

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.009



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 酸溶液对原状黄土抗拉强度的影响试验研究

刘华<sup>1a,1b</sup>, 胡鹏飞<sup>1a</sup>, 王松鹤<sup>2</sup>, 刘乃飞<sup>1a,1b</sup>, 胡文乐<sup>1a</sup>, 谷宏全<sup>1a</sup>

(1. 西安建筑科技大学 a. 土木工程学院; b. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 西安 710055;  
2. 西安理工大学 土木工程学院, 西安 710048)

**摘要:**黄土受到污染后,土体的组分以及内部结构会发生改变,从而使得土体抗拉强度也随之发生改变。通过人工配置盐酸、硫酸和硝酸的4种不同浓度的污染液,对比蒸馏水和污染后的土样进行直接拉伸破坏试验,探讨酸污染黄土的拉应力-拉应变特征及过程,进一步分析不同酸溶液种类、浓度对土体抗拉强度演化规律的影响。结果表明:随着酸污染液的侵入,黄土的抗拉强度均小于未污染状态;且随着污染液浓度的增大,盐酸和硝酸污染黄土的抗拉强度均呈减小态势,而硫酸污染黄土的抗拉强度却逐步恢复,拟合后的污染液浓度与抗拉强度呈现出较好的幂函数关系。基于黄土的抗拉强度和抗剪强度,探讨酸污染黄土的联合抗剪强度拟合关系。

**关键词:**原状黄土;酸污染;抗拉强度;演化特征;卧式拉伸仪

**中图分类号:**TU431 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)05-0109-09

## Experimental study on the influence of acid solutions to the tensile strength characteristics of undisturbed loess

LIU Hua<sup>1a,1b</sup>, HU Pengfei<sup>1a</sup>, WANG Songhe<sup>2</sup>, LIU Naifei<sup>1a,1b</sup>, HU Wenle<sup>1a</sup>, GU Hongquan<sup>1a</sup>

(1a. School of Civil Engineering; 1b. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, P. R. China)

**Abstract:** After loess is contaminated, the composition and internal structure of the soil will change, so that the tensile strength of the soil will also change. Based on this, in this paper, four kinds of polluted liquids with different molar concentrations of hydrochloric acid, sulfuric acid and nitric acid were manually configured, and the direct tensile failure test was carried out by comparing distilled water and contaminated soil samples, and discussed the tensile stress-tensile strain characteristics and process of acid contaminated loess. The effects of different acid solution types and concentrations on the evolution of soil tensile strength were further analyzed. The results show that the tensile strength of loess is lower than that of the

**收稿日期:**2020-09-21

**基金项目:**国家自然科学基金(51608436,51778528);西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室自主项目(No. 2019KJCXTD-12)

**作者简介:**刘华(1983-),男,博士,副教授,主要从事黄土力学与工程研究,E-mail:liuhua029@xauat.edu.cn。

**Received:**2020-09-21

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51608436, 51778528); Research Fund of the State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology (No. 2019KJCXTD-12)

**Author brief:** LIU Hua (1983-), PhD, associate professor, main research interests: mechanics and engineering of loess. E-mail: liuhua029@xauat.edu.cn.

unpolluted state with the invasion of the acid polluted liquid. With the increase of the concentration of the contaminated solution, the tensile strength of the loess polluted by hydrochloric acid and nitric acid were decreased, while that of sulfuric acid gradually recovered. The fitted concentration of the contaminated solution showed a good power function relationship with the tensile strength. Finally, based on the tensile strength and shear strength of the polluted loess, the fitting relationship of the combined shear strength of contaminated loess was discussed.

**Keywords:** undisturbed loess; acid pollution; tensile strength; deterioration characteristics; horizontal tensile tester

随着城市现代化和各行各业的快速发展,人类活动对环境造成的影响越来越大,进而引发了众多的环境岩土工程问题,其中,工业企业对地基土的污染就是较为严重的问题之一<sup>[1]</sup>。由于黄土体的特殊结构和工程性质,由土体拉裂而引发的地质灾害不容忽视,对黄土抗拉强度的研究越来越多地引起了学者们的重视。与此同时,城市建设、工业发展的污染物进一步加剧了土体的污染,影响着黄土的抗拉强度演变及工程稳定。因此,对于污染黄土抗拉强度的研究,在工程实际应用中具有重要的意义。

近年来,学者们对于土体抗拉强度特性及工程实践问题的研究也越来越多。Georgiannou 等<sup>[2]</sup>通过拉伸试验和三轴压缩研究了黏粒含量对不排水抗拉强度、拉伸应变等力学特性的影响。Zhou 等<sup>[3]</sup>采用巴西劈裂试验测定了冻土的抗拉强度,结果表明,冻土的含冰量直接影响着土的抗拉强度,其随着温度的降低而增加。吴旭阳等<sup>[4]</sup>研究了重塑黄土的抗拉变形破坏机理,并对破坏类型进行分类,得出黄土的抗拉强度随含水率的增加持续减小。王中妮等<sup>[5]</sup>研究了分散土改性剂对土的抗拉强度的影响,发现氯化铝、三氯乙酸可提高土的抗拉强度。袁志辉等<sup>[6-7]</sup>分别研究了含水率、基质吸力对黄土的抗拉强度的影响,探讨了含水率和干湿循环次数对原状黄土和重塑黄土抗拉强度的影响,进一步分析了干湿循环下黄土抗拉强度的衰减机制。陈日高等<sup>[8]</sup>探究了金属离子对土强度及力学性质造成的影响,进一步分析了污染土中土颗粒间的电离平衡状态,及其对土体强度的改变。朱春鹏等<sup>[9]</sup>研究了酸碱浓度对污染土中有机质含量、土粒比重、粒度成分和界限含水率的影响,并通过三轴试验和直剪试验研究了不同浓度酸碱污染土的强度特性,进一步分析了污染对土样稠度状态、孔隙比和微观结构的影响。夏磊等<sup>[10]</sup>通过模拟酸雨侵蚀土体试验,探究了土体矿物成分受酸雨影响以及土体密度、强度的变化规律。

考虑到目前的研究大都集中在未污染土的抗拉强度方面,在工程中,地基及路基在使用过程中或边坡的自然状态下会受到酸雨或酸性垃圾污染液的影响,结合孔隙水污染对黄土工程性质的影响,对酸污染对黄土抗拉强度的演化特征影响的研究也十分必要。

测试土体抗拉强度的试验方法分为直接法和间接法两大类<sup>[11-12]</sup>。对于抗拉强度测试仪器尚未形成统一标准,相关测试仪器仍在讨论和规范化过程中。Tamrakar 等<sup>[13]</sup>研制了一种基于圆形夹持模具的抗拉强度试验装置。党进谦等<sup>[14]</sup>对直剪仪进行了改造,研制出卧式单轴拉伸仪,试样为长方体,通过手动加载来测量试样的抗拉强度和轴向变形。大多自制的仪器原理相似,只是形状即截面不同,分为规则截面和异形截面<sup>[15-16]</sup>。基于此,笔者采用端部夹具和化学粘结相结合的方法进行试验。

以铜川黄土为研究对象,采用自行装配的黄土卧式单轴抗拉强度测试仪,测试酸污染条件下原状黄土的抗拉强度,探讨不同酸、不同浓度对黄土抗拉强度的影响,分析黄土抗拉强度在酸污染作用下的变化机制。

## 1 试验概况

### 1.1 土样基本物理性质

试验所用原状黄土土样取自铜川市某在挖基坑,取土深度 2~3 m。采用人工取土的方法取得 Q<sub>3</sub> 原状黄土土样,取样现场见图 1,黄土的基本物理参数见表 1。该层土样土质疏松,含有少量虫孔,微量植物根系,颗分曲线如图 2 所示。

表 1 基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties

干密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	含水 率/%	比重 G <sub>s</sub>	液限 W <sub>l</sub> /%	塑限 W <sub>p</sub> /%	塑性 指数 I <sub>p</sub>
1.38	15.4	2.67	35.43	21.42	14.01



图 1 现场取样概况

Fig. 1 Field sampling

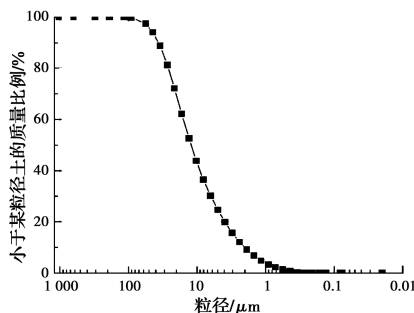


图 2 颗分曲线

Fig. 2 Particle distribution curve

### 1.2 试样制备

试验所选酸液包括盐酸、硫酸和硝酸 3 种,酸溶液配置浓度为 0.1、0.5、1.0、2.0 mol/L 4 个梯度。考虑到化工、造纸工业废水直接排放或泄露的未稀释的污水对土体造成的污染<sup>[17]</sup>,所选取酸溶液的高浓度为 1.0、2.0 mol/L。由于污染过程空气挥发、地下水和雨水的稀释,致使酸污染浓度有所降低,故考虑设置浓度为 0.1、0.5 mol/L。

将配置好的 0.1、0.5、1.0、2.0 mol/L 浓度的酸溶液通过抽气污染方法,在温度 20 °C,气压  $1.01 \times 10^5$  kPa 下制备污染试样,污染试验装置如图 3 所示。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[18]</sup>规定,采用削样器将原状土块分割、削制成直径 39.1 mm、高 80 mm 的圆柱体试样。将制备好的试样两端加上滤纸和透水石,然后用橡皮膜包裹,一端通过锥形导气嘴连接导气管,打开气压泵和进气阀门,通过气压表读数显示,调节好饱和缸中气压,然后将计算好的污染液注入试样上端,开始污染试样,在相同气压条件下污染完所需全部试样。将污染制备完成后的试样用保鲜膜包裹封装,贴上标签并标明浓度,放入保湿缸中静置 48 h 以上,为下一阶段试验使用。所用原状试样的平均密度为 1.59

$\text{g}/\text{cm}^3$ ,平均含水率为 15.4%,在试样体积相同的条件下,使用污染装置进行等体积污染液入渗,控制入渗后含水率为 20%,之后在恒温恒湿箱(温度 25 °C,湿度 20%)中进行养护,直至进行后续试验,测定最终含水率为 20%。鉴于实际环境中土体处于不同的干湿状态,后期会对不同干湿程度的酸污染土体的抗拉强度进一步研究,以期为工程应用及有关科学问题提供可靠的理论依据和数据支撑。

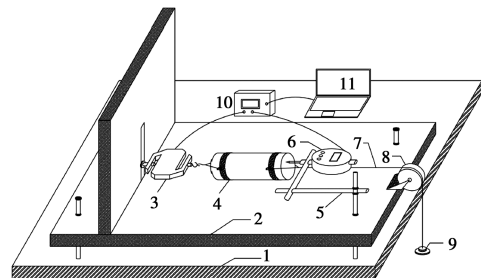


图 3 污染试验装置

Fig. 3 Pollution test device

### 1.3 试验过程及方法

采用单轴直接拉伸试验,单轴抗拉装置分为立式和卧式,卧式拉伸可避免拉伸中试样自重对结果产生的影响,具有操作简易性、可靠性和高效性<sup>[19]</sup>。为规避目前相关抗拉强度仪器的一些适用区间,针对试验自行装配并调试了卧式抗拉强度测试仪,其优点为:可避免试样自重带来的误差,直观反映试样破坏形态,操作简单易懂。为解决试样和玻璃承台摩擦力、试样连接问题的缺点,采用涂抹凡士林减小摩擦、机械和化学联结相结合的方法减小误差,进一步优化试验装置,如图 4 所示。



注: 1.承重台; 2.玻璃承台; 3.S型拉力计(量程为0~200 N); 4.圆形卡箍; 5.T型支架; 6.百分表(量程0~10 mm); 7.钢丝绳; 8.定滑轮; 9.砝码; 10.数据转换器; 11.数据采集器。

图 4 卧式抗拉强度测试仪

Fig. 4 Horizontal tensile strength tester

将经过酸溶液污染之后通过抽气饱和法制备好的试样放入卧式抗拉强度测试仪中进行试验,记录

试验数据,分析研究酸污染土的拉应力-应变的变化规律。

为避免试验过程中出现问题,减小各组试验数据的误差,相同酸溶液下每个摩尔浓度梯度设置 3 个试样(结果取平均值,且极差小于平均值的 30%)。为了进行对比,另外设置 3 个含水率相同的未污染试样,原状黄土试样总计 39 个。

## 2 试验结果分析

### 2.1 酸污染黄土抗拉强度的变化

酸污染对黄土抗拉强度造成的影响包括微观方面和宏观方面。微观方面:黄土中含有大量的高钙物质,其中,碳酸钙胶结盐含量可达 10.75%~15.8%<sup>[20]</sup>,黄土中含有的各种碳酸盐和酸液反应之后生成新的物质,改变了原有的化学组成成分,影响黄土的抗拉强度。宏观方面:酸液浸入到黄土内,由于液体的流动以及化学成分的改变,改变了黄土的内部结构。通过单轴拉伸试验,得到酸污染黄土的抗拉强度,见表 2。

表 2 不同种类酸污染黄土的抗拉强度

Table 2 Tensile strength under different types of acid-contaminated loess

试剂	黄土抗拉强度/kPa			
	0.1 mol/L	0.5 mol/L	1.0 mol/L	2.0 mol/L
盐酸	9.76	9.1	8.32	7.88
硝酸	10.6	9.77	8.27	8.21
硫酸	6.47	7.77	8.26	9.47
蒸馏水	11.82			

### 2.2 不同种类酸污染对黄土抗拉强度的影响

由表 2 可以看出,未污染的黄土抗拉强度为 11.82 kPa,经过酸污染的黄土的抗拉强度都发生了不同程度的降低。随着摩尔浓度的增加盐酸和硝酸的污染,黄土抗拉强度逐渐减小;当浓度到达 1 mol/L 时,盐酸、硫酸和硝酸污染的黄土抗拉强度比较接近;随着摩尔浓度的增加硫酸的污染,黄土抗拉强度逐渐增加,但并没有恢复到未污染的黄土抗拉强度。

原状黄土的抗拉性能由黄土本身土颗粒间的吸附强度和黏聚力组成,其黏聚力由土体内多种碳酸盐及盐类薄膜形成的化学胶结作用形成,吸附强度通过土颗粒间的基质吸力和毛细压力产生<sup>[7]</sup>。原状黄土中含有一定的含水氧化物和胶体氧化物,构成

胶结物的颗粒直径一般小于 0.01 mm,而主要部分胶结物的颗粒粒径小于 0.005 mm,为钙质胶结物<sup>[21]</sup>。对其进行 X 射线能谱分析,如图 5 所示。从图 5 可以看出,原状土金属元素中含有大量的 Si、Al、Fe、Ca、Mg 以及少量的 Ti、Na、K,非金属元素有 O、C、S,在测试过程中,由于固定试样的碳导电装置可能会在试样表面留有碳粉,结果中 C 的含量可能偏高。结合元素分析图可知,原状黄土中矿物成分主要有 SiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaCO<sub>3</sub>、易溶盐 Mg<sup>2+</sup> 和易溶盐 Ca<sup>2+</sup>。

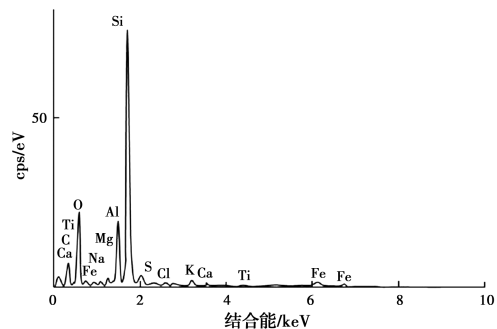
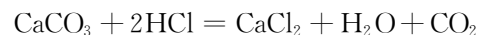


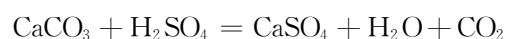
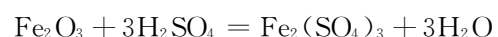
图 5 原状黄土 EDS 能谱分析图

Fig. 5 EDS energy spectrum analysis diagram of undisturbed loess

不同种类酸污染黄土抗拉强度的降低主要是由于土体中含有的碳酸盐及其他化学物质和盐酸、硝酸反应生成了可溶性盐和其他新的物质,破坏了土体原有的内部结构,使其抗拉强度下降。土体中游离的氧化物 SiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaCO<sub>3</sub> 在盐酸和硝酸的环境下发生化学反应,反应方程式为



土中游离的氧化物与盐酸和硝酸不断发生反应,由式(1)可知,随着酸溶液浓度的不断增加,胶结氧化物溶蚀的速度加快,含量不断减小,生成的氯化铁、氯化铝、氯化钙和硝酸铝为易溶于水的盐。随着胶结氧化物的不断溶蚀,土颗粒间的孔隙变大,结构连接逐渐减弱,原生结构排列遭到破坏,抗拉强度逐渐减小。由于黄土碳酸钙含量丰富,和硫酸反应之后生成难溶性硫酸胶结盐,化学反应方程式为



硫酸和胶结氧化物反应之后,生成了一些难溶性盐。低浓度的硫酸溶液中  $SO_4^{2-}$  较少,生成难溶性盐较少,但土体经过硫酸溶蚀之后,原生内部土颗粒间的孔隙变大,黏结结构发生破坏,土体抗拉强度降低。由式(2)可知,随着硫酸溶液浓度的增加,生成的难溶性硫酸盐逐渐增多,填补了土颗粒间部分孔隙,其中,硫酸铁是红褐色的粘稠液体,加强了土颗粒间的黏结作用,土体抗拉强度相对有所提高。运用 SEM 扫描电镜进行微观结构分析,并对放大 1 000 倍的电镜扫描图进行二值化处理,经二值化处理后,图中白色部分为土体颗粒,黑色部分为颗粒间孔隙,如图 6 所示。硫酸污染土颗粒以凝块形态镶

嵌在土颗粒孔隙中,新生成的胶结盐和细小土颗粒沉淀之后阻塞了孔隙通道<sup>[22]</sup>,形成了新的土颗粒之间的黏结结构,造成硫酸污染黄土抗拉强度随着浓度的增加而增大。

由图 6 可以看出,蒸馏水试样有很多大块颗粒凝聚在一起并形成土颗粒间大孔隙;试样受到 1.0 mol/L 的盐酸和硝酸污染之后,土体内孔隙及胶结结构发生改变,大块颗粒减少,小孔隙增多,导致土体内结构疏松,抗拉强度下降;试样受到 1.0 mol/L 的硫酸污染之后,大块颗粒明显增多,小孔隙减少,生成的难溶性盐填补了部分孔隙,加强了土颗粒间的支撑,强度增大。

如图 7 所示,经过 1.0 mol/L 硫酸污染后的试样表面具有明显的孔隙,孔隙大约 0.1~1.0 mm,吸附在孔隙中的细颗粒已经被硫酸腐蚀;经过 1.0 mol/L 硝酸污染后的试样也有明显的孔隙,盐酸次之。宏观来看,不同种类的酸对土体的腐蚀状况为硫酸>硝酸>盐酸>蒸馏水。

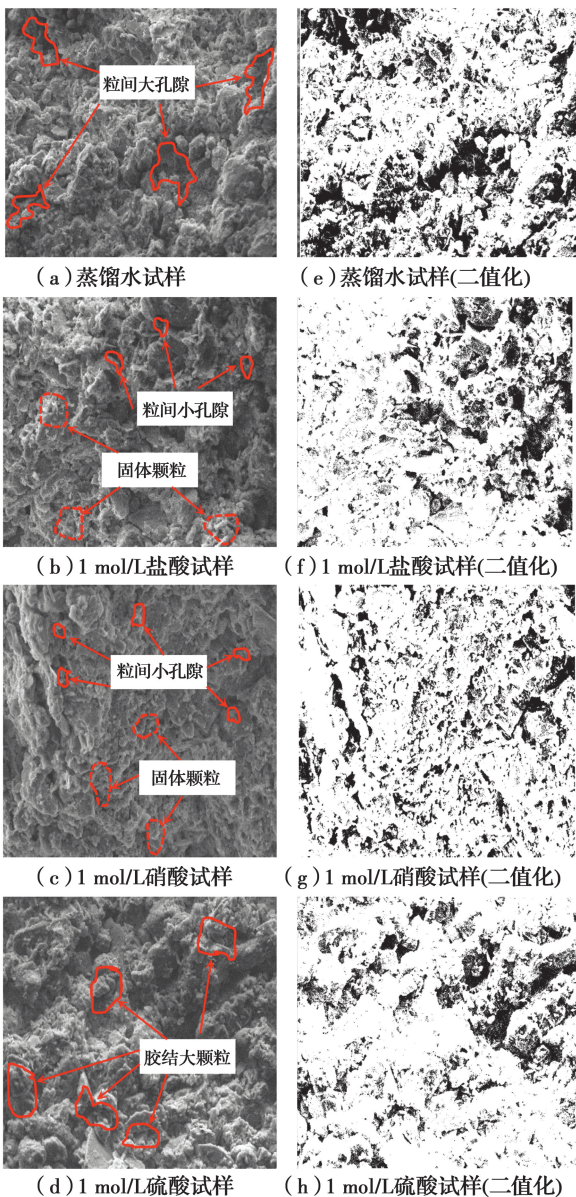


图 6 不同种类酸污染试样微观结构及二值化结果

Fig. 6 Microstructure and binarization results of different types of acid-contaminated samples

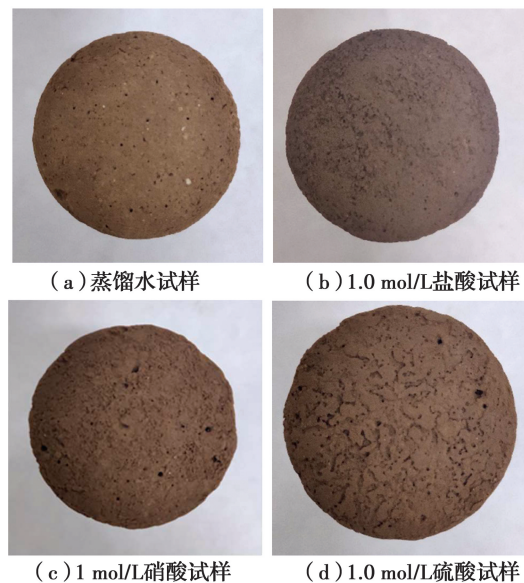


图 7 不同种类酸污染试样表面变化

Fig. 7 Changes in the surface of samples contaminated by different types of acids

### 2.3 不同浓度酸污染黄土的拉应力-应变关系

为考虑不同浓度酸对污染黄土抗拉强度产生的不同影响,绘出拉应力-应变曲线。孙萍等<sup>[23]</sup>通过单轴拉伸试验并运用 RFPA 进行黄土拉伸断裂仿真分析得出,土体受到极限拉应力时,内部裂纹在极短时间内产生,土体突然破坏,没有明显的径缩现象,为脆性断裂。经过 3 种酸污染之后,随着应变的增加,土体的拉应力不断增大,直至试样破坏,其拉

应力-应变曲线类型为应变硬化型。

随着应变的增加,在同一摩尔浓度下污染的原状黄土试样抗拉强度不断增加,增大的趋势走向为非线性,对污染原状黄土的拉应力和应变进行非线性拟合,如图 8 所示,拟合关系式为

$$\sigma_t = m\varepsilon_t^n \quad (3)$$

式中: $\sigma_t$ 为拉应力, kPa;  $\varepsilon_t$ 为应变;  $m$ 和  $n$ 为拟合参数。

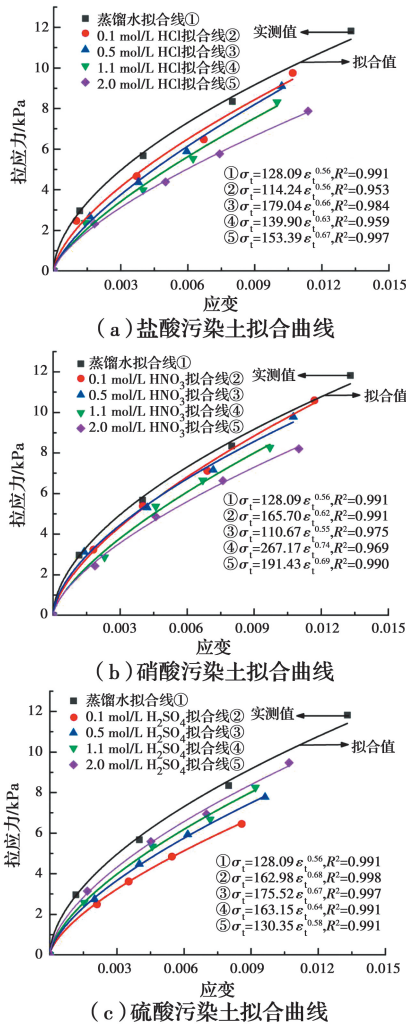


图 8 酸污染土的拉应力-应变拟合关系曲线

Fig. 8 Tensile stress-strain curve of acid-contaminated loess

不同种类的酸、不同摩尔浓度对应的拟合参数值  $m$  和  $n$  不同,见图 9,拟合的相关系数  $R^2$  达到 0.99。

通过对不同摩尔浓度和参数  $m$  进行拟合,得到关于浓度的函数  $m$ ,函数式为

$$m = f_0 + v \cdot \exp\left(-\frac{(c-0.5)^2}{2\omega^2}\right) \quad (4)$$

式中: $c$ 为不同酸的浓度;  $f_0$ 、 $v$ 、 $\omega$ 为拟合参数,见表 3。

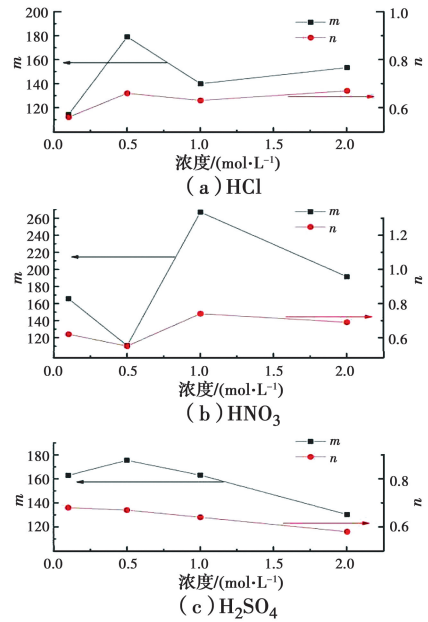


图 9 不同酸污染土的拟合参数  $m$ 、 $n$  与摩尔浓度关系图

Fig. 9 The relationship between the fitting parameters  $m$ ,  $n$  and the molar concentration of different acid-contaminated soils

表 3 不同酸浓度的相关函数拟合参数

Table 3 Fitting parameters of correlation functions for different acid concentrations

酸的种类	$f_0$	$v$	$\omega$
盐酸	173.97	60.29	0.148
硝酸	148.92	26.59	0.322
硫酸	153.18	43.32	0.429

由图 9 可以发现,随着摩尔浓度的变化,参数  $n$  值在 0.55~0.74 之间浮动,可知  $n$  值受摩尔浓度变化的影响并不大,取其平均值等值于  $n$  值,即  $n = 0.64$ 。

结合式(3)、式(4)和  $n = 0.64$  可以得到不同种类酸的浓度和拉应力的函数关系式,可作为计算酸污染黄土抗拉强度的一个经验公式用于工程实践。

### 2.4 酸污染对黄土抗拉强度损伤率的影响

不同浓度酸污染黄土的抗拉强度损伤率可采用式(5)进行计算。

$$K_{\sigma_t} = \frac{\sigma_{t_0} - \sigma_{t_c}}{\sigma_{t_0}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $K_{\sigma_t}$ 为酸污染黄土抗拉强度损伤率,%;  $\sigma_{t_0}$ 为未污染黄土抗拉强度值, kPa;  $\sigma_{t_c}$ 为  $c$  浓度时污染黄土抗拉强度值, kPa;  $c$  为物质的量浓度, mol/L。表 4 为经过不同浓度酸污染后黄土抗拉强度损伤率,从表中可以看出,随着盐酸和硝酸浓度的增大,其抗拉

强度损伤率也不断增大;硫酸污染黄土的抗拉强度损伤率却不断减小。

表 4 不同浓度酸污染后黄土抗拉强度损伤率

Table 4 Damage rate of loess tensile strength after contamination with different acid concentrations

酸浓度/ (mol · L <sup>-1</sup> )	盐酸损 伤率/%	趋 势	硝酸损 伤率/%	趋 势	硫酸损 伤率/%	趋 势
0.1	17.43		10.32		45.26	
0.5	23.01	↓	17.34	↓	34.26	↑
1.0	29.61		30.03		30.12	
2.0	33.33		30.54		19.88	

### 3 讨论

Mohr-Coulomb 强度理论广泛应用于土的压剪破坏,未考虑黄土的拉剪破坏,联合强度理论不但包括了剪切破坏,还包括了拉伸破坏。Li 等<sup>[24]</sup>通过三轴剪切试验、单轴压缩试验和单轴拉伸试验验证了联合强度理论。

通过酸污染黄土抗拉强度的研究,以盐酸为例,绘制不同浓度下的拉伸和剪切强度破坏线,即联合强度理论包络线图,如图 10 所示,采用双曲线进行拟合,拟合公式为

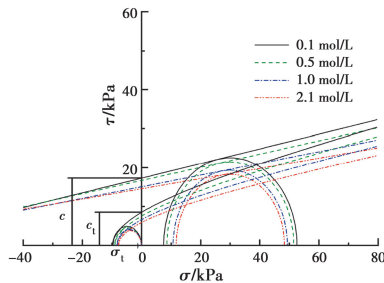


图 10 拉伸和压剪强度破坏线示意图

Fig. 10 Tensile and shear strength failure lines

$$\tau^2 = (A + B\sigma)^2 - (A - B\sigma_t)^2 \quad (6)$$

式中:τ 为剪应力;σ 为应力;σ<sub>t</sub> 为抗拉强度;A 和 B 为拟合参数(见表 5),双曲线与纵轴的交点为抗拉强度的黏聚力指标 c<sub>1</sub>,双曲线在横轴的截距为 σ<sub>t</sub>。根据试验得出的 Mohr-Coulomb 强度包线延长至水平轴的负半轴,交点的值即黄土的抗拉强度名义值,可以得出 0.1 mol/L 的抗拉强度名义值为 91.96 kPa,而实际抗拉强度值为 9.76 kPa,名义值接近实际值的 10 倍,通过 Mohr-Coulomb 强度包线得到的抗拉强度值过于偏大,在实际工程应用中会产生安全隐患。

表 5 拉剪联合强度拟合参数

Table 5 Fitting parameters of combined strength of tensile and shear

酸浓度/(mol · L <sup>-1</sup> )	A	B	σ <sub>t</sub> /kPa
0.1	20.18	0.192	9.76
0.5	18.37	0.178	9.1
1	16.87	0.163	8.32
2	15.69	0.164	7.88

从图 10 可以看出,强度包络线随着盐酸浓度的增加逐渐向里收缩,抗拉强度和抗剪强度都逐渐减小,黏聚力也逐渐减小。受到酸污染之后,土体抗拉强度和抗剪强度均出现损伤。通过拉-剪联合强度模型,结合式(6)和表 5 参数,进一步分析酸污染对黄土拉-剪强度的影响。在进行边坡稳定性分析时,应考虑黄土存在拉伸破坏,通过拉-剪联合强度模型得出的拉-剪强度指标较为实际,能够保证工程的安全性,可靠性。

### 4 结论

通过人工制备酸污染的原状黄土,测试了其抗拉强度的演变规律,得出以下结论:

1)经过不同浓度的盐酸、硝酸和硫酸溶液污染之后,其抗拉强度较未污染均有所降低。污染液种类不同,污染土样抗拉强度表现为:硫酸 > 盐酸 > 硝酸。

2)不同浓度酸液污染后黄土的抗拉强度降低或增长,定性分析是由于化学反应生成可溶性盐和难溶盐,改变了黄土内部组成成分,导致黄土原生内部颗粒间联结发生破坏进而重组。

3)通过室内试验探讨了酸液污染黄土的抗拉强度损伤率和浓度的关系,得出经验拟合关系。

### 参考文献:

[1] 李相然,姚志祥,曹振斌. 济南典型地区地基土污染腐蚀性变异研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1229-1233.  
LI X R, YAO Z X, CAO Z B. Study on physical and mechanical property variation of polluted erosive foundation soils in typical district of Jinan [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(8): 1229-1233. (in Chinese)  
[2] GEORGIANNOU V N, BURLAND J B, HIGHT D W. The undrained behaviour of clayey sands in triaxial

- compression and extension [J]. *Géotechnique*, 1990, 40(3): 431-449.
- [3] ZHOU G Q, HU K, ZHAO X D, et al. Laboratory investigation on tensile strength characteristics of warm frozen soils [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, 113: 81-90.
- [4] 吴旭阳, 梁庆国, 牛富俊, 等. 兰州九州重塑黄土的抗拉变形破坏机理 [J]. *冰川冻土*, 2017, 39(4): 842-849.
- WU X Y, LIANG Q G, NIU F J, et al. Deformation failure mechanism in tensile test on remolded loess from Jiuzhou, Lanzhou [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(4): 842-849. (in Chinese)
- [5] 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.
- WANG Z N, FAN H H, HE Z Q, et al. Influence of modifiers on dispersity and tensile strength of dispersive clay [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(2): 425-432. (in Chinese)
- [6] 袁志辉, 倪万魁, 唐春, 等. 干湿循环下黄土强度衰减与结构强度试验研究 [J]. *岩土力学*, 2017, 38(7): 1894-1902, 1942.
- YUAN Z H, NI W K, TANG C, et al. Experimental study of structure strength and strength attenuation of loess under wetting-drying cycle [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(7): 1894-1902, 1942. (in Chinese)
- [7] 袁志辉, 倪万魁, 唐春, 等. 干湿循环效应下黄土抗拉强度试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(Sup1): 3670-3677.
- YUAN Z H, NI W K, TANG C, et al. Experimental studies of tensile strength of loess in drying-wetting cycle [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(Sup1): 3670-3677. (in Chinese)
- [8] 陈日高, 马福荣, 庞迎波. 重金属污染土强度特性试验研究 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2014, 36(6): 94-98.
- CHEN R G, MA F R, PANG Y B. Experimental analysis of the strength properties of the heavy metal contaminated soil [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2014, 36(6): 94-98. (in Chinese)
- [9] 朱春鹏, 刘汉龙, 沈扬. 酸碱污染土强度特性的室内试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(7): 1146-1152.
- ZHU C P, LIU H L, SHEN Y. Laboratory tests on shear strength properties of soil polluted by acid and alkali [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(7): 1146-1152. (in Chinese)
- [10] 夏磊, 顾欢达. 酸雨对河道淤泥气泡混合土工程性质的影响 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2018, 40(6): 76-84.
- XIA L, GU H D. Influence of acid rain on engineering properties of foamed light soil with river sludge [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2018, 40(6): 76-84. (in Chinese)
- [11] PLÉ O, LÊ T N H. Effect of polypropylene fiber-reinforcement on the mechanical behavior of silty clay [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2012, 32: 111-116.
- [12] VISWANADHAM B V S, JHA B K, PAWAR S N. Influence of geofibers on the flexural behavior of compacted soil beams [J]. *Geosynthetics International*, 2010, 17(2): 86-99.
- [13] TAMRAKAR S B, MITACHI T, TOYOSAWA Y, et al. Development of a new soil tensile strength test apparatus [J]. *Geotechnical Special Publication*, 2005, 164: 1-10.
- [14] 党进谦, 张伯平, 熊永. 单轴土工拉伸仪的研制 [J]. *水利水电科技进展*, 2001, 21(5): 31-32, 70.
- DANG J Q, ZHANG B P, XIONG Y. Development of earthwork elongation apparatus [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2001, 21(5): 31-32, 70. (in Chinese)
- [15] TAMRAKAR S B, MITACHI T, TOYOSAWA Y. Measurement of soil tensile strength and factors affecting its measurements [J]. *Soils and Foundations*, 2007, 47(5): 911-918.
- [16] DAVID SUITS L, SHEAHAN T C, NAHLAWI H, et al. A direct tensile strength testing method for unsaturated geomaterials [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2004, 27(4): 11767.
- [17] 施家佩. 造纸工业废水 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1988.
- SHI J P. Wastewater from paper industry [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1988. (in Chinese)
- [18] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)
- [19] 崔猛, 韩尚宇, 洪宝宁. 新型土工单轴拉伸试验装置的



- 研制及应用[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1832-1840.
- CUI M, HAN S Y, HONG B N. Development and application of a new geotechnical device for direct tension test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(6): 1832-1840. (in Chinese)
- [20] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
- LIU Z D. Loess mechanics and engineering [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997. (in Chinese)
- [21] 王绪民, 陈善雄, 程昌炳. 酸性溶液浸泡下原状黄土物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(9): 1619-1626.
- WANG X M, CHEN S X, CHENG C B. Experimental study on physico-mechanical characteristics of undisturbed loess soaked in acid solution [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(9): 1619-1626. (in Chinese)
- [22] 刘华, 何江涛, 赵茜, 等. 酸污染原状黄土渗透微观特征演变规律试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 765-772.
- LIU H, HE J T, ZHAO Q, et al. Experimental study on evolution of micro-permeability characteristics of acid-contaminated undisturbed loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(3): 765-772. (in Chinese)
- [23] 孙萍, 彭建兵, 殷跃平, 等. 黄土拉伸试验及其破裂过程仿真分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 633-637.
- SUN P, PENG J B, YIN Y P, et al. Tensile test and simulation analysis of fracture process of loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 633-637. (in Chinese)
- [24] LI R J, LIU J D, YAN R, et al. Characteristics of structural loess strength and preliminary framework for joint strength formula [J]. Water Science and Engineering, 2014, 7(3): 319-330.

(编辑 胡玲)