

冻融循环对酸污染黄土抗拉特性劣化试验研究

刘 华^{1,2}, 胡鹏飞¹, 王梦南¹, 刘乃飞^{1,2}, 胡文乐¹

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

摘要: 考虑到黄土地区经受着季节性冻融循环作用的影响, 并随着工业化进程的不断推进, 黄土被大量生活污水及工业废水侵入, 进而导致土体的内部结构及基本物理力学指标发生改变, 诱发土体抗拉特征产生劣化趋势, 影响着天然边坡及场地的稳定状态。基于此, 本文以铜川地区 Q₃ 黄土为研究对象, 通过调研取样并人工配置盐酸、硫酸和硝酸的 4 种不同摩尔浓度的污染液, 进行室内冻融循环条件下的酸污染黄土抗拉强度试验研究, 探讨了酸污染原状黄土在冻融循环下的抗拉强度演变规律, 进一步分析了抗拉特征的耦合劣化结果。结果表明: 酸污染原状黄土抗拉强度随着冻融循环次数的增加均呈减小态势, 3~5 次冻融循环之后黄土抗拉强度趋于基本稳定; 且相同浓度下不同酸污染土的抗拉强度随着冻融循环次数的增加呈现出不同的特征。基于试验数据建立酸侵蚀与冻融循环耦合抗拉强度劣化模型, 可为孔隙水污染下的冻融黄土地区的边坡稳定性提供数据支撑及为地质灾害防治设计提供参考。

关键词: 原状黄土; 冻融循环; 酸污染; 抗拉强度; 劣化机制

中图分类号: TU444

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)04-0493-09

Experimental study on degradation of tensile properties of acid-contaminated loess by freeze-thaw cycles

LIU Hua^{1,2}, HU Pengfei¹, WANG Mengnan¹, LIU Naifei^{1,2}, HU Wenle¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an 710055, China)

Abstract: Considering that the loess area is subject to seasonal freeze-thaw cycles, and with the continuous advancement of industrialization, the loess is invaded by a large amount of domestic sewage and industrial wastewater, which leads to changes in the internal structure and basic physical and mechanical indicators of the soil and the deterioration of the tensile characteristics of the soil, and affects the stability of the natural slope and the site, this study takes Q₃ loess in Tongchuan area as the research object, and conducts indoor acid-contaminated loess tensile strength test under the condition of indoor freeze-thaw cycles through investigation, sampling and manual configuration of 4 different molar concentrations of hydrochloric acid, sulfuric acid and nitric acid. Based on the test, the evolution of tensile strength of acid-contaminated undisturbed loess under freeze-thaw cycles is discussed, and the coupling degradation results of tensile characteristics are further analyzed. The results show that the tensile strength of the undisturbed acid-contaminated loess decreases with the increase in the number of freeze-thaw cycles, and the tensile strength of the loess tends to be basically stable after 3 to 5 freeze-thaw cycles. The results also show that the tensile strength of different acid-contaminated soil shows different characteristics with the increase of freeze-thaw cycles under the same concentration. The establishment of a tensile strength degradation model coupled with acid erosion and freeze-thaw cycles based on experimental data can provide data support for slope stability in freeze-thaw loess areas contaminated by pore water and provide reference for geological disaster prevention and control.

Key words: undisturbed loess; freeze-thaw cycle; acid pollution; tensile strength; deterioration mechanism

我国黄土地区因季节的更替而引发的周期性冻融循环, 一定程度上改变了黄土的内部结构,

收稿日期: 2020-01-14 修改稿日期: 2021-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608436); 陕西省自然科学基金项目(2019JQ756); 陕西省教育厅专项科研项目(19JK0452); 中国博士后科学基金项目(2019M663648)

第一作者: 刘 华(1983—), 男, 博士, 副教授, 主要从事环境岩土工程方面研究。E-mail: liuhua029@xauat.edu.cn

从而对黄土的力学性能产生损伤,进一步影响黄土上建(构)筑物的安全性^[1-3]。由于气候的周期性变化,黄土体的特殊组构在降雨、蒸发和冻结、融化的交替变化下发生改变,黄土的抗拉强度也处于不断变化中,改变着黄土地表的形态特征。与此同时,工农业的发展以及城市现代化的不断建设,环境污染的问题愈来愈显著,孔隙水污染对黄土场地及边坡的稳定状态造成了一定程度的影响。因此对于冻融循环条件下污染黄土的抗拉强度的研究,对黄土场地稳定性的影响具有实际的工程意义。

近年来,研究者对于冻融循环效应下的黄土体特性研究越来越多。叶万军等^[4-5]通过扫描电镜、CT扫描探究了不同冻融循环次数下黄土结构损伤,结果表明土体内部骨架连接方式发生改变,影响着冻融循环作用下黄土边坡剥落模式和结果。李宝平等^[6]通过平面应变试验研究了冻融循环原状黄土的力学性质,得出了冻融的循环周期越大,土体损伤越严重。Zhou^[7]基于巴西劈裂试验方法探究冻土内的冰含量对土的抗拉强度的影响,结果表明冻土的抗拉强度随着温度的降低而增加,与冻土中的冰含量紧密相关。赵茜等^[8]研究了冻融循环对黄土渗透系数异性的影响,结果表明随着冻融次数的增加,黄土的渗透系数增大,各向异性受到弱化。陈涛等^[9]提出冻融循环中大孔隙增多、细颗粒聚集对单轴抗压性能具有弱化影响。许健等^[10-11]通过CT扫描、剪切试验,研究了原状黄土和 Na_2SO_4 盐渍黄土冻融过程劣化规律和微观结构的损伤演化机制,提出原状黄土粘聚强度劣化模型。郑勋等^[12-13]探讨了冻融循环对黄土结构性影响的机理,定义了“冻融结构势”作为土体结构性的定量参数,并分析了冻融循环中土的三相组成在水分相变和迁移过程的影响,得出了冻融过程中水分变化对土颗粒及孔隙的反作用力,是对土结构性影响的根本原因之一。因此冻融循环作用对黄土结构性的损伤不仅对土体压-剪性能有影响,而且对土体的抗拉强度也有一定的影响。

在污染黄土的力学性质方面,王绪民等^[14]分析了原状黄土受到酸性溶液侵蚀下黄土力学性质的演变规律,得出浸泡液酸性越强,钙质胶结物溶蚀速度越快,黏聚力越小。杨秀娟等^[15]通过室内模拟的方法探究了酸性溶液对黄土工程性质的影响,结果表明随着酸溶液浓度的增大,抗剪强度降低,渗透系数增大,土体孔隙孔径增大。刘

华等^[16]通过渗透试验及电镜扫描探究了酸污染原状土的渗透微观特性演变规律,结果表明随着酸溶液浓度增大,污染土的渗透系数降低。朱春鹏等^[17]通过三轴剪切试验和直剪试验探究了酸碱污染土的强度特性,得出了浓度和总应力强度之间的关系。基于冻融劣化和孔隙水变化的影响结果,周凤玺等^[18]探究了稳定条件下非饱和土中温度-水-盐(THC)多场耦合效应,得出了温度边界、含水率、孔隙率在饱和土中各分场的演变规律。

目前多数学者都是对污染土的抗剪、抗压、渗透系数等基本力学特性进行研究,对冻融循环和孔隙水酸污染耦合条件下黄土的抗拉强度的变化及强度劣化机制的研究,而对于冻融循环作用下酸污染土的抗拉强度特性研究较少。基于此,本文选取陕西省铜川市原状黄土为研究对象,采用卧式单轴抗拉强度测试仪,探明冻融循环和酸污染耦合条件下原状黄土的抗拉强度演变结果,探讨了酸污染和冻融循环次数对黄土抗拉强度的耦合影响,进一步分析酸污染黄土在冻融循环作用下的损伤机制,对边坡剥落、地表地貌塑形以及稳定性预测,在工程建设和运营中具有重要的指导意义。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验所用黄土试样取自陕西省铜川市耀州区某在建基坑,采用人工取土的方法取得原状土样,取土深度为2.0~3.0m。该土样为 Q_3 黄土,土质较均匀,土体中有微量颗粒状钙质胶结物,少量植物根系和虫孔。取样位置及现场见图1,原状黄土试样的基本物理性质指标见表1,颗分曲线如图2所示。

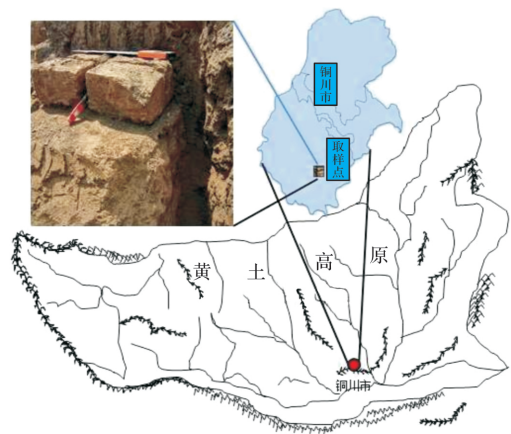


图1 现场取样概况

Fig. 1 Field sampling

表 1 基本物理性质指标

Tab. 1 Basic physical properties

干密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	含水率 /%	比重 G_s	塑限 w_p /%	液限 w_l /%	塑性指 数 I_p
1.38	16.8	2.67	21.42	35.43	14.01

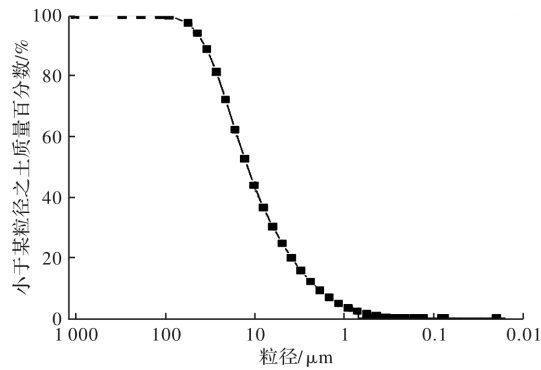


图 2 颗分曲线

Fig. 2 Particle distribution curve

1.2 试样制备

根据《土工试验方法标准》GB/T50123-2019 规定^[19], 原状土样制备: 制备尺寸为直径 39.1 mm、高 80 mm 的圆柱体试样, 制备好的土样用保鲜膜包裹封装, 备用。

试验所选酸液包括盐酸、硫酸和硝酸三种, 以蒸馏水为基液配置浓度为 0.1 mol/L、0.5 mol/L、1.0 mol/L 和 2.0 mol/L 四个浓度梯度, 经过调研大量文献资料, 大量化工工厂以及造纸业产生的废水的排放、泄漏的未稀释的污水对土体造成的污染^[20], 生活垃圾常年堆积产生的酸液的排放以及部分地区酸雨的影响, 在长期发展过程中, 由空气挥发、地下水和雨水的稀释, 致使酸污染浓度有所降低, 因此所选取酸溶液低浓度为 0.1 mol/L 和 0.5 mol/L, 高浓度为 1.0 mol/L 和 2.0 mol/L。通过抽气污染的方法, 制备污染试样, 抽气污染试验装置如图 3 所示。将 4 种不同浓度的污染液注入试样上端, 观察气压表, 调节饱和缸内气压, 相同温度、气压条件下, 制备完成所需试样, 并用保鲜膜包裹密封静置 48~72 h, 进行养护, 最终污染试样含水率为 20%。

1.3 试验方法及过程

测试黄土抗拉强度的试验仪器和方法有多种, 分为直接拉伸试验和间接拉伸试验^[21-22], 但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, 并无明确标准可依。本文以铜川黄土为研究对象, 采用自行装配黄土卧式

单轴抗拉强度测试装置, 如图 4 和图 5 所示。



图 3 污染试验装置

Fig. 3 Pollution test device

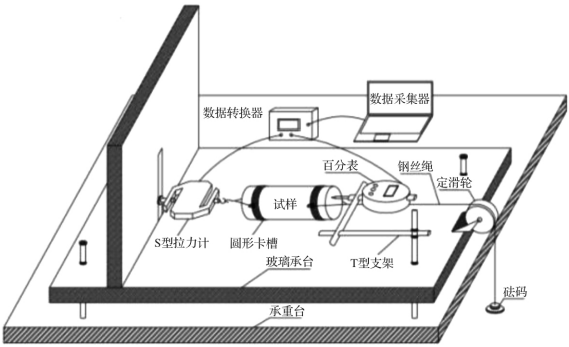


图 4 卧式抗拉强度测试装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of horizontal tensile strength testing device



图 5 卧式抗拉强度测试装置效果图

Fig. 5 Effect diagram of horizontal tensile strength testing device

试验仪器最大测量荷载为 200 N, 精度为 0.01 N, 经冻融循环污染后的试样放入圆形卡箍内后, 圆形卡箍和试样之间用快干胶黏结, 进行固定, 保证在拉伸过程中试样不会出现拔脱, 试样下方涂抹凡士林, 消减试样和玻璃承台间的摩擦; 抗拉试验进行时, 将百分表读数归零, 施加砝码,

试样受到端部拉应力, 进入拉伸状态, S 型拉力传感器将数据传输到数据采集器中, 通过换算公式得到抗拉强度值。

为研究冻融循环次数与污染黄土抗拉强度之间的关系, 选定 0.1 mol/L、0.5 mol/L、1.0 mol/L 和 2.0 mol/L 四个浓度梯度为控制点, 进行 0、1、3、5、10 和 15 次冻融循环的污染土的抗拉强度试验, 为了避免实验过程中的误差, 保证数据的准确性和平衡性, 同一个冻融循环下的每个摩尔浓度梯度制备 3 个试样, 另外设置不同冻融循环下含水率相同的未污染试样, 进行对比, 因此, 原状黄土抗拉强度试样总共为 252 个。

为真实还原土体所处实际环境, 经调研相关资料, 铜川属于暖温带大陆性气候, 不同季节日均气温相差较大, 最低气温约为 -15°C , 融化季节日均气温约为 20°C , 因此在冻融循环试验过程中, 冻结融化温度分别设置为 -15°C 和 20°C 。将养护好污染均匀后的试样取出, 放入冻融循环箱进行封闭保湿冻融循环试验(保证黄土体在冻结过程中含水率基本不变)。每次冻融循环时间设置为 24 h, 以冻结 12 h 和融化 12 h 作为一次冻融循环, 冻结融化温度分别为 -15°C 和 20°C , 不同浓度的污染试样分别冻融 0、1、3、5、10、15 次, 冻融箱循环过程如图 6 所示。

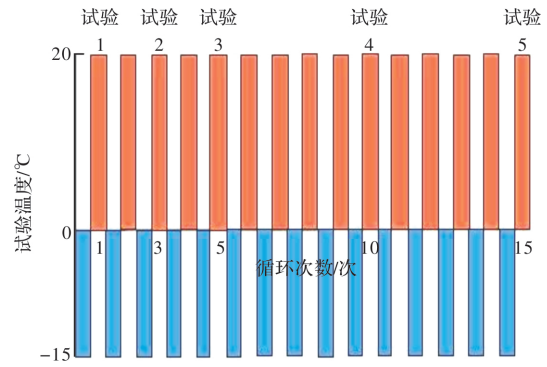


图 6 冻融循环过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of freeze-thaw cycle process

2 结果分析

2.1 黄土的拉应力-应变特征

冻融循环和酸污染耦合条件下黄土的拉应力-应变关系如图 7、8、9 所示, 图中 APFTN 为冻融循环和酸污染耦合次数。从图中可以看出经过不同浓度的三种酸污染之后, 黄土体的拉应力随拉应变的增加不断增大, 直至试样拉伸破坏, 其拉应力-拉应变曲线类型为应变硬化型, 属脆性破坏; 在同一应变下, 盐酸、硝酸和硫酸污染后的试样, 随着冻融循环次数的增加, 土体抗拉强度不断减小; 在经历 3 次冻融循环之后, 第 5、10 和 15 次冻融循环得出的应力应变曲线较为接近, 经过 3 次冻融循环之后, 黄土抗拉强度降低, 再进行冻融循环黄土时内部结构已破坏, 抗拉强度变化量减小。

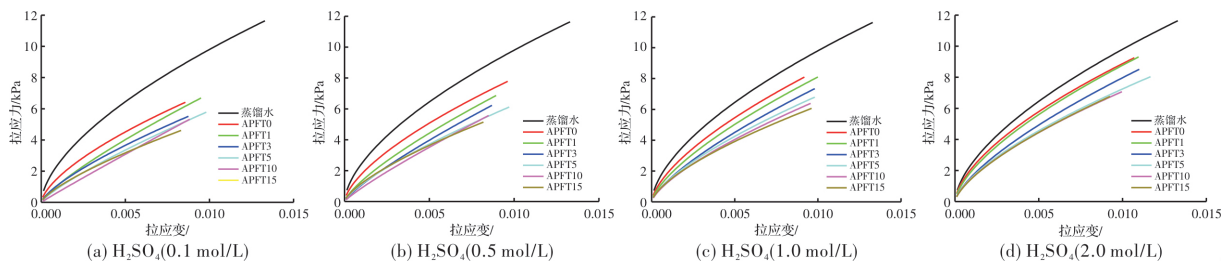


图 7 冻融循环与硫酸污染耦合下黄土拉应力-应变曲线

Fig. 7 Tension stress-strain curve of loess under the coupling of freeze-thaw cycles and sulfuric acid pollution

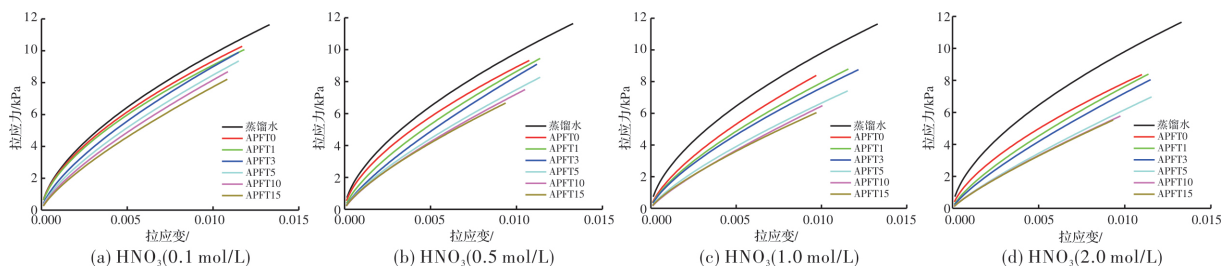


图 8 冻融循环与硝酸污染耦合下黄土拉应力-应变曲线

Fig. 8 Tension stress-strain curve of loess under the coupling of freeze-thaw cycles and nitric acid pollution

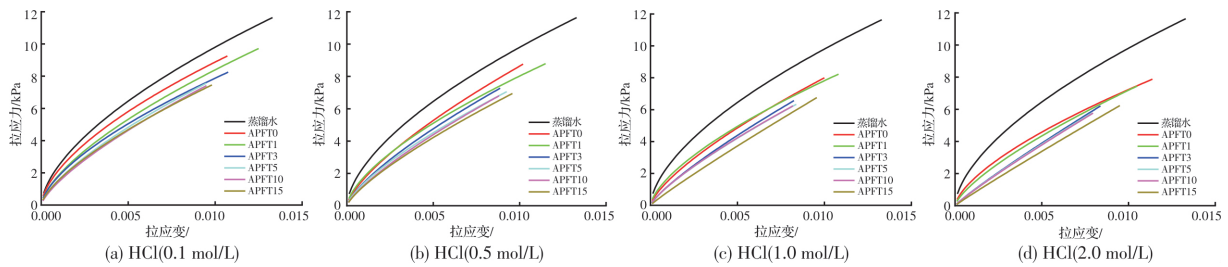


图9 冻融循环与盐酸污染耦合下黄土拉应力-应变曲线

Fig. 9 Tension stress-strain curve of loess under the coupling of freeze-thaw cycles and hydrochloric acid pollution

同一冻融循环下,原状黄土污染试样的拉应力随着拉应变的增加呈非线性上升趋势,曲线斜率逐渐变缓,呈现出幂函数关系.在污染黄土的拉应力-拉应变试验关系曲线中,可以发现酸污染和未污染黄土拉伸破坏应力的对比.以盐酸溶液污染为例,经过 0.1 mol/L 盐酸污染后黄土抗拉强度较未污染下降了 17.4%,而经过 1 次冻融循环后黄土抗拉强度较未污染下降了 13.7%;经过 2.0 mol/L 盐酸污染后黄土抗拉强度较未污染下降了 33.4%,而经过 15 次冻融循环后黄土抗拉强度较未污染下降了 25.8%.可以得出,经过酸污染后黄土抗拉强度较未污染土冻融循环后黄土抗拉强度下降较大即酸污染对于黄土强度的影响程度大于冻融循环对黄土强度的影响.分析其原因:黄土经酸液侵蚀后严重破坏了土体本身的结构,酸溶液与土中物质发生反应,生成可溶性和难溶性盐,土体结构的破坏程度较大;冻融的反复进行即温度的变化,致使孔隙水形态不断改变以及孔隙水在土体中不断移动,孔隙水的流动带动土体内细颗粒在孔隙中游离,土体原生结构变化较小,黄土强度损失相对较小.

2.2 酸溶液浓度与黄土抗拉强度的关系

通过黄土单轴抗拉强度试验得出不同冻融循环次数下酸污染黄土的抗拉强度和酸液浓度关系曲线如图 10 所示,图中 N 为冻融循环次数.

由图 10 可以看出,经过三种酸污染之后的土的抗拉强度均有所减小,但最大值都不超过 12 kPa;当盐酸浓度从 0.1 mol/L 升高至 2.0 mol/L 时,0 次冻融循环的原状黄土的抗拉强度下降了 19.26%,但经过 1 次冻融循环之后原状黄土的抗拉强度降低了 23.98%,经过 3 次冻融循环之后原状黄土的抗拉强度降低了 21.99%,经过第 5 次冻融循环之后原状黄土的抗拉强度降低了 23.7%,经过第 10 次冻融循环之后原状黄土的抗拉强度降低了 20.54%.

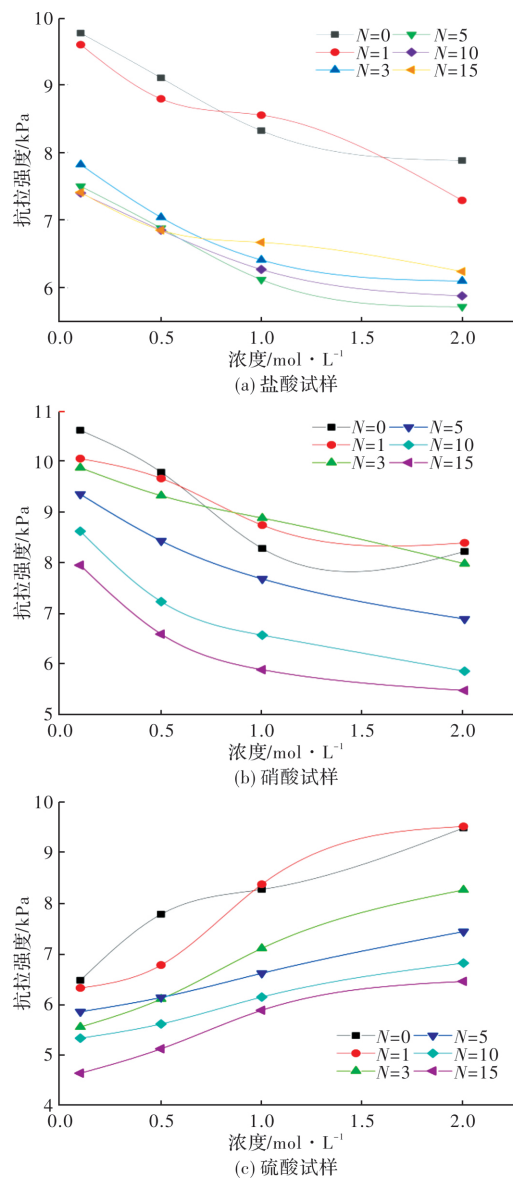


图10 冻融循环下土抗拉强度与酸液浓度的关系

Fig. 10 The relationship between soil tensile strength and acid concentration under freeze-thaw cycles

同一冻融循环次数下盐酸、硝酸和硫酸污染的黄土抗拉强度和酸液浓度呈非线性关系;经过盐酸和硝酸污染之后的抗拉强度随浓度的增加呈非线性的减小,经过硫酸污染之后的抗拉强度随浓度是呈非线性的增大;根据曲线拟合可得,相

同冻融循环下原状黄土抗拉强度随酸液浓度的增大呈指数函数关系;当浓度逐渐较大时,曲线斜率逐渐变缓,经过3次冻融循环之后,抗拉强度逐渐趋近。

原状黄土的抗拉强度源于土颗粒间吸附强度、原始黏聚力和加固黏聚力^[23],土颗粒间吸附强度是由毛细压力和基质吸力形成,土体内多种碳酸盐及盐类薄膜经过长时间的化学胶结作用形成黄土中加固黏聚力,胶结物质的数量、形态和成分以及含水率对土颗粒间的黏聚力有不同影响。黄土中主要包括易溶盐(Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 的氯盐、碳酸盐和硫酸盐)、中溶盐(CaSO_4)和难溶盐(CaCO_3)组成的化学胶结物以及游离氧化物(SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3)^[24-26]。

不同酸污染黄土的抗拉强度的变化主要是因为黄土受到酸溶液的侵蚀后,土体中含有的碳酸盐及其它化学胶结物质发生溶解后,胶结力降低,产生 SiO_3^{2-} 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 AlO_2^- 等游离离子,一部分和盐酸、硝酸反应生成了可溶性盐和其它新的物质,另一部分被其它化学胶结物质再吸附或游离到土颗粒孔隙中生成具有吸附强度的胶结物质。在土体未被污染时,土体中的化学胶结物质数量是不变的,所含化学物质成分是相同的,当污染液的浓度增大时,溶入土中的 Cl^- 、 NO_3^- 数量增多,土中原有胶结物质的浓度减小,生成新的可溶性盐和其他新物质,破坏了土体原有的内部结构,土颗粒间的吸附强度降低,土体的胶结作用减小,黏聚力减弱,其抗拉强度下降。其中硫酸和土体中化学胶结氧化物反应之后,低浓度的硫酸溶液中 SO_4^{2-} 较少,生成难溶性盐较少,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。随着硫酸溶液的浓度增加,生成的难溶性硫酸盐逐渐增多,生成的硫酸盐填补了土颗粒间部分孔隙,其中硫酸铁是红褐色的黏稠液体,加强了土颗粒间的黏结作用,土体抗拉强度相对有所提高。

2.3 冻融循环次数对污染黄土抗拉强度的影响

冻融循环作用会改变土颗粒大小,破坏土体颗粒间的连结,胶结力弱化,冻结生成的冰晶,导致土颗粒挤压移动,土体结构体系发生变化^[27-29],结构损伤,对黄土抗拉强度产生一定影响。通过试验数据归纳整理,得出冻融循环次数与污染原状黄土抗拉强度关系曲线如图11所示。由图11可知,同一种酸液浓度污染的原状黄土的抗拉强度随着冻融循环次数的增加逐渐降低,但

是随着冻融循环次数的逐渐增多,污染黄土抗拉强度值降低幅度逐渐减弱,直至趋于稳定。在经历1、3次冻融循环之后,污染黄土抗拉强度变化较大,其抗拉强度值衰减了约20%,经过5次冻融循环之后,其抗拉强度衰减幅度降低。可看出污染原状黄土抗拉强度加速衰减集中在3~5次冻融循环,之后劣化特征减缓,抗拉强度逐渐趋于稳定的,可得出经开挖裸露后的黄土地层的抗拉性能在3~5个冻融周期内的变化幅值是最大的推断。

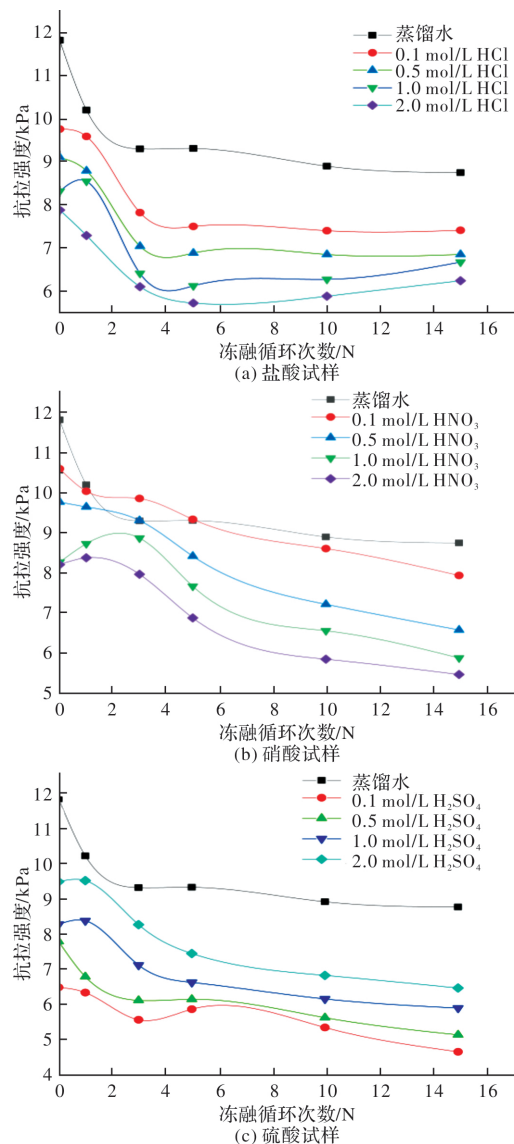
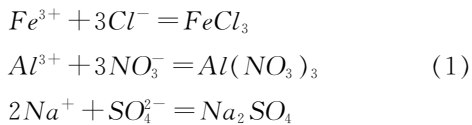


图11 冻融循环次数与污染黄土抗拉强度关系

Fig. 11 The relationship between the number of freeze-thaw cycles and the tensile strength of contaminated loess

原状黄土经过酸液污染之后,再进行反复冻融作用,土体中水分进行不断的冻结和融化,孔隙水发生迁移,迁移力不断改变土体内部孔隙大小及分布;冻融循环过程中孔隙水形态发生变化,液-固-液态交替进行,由于水冻结成冰,在颗粒孔

隙之间约束作用下产生冻胀力作用在土颗粒上，破坏了土体原生内部结构。当冻融循环达到一定次数时，由于土体内水形态的变化，在土颗粒间产生的迁移力和冻胀力导致土体的胶结力不断受损，土体中较大粒组结构遭到破坏，改变了原始土颗粒的形态，进行重组排列，初始结构破坏，土体的黏聚力降低，黄土的抗拉强度降低。同时由于酸液的侵蚀，在土体内发生了化学反应，生成了可溶性盐，离子反应方程式为



冻融循环过程中产生的可溶性盐，发生溶解-结晶-溶解交替变化，形态反复的改变和不断重复侵蚀，黄土内部结构遭到破坏，土颗粒排列形态较为松散；经过多次冻融，土颗粒排列趋于平衡状态，土颗粒间联结强度达到平稳状态即残余抗拉强度。

3 冻融作用下酸污染黄土抗拉强度劣化模型

基于前述冻融循环次数对污染黄土抗拉强度的影响分析，建立酸侵蚀与冻融循环耦合抗拉强度劣化模型。

酸污染黄土抗拉强度与冻融次数呈指数函数关系，可用以下指数函数公式进行拟合分析。

$$\sigma_t = A \cdot e^{BN} + C \tag{2}$$

式中： σ_t 为抗拉强度； N 为冻融循环次数； A 、 B 、 C 为拟合参数(见表 2)。

表 2 拟合参数
Tab. 2 Fitting parameters

浓度/mol · L ⁻¹	A	B	C	R ²
0.1	2.693	-0.743	8.955	0.978
0.5	2.545	-0.471	6.748	0.933
1.0	2.399	-0.474	6.27	0.791
2.0	2.065	-0.612	5.916	0.923

基于表 2 拟合参数，考虑酸污染浓度对黄土抗拉强度产生的影响，对表 2 数据进行拟合，采用(3)式进行拟合，拟合效果较好。

$$\begin{aligned} A &= A_1 n + A_2 \\ B &= B_1 n + B_2 \\ C &= C_1 n + C_2 \end{aligned} \tag{3}$$

式中： n 为酸溶液浓度； A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 、 C_1 、 C_2 为拟合参数，拟合结果见表 3。

将(3)式代入(2)式，可得到酸污染原状黄土抗拉强度与冻融循环次数的关系式。

$$\sigma_t = (2.72 - 0.327n) \cdot e^{-(0.103n + 0.398)N} - 0.694n + 7.18 \tag{4}$$

式中： n 为酸溶液浓度； N 为冻融循环次数。

表 3 拟合参数
Tab. 3 Fitting parameters

A_1	A_2	R^2
-0.327	2.72	0.99
B_1	B_2	R^2
-0.103	-0.398	0.944
C_1	C_2	R^2
-0.694	7.18	0.903

通过已有独立试验数据和模型计算值进行对比验证，此酸侵蚀与冻融循环耦合抗拉强度劣化模型得出计算值和试验值相差较小，表明式(4)能较好反映冻融循环条件下酸污染原状黄土抗拉强度劣化特性。

4 结论

本文通过配置孔隙水酸污染的原状黄土，探讨了在冻融循环效应下抗拉强度退化的演变规律，得出了以下结论：

(1)酸污染原状黄土的抗拉强度较小，随着酸液浓度的增大抗拉强度呈非线性变化态势发展。

(2)在相同污染浓度下，抗拉强度随着冻融循环次数增加而减小，经过 3~5 次冻融循环后，抗拉强度劣化程度较大，5 次冻融循环后，抗拉强度逐渐趋于稳定。

(3)通过室内试验得出在冻融循环效应下酸污染土的拉应力-拉应变演变规律，并分析了酸污染黄土抗拉强度损伤结果，建立了酸侵蚀与冻融循环耦合抗拉强度劣化模型。

参考文献 References

[1] YAN C G, ZHANG Z Q, JING Y L. Characteristics of strength and pore distribution of lime-fly ash loess under freeze-thaw cycles and dry-wet cycles[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10(24):544.
[2] 沈珠江. 抗风化设计:未来岩土工程设计的一个重要内容[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6):866-869.
SHEN Zhujiang. Anti-weathering design: an important content of future geotechnical engineering design [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6):866-869.
[3] BRUNO, RANDOLPH M F. Dynamic and static load

- testing of model piles driven into dense sand[J]. Journal of Geotechnical and Geo-Environmental Engineering, 1999, 125(11): 988-998.
- [4] 叶万军, 李长清, 杨更社, 等. 冻融环境下黄土体结构损伤的尺度效应[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2336-2343, 2360.
- YE Wanjun, LI Changqing, YANG Gengshe, et al. Scale effect of loess body structure damage under freezing and thawing environment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2336-2343, 2360.
- [5] 叶万军, 杨更社, 彭建兵, 等. 冻融循环导致洛川黄土边坡剥落病害产生机制的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 199-205.
- YE Wanjun, YANG Gengshe, PENG Jianbing, et al. Experimental study on the mechanism of flaking disease of Luochuan loess slope caused by freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 199-205.
- [6] 李宝平, 平高权, 张玉, 等. 平面应变条件下冻融循环对黄土力学性质的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(2): 1-8.
- LI Baoping, PING Gaoquan, ZHANG Yu, et al. The influence of freeze-thaw cycles on the mechanical properties of loess under plane strain conditions[J]. Chinese Journal of Civil and Environmental Engineering (Chinese-English), 2020, 42(2): 1-8.
- [7] ZHOU G, HU K, ZHAO X, et al. Laboratory investigation on tensile strength characteristics of warm frozen soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 113: 81-90.
- [8] 赵茜, 苏立君, 刘华, 等. 冻融循环对黄土渗透系数各向异性影响的试验研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3): 843-853.
- ZHAO Qian, SU Lijun, LIU Hua, et al. Experimental study on the influence of freeze-thaw cycles on the anisotropy of permeability coefficient of loess[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3): 843-853.
- [9] 陈涛, 毕贵权, 陈国良, 等. 冻融循环对黏质粗粒土单轴抗压性能影响的试验研究[J]. 冰川冻土, 2019, 41(3): 587-594.
- CHEN Tao, BI Guiquan, CHEN Guoliang, et al. Experimental study on the effects of freeze-thaw cycles on the uniaxial compressive properties of clayey coarse-grained soils[J]. Glacier and Frozen Soil, 2019, 41(3): 587-594.
- [10] 许健, 李诚钰, 王掌权, 等. 原状黄土冻融过程抗剪强度劣化机理试验分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(5): 90-98.
- XU Jian, LI Chengyu, WANG Zhangquan, et al. Experimental analysis of shear strength degradation mechanism of undisturbed loess during freezing and thawing process[J]. Civil Construction and Environmental Engineering, 2016, 38(5): 90-98.
- [11] 许健, 张明辉, 李彦锋, 等. Na_2SO_4 盐渍原状黄土冻融过程劣化特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(9): 1642-1650.
- XU Jian, ZHANG Minghui, LI Yanfeng, et al. Experimental study on degradation characteristics of Na_2SO_4 saline undisturbed loess during freezing and thawing process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(9): 1642-1650.
- [12] 郑鄯, 马巍, 郝慧. 冻融循环对土结构性影响的机理与定量研究方法[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 132-137.
- ZHENG Yun, MA Wei, BING Hui, The mechanism and quantitative research method of the influence of freeze-thaw cycles on soil structure[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 132-137.
- [13] 郑鄯, 马巍, 郝慧. 冻融循环对土结构性影响的试验研究及影响机制分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1282-1287, 1294.
- ZHENG Yun, MA Wei, BING Hui, Experimental study of the influence of freeze-thaw cycles on soil structure and analysis of its influence mechanism[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1282-1287, 1294.
- [14] 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 Xumin, CHEN Shanxiong, CHENG Changbing. Experimental study on physical and mechanical properties of undisturbed loess immersed in acid solution[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(9): 1619-1626.
- [15] 杨秀娟, 武雷杰, 刘惹梅, 等. 酸性溶液对重塑黄土工程性质的影响研究[J]. 人民黄河, 2020, 42(7): 122-125, 135.
- YANG Xiujuan, WU Leijie, LIU Rumei, et al. The influence of acidic solution on the engineering properties of remodeling loess[J]. People's Yellow River, 2020, 42(7): 122-125, 135.
- [16] 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 Hua, HE Jiangtao, ZHAO Qian, et al. Experimental study on the evolution law of infiltration microscopic characteristics of acid-polluted undisturbed loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(3): 765-772.

- [17] 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 Chunpeng, LIU Hanlong, SHEN Yang. Laboratory test study on the strength characteristics of acid-base contaminated soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(7): 1146-1152.
- [18] 周凤玺,高国耀. 非饱和土中热-湿-盐耦合作用的稳态分析[J]. 岩土力学,2019,40(6):2050-2058.
ZHOU Fengxi, GAO Guoyao. Steady-state analysis of heat-moisture-salt coupling in unsaturated soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(6): 2050-2058.
- [19] 水利部水利水电规划设计总院,南京水利科学研究院. 土工试验方法标准:GB/T 50123-2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.
General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Nanjing Institute of Water Conservancy Research. Geotechnical test method standard: GB/T 50123-2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [20] 施家佩. 造纸工业废水[M]. 北京:化学工业出版社,1988.
SHI Jiawei. Wastewater from paper industry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1988.
- [21] PLE O, LE T N H. Effect of polypropylene fiber-reinforcement on the mechanical behavior of silty clay [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2012, 32 (32): 111-116.
- [22] 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.
- [23] 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 (S1): 3670-3677.
YUAN Zhihui, NI Wankui, TANG Chun, et al. Experimental study on the tensile strength of loess under the effects of dry-wet cycles [J], Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36 (S1): 3670-3677.
- [24] 刘东生,张宗祜. 中国的黄土[J]. 地质学报, 1962, 42 (1): 1-14, 16-19.
LIU Dongsheng, ZHANG Zonghu. Chinese loess [J]. Acta Geology, 1962, 42(1): 1-14, 16-19.
- [25] BECKETT P H T. The physical chemistry and mineralogy of soils. vol. 1. soil materials; C. E. Marshall; John Wiley, New York, 1964. 90s [J]. Pergamon, 1965, 29(5): 605-606.
- [26] LI Yanrong. A review of shear and tensile strengths of the Malan Loess in China [J]. Engineering Geology, 2018, 236: 4-10.
- [27] 肖东辉,冯文杰,张泽. 冻融循环作用下黄土孔隙率变化规律[J]. 冰川冻土,2014,36(4): 907-912.
XIAO Donghui, FENG Wenjie, ZHANG Ze. Change law of porosity of loess under freeze-thaw cycles [J]. Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 907-912.
- [28] 赵鲁庆,杨更社,吴迪,等. 冻融黄土微观结构变化规律及分形特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(6): 1680-1690.
ZHAO Luqing, YANG Gengshe, WU Di, et al., Study on the microstructure change and fractal characteristics of freeze-thaw loess [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15 (6): 1680-1690.
- [29] 时伟,张亮,杨忠年,等. 冻融循环条件下膨胀土力学特性试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(4): 480-485.
SHI Wei, ZHANG Liang, SHI Zhongnian, et al. Experimental study on mechanical properties of expansive soil of artificial preparation under freeze-thaw cycle conditions [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2019, 51(4): 480-485.

(编辑 桂智刚)