

基于低场核磁共振技术的非织造土工织物有效孔径测定

张宪雷¹, 杨鹏鹏², 马少帅³

(1. 华北水利水电大学水利学院; 2. 松花江水力发电有限公司吉林白山发电厂; 3. 国网新源集团有限公司新安江水力发电厂)

摘要:为精确测定针刺非织造土工织物有效孔径,运用湿筛法和低场核磁共振技术开展了试验研究,分别绘制了累积百分率与孔径尺寸之间的关系曲线,得到非织造土工织物的有效孔径值,并进行了对比分析;利用低场核磁共振成像技术与 Python 程序像素点识别相结合的方法验证了低场核磁共振测量技术成果的可靠性。结果表明:以氢原子为探针的低场核磁共振测量技术能够精确测定非织造土工织物的有效孔径;低场核磁共振成像技术和 Python 程序像素点识别相结合的方法可验证低场核磁共振技术测定非织造土工织物有效孔径的准确性;低场核磁共振测量技术可避免湿筛法的缺点,提高有效孔径测定成果的准确性。

关键词:非织造土工织物;孔径分布;孔隙度;有效孔径;低场核磁共振技术

Determination of effective pore size of nonwoven geotextiles based on low-field nuclear magnetic resonance technology//Zhang Xianlei¹, Yang Pengpeng², Ma Shaoshuai³(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power; 2. Jilin Baishan Hydropower Plant, Songhuajiang Hydropower Co., Ltd.; 3. Xinanjiang Hydropower Plant of State Grid Xinyuan Group Co., Ltd.)

Abstract: In order to accurately determine the effective pore size of needle-punched nonwoven geotextiles, the wet sieving method and the low-field nuclear magnetic resonance (NMR) technology were used to carry out experimental research. The relationship curves between the cumulative percentage and the pore size were drawn, and the effective pore size value of nonwoven geotextiles was obtained and compared. The reliability of the low-field NMR measurement results was verified by combining the NMR imaging technology and Python programming pixel recognition method. The results show that the low-field NMR measurement technology with hydrogen atom as probe can accurately determine the effective pore size of nonwoven geotextiles. The combination of the NMR imaging technology and Python programming pixel recognition method can verify the accuracy of the low-field NMR technology in determining the effective pore size of nonwoven geotextiles. The low-field NMR measurement technology can avoid the shortcomings of the wet sieving method and improve the accuracy of the effective pore size measurement results.

Key words: nonwoven geotextiles; pore size distribution; porosity; effective aperture; low-field nuclear magnetic resonance technology

非织造土工织物是主要的土工合成材料之一,具有良好的力学性能、水力特性、耐久性等优点,起到反滤、排水、加筋等作用^[1-3],被广泛应用于环境保护、水利工程(如水库大坝、渠堤)、交通运输等领域^[4-7]。土工织物的保土性、透水性和抗堵塞性一般采用有效孔径表征,有效孔径常用干筛法和湿筛法测定。Blond 等^[8]指出颗粒形状、样品选择和筛分设备决定了干筛法试验成果;苏树清等^[9]开展了土工织物有效孔径测定试验,认为干筛法适用于编织土

工织物,湿筛法能直接模拟工作特性,适用于所有类型土工织物。大部分学者认为干筛法测定过程中的静电吸附效应导致测定的有效孔径偏低;湿筛法不存在静电吸附效应,测定成果优于干筛法,但试验程序繁杂、周期长。

为解决干筛法和湿筛法存在的问题,学者们采用数字图像法测定非织造土工织物孔隙结构特征,实现了高精度无损测量,并用于土工织物微观结构特性研究。例如:Chen 等^[10]研究了非织造土工织

基金项目:国家自然科学基金项目(51609087,51709114);河南省科技厅面上基金项目(252300420051);河南省研究生教育改革与质量提升工程项目(YJS2026YBGZZ03)

作者简介:张宪雷(1984—),男,副教授,博士,主要从事高面膜堆石坝土工膜防渗研究。E-mail:zhangxianlei@ncwu.edu.cn

物 NSST 的融合算法,实现了多聚焦图像融合,并根据图像测量了纤维直径、纤维取向和孔隙度;Kothari 等^[11]基于种子生长技术算法获取了非织造土工织物的孔径分布曲线;Li 等^[12]基于扫描电子显微镜 (SEM) 二维图像和计算机断层扫描 (CT) 三维图像,分析了连续长丝土工织物微观结构特征。

数字图像技术 (CT、SEM 等) 实现了土工织物内部孔隙结构和纤维分布的可视化,但图像分辨率的差异导致样品孔径测定成果存在较大误差^[13];低场核磁共振技术具有快速、直接、无损、精确等优点,被广泛用于测定煤炭、砂岩、水泥砂浆^[14-20]等各类多孔介质的孔隙度、孔径等;尹春杰等^[21-23]基于低场核磁共振技术分析 PVC-P 土工膜的孔隙结构特征,为研究土工合成材料孔隙结构开辟了新途径。

为消除数字图像法的局限性,本文基于低场核磁共振技术获取了针刺非织造土工织物孔径分布曲线、孔隙度和有效孔径 O_{90} 值,结合 Python 程序像素点识别和低场核磁共振成像技术验证了试验成果的准确性,并对比分析了与湿筛法测定的有效孔径 O_{90} 存在差异的原因。

1 试验条件

1.1 湿筛试验

1.1.1 试样制备

试验材料选用针刺非织造土工织物,其厚度为 3.50 mm,单位面积质量为 360 g/m^2 ,纵横向断裂强度为 18 kN/m ,单幅卷材长 100 m,宽 6 m。

依据 GB/T 13760—2009《土工合成材料 取样和试样制备》对有效孔径测定的试样要求,选择在表面无积垢、无可见损坏或折痕的针刺非织造土工织物上截取直径为 200 mm 的试样。参照 GB/T 17634—2019《土工布及其有关产品 有效孔径的测定 湿筛法》,3 块试样中任意一块试样的颗粒通过率与平均值的绝对差值占平均值的百分比小于 25%,则接受 3 块试样的数据,反之应对另外保留的 2 块试样进行试验。为保证试验数据的准确性,本文共设置 3 组湿筛试验,每组 5 块试样,测量并记录每块试样的厚度及干重。调制十二烷基苯磺酸钠与水的体积比为 0.1% 的溶液,并将试样放置于溶液中浸泡 15 h,使之达到饱和状态。

1.1.2 试验设备

湿筛法试验设备选用天津市美特斯试验机厂研发的 MTSY-02 型土工布有(等)效孔径测定仪(湿筛法)。具体参数为筛分频率 50 Hz(即振动频率 3000 次/min),主振的垂直筛动振幅 1.5 mm(即振动高度 3 mm),夹持器内径 176 mm,外界环境温度

10~30℃、湿度不超过 80%,筛分时间范围 0~999 s。

1.1.3 试验方法

选用不施加张力的单层试样作为筛分网,在试样上投放一定量无黏性标准颗粒材料,并在无外界压力及 GB/T 17634—2019《土工布及其有关产品有效孔径的测定 湿筛法》规定的振动频率和振幅下,对试样及其连续级配粒径喷水,使颗粒粒径通过试样,收集通过的颗粒,并对试样进行分析。以通过颗粒材料累积百分率为纵坐标,相应筛子孔径尺寸为横坐标绘制半对数曲线图,在图中获取累积百分率为 90% 对应的横坐标值,即有效孔径 O_{90} 值。

1.2 低场核磁共振试验

1.2.1 试样制备

为降低非织造土工织物不均匀性对试验结果的影响,选择内径为 50 mm 的圆形环刀在湿筛法裁剪的直径为 200 mm 的圆形试样周围有效区域截取 3 个核磁试样,测量试样厚度并计算其体积。将核磁试样浸泡于 ZK-270 真空饱和装置,启动真空泵,使缸体顶盖压力表数值稳定在 0.1 MPa 并持续 24 h,打开顶盖泄压阀对缸体内部充分泄压,取出饱水核磁试样。

1.2.2 试验设备

a. 低场核磁共振测量。选用苏州纽迈分析仪器股份有限公司研制的 MicroMRI12-150H-I 型号大口径核磁共振成像分析仪,设备集低场核磁共振弛豫分析和成像功能于一体。基本参数包括:磁体磁场强度为 $(0.28 \pm 0.05)\text{ T}$;射频信号频率主值为 12.84 MHz;磁体温度为 32.0℃;工作温度为 25.0~28.0℃;探头线圈口径为 5.08 cm(2 英寸),型号为 RF Coil 3#。本次试验选用硬脉冲 CPMG (Carr-Purcell-Meiboom-Gill) 序列,接收机带宽为 125.0 kHz,重复采样时间为 6000 ms,重复采样次数为 32 次,两个相邻回波的时间间隔为 1.5 ms,模拟增益为 20.0 dB,信号采样得到的回波数量为 18000。

b. 图像分析处理。计算机配置为 Windows10 64 位操作系统。采用纽迈低场核磁共振成像软件和图像处理软件 V3.0 版本和 Python 2022.2.2。

2 试验方法

2.1 低场核磁共振测量方法

本次测量的非织造土工织物处于均匀分布的低磁场,回波时间较短,主要考虑表面弛豫而忽略自由弛豫和扩散弛豫对测量结果的影响。低场核磁共振弛豫时间 T_2 曲线表达式为:

$$1/T_2 \approx 1/T_{2sr} = \rho(S/V) = \rho(2F_s/d) \quad (1)$$

式中: T_2 为弛豫时间; T_{2sr} 为表面弛豫时间; S 为孔

隙表面积; V 为孔隙的体积; F_s 为孔隙形状尺寸系数, 取 1.0、2.0、3.0, 分别用于孔隙结构为扁平形模型、毛细管束模型、球形模型, 本文选用毛细管束模型, F_s 取 2.0; d 为孔径; ρ 为表面弛豫率, 与试样的物理和化学性质有关。

选用 1%、5%、10%、20%、30% 的孔隙度标样定标, 并对单位体积信号强度与孔隙度进行线性拟合, 绘出决定系数 $R^2 = 0.999\ 8$ 的高精度拟合曲线 (图 1) 作为标线, 对非织造土工织物饱水试样进行测量。依据低场核磁共振测得非织造土工织物饱水试样的第 i 个核磁信号强度及标线, 对应孔隙度 φ_i 为:

$$\varphi_i = \frac{M_{ri}}{n_r \sigma_r} \frac{n_w \sigma_w}{M_w} \frac{V_w}{V_r} \times 100\% \quad (2)$$

式中: M_{ri} 为非织造土工织物试样第 i 个 T_2 信号强度; n_r 为测试样品的累加次数; σ_r 为测试样品的接受增益; n_w 为标准样品的累加次数; σ_w 为标准样品的波谱仪接受增益; M_w 为标准样品的信号强度; V_w 为标准样品的体积; V_r 为测试样品的体积。

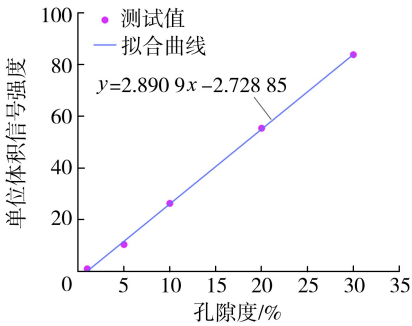


图 1 单位体积信号强度与孔隙度的关系曲线

则非织造土工织物饱水试样的总孔隙度 φ 为:

$$\varphi = \sum_{i=1}^l \varphi_i \quad (3)$$

式中: l 为质子开始释放吸收的脉冲能量至释放结束接收线圈获得的所有信号强度对应的孔隙度数量。

Lawal 等^[24] 构建了表面弛豫率 ρ 与孔隙度 φ 、比表面积 S/V 、单位质量表面积 S_m 之间的数学模型:

$$S/V = S_m \rho (1 - \varphi) / \varphi \quad (4)$$

本文基于此模型建立了适用于非织造土工织物表面弛豫率的预测模型, 并得出非织造土工织物的表面弛豫率为 $10\ \mu\text{m/s}$ 。将核磁共振设备接收到的 CPMG 序列自旋回波衰减信号进行回波串反演得到信号强度与 T_2 弛豫时间曲线, 结合式 (1) 得到试样所有孔径及其分布, 并绘出累积百分率与孔径的半对数曲线, 由半对数曲线确定试样的有效孔径 O_{90} 值。

2.2 低场核磁共振成像方法

低场核磁共振成像是从矢状轴、冠状轴、垂直轴 3 个基本轴定位非织造土工织物饱水试样位置, 利用 3 个基本轴所在的矢状面、冠状面、横断面将非织造土工织物饱水试样分为若干小块, 每一小块内氢质子受到外部磁场激励产生弛豫现象, 经反演获得每一小块的信号强度, 依据信号越强、像素越亮原理确定每一个像素亮度大小, 将各像素亮度组合得到成像图。

低场核磁共振测量结束后, 为避免非织造土工织物饱水试样在试验过程中孔隙内部水分蒸发等因素影响测量精度, 选用直径为 $60\ \text{mm}$ 的样品仓将其密封, 并将样品仓推入探头线圈内进行核磁成像。经图像处理软件获得伪彩图, 结合 Python 程序对每张核磁图像进行像素点的识别, 统计不同像素点占整张图像中总像素点数的比值, 分析计算试样的孔隙度。

3 试验结果与分析

3.1 湿筛法有效孔径

参照 GB/T 17634—2019《土工织物及其有关产品有效孔径的测定 湿筛法》规范, 对颗粒材料进行逐级筛分试验, 并将得到的颗粒材料平均通过百分率作为分析数据, 计算颗粒材料累积通过百分率, 将得到的 3 组湿筛试验数据点进行拟合, 绘制累积通过率与筛孔尺寸的半对数曲线 (图 2)。图 2 中 3 组试验数据点均匀散布在拟合曲线附近, 当筛孔尺寸为 $90 \sim 140\ \mu\text{m}$ 时, 累积通过百分率为 $72.5\% \sim 97.7\%$, 曲线呈大幅上升趋势; 当筛孔尺寸为 $140 \sim 160\ \mu\text{m}$ 时, 累积通过百分率为 $97.7\% \sim 99.3\%$, 曲线上升变缓。通过作图法得到累积通过百分率为 90% 时颗粒粒径为 $115.84\ \mu\text{m}$, 即 $d_{90} = 115.84\ \mu\text{m}$, 取土工织物有效孔径 O_{90} 与颗粒尺寸分布曲线的 d_{90} 相等, 即 $O_{90} = d_{90} = 115.84\ \mu\text{m}$ 。

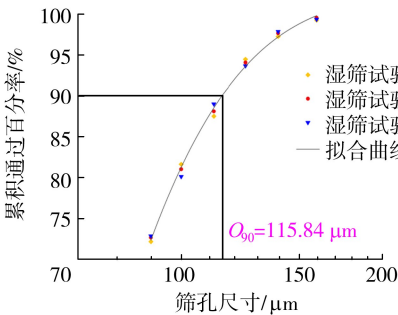


图 2 颗粒材料的累积通过百分率曲线

3.2 低场核磁共振测量结果

利用 CPMG 序列对土工织物饱水试样内部孔隙水的氢质子群重复施加 180° 脉冲, 使其产生一系

列自旋回波串衰减数据,经反演转换为信号强度与弛豫时间 T_2 的分布曲线(图 3(a))。由于非织造土工织物内部孔隙通道类似毛细管束型,孔隙形状尺寸系数 F_s 取 2.0;根据构建的适用于非织造土工织物的表面弛豫率预测模型,预测 ρ 值为 $10\text{ }\mu\text{m/s}$,结合式(1)得到孔径分布百分率与孔口直径关系曲线(图 3(b))。依据孔隙度定义,结合孔径分布曲线计算所有不同尺寸孔径所对应的占比总和作为非织造土工织物的孔隙度。

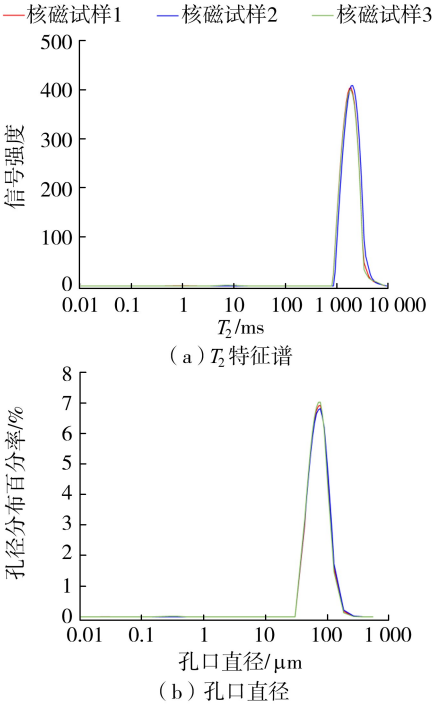


图3 非织造土工织物 T_2 特征谱和孔口直径分布曲线

湿筛法中 O_{90} 定义为 90%的颗粒材料通过土工织物的孔径尺寸,转变到核磁测量的孔口直径分布中 O_{90} 即 90%孔径的尺寸均小于该孔口直径。3 个样品有效孔径为 106.37、107.59、104.63 μm , 以此计算得到核磁试样有效孔径 O_{90} 均值为 106.20 μm 。

3.3 低场核磁共振成像结果

低场核磁共振测量分析后,利用组迈低场核磁共振成像软件 V3.0 对针刺非织造土工织物饱水试样进行成像。采用 3DSE 序列对每个核磁试样整体激励 3.50 mm 层厚,选择在试样上、下层厚 0.25 mm 之间均匀无间隔切割 3 层图像,层厚 1.00 mm,图像以 .dcm 格式储存,经图像处理软件导出每个核磁试样的 3 组 K 空间原始数据并取均值,绘制伪彩图,如图 4 所示。伪彩图中颜色不同代表信号强度不同,颜色越深表示信号越强,孔隙分布越稠密;颜色越浅表示信号越弱,孔隙分布越稀疏。核磁试样 2 颜色相对较深,核磁试样 1 次之,核磁试样 3 颜色最

浅,说明核磁试样 2 的信号强度高于另外 2 个试样,即试样内部孔隙分布密集。

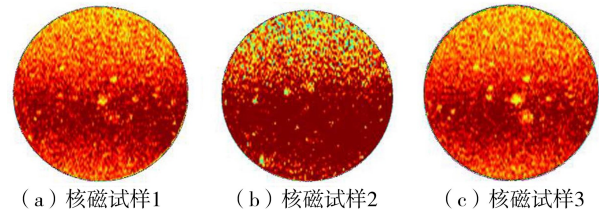


图4 非织造土工织物饱水试样伪彩图

为验证低场核磁共振测量数据反演得到 T_2 特征谱和孔径分布曲线所假定的孔隙尺寸系数与表面弛豫率预测值在非织造土工织物核磁共振测量中的适用性,本文结合 Python 程序利用加权平均法将核磁伪彩图像灰度化,运用高斯滤波法对灰度图进行去噪,遍历各像素点并统计其 RGB 占整图 RGB 总量的比例,输出统计表格并以 .xls 格式存储,结合低场核磁共振成像原理设定 RGB 从 $[0,0,0]$ 至 $[32,32,32]$ 之间的像素点位置孔隙信号强度为零,即不存在孔隙,其余 RGB 组合均为不同尺寸孔隙的原则,对 3 个核磁试样的图像进行多次识别统计,得出 3 个核磁试样的孔隙度分别为 86.25%、87.39%、86.05%(表 1),最大差值为 1.34%,核磁共振测量测得 3 个试样的孔隙度分别为 87.24%、87.91%、87.14%,最大差值为 0.77%,两者吻合度较高。这表明经核磁共振测量数据反演成 T_2 特征谱和孔径分布曲线时,孔隙尺寸系数假定值与表面弛豫率预测值适用于针刺织造土工织物有效孔径测定,验证了低场核磁共振技术测定针刺非织造土工织物有效孔径的准确性。

表1 Python 程序像素点占比识别数据

像素点 RGB 范围	占比/%		
	核磁试样 1	核磁试样 2	核磁试样 3
$[0,0,0] \sim [32,32,32]$	13.75	12.61	13.95
$[33,33,33] \sim [64,64,64]$	0.44	0.74	0.46
$[65,65,65] \sim [96,96,96]$	1.03	1.21	0.64
$[97,97,97] \sim [128,128,128]$	1.34	1.28	1.01
$[129,129,129] \sim [160,160,160]$	1.47	1.72	1.32
$[161,161,161] \sim [192,192,192]$	1.64	1.83	1.54
$[193,193,193] \sim [224,224,224]$	1.87	2.08	1.87
$[225,225,225] \sim [255,255,255]$	78.46	78.53	78.21
$[33,33,33] \sim [255,255,255]$	86.25 ^a	87.39 ^a	86.05 ^a

注:^a 表示核磁试样孔隙度。

3.4 结果分析

图 5 为低场核磁和湿筛试样孔径分布累积百分率与孔径的分布趋势,湿筛法曲线整体低于低场核磁共振曲线。3 个核磁试样在孔径尺寸为 $0 \sim 32.04\text{ }\mu\text{m}$ 时累积百分率为零;在孔径尺寸为 $32.04 \sim 169.31\text{ }\mu\text{m}$ 时曲线呈大幅上升趋势,累积百

分率从 0.33% 增至 99.52%; 在孔径尺寸为 169.31~720.00 μm 时曲线趋于水平, 累积百分率逐渐趋于 100%。湿筛试样孔径在 90~160 μm 之间时累积通过百分率为 72.50%~99.30%, 曲线整体呈先大幅上升后逐渐变缓趋势, 与 3 个核磁试样在孔径 32.04~169.31 μm 之间曲线走势基本吻合。

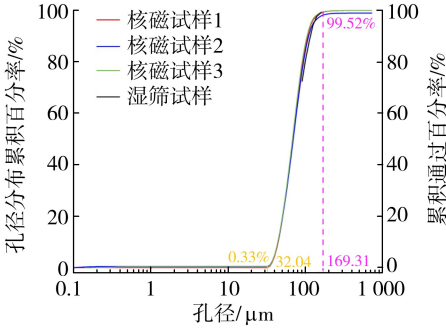


图5 累积百分率与孔口直径关系曲线

由于湿筛试验测定有效孔径所用标准颗粒粒径局限于 45~710 μm 之间, 湿筛法只能测量分布在该区间内的有效孔径, 而低场核磁共振技术以 ^1H 为探针, 可测量从原子至毫米级之间所有孔隙大小及分布, 故低场核磁共振技术可全面测量土工织物的孔径分布, 更精准测定其有效孔径。

通过作图法在图 5 中获取湿筛试样和核磁试样的平均有效孔径 O_{80} 、 O_{85} 、 O_{90} 和 O_{95} , 结果见表 2。由表 2 可知, 湿筛法和低场核磁共振技术测得的有效孔径 O_{80} 、 O_{85} 、 O_{90} 和 O_{95} 差值分别为 7.11、8.72、9.62、8.96 μm , 湿筛法得到的有效孔径皆高于低场核磁共振技术测量成果。这是由于湿筛法在测量过程中使用的标准颗粒材料的粒径是范围值, 且某一范围值内粒径分布存在一定的不均匀性, 此外, 针刺非织造土工织物中聚酯纤维网排列错综复杂, 土工织物内部孔隙通道各层尺寸大小不一, 试验过程中大颗粒被卡在土工织物的孔隙通道中, 小颗粒无法及时顺利通过, 造成土工织物孔隙淤堵, 降低了颗粒材料通过率, 最终使得湿筛法相较于核磁测量方法得出的累积曲线整体下移, 有效孔径偏大。

表 2 不同试验方法有效孔径对比 单位: μm

试验方法	O_{80}	O_{85}	O_{90}	O_{95}
湿筛法	98.93	106.74	115.84	128.09
低场核磁共振	91.82	98.02	106.22	119.13

依据低场核磁共振分析与湿筛试验所得的孔径分布累积百分率与孔径关系的数据点, 分别拟合出孔径分布累积百分率/累积通过百分率与孔口直径的曲线, 如图 6 所示, 决定系数 R^2 分别为 0.9998、0.9999。目前国内通常将有效孔径 O_{90} 作为评价指标, 确保土工织物具有良好的反滤、颗粒截留能力和

排水性能以满足工程要求。故本文选用 O_{90} 作为非织造土工织物的有效孔径, 其值为 106.20 μm 。

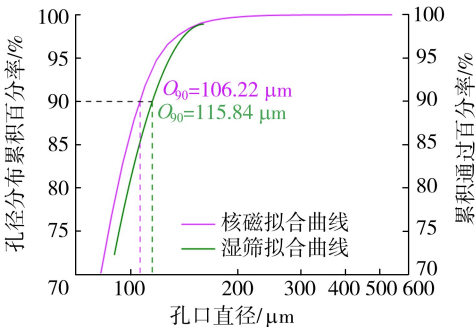


图 6 累积百分率与孔口直径关系拟合曲线

4 结 论

a. 低场核磁共振技术可精确测定非织造土工织物有效孔径, 试验流程简便、周期短、量测成果精准, 为非织造土工织物有效孔径测定提供了一种新方法。

b. 低场核磁共振成像技术可清晰地呈现针刺非织造土工织物孔隙分布, 验证了低场核磁共振测试方法的准确性。

c. Python 程序识别核磁图像像素点占比得到的孔隙度与核磁测量测得的孔隙度相近, 表明低场核磁共振测量技术测定非织造土工织物有效孔径 O_{90} 的准确性。

d. 运用低场核磁共振分析与成像时, 氢质子受外部磁场作用自旋产热, 使试样温度略升, 影响试验数据的可重现性, 后续可增设恒温装置保持测试温度的稳定, 提高量测数据准确性。

参考文献:

[1] Sabiri N E, Caylet A, Montillet A, et al. Performance of nonwoven geotextiles on soil drainage and filtration [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2020, 24 (5) : 670-688.

[2] 张达德, 王淳耀, 方力. 塑料排水板加固软土地基失效案例分析 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42 (11) : 2034-2039. (Chang T T, Wang C H, Fang Li. An unfunctional case of vertical drains-reinforced soft foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42 (11) : 2034-2039. (in Chinese))

[3] 徐超, 柴菲, 刘若彤, 等. 无纺布过滤黏土的梯度比试验及机理研究 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2018, 46 (3) : 227-233. (Xu Chao, Chai Fei, Liu Ruotong, et al. Gradient ratio tests and filtration mechanism of cohesive soil-geotextile system [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46 (3) : 227-233. (in Chinese))

[4] Hosney M S, Rowe R K. Changes in geosynthetic clay liner

- (GCL) properties after 2 years in a cover over arsenic-rich tailings[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(3):326-342.
- [5] 朱朝荣,束一鸣,姜俊红,等.管袋堤坝在水流作用下的稳定性模型试验[J].河海大学学报(自然科学版),2008,36(3):333-336. (Zhu Chaorong, Shu Yiming, Jiang Junhong, et al. Experiment on the stability of geotube embankments in river current [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2008, 36(3):333-336. (in Chinese))
- [6] 姜红,雷国辉,杨明昌.土工织物垂直渗透特性的研究进展[J].水利水电科技进展,2014,34(3):89-94. (Jiang Hong, Lei Guohui, Yang Mingchang. Research progress of vertical infiltration characteristics of geotextiles [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(3):89-94. (in Chinese))
- [7] 邱双,王智远.有纺土工织物在软土地基中的应用[J].水利水电科技进展,2012,32(增刊1):49-50. (Qiu Shuang, Wang Zhiyuan. Application of woven geotextiles in soft soil foundation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(S1):49-50. (in Chinese))
- [8] Blond E, Veermersch O, Diederich R. A comprehensive analysis of the measurement techniques used to determine geotextile opening size: AOS, FOS, O_{90} , and 'bubble point' [C]//Proceedings of the Geosynthetics 2015. Portland:Geosynthetics, 2015.
- [9] 苏树清,吴伟俊.土工织物有效孔径测定方法探讨[J].岩土工程学报,2016,38(增刊1):156-159. (Su Shuqing, Wu Weijun. Determination methods for effective opening size of geotextiles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S1):156-159. (in Chinese))
- [10] Chen Yang, Deng Na, Xin Binjie, et al. Nonwovens structure measurement based on NSST multi-focus image fusion[J]. Micron, 2019, 123:102684.
- [11] Kothari V K, Agarwal G. Determination of pore size parameters and its distribution of hydroentangled fabrics by image processing[J]. Journal of the Textile Institute, 2008, 99(4):317-324.
- [12] Li Keyi, Tang Xiaowu, Zhao Wenfang, et al. Microstructure characteristics of nonwoven geotextiles using SEM and CT methods [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2023, 51(2):293-302.
- [13] 王佳部.基于数字图像技术的陆相页岩微观结构特征研究[D].西安:西安石油大学,2020.
- [14] Zhao Yixin, Sun Yingfeng, Liu Shimin, et al. Pore structure characterization of coal by NMR cryoporometry[J]. Fuel, 2017, 190:359-369.
- [15] Yang Zairong, Zhao Yu, Wang Chaolin, et al. Pore structure and fractal analysis of coal subjected to multiple treatments based on nuclear magnetic resonance [J]. Energy Science & Engineering, 2022, 10(8):2842-2849.
- [16] 方锐.四川盆地凉山高山组页岩储层成储机制与流体赋存状态研究[D].成都:西南石油大学,2024.
- [17] Zhou Yuan, Wu Zhijun, Weng Lei, et al. Seepage characteristics of chemical grout flow in porous sandstone with a fracture under different temperature conditions: an NMR based experimental investigation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 142:104764.
- [18] 田佳丽,王惠民,刘星星,等.考虑不同尺度孔隙压缩敏感性的砂岩渗透特性研究[J].岩土力学,2022,43(2):405-415. (Tian Jiali, Wang Huimin, Liu Xingxing, et al. Study on permeability characteristics of sandstone considering pore compression sensitivity at different scales [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(2):405-415. (in Chinese))
- [19] Zhang Chaoyang, Liu Taoying, Jiang Chong, et al. The freeze-thaw strength evolution of fiber-reinforced cement mortar based on NMR and fractal theory: considering porosity and pore distribution [J]. Materials, 2022, 15(20):7316.
- [20] Ning Lin, Zhao Yu, Bi Jing, et al. Effect of aggregate size on water distribution and pore fractal characteristics during hydration of cement mortar based on low-field NMR technology [J]. Construction and Building Materials, 2023, 389:131670.
- [21] 尹春杰,张宪雷.基于低场核磁共振技术变形状态下PVC膜孔隙特征研究[J].水电能源科学,2022,40(7):180-183. (Yin Chunjie, Zhang Xianlei. Study on pore characteristics of PVC geomembrane under low field NMR deformation [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(7):180-183. (in Chinese))
- [22] 徐国雷,张宪雷,马仲阳.基于低场核磁共振技术面膜堆石坝中PVC膜渗透机理[J].水电能源科学,2022,40(12):138-142. (Xu Guolei, Zhang Xianlei, Ma Zhongyang. Mechanism of PVC membrane permeation in face rock fill dam based on low-field NMR technology [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(12):138-142. (in Chinese))
- [23] 张宪雷,尹春杰,马仲阳,等.基于低场核磁共振技术PVC-P土工膜细观渗透机理研究[J].岩土工程学报,2024,46(4):880-889. (Zhang Xianlei, Yin Chunjie, Ma Zhongyang, et al. Micropermeation mechanism of PVC-P geomembranes by low-field NMR technology [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(4):880-889. (in Chinese))
- [24] Lawal L O, Adebayo A R, Mahmoud M, et al. A novel NMR surface relaxivity measurements on rock cuttings for conventional and unconventional reservoirs [J]. International Journal of Coal Geology, 2020, 231:103605.

(收稿日期:2025-03-05 编辑:俞云利)