

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230120

# 干湿循环条件下黄土核磁共振 $T_2$ 图谱定量分析与应用

麻建宏, 孙 文, 徐 娜, 幸锦雯, 马文东, 孙浩宸

(兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 为探究水分变化对重塑黄土孔隙结构的影响, 对不同干密度的重塑黄土进行了不同次数的增湿—减湿循环试验, 利用核磁共振技术测试不同循环次数下土体内部的孔隙结构。结果表明, 重塑黄土的核磁共振  $T_2$  图谱呈双峰结构, 即试样内部包含两种孔隙结构; 干湿循环对黄土孔隙结构的变化有影响, 不同干湿循环次数下孔隙结构呈不同的变化规律。最后基于  $T_2$  图谱中提取的定量参数, 利用 SDR 渗透模型计算不同循环次数下重塑黄土的渗透率, 从微观方面解释了渗透机制。

**关键词:** 干湿循环; 核磁共振; 定量参数; 孔隙结构; SDR 渗透模型

**中图分类号:** TU41; [TV16]

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)12-0168-05

## 1 引言

干湿循环作用使黄土内部的孔隙结构处于动态变化中, 利用核磁共振测试技术可快速、无损地检测土体孔隙结构。叶万军等<sup>[1-3]</sup>利用核磁共振测试技术探究了不同干湿循环后土体的孔隙结构演变规律; 冯上鑫等<sup>[4]</sup>为了研究土石混合体在渗流作用下的细观结构变化, 基于核磁共振技术实时监测不同条件下土石混合体细观结构信息; 赵俊宇等<sup>[5]</sup>对重塑黄土进行了干湿循环试验, 通过核磁共振测得孔隙含量增长呈先快后慢的变化趋势, 且在循环 2 次后谱峰达到最大。已有核磁共振技术对土体的研究均是通过宏微观结合, 但利用  $T_2$  图谱中所包含的数学特征定性定量分析土体孔隙结构的较少。因此, 本文以兰州黄土为例, 进行了不同次数的增湿—减湿循环试验, 并利用核磁共振技术测试了不同循环次数后黄土试样的  $T_2$  图谱, 然后运用数学统计方法提取出了各定量参数, 通过定量参数的变化探究了重塑黄土孔隙结构随干湿循环次数变化的演化规律, 最后通过 SDR 渗透模型计算了重塑黄土的渗透率, 研究了干湿循环次数对土体渗透性的影响机理, 该方法可对干湿循环条件下黄土的渗透机制提供新的研究思路。

## 2 试验材料及方法

### 2.1 试验设备及原理

试验仪器采用苏州纽迈公司生产的 MacroMR12-150H-I 型核磁共振仪, 其主要包括数据采集系统、射频系统、永磁体、射频线圈 4 部分。其原理为通过射频系统对试样发射脉冲信号, 脉冲信号与磁场中的氢原子相互作用, 从而获得氢原子的信息来反映被测物体的内部结构信息。被测孔隙半径与弛豫时间  $T_2$  成正比, 小孔隙对应较小的弛豫时间, 大孔隙对应较大的弛豫时间。曲线与横轴围成的面积代表孔隙水的含量, 即代表相应孔隙的含量。岩土体的弛豫时间表达式为:

$$T_2 = 1/T_{2\text{自由}} + 1/T_{2\text{表面}} + 1/T_{2\text{扩散}} \quad (1)$$

式中,  $T_{2\text{自由}}$  为自由弛豫时间, 与液体属性有关;  $T_{2\text{表面}}$  为孔隙流体的表面弛豫时间;  $T_{2\text{扩散}}$  为流体的扩散弛豫时间, 它由扩散系数  $D$ 、磁场强度  $G$ 、磁旋比  $\gamma$  和序列参数  $T_E$  决定。

由于液态水  $T_{2\text{表面}}$ 、 $T_{2\text{扩散}}$  在计算中忽略不计, 因此孔隙水只与  $T_{2\text{表面}}$  有关, 即:

$$1/T = \rho_2 S/V \quad (2)$$

式中,  $\rho_2$  为表面弛豫强度, 与土体颗粒的性质有关,  $\mu\text{m}/\text{ms}$ ;  $S$  为孔隙表面积,  $\mu\text{m}^2$ ;  $V$  为孔隙体

**收稿日期:** 2023-02-02, **修回日期:** 2023-04-10

**基金项目:** 中央引导地方科技发展资金项目(22ZY1QA005)

**作者简介:** 麻建宏(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水利工程、岩土工程, E-mail: 1948873146@qq.com

**通讯作者:** 孙文(1976-), 男, 博士、副教授, 研究方向为水利工程、岩土工程及理论, E-mail: sunwen1223@163.com

积,  $\mu\text{m}^3$ 。

## 2.2 试验材料

### 2.2.1 试验材料的基本物理性质

试验所用黄土取自甘肃省兰州市,为避免表面土层含有的杂质对试验结果产生影响,采取向下开挖 4~5 m 进行取样,将土样运回后根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)<sup>[6]</sup>对所取黄土进行了室内试验,其基础物理指标见表 1。

表 1 黄土的基础物理指标

Tab. 1 Basic physical indicators of loess

天然含水率/%	初始干密度 /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	最优含水率/%	最大干密度 /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	液限 /%	塑限 /%
8.23	1.54	18.40	1.73	27.6	15.10

### 2.2.2 饱水湿陷试验

天然黄土具有大孔隙、垂直节理等特点,遇水后容易湿陷,但经人为扰动后,湿陷性会发生变化。对黄土进行饱水条件下的侧限压缩试验,用下式计算湿陷系数  $\delta_{sp}$  :

$$\delta_{sp} = \Delta h_{sp} / h_0 \quad (3)$$

式中,  $\Delta h_{sp}$  为饱和浸水时产生的附加变形, mm;  $h_0$  为试样的初始高度, mm。

$\delta_{sp} > 0.07$  为强烈湿陷性,  $0.03 < \delta_{sp} \leq 0.07$  为中等湿陷性,  $0.015 < \delta_{sp} \leq 0.03$  为轻微湿陷性,  $\delta_{sp} < 0.015$  为无湿陷性。

通过式(3)计算所得的原状黄土与重塑黄土的饱水湿陷系数及等级见表 2。由表 2 可知,原状黄土的湿陷较大,是因试验黄土接近表层,属于新近黄土,新近黄土颗粒之间在无自重压缩前就形成了胶结作用,遇水受压下易发生湿陷。干

表 2 湿陷系数及等级

Tab. 2 Wet sink factor and grade

黄土	干密度 /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$\delta_{sp}$	分类等级
原状		0.198 0	强烈湿陷性
重塑	1.53	0.103 0	强烈湿陷性
	1.63	0.027 2	轻微湿陷性
	1.73	0.014 0	无湿陷性

密度为  $1.53 \text{ g/cm}^3$  的重塑黄土与天然干密度相差不大,也属于强烈湿陷性,但湿陷系数相对较小,原因为重塑黄土在静压后其颗粒排列相对均匀,且无较大的孔洞;干密度为  $1.73 \text{ g/cm}^3$  的重塑黄土湿陷系数最小,属于无湿陷性黄土,原因为该密度为黄土的最大干密度,在制样静压时颗粒排列非常密实,黄土湿陷性被消除。

## 2.3 试验方法

采用三轴试样,尺寸为  $39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$  (宽×长),试样控制干密度分别为  $1.53$ 、 $1.63$ 、 $1.73 \text{ g/cm}^3$ 。将制备后的试样进行 0、1、3、5、6 次干湿循环,增湿过程使用真空饱和仪,饱和增湿时间为 12 h,减湿过程采用恒温干燥箱,烘干至质量不变为止,如此为一次干湿循环。将经不同干湿循环次数的试样饱和后进行核磁共振试验。

## 3 核磁共振 $T_2$ 谱图形、数学分布特征

### 3.1 核磁共振 $T_2$ 谱图形分布特征

对不同干密度的黄土试样进行了 0、1、3、5、6 次干湿循环试验,根据核磁共振测试技术反演出不同循环次数下的  $T_2$  谱分布曲线见图 1。由图 1 可看出,不同干密度的  $T_2$  图谱均含有两个峰值,两种峰值对应两种类型的孔隙,即微孔隙和大孔隙,但其所对应  $T_2$  时间范围略有差异。干密度为  $1.53 \text{ g/cm}^3$  的土样,  $T_2$  范围分别为  $0.28 \sim 54$ 、 $60 \sim 2866 \text{ ms}$ ;干密度为  $1.63 \text{ g/cm}^3$  的土样,  $T_2$  范围为  $0.28 \sim 51$ 、 $62 \sim 2171 \text{ ms}$ ;干密度为  $1.73 \text{ g/cm}^3$  的土样,  $T_2$  范围为  $0.22 \sim 51$ 、 $83 \sim 471 \text{ ms}$ 。由图 1(a)曲线分布范围可知,干密度为  $1.53 \text{ g/cm}^3$  时,其  $T_2$  时间分布范围最广,即其土样内所含孔隙较多;由图 1(c)曲线分布范围可知,干密度为  $1.73 \text{ g/cm}^3$  时,其  $T_2$  范围分布最小,即其土样内所含孔隙较少,因此通过核磁共振试验从微观方面解释了土样干密度越大,其密实度越高,其内所含孔隙越少。

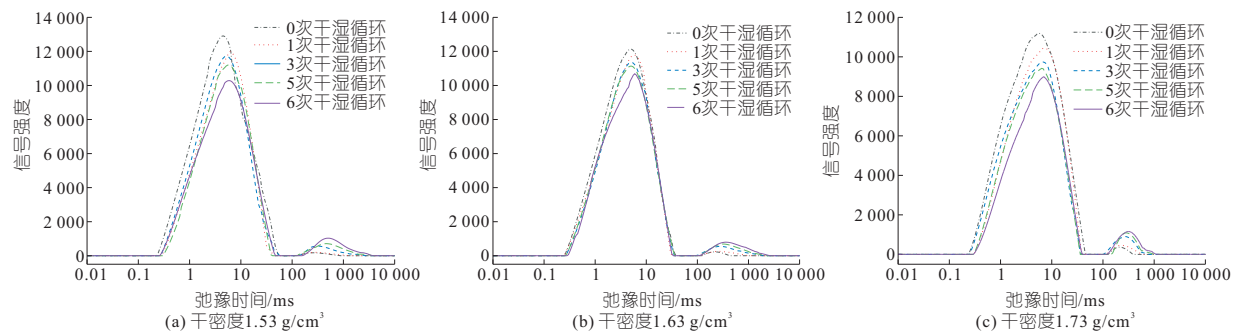


图 1 不同干湿循环次数下的  $T_2$  图谱

Fig. 1  $T_2$  profiles at different numbers of wet and dry cycles

核磁共振  $T_2$  图谱的图形分布特征主要分为弛豫时间极值、谱峰弛豫时间和最大孔隙度分量等<sup>[7]</sup>。

### 3.1.1 最大、最小弛豫时间

研究最大和最小弛豫时间可了解试样内孔隙结构的范围。由图 2(a)可知,核磁共振最小弛豫时间基本一致,其范围在 0.25~0.30 ms 之间。由图 2(b)可知,随着干密度的减小,其最大弛豫时间逐渐增大,表明干密度越小,土样颗粒之间较松散,其孔隙较大;随着干湿循环次数的增大,最大弛豫时间逐渐增大,表明干湿循环作用对土体颗粒骨架造成破坏,使孔隙逐渐增大。

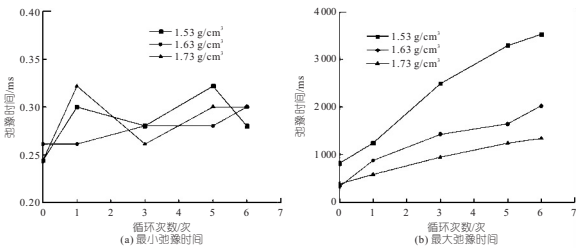


图 2 弛豫时间极值图

Fig. 2 Relaxation time extremes plot

### 3.1.2 谱峰弛豫时间

在核磁共振中,谱峰弛豫时间指信号强度最大的点所对应的弛豫时间,代表孔隙大小比较集中的时间分量。岩土介质为非均质,其核磁共振具有双峰结构。由图 3(a)可知,第一谱峰弛豫时间基本一致,其变化范围在 4~8 ms 之间。由图 3(b)可看出,第二谱峰弛豫时间随着干密度增大弛豫时间逐渐减小,随着干湿循环次数增大弛豫时间逐渐增大。

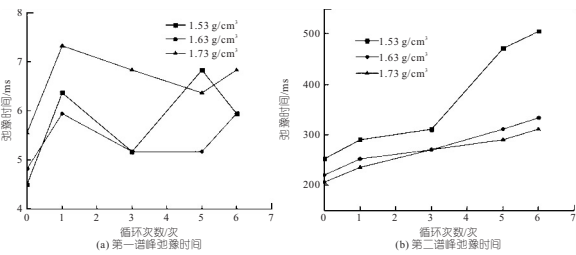


图 3 谱峰弛豫时间

Fig. 3 Spectral peak relaxation times

### 3.1.3 孔隙度分量

孔隙度分量是将核磁共振信号强度进行归一化处理,即每一个弛豫时间对应的信号强度除以总的信号强度,最大孔隙度分量是信号强度最大的点所对应的值。由孔隙度分量结果(表 3)可知,最大孔隙度分量基本一致,在 2.5% 附近。

### 3.2 核磁共振 $T_2$ 谱数学分布特征

对于传统的地质数学统计模型中,常用的概

表 3 孔隙度分量

Tab. 3 Porosity components

循环次数	孔隙度分量/%		
	1.53 g/cm <sup>3</sup>	1.63 g/cm <sup>3</sup>	1.73 g/cm <sup>3</sup>
0	2.45	2.55	2.21
1	2.65	2.65	2.38
3	2.52	2.58	2.29
5	2.51	2.51	2.37
6	2.34	2.52	2.46

率统计模型是正态分布统计。白松涛等<sup>[7]</sup>指出核磁共振  $T_2$  图谱与毛管压力曲线计算所得的孔喉半径直方图具有类似几何形态,核磁共振  $T_2$  图谱可反映孔隙结构大小。因此,核磁共振也可用均值、几何均值、标准差和峰度对试样进行定量表征。

### 3.2.1 均值

核磁共振中均值  $\bar{T}_2$  表示孔隙分布的平均位置,其值大小可用弛豫时间与孔隙度分量的加权平均得到:

$$\bar{T}_2 = \sum_{i=1}^n T_{2i} \phi_i \quad (4)$$

式中,  $T_{2i}$  为第  $i$  个弛豫时间, ms;  $\phi_i$  为第  $i$  个弛豫时间所对应的孔隙度分量, %。

计算所得的均值结果见图 4(a)。由图 4(a)可知,相同循环次数下随着干密度的增大均值在逐渐减小;相同干密度下均值随着循环次数的增大而增大。

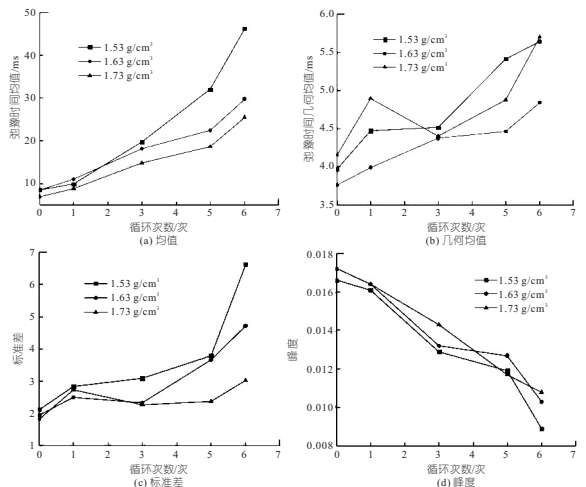


图 4 弛豫时间均值、几何均值、标准差、峰度

Fig. 4 Mean value, geometric mean, standard deviation and kurtosis of relaxation time

### 3.2.2 几何均值

几何均值也是求一组数据的平均值,其一般用来表征数据的平均增长率,核磁共振的几何均值  $T_{2gm}$  也是通过弛豫时间和孔隙度分量计算得到,具体定义为:

$$T_{2gm} = \prod_{i=1}^n T_{2i}^{\phi_i} \quad (5)$$

几何均值结果见图 4(b)。由图 4(b)可知,在经过 1、5、6 次干湿循环后试样的几何均值与循环次数呈正相关关系,随循环次数增大而增大,  $T_2$  曲线的平均增长率逐渐增大;在经过 3 次干湿循环后,其几何均值相比于前一次有所降低,分析原因可能是在经过 3 次干湿循环后,土体颗粒大小相对集中,使孔隙结构大小变得相对均匀。

### 3.2.3 标准差

标准差可用来描述一组数据的离散程度。在孔隙结构中,标准差可描述孔隙大小的分散程度,也称为分散系数,孔隙结构分散性越好,其值越小。标准差  $\sigma$  的计算公式为:

$$\sigma = \sqrt{\sum (\phi_i T_{2i} - \bar{\phi}_i \bar{T}_2)^2} \quad (6)$$

式中,  $\bar{\phi}_i$  为孔隙度分量均值。

标准差结果见图 4(c)。由图 4(c)可知,标准差随着干湿循环次数的增大出现增大—平缓—再增大的变化规律。随着干湿循环次数增大,孔隙结构越分散,孔隙分选性越差。在经过第 3 次干湿循环后,标准差出现了短暂的未增长情况,说明在经过此次循环后,孔隙结构出现了相对集中的情况,在继续增加干湿循环次数后,孔隙结构又出现分散状况,因此标准差继续增大。

### 3.2.4 峰度

峰度  $K_G$  是用来描述随机概率函数曲线的尖锐程度,本文用来描述核磁共振  $T_2$  曲线的陡峭程度,进而评价孔隙结构,反映土样内部孔隙大小的集中程度,计算公式为:

$$K_G = \frac{1}{\sigma^4} \sum (\phi_{2i} T_{2i} - \bar{\phi} \bar{T})^4 \quad (7)$$

峰度结果见图 4(d)。由图 4(d)可知,峰度随着干湿循环次数的增大逐渐减小,表明随着干湿循环次数的增大,  $T_2$  曲线趋缓,孔隙结构越松散。

## 4 定量参数在渗透率计算中的应用

渗透性为土体重要的岩土工程性质之一,渗透性的大小用来描述流体通过多孔介质的难易程度<sup>[8]</sup>。黄土作为多孔介质,渗透性是其一个最大特点,同时黄土具有遇水湿陷的特性,因此渗透性的大小对其工程性质影响很大。渗透率是表征材料渗透性大小的参数,它一般与材料自身的孔隙结构大小、颗粒排列方向、孔隙度等有关,与所流经的流体性质无关<sup>[9]</sup>。本文利用 SDR 渗透模型计算分析了不同干湿循环次数后的黄土的渗透率  $K$ , 计算模型为:

$$K = 0.01 \phi \sqrt{T_{2gm} \sigma T_{2h} \phi_{imax} / K_G} \quad (8)$$

式中,  $\phi$  为孔隙度,%;  $\phi_{imax}$  为孔隙度最大分量, %。

渗透率结果见图 5。由图 5 可知,渗透率随着干湿循环次数增大而逐渐增大,当干密度为  $1.53 \text{ g/cm}^3$  时,干密度越小,其增幅越大,增幅最大可达 56.67%。孔隙结构对渗透性影响很大,随着干湿循环次数的增大,孔隙结构从小孔隙逐渐转变为大孔隙,使孔隙之间相互联通,为渗流提供了优势通道,因此渗透率逐渐增大。当密度为  $1.73 \text{ g/cm}^3$  时,干密度越大,渗透率越小,其原因为干密度越大,孔隙结构越密实,颗粒与颗粒之间的孔喉越小,使流体流过的通道越小,因此渗透率越小。由此可知,在经过 3 次循环后孔隙结构出现了相对均匀、集中的情况,因此在 3 次干湿循环后渗透率基本不变。

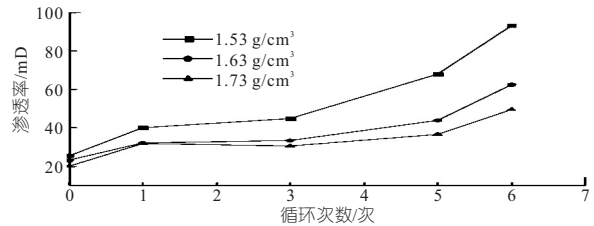


图 5 渗透率

Fig. 5 Penetration rate

## 5 结论

a. 不同干湿循环次数下的的重塑黄土呈小孔隙与大孔隙两种结构,随着干湿循环次数的增大,小孔隙逐渐演变为大孔隙、孔隙分选性越差、孔隙结构越分散、 $T_2$  曲线逐渐平缓。

b. 将核磁共振 SDR 渗透率计算模型引入黄土中,计算所得渗透率随着干湿循环次数的增大逐渐增大,且增幅有差异。

c. 重塑黄土中大孔隙和垂直节理较难存在,是因重塑黄土颗粒级配较好,通过静压后内部孔隙结构相对比较均匀,由湿陷试验也可看出,水作用对原状黄土内部孔隙结构影响较大,重塑黄土内部的孔隙结构比原状黄土小。通过核磁共振技术所得重塑黄土微观结构定量结果存在偏小的可能,后期需通过核磁共振技术对兰州原状黄土微观结构进行定量研究。

### 参考文献:

- [1] 叶万军,吴云涛,杨更社,等. 干湿循环作用下古土壤微观结构及宏观力学性能变化规律研究[J]. 岩

石力学与工程学报,2019,38(10):2126-2137.

[2] 李甜果,孔令伟,王俊涛,等.基于核磁共振的季冻区膨胀土三峰孔隙结构演化特征及其力学效应[J].岩土力学,2021,42(10):2741-2754.

[3] 潘振兴,杨更社,叶万军,等.干湿循环作用下原状黄土力学性质及微观损伤研究[J].工程地质学报,2020,28(6):1186-1192.

[4] 冯上鑫,柴军瑞,许增光,等.基于核磁共振技术研究渗流作用下土石混体微观结构的变化[J].岩土力学,2018,39(8):2886-2894.

[5] 赵俊宇,许增光,柴军瑞,等.干湿循环条件下重塑黄土强度与持水特性的试验研究[J].水电能源科学,2021,39(9):169-172,139.

[6] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局

管理总局.土工试验方法标准:GB/T 50123-2019[S].北京:中国计划出版社,2019.

[7] 白松涛,程道解,王金彬,等.砂岩岩石核磁共振  $T_2$  谱定量表征[J].石油学报,2016,37(3):382-391,414.

[8] CHAPUIS R P. Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review[J]. Bulletin of engineering geology and the environment,2012,71(3):401-434.

[9] AHMADI M M, MOHAMMADI S, HAYATI A N. Analytical derivation of tortuosity and permeability of monosized spheres: a volume averaging approach[J]. Physical review E, statistical, nonlinear, and soft matter physics,2011,83(2):026312.

## Quantitative Analysis and Application of NMR $T_2$ Spectrum of Loess Under Dry-wet Cycles Conditions

MA Jian-hong, SUN Wen, XU Na, XING Jin-wen, MA Wen-dong, SUN Hao-chen

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In order to explore the impact of moisture change on the pore structure of reshaped loess, different times of humidification-dehumidification cycle tests were carried out for remodeled loess with different dry densities, and the pore structure inside the soil under different cycles was tested by nuclear magnetic resonance technology. The results show that the NMR  $T_2$  pattern of reshaped loess presents a bimodal structure, that is, the sample contains two pore structures; The dry and wet cycles have an impact on the change of the pore structure of the loess, and the pore structure shows different laws under different times of dry and wet cycles. Finally, based on the quantitative parameters extracted from the  $T_2$  pattern, the permeability of reshaped loess under different cycles were calculated by SDR permeability model, and the permeability mechanism of loess was explained from the microscopic aspect.

**Key words:** dry-wet cycle; NMR; quantitative parameters; pore structure; SDR permeability model

\*\*\*\*\*  
(上接第 155 页)

[11] 中华人民共和国水利部.土工合成材料测试规程:SL/T235-1999[S].北京:中国水利水电出版社,2012.

[12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.塑料拉伸性能的测定第3部分:薄膜和薄片的试验条件:GB/T 1004.3-2006[S].北京:中国标准出版社,2006.

[13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.高分子防水材料第1部分:片材[S].2012.

[14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局:GB 12952-2003[S].北京:中国标准出版社,2003.

[15] MERRY S M, BRAY J D. Geomembrane response in the wide strip tension test. Geosynthetics international,1996,3(4):517-536.

## Experimental Study of Unidirectional Tensile Mechanical Evaluation Method for Geomembranes

SONG Yong-jia, TANG Yuan, ZHANG Xian-lei, TIAN Lin-gang

(School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Henan 450046, China)

**Abstract:** In view of the influence of the analysis method of geosynthetics axial tensile test results on the authenticity of mechanical properties, the mechanical properties of PVC geomembrane and HDPE geomembrane materials were studied respectively, and the relationship curves of the two materials under different analysis methods were obtained. Then the error of material tensile index under the two analysis methods was compared. The results indicate that the experimental curves obtained by the true stress-strain analysis method considering thickness changes can more accurately reflect the tensile deformation process of materials. When the materials are different, the modulus errors of the materials under the two analysis methods are also completely different. However, the variation law of the true stress-strain curve is more consistent compared to standard methods for processing, which can more accurately evaluate the material's ability to adapt to load deformation.

**Key words:** geomembrane; axial tensile test; mechanical property; stress-strain relationship