**文章编号:**1007-9629(2022)05-0545-06

# 干湿/冻融循环作用下改良隔离墙的渗透性及 孔隙结构

刘科<sup>1</sup>,刘霖<sup>1,2,\*</sup>,张永鹏<sup>1</sup>

(1.内蒙古工业大学 土木工程学院,内蒙古 呼和浩特 010051;2.内蒙古工业大学 内蒙古土木工程结构与力学重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要:以凹凸棒土为改良隔离墙材料,通过渗透试验分析凹凸棒土掺量、苯酚质量浓度和干湿/冻融 循环作用对隔离墙渗透系数的影响,结合核磁共振试验研究隔离墙孔隙结构,讨论凹凸棒土的掺入 对干湿/冻融循环作用下隔离墙防渗效果的影响.结果表明:隔离墙渗透系数随凹凸棒土掺量增大而 减小,随干湿/冻融循环次数增加而增大,不随苯酚质量浓度变化而变化;凹凸棒土可使干湿/冻融循 环作用下隔离墙的渗透系数降低,且随着干湿/冻融循环次数的增加,隔离墙中小孔隙分布减少,中 孔隙增多;凹凸棒土可增强隔离墙的防渗效果,亦可抑制干湿/冻融循环作用对其产生的破坏;冻融 循环作用对隔离墙渗透系数及孔隙结构的影响大于干湿循环作用.

关键词:凹凸棒土;隔离墙;渗透系数;孔隙结构;干湿;冻融

**中图分类号:**X53 **文献标志码:**A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.05.015

# Permeability and Pore Structure of Improved Isolation Wall under the Action of Dry-Wet/Freeze-Thaw Cycles

LIU Ke<sup>1</sup>, LIU Lin<sup>1,2,\*</sup>, ZHANG Yongpeng<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;
2. Key Laboratory of Civil Engineering Structure and Mechanics of Inner Mongolia, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

**Abstract :** Using attapulgite as the improved isolation wall material, the effects of attapulgite content, phenol concentration, the action of dry-wet or freeze-thaw cycles on the permeability coefficient of the isolation wall were invesgated through permeability test. Combined with nuclear magnetic resonance test, the internal pore structure was studied, and the influence of attapulgite on the anti-seepage effect of the isolation wall was discussed. The results show that the permeability coefficient decreases with the increase of attapulgite content, and increases with the increase of dry-wet or freeze-thaw cycles, and does not change with the change of phenol concentration. Attapulgite can reduce the permeability coefficient of the isolation wall under the action of dry-wet or freeze-thaw cycles, and the distribution of small pores in the isolation wall decreases and the number of mesopores increases with the increase of dry-wet or freeze-thaw cycles. Attapulgite can enhance the anti-seepage effect of the isolation wall, and also restrain the damage caused by the action of dry-wet or freeze-thaw cycles. The effect of freeze-thaw cycles on permeability coefficient and pore structure of isolation wall is greater than that of dry-wet cycles.

Key words: attapulgite; isolation wall; permeability coefficient; pore structure; dry-wet; freeze-thaw

收稿日期:2021-02-01;修订日期:2021-05-28

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2019MS05059)

第一作者:刘 科(1995—),男,山西长治人,内蒙古工业大学硕士生. E-mail: 3445170532@qq.com

通讯作者:刘 霖(1968-),女,北京人,内蒙古工业大学副教授,硕士生导师,硕士.E-mail: 374628630@qq.com

随着煤化工企业的发展,产生了大量的煤化工 废水或淤泥质废物,它们的堆积存放需隔离处理,否 则会造成周围土体及水源污染.土-膨润土隔离墙常 被用来阻隔污染物的运移,如何提高隔离墙对污染 物的阻隔性能得到广泛关注.杜延军等印通过固结试 验得到膨润土掺量是影响土-膨润土试样渗透性的 主要因素:Yeo等<sup>[2]</sup>研究发现5%掺量的膨润土可使 砂-膨润土渗透系数降低近3个数量级;Malusis等[3] 研究了添加活性炭改性剂后砂土-膨润土的渗透性; Angin 等<sup>[4]</sup>研究发现硅藻土可降低土壤的渗透系数, 提高冻融作用下土壤团聚体的稳定性; Malusis 等<sup>[5]</sup> 分析了砂土-膨润土在干湿过程中渗透系数的变化 情况:杜渊博等<sup>[6]</sup>研究发现在水泥石材料中掺入偏高 岭土,偏高岭土发生水化反应后生成的水化产物增 多,从而使水泥石材料的孔隙率降低,微观结构更 致密.

凹凸棒土具有较好的阳离子交换性、吸水性,且 比表面积大,黏结性好.以凹凸棒土为改良隔离墙材 料,通过渗透试验及核磁共振试验研究改良后隔离 墙渗透系数λ的变化,分析隔离墙孔隙结构,讨论掺 加凹凸棒土对干湿/冻融循环作用下隔离墙防渗效 果的影响,以期为有机污染场地的隔离、封闭提供理 论依据与参数支持.

#### 1 试验

#### 1.1 原材料

隔离墙材料为风积沙土和膨润土.风积沙土取 自库布齐沙漠,其级配较差,粉黏粒含量少,无黏结 性;膨润土为钙基膨润土,其吸附性及膨胀性良好, 与水、细沙拌和后有较好的可塑性和黏结性,其中的 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO含量(质量分数,文中涉及的 含量、配合比等均为质量分数或质量比)分别为 69.36%、15.53%、2.82%、1.89%.用有独特晶体结构 且性能较好的凹凸棒土作为改良隔离墙材料,其中 的 SiO<sub>2</sub>、MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量分别为 60.12%、 8.51%、8.45%、4.65%.经处理后的煤化工废水或淤 泥质废物中含有包括酚类、多环芳香族化合物等在 内的多种污染物,用苯酚溶液代替这些污染物作为 渗透液,其质量浓度 $\rho$ =0、0.5、1.0、2.0、4.0 g/L.

#### 1.2 试验设计

美国环境保护署 EPA 规定污染场地隔离材料中 水化膨润土马氏漏斗黏度应在 36 s 以上,坍落度在 100~150 mm 较为合适,因此选用配合比 m(膨润土): m(水):m(风积沙)=1:3:9.凹凸棒土的掺量 w<sub>a</sub>以风 积沙与膨润土的总质量计,设定 w<sub>a</sub>=0%、3%、5%、 8%、10%,对应的隔离墙分别记为IW0、IW3、IW5、 IW8、IW10.干湿循环制度为:将试样放入(45±3)℃ 的烘箱中12h,取出后在试样上下面覆盖透水石后, 将其浸入水中,吸水3h,此为1个干湿循环.冻融循 环制度为:将试样放入-20℃的工业冰箱中,12h后 取出放入标准养护室中养护4h,此为1个冻融循环. 设定干湿/冻融循环次数*n*=0、1、2、3.

#### 1.3 渗透试验及核磁共振试验

用TST-55型土壤渗透仪进行渗透试验,采用变 水头试验方法,对试样进行饱水后,在不同渗透时间*t* 测试隔离墙的渗透系数,其测试间隔为每隔20min测 量1次.用MesoMR23-060H-1低温高压岩土核磁共 振分析与成像系统进行核磁共振试验,将养护好的 试样取出饱水24h,用塑料膜包紧放入核磁共振仪中 进行试验.

#### 2 结果与分析

#### 2.1 隔离墙渗透系数

#### 2.1.1 凹凸棒土对隔离墙渗透系数的影响

凹凸棒土对隔离墙渗透系数的影响见图1.由图 1可见:无凹凸棒土掺入时,不同苯酚质量浓度下隔 离墙的渗透系数无明显变化规律,这是因为膨润土 颗粒可快速填充于土粒间,减小土样的孔隙体积,但 其扩散速率会受到各种因素的影响,例如环境因素、 试验操作方法等;随着凹凸棒土掺量的增大,隔离墙 渗透系数变化曲线由分散变为聚拢且逐渐降低,这 是因为凹凸棒土的黏结性与吸附性较好,可以使隔 离墙内部变得更加均匀和密实;隔离墙的渗透系数 不随苯酚质量浓度的变化而变化,这是因为膨润土 对苯酚的吸附并不改变墙体内部孔隙特点、凝胶体 系的外边缘特征及孔隙的联通特性[7];随着凹凸棒土 掺量的增大,隔离墙的渗透系数逐渐减小,当w =3%时,隔离墙渗透系数降低近50%,继续增大凹凸 棒土的掺量,其渗透系数的变化幅度逐渐减小.凹凸 棒土有较大的比表面积以及较好的吸附性、黏结性, 可以吸附隔离墙土体内部游离的小土颗粒,使其聚 集成大颗粒,降低孔隙率,从而使隔离墙渗透系数降 低.凹凸棒土掺量较低时,其颗粒均匀分散于土体内 部,可以很好地吸附并聚集土颗粒,改变其内部渗流 路径,隔离墙渗透系数降低幅度较大,而随着其掺量 的增大,隔离墙土体内部无游离的土颗粒,只能由凹 凸棒土颗粒填充孔隙,导致其渗透系数变化减小.

#### 2.1.2 干湿循环对隔离墙渗透系数的影响

t=20 min时,干湿循环作用下隔离墙渗透系数的变化曲线见图2.由图2可见:随着干湿循环次数





的增加,隔离墙渗透系数增大,其增大幅度约为1 个数量级;随着凹凸棒土掺量的增大,隔离墙渗透 系数逐渐减小.土-膨润土隔离墙在干燥脱湿过程 中,膨润土层状结构中水分流失,间距减小,膨润土 颗粒从膨胀变为收缩,在增湿过程中,收缩的膨润 土颗粒吸水缓慢回弹<sup>[8]</sup>,但不会恢复到原始状态那 样密实均匀.隔离墙内部膨润土颗粒产生干缩和湿 涨变形,形成微裂隙,破坏了土颗粒间的胶结作用, 增大了孔隙.随着干湿循环次数的增加,微裂隙不 断扩展,造成固化体孔隙逐渐增大[9],表现为隔离 墙渗透系数增大,该结果与文献[10]基本一致.但 本文隔离墙的渗透系数较大,可能是膨润土种类、 掺量不同或试验过程存在的误差所致.凹凸棒土因 独特的晶体结构,具有胶体性质以及好的吸附性、 黏结力,可以填充于土体孔隙结构中,使土体更密 实,增强土体稳定性及吸附能力,故随其掺量增大, 隔离墙渗透系数降低.

第5期

干湿循环作用下渗透时间对隔离墙渗透系数的 影响见表1.由表1可见,在干湿循环过程中,随着渗





透时间的增加,隔离墙的渗透系数逐渐减小但变化 不大(除个别数据外),这是因为随着渗透时间的增 加,膨润土水化、膨胀过程逐渐完成并填充于土颗粒 间,使隔离墙密实均匀,一定程度上减弱了干湿循环 产生的破坏作用,故隔离墙的渗透系数略有减小.



 $\times 10^6/(\mathrm{cm}\cdot\mathrm{s}^{-1})$ 

Specimen	n/times	Dry-wet cycles					Freeze-thaw cycles				
		20 min	40 min	60 min	80 min	100 min	20 min	40 min	60 min	80 min	100 min
IW0	1	6.50	7.08	7.02	6.88	6.79	190.40	180.20	180.10	170.60	163.70
	2	12.49	12.35	12.18	12.02	11.76	348.40	381.10	376.10	308.40	283.30
	3	16.23	15.58	15.46	15.27	15.20	526.80	563.00	535.10	499.00	445.00
IW5	1	2.65	2.74	2.66	2.58	2.42	92.70	98.80	91.98	86.44	84.60
	2	6.39	6.77	6.42	6.06	5.82	219.50	225.30	223.60	213.10	206.10
	3	8.69	8.90	8.70	8.52	8.31	280.50	306.50	288.60	259.70	233.40
IW10	1	1.85	1.79	1.72	1.67	1.53	81.20	86.77	83.28	77.41	69.38
	2	4.87	4.74	4.56	4.46	4.22	139.90	119.20	98.18	84.32	76.44
	3	5.35	5.26	5.11	4.94	4.57	146.30	132.40	121.60	114.30	105.80

2.1.3 冻融循环对隔离墙渗透系数的影响

冻融循环作用下隔离墙渗透系数的变化曲线见 图 3. 由图 3 可见:随着冻融循环次数的增加,隔离墙 渗透系数逐渐增大,其增大幅度为 2 个数量级;随着 凹凸棒土掺量的增大,隔离墙渗透系数逐渐减小,且 冻融循环次数越多,其降低幅度越大;冻融循环1次 时,凹凸棒掺量从 0%增加到 8%时,隔离墙的渗透 系数趋于稳定;不同循环次数下,IW10的渗透系数 均最小.冻融循环作用下渗透时间对隔离墙渗透系 数的影响也列于表1.由表1可见:隔离墙渗透系数随 着渗透时间的增加而降低,且降低幅度为1个数量 级;对比干湿循环作用下渗透系数的变化,冻融循环 作用对隔离墙渗透系数的影响及损害更大.





由于膨润土中蒙脱石含量较高,晶粒较小,比表 面积较大,且层间作用力较弱,在溶剂中易剥离、膨 胀、分离而形成更薄的单晶片,使蒙脱石具有更大的 内表面积,因此膨润土具有较高的吸附能力[11].未掺 加凹凸棒土时,随时间增加膨润土水化生成的胶凝 物质填充了土体孔隙,降低了隔离墙的孔隙率,阻碍 了污染物的通过,故其渗透系数逐渐减小.掺入凹凸 棒土可以进一步填充隔离墙孔隙,使其具有更好的 吸附性、阳离子交换性,从而阻碍苯酚在隔离墙中的 迁移,降低其渗透系数,起到对污染物的隔离效果. 冻融循环过程中产生的冻胀力对隔离墙内部结构会 产生破坏作用,形成较多孔隙,损伤隔离墙的稳定 性,故随着冻融循环次数的增加,隔离墙因冻胀温缩 产生的破坏愈加严重,渗透系数也逐渐增大.凹凸棒 土因特殊的层链状结构具有较强的吸水性,可吸附 墙体内部游离的水分子,降低因水分冻胀而使隔离 墙产生的破坏作用,且凹凸棒土具有一定的黏结力, 可增强土颗粒间的黏聚力,随着其掺量的增加,这种 作用亦在增强,可有效抑制冻融循环对隔离墙的 破坏.

#### 2.2 隔离墙孔隙分布

2.2.1 凹凸棒土掺量对隔离墙孔隙分布的影响

凹凸棒土掺量对隔离墙孔隙分布的影响见图 4,图中d为孔隙半径.由图4可见:随着凹凸棒土 掺量的增加,隔离墙孔隙分布曲线整体向左偏移, 孔隙半径减小,这说明凹凸棒土颗粒可以填充隔离 墙内部孔隙,减小其孔隙半径,使隔离墙更加致密 均匀.



Fig. 4 Effects of  $w_a$  on the pore size distribution of isolation walls

#### 2.2.2 干湿循环作用下隔离墙孔隙分布

干湿循环作用下隔离墙孔隙分布见图5.由图5 可见,隔离墙孔隙变化曲线出现了3个峰:第1个峰 的孔隙半径为0.010~0.100 µm,峰区面积最大;第2 个峰的孔隙半径为0.100~5.000 µm,峰区面积次之; 第3个峰的孔隙半径为5.000~50.000 µm,峰区面积 最小.有研究表明,孔隙分布曲线中3个峰分别对 应试样中的小孔、中孔及大孔,峰区面积反映的是 相应的孔隙体积[12].干湿循环作用后,第1个峰的 峰区面积明显减小,第2个峰的峰区面积增大,其 原因是干湿循环作用下产生的胀缩效应会破坏隔 离墙的内部结构, 增大其孔隙率, 使部分小孔隙演 变为中孔隙.随着循环次数的增加,第1个峰的峰 区面积继续减小,第2个峰的峰区面积继续增大, 即隔离墙土体内部小孔数量减少,中孔数量增多, 说明干湿循环作用削弱了隔离墙土颗粒间的胶结 作用,破坏了隔离墙的结构完整性,使其内部形成 微裂隙,增大了较大孔隙的分布.随着凹凸棒土掺 量的增大,第1个峰的峰区面积逐渐增大,第2个峰 的峰区面积逐渐减小,第3个峰的峰区面积有减小 趋势但变化不大,这说明凹凸棒土的掺入使隔离墙 内部中孔隙减少,小孔隙增加,原因是凹凸棒土吸 水性强,可减弱隔离墙因胀缩效应所产生的破坏, 且凹凸棒土有黏性和可塑性,可吸附土颗粒,减小 孔隙,改变土体内部渗流通道,干燥后收缩小,对干 湿循环产生的破坏有所抑制.



图 5 一碰個环作用下層為過化原分和 Fig. 5 Pore size distribution of isolation wall under dry-wet cycles

#### 2.2.3 冻融循环作用下隔离墙孔隙分布

冻融循环作用下隔离墙孔隙分布见图 6. 由图 6 可 见:首次冻融过程中,有 2 个明显的主峰区;冻融循环 2 次时,2 个主峰区孔隙半径分布均减小;冻融循环 3 次 时,第 1 个峰峰值降低,第 2 个峰峰值升高.这可能是因 为冻融循环开始时,膨润土水化产生胶结物填充于土 体孔隙中,增加了土体的密实度,且土体中的大团聚体 由于冻胀力遭到破坏,形成较多的小团聚体,也使大孔 隙数减少;随着冻融循环次数的增加,冻胀温缩对土体的破坏愈加严重,使小孔隙发展为中孔隙,出现小孔隙 减少、中孔隙增多的现象.由图6还可见,随着凹凸棒 土掺量的增大,第1个峰的峰区面积增大,第2个峰的 峰区面积减小,即小孔隙数量增加,中孔隙数量减少, 大孔隙数量基本不变,但孔隙半径略微变小,这表明凹凸 棒土可有效降低冻融循环过程中隔离墙内出现的微裂 隙,有利于增强土-膨润土隔离墙对污染液的阻隔效果.





### 2.2.4 干湿/冻融循环作用下隔离墙孔隙结构变化 对比

比较图 5、6 可见:未进行干湿/冻融循环时,隔离 墙内部孔隙结构较单一,孔径为0.001~0.100 μm;3 次干湿循环后,小孔隙数量减少,部分转化为中孔 隙;冻融循环后,孔隙结构变化与干湿循环基本一 致,但第 2个峰的峰区面积较大,这表明冻融循环作 用下隔离墙内中孔隙分布更广,结构破坏较干湿循 环更为严重,内部流通性更好,防渗及阻隔效果较差,这与上述冻融循环作用对隔离墙渗透系数的影响及损害较大的结论一致.

## 3 结论

(1)凹凸棒土的掺入可使隔离墙渗透系数大幅 降低,随着其掺量的增大,隔离墙渗透系数的降低趋 势逐渐减缓;隔离墙渗透系数随干湿/冻融循环次数 增加而增大,不随苯酚质量浓度变化而变化.

(2)未进行冻融/干湿循环时,随着凹凸棒土掺 量的增大,隔离墙内部孔隙半径减小,且有极少的大 孔隙;随着干湿、冻融循环次数的增加,隔离墙内部 结构破坏加剧,小孔隙分布减少,中孔隙增加.

(3)凹凸棒土颗粒具有较好的吸附性与黏结性, 可填充土体孔隙,增大其掺量可降低隔离墙的孔隙 率,减轻干湿、冻融循环作用对隔离墙的破坏作用, 使隔离墙渗透系数减小.

(4)冻融循环作用对隔离墙渗透系数及孔隙结构的影响大于干湿循环作用.

#### 参考文献:

- [1] 杜延军,范日东.改性土-膨润上竖向隔离墙材料的压缩及渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊1):49-54.
  DU Yanjun, FAN Ridong. Experimental study on compression and permeability characteristics of modified soil-bentonite vertical isolation wall material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (Suppl 1):49-54.(in Chinese)
- YEO S S, SHACKELFORD C D, EVANS J C. Consolidation and hydraulic conductivity of nine model soil-bentonite backfills
   J. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(10):1189-1198.
- [3] MALUSIS M A, BARBEN E J, EVANS J C. Hydraulic conductivity and compressibility of soil-bentonite backfill amended with activated carbon [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(5):664-672.
- [4] ANGIN I, SARI S, AKSAKAL E L, et al. Effects of diatomite (DE) application on physical properties of soils subjected to freeze-thaw cycles[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 160: 34-41.
- [5] MALUSIS M A, YEOM S, EVANS J. Hydraulic conductivity of model soil-bentonite backfills subjected to wet-dry cycling[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(8):1198-1211.

- [6] 杜渊博, 葛勇. 偏高岭土、玻璃粉和石灰石粉对水泥石微观结构和性能的影响[J/OL]. 建筑材料报:1-12[2022-02-21].http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20210916.0942.002.html. DU Yuanbo, GE Yong. Effect of metakaolin, glass powder and limestone powder on microstructure and properties of cement set [J]. Journal of Building Materials:1-12[2022-02-21].http://kns. cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20210916.0942.002.html.(in Chinese)
- [7] 吕淑清.土壤-膨润土泥浆墙对污染物的阻截性能及机理研究
  [D].吉林:吉林大学,2015.
  LÜ Shuqing. Study on the resistance and mechanism of soil-bentonite mud wall to pollutants[D]. Jilin: Jilin University, 2015. (in Chinese)
- [8] 陈彬,王宝,许健,等.冻融-干湿循环作用下土工合成黏土衬 垫防渗性能变化规律[J].新型建筑材料,2019(1):128-133.
   CHEN Bin, WANG Bao, XU Jian, et al. Variation regularity of anti-seepage performance of geosynthetic clay liner under freeze-thaw and dry-wet cycle[J]. New Building Materials, 2019 (1):128-133.(in Chinese)
- [9] 查甫生,刘晶晶,许龙,等.水泥固化重金属污染土干湿循环特 性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7):1246-1252.
   ZHA Fusheng, LIU Jingjing, XU Long, et al. Experimental study on dry-wet cycle characteristics of cement-solidified heavy metal contaminated soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(7):1246-1252.(in Chinese)
- [10] MAZZIERI F, EMIDIO G D, FRATALOCCHI E, et al. Permeation of two GCLs with an acidic metal-rich synthetic leachate[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2013, 40:1-11.
- [11] 刘菊. 膨润土在废水处理中的应用[J]. 化工时刊, 2010, 24(3): 30-32.

LIU Ju. Application of bentonite in wastewater treatment[J]. Chemical Industry Journal, 2010, 24(3):30-32.(in Chinese)

[12] 陶高梁, 吴小康, 杨秀华, 等. 水泥土的孔隙分布及其对渗透性的影响[J]. 工程地质学报, 2018, 26(5):1243-1249.
TAO Gaoliang, WU Xiaokang, YANG Xiuhua, et al. Pore distribution of soil-cement and its effect on permeability[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(5):1243-1249.(in Chinese)