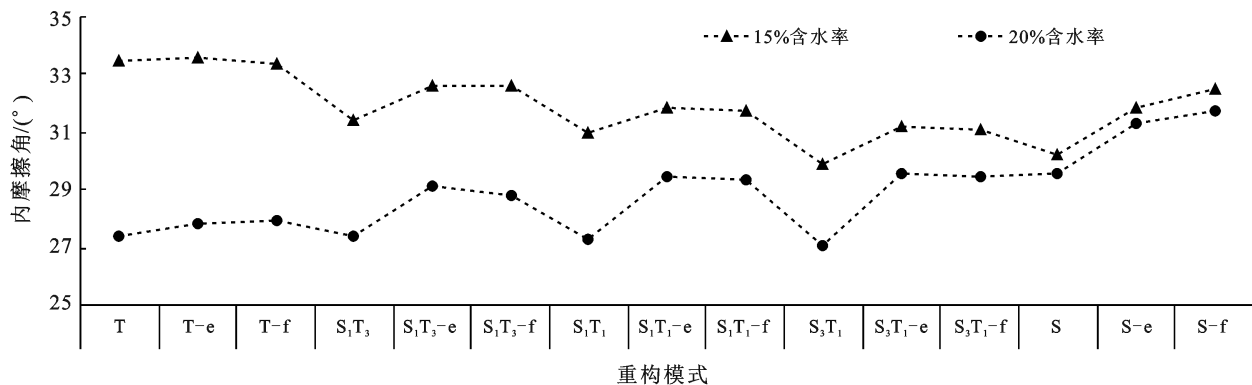


图 5 偏紧状态下含水率和 PAM 分子量变化对重构铁尾矿砂内摩擦角的影响

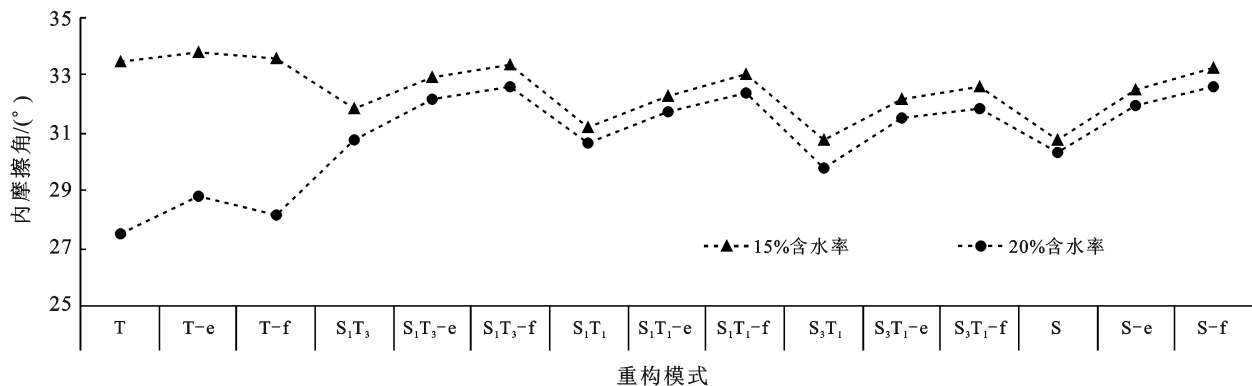


图 6 致密状态下含水率和 PAM 分子量变化对重构铁尾矿砂内摩擦角的影响

2.2.1 含水率变化对重构铁尾矿砂内摩擦角的影响  
疏松、偏紧、致密 3 种状态下,随着含水率增加,T, S<sub>1</sub>T<sub>3</sub>, S<sub>1</sub>T<sub>1</sub>, S<sub>3</sub>T<sub>1</sub>, 这 5 种重构模式的内摩擦角降低。疏松状态下,含水率由 15% 增至 20%, 5 种重构模式的内摩擦角依次降低了 5.99°, 4.49°, 4.06°, 3.45°, 3.05°。

偏紧状态下,含水率由 15% 增至 20%, 5 种重构模式的内摩擦角依次降低了 6.05°, 4.06°, 3.74°, 2.79°, 0.74°。致密状态下含水率由 15% 增至 20%, 5 种重构模式的内摩擦角依次降低了 6.00°, 1.15°, 0.60°, 0.92°, 0.45°。随着含水率的升高,3 种状态下,

T 模式的内摩擦角显著性降低 ( $p < 0.05$ ), 疏松、偏紧状态下 S 模式的内摩擦角显著性降低 ( $p < 0.05$ );  $S_1 T_3$ ,  $S_1 T_1$ ,  $S_3 T_1$ , S 这 4 种重构模式随掺土量的减少, 内摩擦角降幅减弱; 含水率变化对致密状态下  $S_1 T_3$ ,  $S_1 T_1$ ,  $S_3 T_1$ , S 这 4 种重构模式的内摩擦角影响较小。

**2.2.2 PAM 分子量变化对重构铁尾矿砂内摩擦角的影响** 疏松、偏紧、致密 3 种状态下, PAM 分子量由 0 增至  $3.00 \times 10^6$  Da 时, T,  $S_1 T_3$ ,  $S_1 T_1$ ,  $S_3 T_1$ , S 这 5 种重构模式的内摩擦角增大, PAM 分子量由  $3.00 \times 10^6$  Da 增至  $6.00 \times 10^6$  Da 时, 3 种状态下内摩擦角无显著性变化 ( $p > 0.05$ )。疏松状态下, PAM 分子量由 0 增至  $3.00 \times 10^6$  Da, 5 种重构模式在含水率 15% 时内摩擦角依次增加了  $0.44^\circ$ ,  $1.36^\circ$ ,  $1.20^\circ$ ,  $1.45^\circ$ ,  $1.60^\circ$ ; 含水率 20% 时, 内摩擦角依次增加了  $0.66^\circ$ ,  $1.67^\circ$ ,  $2.17^\circ$ ,  $2.34^\circ$ ,  $3.43^\circ$ 。偏紧状态下, PAM 分子量由 0 增至  $3.00 \times 10^6$  Da, 5 种重构模式在含水率 15% 时内摩擦角依次增加了  $0.12^\circ$ ,  $1.21^\circ$ ,  $0.84^\circ$ ,  $1.37^\circ$ ,  $1.59^\circ$ ; 含水率 20% 时, 内摩擦角依次增加了  $0.49^\circ$ ,  $1.80^\circ$ ,  $2.24^\circ$ ,  $2.46^\circ$ ,  $1.80^\circ$ 。致密状态下, PAM 分子量由 0 增至  $3.00 \times 10^6$  Da, 5 种重构模式在含水率 15% 时内摩擦角依次增加了  $0.26^\circ$ ,  $1.03^\circ$ ,  $1.06^\circ$ ,  $1.40^\circ$ ,  $1.76^\circ$ ; 含水率 20% 时, 内摩擦角依次增加了  $1.31^\circ$ ,  $1.40^\circ$ ,  $1.08^\circ$ ,  $1.77^\circ$ ,  $1.67^\circ$ 。偏紧、致密两种状态下, 随着 PAM 分子量的增加, S 模式的内摩擦角持续增大。

### 2.3 含水率和 PAM 分子量对重构铁尾矿砂抗剪强度的影响

抗剪强度主要指土体对于外荷载所产生的剪应力的极限抵抗能力。对于铁尾矿砂, 由于长时间的堆积, 上层砂子自身重力会对下层土体产生一定的压力, 下层受到外部载荷的作用会产生剪应力和剪切变形, 当下层土体中某一点或者某一个面由于外部载荷产生的剪应力达到土体的抗剪强度时, 下层土体连同砂粒就会沿着剪应力的作用方向产生相对滑动。因此, 要想保证铁尾矿砂的边坡稳定, 就要提高抗剪强度。含水率和 PAM 分子量对重构铁尾矿砂抗剪强度的影响如图 7—9 所示。整体来看, 随着含水率的增加, 重构铁尾矿砂的抗剪强度降低; PAM 的施加能够有效的提高重构铁尾矿砂的抗剪强度, 且随 PAM 分子量的增加, 抗剪强度增大。3 种状态下, 随紧实度的增加, 重构铁尾矿砂的抗剪强度在增大。

#### 2.3.1 含水率变化对重构铁尾矿砂抗剪强度的影响

含水率变化会影响重构铁尾矿砂的内摩擦角和黏聚力, 而内摩擦角和黏聚力又是抗剪强度的两个重要力学参数, 因此, 含水率变化会对抗剪强度产生影响。

疏松、偏紧、致密 3 种状态下, 随着含水率的增加, T,  $S_1 T_3$ ,  $S_1 T_1$ ,  $S_3 T_1$ , S 这 5 种重构模式的抗剪强度在降低。疏松状态下, 含水率由 15% 增至 20% 时, 5 种重构模式的抗剪强度依次降低了 58.61, 43.82, 38.82, 32.81 和 27.20 kPa。偏紧状态下, 含水率由 15% 增至 20% 时, 5 种重构模式的抗剪强度依次降低了 60.46, 41.90, 40.74, 25.22 和 10.66 kPa。致密状态下, 含水率由 15% 增至 20% 时, 5 种重构模式的抗剪强度依次降低了 63.31, 13.58, 9.29, 12.41 和 6.34 kPa。随着含水率的升高, 3 种状态下, T 模式的抗剪强度显著性降低 ( $p < 0.05$ ); 含水率的变化对致密状态下重构铁尾矿砂的抗剪强度影响最小。

**2.3.2 PAM 分子量变化对重构铁尾矿砂抗剪强度的影响** 疏松、偏紧、致密 3 种状态下, 施加 PAM 可以提高 T,  $S_1 T_3$ ,  $S_1 T_1$ ,  $S_3 T_1$ , S 这 5 种重构模式的抗剪强度, 且随着 PAM 分子量的增加, 重构模式的抗剪强度增大。疏松状态下, PAM 分子量由 0 增至  $3.00 \times 10^6$  Da, 5 种重构模式的抗剪强度在含水率 15% 时依次增加了 6.34, 12.40, 11.71, 14.05 和 13.86 kPa, 其中  $S_3 T_1$  模式在 15% 含水率时抗剪强度显著性增加 ( $p < 0.05$ ); PAM 分子量由  $3.00 \times 10^6$  Da 增至  $6.00 \times 10^6$  Da, 5 种重构模式的抗剪强度依次增加了 4.44, 1.90, 3.21, 2.00 和 1.59 kPa。PAM 分子量由 0 增至  $3.00 \times 10^6$  Da, 5 种重构模式的抗剪强度在含水率 20% 时依次增加了 7.92, 14.61, 19.18, 20.42 和 28.82 kPa; PAM 分子量由  $3.00 \times 10^6$  Da 增至  $6.00 \times 10^6$  Da 时, 抗剪强度依次增加了 3.96, 7.86, 6.44, 4.69 和 2.34 kPa; PAM 分子量  $6.00 \times 10^6$  Da 时, 5 种重构模式的抗剪强度均有增加, 但与  $3.00 \times 10^6$  Da 分子量相比, 抗剪强度增加不显著 ( $p > 0.05$ )。

偏紧状态下, PAM 分子量由 0 增至  $3.00 \times 10^6$  Da 时, 5 种重构模式的抗剪强度在含水率 15% 时依次增加了 3.55, 11.39, 7.50, 12.50 和 13.81 kPa; 含水率 20% 时, 抗剪强度依次增加了 6.86, 15.39, 19.03, 19.97 和 16.19 kPa。PAM 分子量由  $3.00 \times 10^6$  Da 增至  $6.00 \times 10^6$  Da, 5 种重构模式的抗剪强度虽有增加但增加不显著 ( $p > 0.05$ )。致密状态下, PAM 分子量变化对重构铁尾矿抗剪强度的作用效果与疏松、偏紧状态基本相同, 即 PAM 分子量  $3.00 \times 10^6$  Da 时, 5 种重构模式抗剪强度增幅较大, PAM 分子量由  $3.00 \times 10^6$  Da 增至  $6.00 \times 10^6$  Da 时, 抗剪强度虽有增加但增加不显著 ( $p > 0.05$ )。疏松、偏紧、致密 3 种状态下, 添加  $3.00 \times 10^6$  Da 分子量的 PAM,  $S_3 T_1$  模式的抗剪强度增长较大。

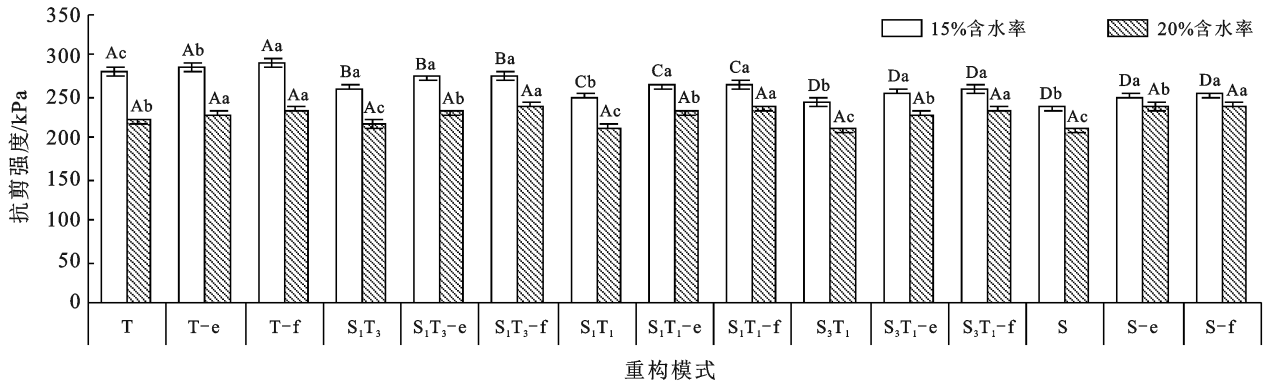


图7 疏松状态下含水率和PAM分子量变化对铁尾矿砂抗剪强度的影响

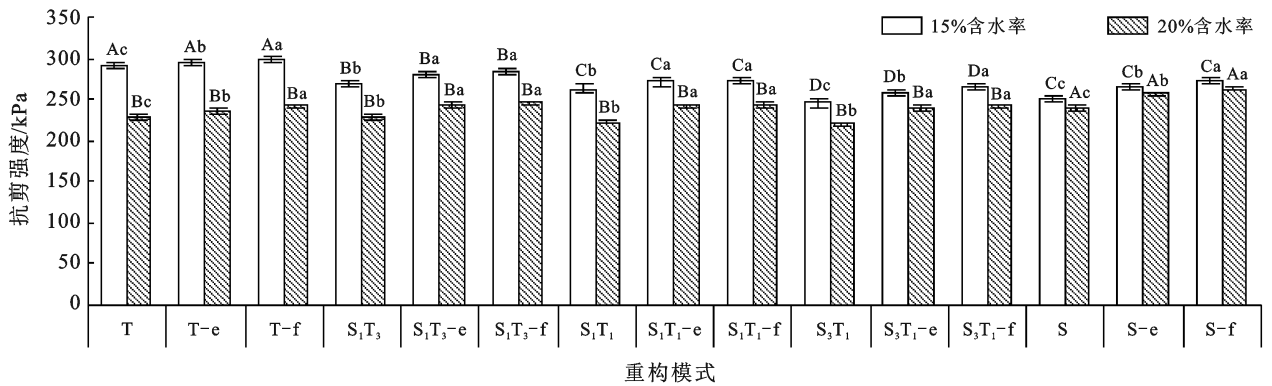


图8 偏紧状态下含水率和PAM分子量变化对重构铁尾矿砂抗剪强度的影响

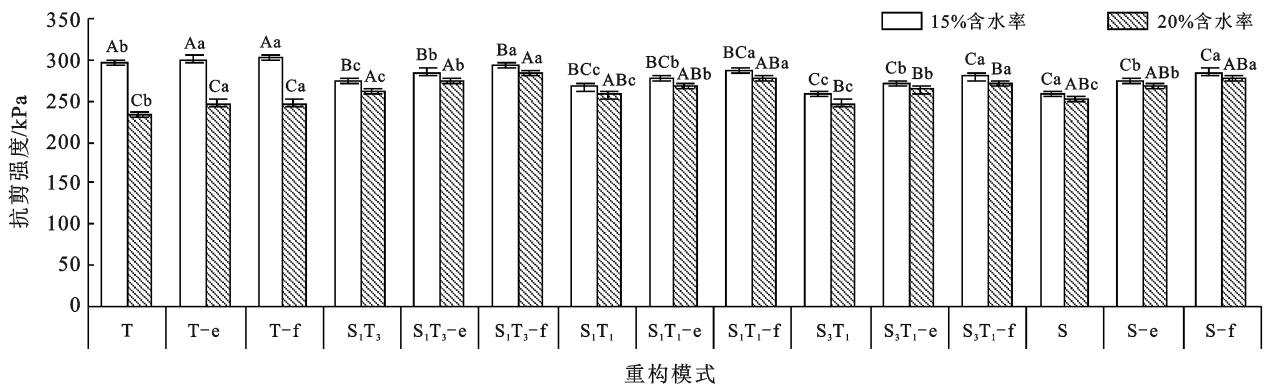


图9 致密状态下含水率和PAM分子量变化对重构铁尾矿砂抗剪强度的影响

## 3 讨论

### 3.1 含水率对重构铁尾矿砂抗剪强度的影响

重构铁尾矿砂的抗剪强度因含水率的不同而存在一定差异,试验结果证明,含水率由15%增至20%,重构铁尾矿砂内摩擦角减小、黏聚力下降,最终导致抗剪强度值也在减小。这与韦杰等<sup>[15]</sup>和施威等<sup>[16]</sup>研究含水率对土壤抗剪性能的影响结果一致,韦杰等<sup>[15]</sup>认为,土壤含水率越大,在相同围压下破坏土体时作用于试样的总压力越小,土体更易被破坏;

施威等<sup>[16]</sup>认为,随着含水率的增加,孔隙水压力增大,根据有效应力原理,总应力大小不变,则有效应力减小,土的抗剪强度降低。试验发现,在疏松和偏紧两种状态下,含水率变化对重构铁尾矿砂抗剪强度的影响较大,分析其原因可能是这两种状态下紧实度相对较低,铁尾矿砂黏粒含量也低,结构过于分散,大孔隙数量多使得铁尾矿砂固持水分的能力降低,水分易流动,含水率的变化就会对铁尾矿砂稳定性产生较大的影响;致密状态下,含水率变化对重构铁尾矿砂抗剪强度影响较小,其主要是因为随着紧实度的增加,

铁尾矿砂内部大孔隙就会被挤压成易于持水的中小孔隙,水分存储空间增多,铁尾矿砂中的水分就相对稳定,此时含水率变化对铁尾矿砂稳定性影响较小。本次试验设置的最高含水率 20% 已接近铁尾矿砂的饱和含水率 23.49%,含水率较高时重构模式的抗剪强度下降,因此,在铁尾矿砂生态修复实践中,要增强其重构土体水分入渗能力,否则会由于含水率过高,降低重构铁尾矿砂的抗剪强度,导致边坡稳定性的下降;含水率 15% 时 5 种重构模式的抗剪强度均较高, $S_3T_1$  的重构模式水分入渗能力较好,有利于铁尾矿边坡稳定性的防护。

### 3.2 容重对重构铁尾矿砂抗剪强度的影响

容重可以影响铁尾矿砂的水分入渗性能<sup>[17]</sup>,影响铁尾矿砂的持水性能<sup>[18]</sup>,影响土体内摩擦角、黏聚力、抗剪强度<sup>[19]</sup>。本团队在对铁尾矿砂水分运移的研究中发现,铁尾矿砂在容重  $1.6 \text{ g/cm}^3$  时持水性最好,其他重构模式均在  $1.5 \text{ g/cm}^3$  下持水性最高;5 种重构模式在最佳持水容重下,T 的持水性最好,持水性能总体上随掺土率的升高而增强;T, $S_1T_3$ , $S_1T_1$ , $S_3T_1$ ,S 这 5 种重构模式中透气性由好到差依次为 T, $S_3T_1$ , $S_1T_1$ , $S_3T_1$ ,S;砂土混掺中  $S_3T_1$ , $S_1T_1$  和  $S_1T_3$  这 3 种重构模式在定容重情况下  $S_3T_1$  入渗性能最好<sup>[11]</sup>。试验结果表明,随着容重的增加,同一含水率水平下,重构铁尾矿砂的内摩擦角、黏聚力、抗剪强度均呈增加的趋势。这与前人关于土体容重对抗剪强度影响的结果基本相同,王建等<sup>[20]</sup>在研究中发现,当土壤容重越大,土壤将越紧实,颗粒间距离越近,颗粒间接触越密集,导致土壤颗粒之间及土壤颗粒与水分之间相对作用增强,导致土壤内摩擦角变大、黏聚力增大,进而导致土壤抗剪强度增大。试验表明容重越大,越有利于铁尾矿砂抗剪强度的提高,但在实际的生产中,容重增大可能会导致土壤孔隙减小,水分入渗困难,土壤含水率降低,持水能力下降等,将不利于植被的生长。因此,针对铁尾矿砂在不同容重下抗剪强度表现的差异性,还需要进一步设置不同容重梯度从不同容重下孔隙的微观结构和连通性差异去验证,在提高铁尾矿砂抗剪强度的同时,又要保证铁尾矿砂通气、保水,适宜植被生长,也为铁尾矿砂高效利用提供了方向。

### 3.3 PAM 分子量对重构铁尾矿砂抗剪强度的影响

PAM 可以起到增加土壤中大团聚体数量,增强团聚体稳定性的作用<sup>[21-24]</sup>,单施 PAM 即可以起到增强土壤抗剪强度的作用<sup>[25]</sup>,同时可以增强植物根系的抗剪、抗拉特性,根土复合体更有益于土体结构稳定<sup>[26-27]</sup>。本团队在研究 PAM 对铁尾矿砂水分运移

的影响中发现,PAM 的加入可以提高铁尾矿砂田间持水量,提高铁尾矿砂的保水性及饱和含水量,但饱和和导水率随 PAM 质量浓度的增加呈下降趋势,并且 PAM 分子量越大对铁尾矿砂饱和和导水率的抑制作用就越强<sup>[12]</sup>。试验结果表明,PAM 的加入可以有效提高铁尾矿砂的抗剪强度,作用效果随 PAM 分子量的增加而增强,这表明加入 PAM 后,随着铁尾矿砂中大团聚体数量的增加,铁尾矿砂抵抗剪切破坏的能力增强,铁尾矿稳定性提高。作为影响抗剪强度变化的重要力学参数黏聚力,本次研究发现,PAM 分子量对  $S_1T_3$ , $S_1T_1$ , $S_3T_1$ ,S 这 4 种重构模式黏聚力产生了一定的影响,分子量为  $3.00 \times 10^6 \text{ Da}$  时,加入 PAM 后 4 种重构模式的黏聚力降低,分子量为  $6.00 \times 10^6 \text{ Da}$  时,PAM 的加入黏聚力增大。针对这一现象,后续研究中可以适当增加 PAM 分子量和质量浓度梯度,探究不同浓度和分子量作用下重构铁尾矿砂黏聚力的变化规律,为后续科学实践提供更加全面的依据。

## 4 结论

(1) 同一紧实状态下,随着含水率的增加,纯土、掺土率 25%,50%,75%、纯尾矿砂 5 种重构模式的黏聚力、内摩擦角下降;15% 含水率时 5 种重构模式的抗剪强度均高于 20% 含水率;同一含水率水平下,5 种重构模式的内摩擦角、黏聚力、抗剪强度随紧实度的增加而增大。

(2) 本课题前期研究表明聚丙烯酰胺(PAM)的加入可以提高铁尾矿砂田间持水量,增加铁尾矿砂的保水性和饱和含水率,同时 PAM 分子量过高会抑制铁尾矿砂的饱和和导水率,低分子量  $3.00 \times 10^6 \text{ Da}$  的 PAM 有利于生态修复。本试验在此基础上进一步证明 PAM 可以提高重构铁尾矿砂的抗剪强度,且 PAM 分子量为  $3.00 \times 10^6 \text{ Da}$  时,5 种重构模式的抗剪强度增强效果比  $6.00 \times 10^6 \text{ Da}$  PAM 分子量的好。

(3) 5 种重构模式中添加  $3.00 \times 10^6 \text{ Da}$  分子量的 PAM,掺土率 25% 的重构模式抗剪强度提高较大,水分入渗能力也较强;同时掺土率 25% 的模式,铁尾矿砂利用率高,土壤掺入量少。

(4) 综合以上结果分析,含水率 15%,PAM 分子量为  $3.00 \times 10^6 \text{ Da}$  时,掺土率 25% 的少土重构模式对于矿区生态环境的修复、铁尾矿边坡稳定性的提高具有积极的作用。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 刘昌鑫,潘健,邓羽松,等.干湿循环对崩岗土体稳定性的影响[J].水土保持学报,2016,30(6):253-258.



- [2] 卫杰,张晓明,张鹤,等.干湿循环对崩岗不同层次土体无侧限抗压强度的影响[J].水土保持学报,2016,30(5):107-111.
- [3] 魏玉杰,吴新亮,蔡崇法.崩岗体剖面土壤收特性的空间变异性[J].农业机械学报,2015,46(6):153-159.
- [4] Al-Abed N, Amayreh J, Shudifat E, et al. Polyacrylamide(PAM) effect on irrigation induced soil erosion and infiltration [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2003,49(3):301-308.
- [5] 曹丽花,赵世伟,梁向峰,等. PAM 对黄土高原主要土壤类型水稳性团聚体的改良效果及机理研究[J].农业工程学报,2008,24(1):45-48.
- [6] 员学锋,吴普特,冯浩.聚丙烯酰胺(PAM)的改土及增产效应[J].水土保持研究,2002,9(2):55-58.
- [7] Sepaskhah A R, Shahabizad V. Effects of water quality and PAM application rate on the control of soil erosion, water infiltration and runoff for different soil textures measured in a rainfall simulator [J]. Biosystems Engineering, 2010,106(4):513-520.
- [8] 刘纪根,雷廷武.坡耕地施加 PAM 对土壤抗冲抗蚀能力影响试验研究[J].农业工程学报,2002,18(6):59-62.
- [9] 王中妮,樊恒辉,贺智强,等.分散性土改性剂对土的分散性和抗拉强度的影响[J].岩石力学与工程学报,2015,34(2):425-432.
- [10] 张婉璐,魏占民,徐睿智,等. PAM 对河套灌区盐渍土物理性状及水分蒸发影响的初步研究[J].水土保持学报,2012,26(3):227-231.
- [11] 陈丹.干排铁尾矿不同土壤重构模式水分运移模拟研究[D].山西 太谷:山西农业大学,2019.
- [12] Sun Bo, Lyu Chunjuan, Bi Rutian, et al. Effects of polyacrylamide molecular weight and mass concentration on water transport characteristics of iron tailings [J]. Scientific Reports, 2021,11(1):1-15.
- [13] 胡斐南,魏朝富,许晨阳,等.紫色土区水稻土抗剪强度的水敏性特征[J].农业工程学报,2013,29(3):107-114.
- [14] 林金石,庄雅婷,黄炎和,等.不同剪切方式下崩岗红土层抗剪特征随水分变化规律[J].农业工程学报,2015,31(24):106-110.
- [15] 韦杰,史炳林,李进林.紫色土坡耕地埂坎土壤抗剪性能对含水率的响应[J].农业工程学报,2016,32(20):153-160.
- [16] 施威,魏继红,宋京雷,等.含水率对下蜀土抗剪强度的影响[J].西华大学学报,2016,35(3):99-100.
- [17] 吕殿青,邵明安,潘云.容重变化与土壤水分特征的依赖关系研究[J].水土保持学报,2009,23(3):209-216.
- [18] 陈丹,吕春娟,郭星星,等.容重对铁尾矿砂水分运移特征的影响[J].水土保持通报,2019,39(1):82-84.
- [19] 张健乐,史东梅,刘义,等.土壤容重和含水率对紫色土坡耕地耕层抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2020,34(3):164-167.
- [20] 王健,刘旦旦,张鹏辉.土壤密度对土壤抗侵蚀性的影响[J].灌溉排水学报,2013,32(1):65-68.
- [21] 王勇,李富程,汪璇,等.聚丙烯酰胺对紫色土坡地耕作位移及土壤结构的影响[J].水土保持学报,2017,31(4):51-56.
- [22] Lu Shaoyong, Chen Fangxin, Huo Hao Ngo, et al. Effect of straw and polyacrylamide on the stability of land/water ecotone soil and the field implementation [J]. Ecological Engineering, 2016,94:12-21.
- [23] 郭天雷,史东梅,卢阳.几种保护措施对紫色丘陵区坡耕地土壤团聚体结构及有机碳的影响[J].水土保持学报,2017,31(2):197-203.
- [24] Chen Zhang, Chen Wenlu, Li Chengjun, et al. Effects of polyacrylamide on soil erosion and nutrient losses from substrate material in steep rocky slope stabilization projects [J]. Science of the Total Environment, 2016,54(6):26-33.
- [25] 李铁,王润泽,湛芸,等. PAM 和草类根系对荒坡紫色土物理性质与抗剪性能的影响[J].草业学报,2018,27(2):69-78.
- [26] 周涛,湛芸,王润泽,等.种草和施用聚丙烯酰胺对荒坡紫色土抗剪和抗蚀性能的影响研究[J].草业学报,2019,28(3):62-73.
- [27] Hu Xia, Liu Liyou, Li Shunjiang, et al. Development of soil crusts under simulated rainfall and crust formation on a loess soil as influenced by polyacrylamide [J]. Pedosphere, 2012,22(3):415-424.