

doi:10.3799/dqkx.2014.135

真空冷冻干燥和烘干对滑带土孔隙特征的影响试验

崔德山^{1,2},项伟^{1,2},陈琼¹,刘清秉²,郎林智¹,吴益平¹

1.中国地质大学工程学院,湖北武汉 430074

2.中国地质大学教育部长江三峡库区地质灾害研究中心,湖北武汉 430074

摘要:采用水蒸气吸附法和恒速压汞法测定了三峡库区巴东县黄土坡滑坡I号支洞滑带土在真空冷冻干燥和烘干状态下的孔隙特征。研究表明,滑带土烘干样中墨水瓶形孔道内水分子发生凝聚、堵塞,导致其比表面积和吸附水蒸气的能力均小于滑带土冻干样。滑带土烘干样失水收缩,团粒结构更紧密,滑带土吸附势减小,在微孔区间其累积孔隙体积和最大孔隙体积均小于滑带土冻干样。在考虑水蒸气表面张力情况下,滑带土冻干样吸附和脱附的孔隙表面分形维数均大于烘干样,说明烘干样失水后在各种化学键引力作用下使孔隙表面更趋于平滑。压汞实验结果表明在微孔和中孔区间,冻干滑带土的孔隙直径和孔隙体积均大于烘干样,但孔隙直径在0.133~129.051 μm区间,烘干样的孔隙体积大于冻干样,且直径大于41.421 μm的颗粒体积比冻干样大。

关键词:滑带土;水蒸气吸附;恒速压汞;孔径分布;比表面积;分形维数。

中图分类号:P642

文章编号:1000-2383(2014)10-1431-07

收稿日期:2014-01-04

Pore Characteristics of Sliding Zone Soils of Huangtupo Landslide by Vacuum Freeze-Dried and Dried Methods

Cui Deshan^{1,2}, Xiang Wei^{1,2}, Chen Qiong¹, Liu Qingbing², Lang Linzhi¹, Wu Yiping¹

1.Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2.Three Gorges Research Center for Geo-hazard, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The pore characteristics of sliding zone soils, treated with vacuum freeze-drying and drying methods, respectively, are studied using water adsorption and constant-rate mercury injection porosimetry in branch tunnel I of Huangtupo landslide located in Three Gorges Reservoir. It is found that the condensation and congestion function of water vapor in the ink bottle pore of dried sample lead to smaller specific surface area and weaker water vapor adsorption ability than those of the freeze-dried sample. The shrinkage functions and weaker adsorption potential in the dried sample make the granular structure closer, which in turn leads to smaller cumulative pore volume and maximum pore volume than those of freeze-dried sample. Considering the water vapor surface tension, the pore surface fractal dimension of freeze-dried sample is greater than that of the dried samples, which indicates that the pore surface of dried samples becomes smoother with a variety of chemical bonds. The mercury intrusion porosimetry results show that the pore diameter and pore volume of freeze-dried sample are greater than those of the dried samples in the range of micropore and mesopore. But in the pore diameter range of 0.133~129.051 μm, the pore volume of freeze-dried sample is greater than that of the dried samples. The particle volume of dried sample with diameter greater than 41.421 μm is bigger than that of the freeze-dried samples.

Key words: sliding zone soil; water vapor adsorption; constant-rate mercury injection; pore size distribution; specific surface area; fractal dimension.

三峡工程是世界上最大的水利枢纽工程,三峡库区自然地质环境脆弱,是重大地质灾害的高危区。

三峡库区巴东县黄土坡滑坡(群)的稳定性备受争议,同时也威胁着人民生命财产安全和社会稳定。中

国地质大学(武汉)教育部长江三峡库区地质灾害研究中心为了研究黄土坡滑坡的形成机制,世界上首次在大型水库滑坡体中开挖隧洞群并长期开展科学实验和监测工作,这是一种野外大型地质灾害综合实验场的创新实践。黄土坡滑坡地下洞室群呈弧形状布置在临江1#崩滑体下伏基岩中,主洞全长约908 m,为城门洞型,断面尺寸为5.0 m×3.5 m,进口底板高程179.60 m,出口底板高程190.73 m,坡比1.24%。主洞内设5条实验支洞,其中I号支洞长145 m,IⅡ号支洞长10 m,Ⅲ号、Ⅳ号支洞长5 m,V号支洞长40 m,支洞断面尺寸均为3.0 m×3.5 m。

滑坡滑带土的孔隙特性对计算滑坡地下水的渗透(王秀艳和刘长礼,2003)、固结特性(项伟等,2007)、结构性损伤模型研究(吕海波等,2005)、溶质在孔隙中的运移、灌浆加固可行性和滑坡稳定性评价具有重要的科学意义。黄土坡滑坡滑带土以上地下水非常发育,滑带土由于含有较多的黏粒,是非常好的隔水层,滑带土下部的基岩,均比较干燥,含水率非常低。基于此,亟需研究水在滑带土中的渗透、扩散、吸附特性和滑带土的孔隙特性。土的孔隙结构测试需要干燥后的样品,然而传统的烘干法使样品种体积收缩,改变了其微观孔隙结构。真空冷冻干燥法利用液氮使土样中的液态水变成非结晶态冰,不产生体积膨胀,然后在真空低温条件下让冰升华排出,获得干燥样品。

为了更真实地揭示滑带土的孔隙特性,探索滑带土灌浆加固方法,本文分别采用水蒸气吸附法和恒速压汞法研究了滑带土在不同干燥状态下的微孔、中孔和大孔的孔径分布、比表面积和颗粒大小分布。

1 实验材料与实验方法

1.1 实验材料

实验所用样品为黄土坡滑坡I号支洞滑带土,取样位置为I号支洞里140 m处(图1),滑带土以上地下水较发育,使支洞内出露的滑带土表层近饱和,表面有滴水现象,但滑带土内和以下的地下水均不发育。滑带土呈黄色,含有灰色的次棱角状—浑圆状碎石,碎石粒径5~30 mm,含量约为5%~10%,主要成分为灰炭、泥岩等。为了研究滑带土的孔隙特性,将取回的滑带土过2 mm筛子,剔除滑带土中的碎石,测量其基本性质指标,实验结果见表1。采用X射线衍射法来测定定向滴片滑带土的矿物成分,实验结果见表2。采用碱溶法测定滑带土的化学成分,



图1 黄土坡滑坡I号支洞滑带土

Fig.1 Sliding zone soils in branch tunnel I of Huangtupo landslide

表1 滑带土基本性质指标

Table 1 Basic index of sliding zone soils in branch tunnel I of Huangtupo landslide

天然含水率 (%)	密度 (g·cm ⁻³)	饱和度 (%)	液限 (%)	塑限 (%)	塑性 指数
11~14	2.32	83.5	28.38	17.12	11.26

表2 黄土坡滑坡I号支洞滑带土的矿物组成(%)

Table 2 Mineral composition of sliding zone soils in branch tunnel I of Huangtupo landslide (%)

矿物成分	石英	长石	方解石	蒙脱石	绿泥石	伊利石
滑带土	26	4	30	10	4	26

表3 黄土坡滑坡I号支洞滑带土的化学全量分析结果(%)

Table 3 Chemical component of sliding zone soils in branch tunnel I of Huangtupo landslide (%)

氧化物	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O
滑带土	41.25	11.00	4.16	1.51	18.54	0.15
氧化物	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	H ₂ O	烧失量
滑带土	2.24	0.53	0.10	0.04	2.80	20.48

实验结果见表3,易溶盐含量见表4。

在进行滑带土孔隙分析之前,首先要准备好不同含水状态的样品。为了研究滑带土在不同含水率及不同孔隙体积时的孔隙特征,将滑带土调制成液限状态(崔德山和项伟,2010),一份滑带土采用真空冷冻干燥方法,一份滑带土采用真空烘干方法,最终烘干温度为105℃,具体干燥过程如下:

烘干过程:将剔除碎石的滑带土调成液限状态,取3 g左右滑带土,放入水蒸气吸附仪配备的内径为9 mm的玻璃试管内,接入吸附仪器样品管接口,同时用电热包对样品管进行加热,由于滑带土不含有机质,故以5℃/min的加热速度将样品管加热到

表 4 黄土坡滑坡 I 支洞滑带土的易溶盐(g/kg)

Table 4 Soluble salt of sliding zone soils in branch tunnel I of Huangtupo landslide(g/kg)

易溶盐	pH 值	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{K}^+ + \text{Na}^+$	易溶盐总量
滑带土	6.36	0.366	0.014	0.048	0.076	0.015	0.060	0.579

105 °C, 然后保持这一温度连续抽真空 24 h 以上。

冻干过程: 从液限滑带土上切取大小约 5 mm × 5 mm × 10 mm 左右的试样放入较大玻璃试管, 将试管置于装有液氮的杜瓦瓶中冷冻 10 min, 然后在 -40 °C 的冷阱中抽真空, 使滑带土中的液态水直接转化成非晶态的固态冰, 并在真空条件下使固态冰缓慢升华, 抽真空时间控制在 24 h 以上。

1.2 实验方法

中华人民共和国国家标准《压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度》(GB/T 21650.1-2008、GB/T 21650.2-2008) 规定了多种方法用于表征材料的孔结构。但由于滑带土矿物组成多样、孔隙特征复杂, 因此不同方法得到的结果通常不能很好的吻合, 而且仅靠一种方法也不能给出所有孔隙的特征。应依据滑带土的状态、化学和物理特性和孔径范围选择最合适的表征方法。

根据国标, 目前最常用的测量岩土孔径分布和孔隙度的方法如下:

(1) 压汞法: 加压向孔内充汞, 此方法适于孔直径范围在 0.003~400 μm 之间, 尤其是 0.1~100 μm 之间的大多数材料; (2) 气体吸附分析介孔一大孔法: 通过吸附一种气体表征孔结构, 如室温下的水蒸气, 该方法适于测量孔径范围在 0.002~0.1 μm 之间的孔, 该方法是表面积评估技术的拓展; (3) 气体吸附分析微孔法: 通过吸附一种气体表征孔结构, 如液氮温度下的氮气, 该法适用于测量孔径范围在 0.000 4~0.002 μm 之间的孔。

鉴于仪器设备的限制和研究孔隙的范围, 本文采用的吸附法为前 2 种, 所测量的孔是滑带土中可测量的孔隙和通道, 不包括与外界不相通的闭孔。

滑带土的孔隙特征分析分别采用美国 Quanta-Chrome 研发的水蒸气吸附仪 Autosorb iQ 和压汞仪 Poremaster33, 前者用来分析中孔和大孔, 后者用来分析大孔。进行吸附测量之前, 应通过“脱气”除去滑带土表面的物理吸附物质, 从而保证吸附数据的重现性。将准备好的 2 份烘干试样和 2 份冻干试样分别装入 QuantaChrome Autosorb iQ 水蒸气吸附仪和 Poremaster33 压汞仪的样品管中准备实验。水蒸气吸附仪 Autosorb iQ 采用静态法进行水蒸气

吸附实验, 由于吸附体积是相对湿度、温度、时间等变量的状态函数, 可通过气体状态方程转换成重量吸附的动力学曲线。仪器可控制相对湿度范围 0.25%~99.5%, 比表面积测量最小值为 0.01 m²/g, 有效孔隙直径范围为 0.000 35~0.4 μm。Poremaster33 压汞仪可以采用连续扫描或步进平衡加压检测方式进行注汞实验, 可测定的孔隙直径范围 0.006 4~950 μm, 在高压时, 传感器精度 $\leq \pm 0.05\% \text{ FSO}$, 传感器非线性 $\leq \pm 0.05\% \text{ FSO}$, 传感器重现性 $\leq \pm 0.10\% \text{ FSO}$, 孔体积分辨率 0.03 μL。所以通过压汞法和气体吸附法可以测量的孔径范围是 0.000 35~950 μm, 包括部分微孔、全部中孔和部分大孔。

需要特别说明的是, 压汞法在高压时, 会使滑带土中的孔隙变形甚至压塌, 导致测试结果偏离实际, 对纳米级孔的测定不够精确。水蒸气吸附法可测定微孔和中孔, 而在测量大孔时, 由于产生毛细管凝聚现象, 使其对大孔的测定会产生较大的误差。2 种方法均可以测量出孔隙的比表面积和孔径分布。

2 实验结果与分析

2.1 吸附—脱附等温线

图 2 为滑带土冻干样与烘干样的水蒸气等温吸附—脱附曲线。根据国际纯粹与应用化学联合会(International union of pure and applied chemistry, IUPAC) 和 Sing *et al.* (1985) 提出的标准物理吸附等温线分类, 滑带土在 2 种状态下的水蒸气吸附曲线均属于 II 型等温吸附曲线, 且有滞回圈。究其原因, 在相对低的压力区域, 气体吸附量会有一个快速增长, 这归因于微孔填充。随后的平台表明, 微孔已经充满, 开始发生多层吸附。滞回圈说明存在发生毛细管凝聚的中孔。在 $P/P_0 = 0.30$ 时, 吸附等温线逐渐向上凸, 说明第 1 层吸附大致完成, 可以用来计算滑带土的比表面积。由实验数据可知, 冻干滑带土吸附水蒸气的最大值为 $179.291 5 \times 10^{-3} \text{ L/g}$, 烘干滑带土吸附水蒸气的最大值为 $36.720 3 \times 10^{-3} \text{ L/g}$, 二者相差 4.88 倍。究其原因, 主要是因为在 105 °C 下烘干会使液限状态滑带土中的孔隙收缩, 形成较多

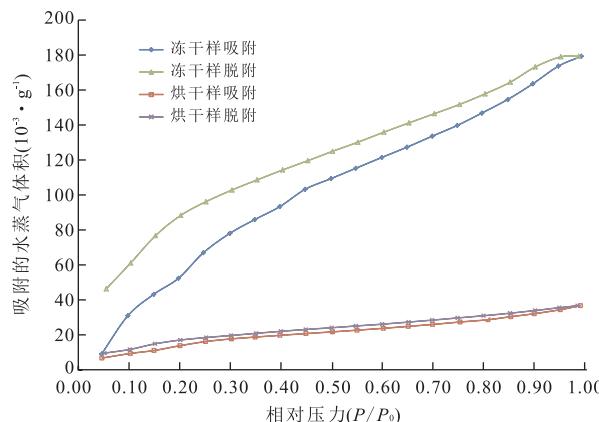


图 2 滑带土烘干样与冻干样的水蒸气等温吸附—脱附曲线
Fig.2 Absorption and desorption isotherms of water vapor gas of dried and freeze-dried sliding zone soils

墨水瓶形结构的孔隙或窄缝状孔隙(刘志彬等, 2004)且孔喉较小, 墨水瓶口孔道或窄缝形孔隙喉道在吸附少量的水蒸气后, 孔道会因吸附水蒸气产生的凝聚作用而堵塞。凝聚的水分子由于与滑带土中的粘土矿物形成氢键, 无法使滑带土进一步产生吸附作用。而冻干滑带土基本保持液限时的最大孔隙, 孔道可以使水蒸气自由进出, 所以可以使墨水瓶内部的孔隙继续吸附水蒸气, 导致其吸附水蒸气的量较大。

2.2 比表面积

根据实验吸附和脱附数据及 BET 理论(Brunauer *et al.*, 1938), 以 $(P/P_0)/(V \times (1 - P/P_0))$ 对相对压力 P/P_0 作图, 水蒸气吸附的多点 BET 实验结果如图 3 所示。可以看到, 拟合 $(P/P_0)/(V \times (1 - P/P_0))$ 曲线基本为直线, 且相关系数较高, 均大于 0.97, 说明水分子单层吸附效果较好。根据式(1)和式(2)可分别计算出冻干滑带土和烘干滑带土吸附水蒸气的单层饱和吸附量及相应的比表面积。

$$\frac{x}{v(1-x)} = \frac{1}{C_{BET} V_m} + \frac{(C_{BET} - 1)}{C_{BET} V_m} x, \quad (1)$$

式中: C_{BET} 是 BET 常数; V_m 是单位吸附剂质量上的单分子层吸附质质量, 10^{-3} L/g ; V 是吸附数量, $x = p/p_0$ 是相对压力。

然后根据单分子层吸附量 V_m 可以计算比表面积 $A_s (\text{m}^2/\text{g})$ 。

$$A_s = \left(\frac{V_m N a_m}{22414} \right) \times 10^{-18}, \quad (2)$$

式中: N 是 Avogadro 常数, 6.022×10^{23} ; a_m 是一个

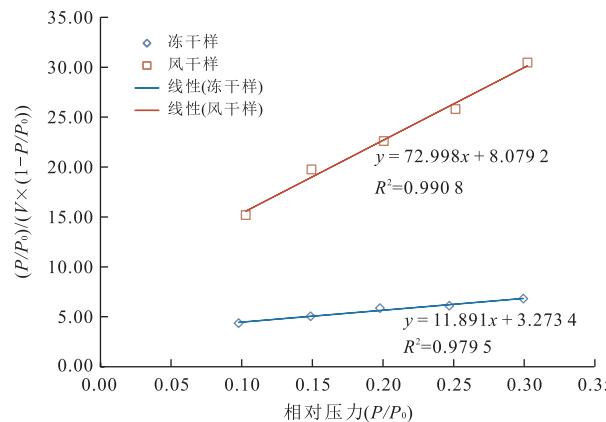


图 3 滑带土烘干样与冻干样的多点 BET 测试结果
Fig.3 Multi-point BET of dried and freeze-dried sliding zone soils

吸附质分子在试样表面所占的面积, 也就是分子占有面积, nm^2 ; 假定吸附层为六方密堆积结构, 则水分子的 $a_{m(\text{H}_2\text{O})} = 0.108 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 。

通过计算得出, 冻干滑带土的比表面积达 $275.548 \text{ m}^2/\text{g}$, 烘干滑带土的比表面积达 $51.537 \text{ m}^2/\text{g}$, 二者的比表面积相差 5.35 倍。由于黏土的比表面积取决于黏土颗粒大小、形状和孔隙, 故其值的大小可以反映在某一状态下黏土颗粒的电荷密度和水蒸气吸附能力。滑带土烘干样由于体积收缩, 黏土颗粒发生团聚现象, 在进行水蒸气吸附时, 由于孔隙减小, 不能使水分子进入所有层内的孔隙, 导致部分内比表面积无法测量, 所以滑带土烘干样结果只代表外比表面积和部分内比表面积。滑带土冻干样黏土颗粒分散性较好, 孔隙通道较畅通, 在进行水蒸气吸附时, 水分子可以进入层内的孔隙, 故测量的比表面积较大。

2.3 水蒸气吸附孔径分布

气体吸附适宜于评价微孔(孔宽小于 2 nm)和中孔(孔宽介于 2~50 nm)的孔径大小和分布特征, 根据水蒸气脱附曲线的数据和 Kelvin 方程适用范围, 笔者统计了孔隙半径在 $0.825 \sim 17.925 \text{ nm}$ 区间内的数据, 发现烘干样在微孔区间的孔隙分布范围较广, 且孔隙体积较小, 最大孔隙体积为 $0.00338 \times 10^{-3} \text{ L/g}$ 。冻干样的孔隙比较集中, 且孔隙体积大于烘干样, 最大孔隙体积为 $0.0320 \times 10^{-3} \text{ L/g}$, 是烘干样最大孔隙体积的 9.47 倍。说明滑带土烘干样团粒结构紧密, 滑带土的吸附势减小, 导致其能够吸附水蒸气的能力较小。除此之外, 笔者还比较了滑带土在 2 种不同状态下累积孔隙的体积, 如图 4 所示, 烘干样的累积孔隙体积为 $0.0522 \times 10^{-3} \text{ L/g}$, 冻干样的累积孔隙体积为

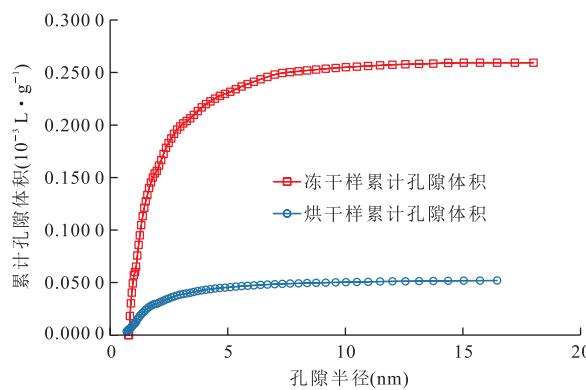


图 4 滑带土冻干样和烘干样的累计孔隙体积

Fig.4 Total pore volume of freeze-dried and dried sliding zone soils

$0.2590 \times 10^{-3} \text{ L/g}$, 是烘干样累积孔隙体积的 4.97 倍。这再次说明由于滑带土冻干样结构疏松, 层间孔隙直径较大, 可吸附水蒸气的容量更大。

2.4 表面分形维数

滑带土的孔隙结构由许多大小、形状各不相同的大孔、中孔和少量微孔相互交织成的立体网状通道构成, 它具有一定程度的自相似性和精细结构。大量研究表明, 由形状与大小各异的岩土体颗粒和孔隙组成的岩土体具有分形特性。描述滑带土分形的定量参数是分形维数 D , 如果分形维数可以确定, 则说明分形现象存在。Pfeifer and Avnir(1983)把分形的概念引入到孔隙材料中, 从而可以定量描述大孔固体表面的复杂结构和能量不均匀性。谢和平(1992, 1993)、陶高梁和张季如(2009)研究了岩石孔隙表面分形, 即考虑一个单位正方形被分成 m^2 个等大的小正方形, 在一定限制条件下去掉 n 个小正方形, 从而推导出孔隙表面的分形维数为:

$$D_2 = 2 + \log(1 + 4n/m^2)/\log(m), \quad (3)$$

认为其分形维总是在 2 和 3 之间, D 值越接近于 2, 则表面越光滑; 而 D 值越接近于 3, 则表面越不规整。

根据 Frenkel-Hill-Halsey (FHH) 方程, 可以计算滑带土的孔隙分形维数:

$$\ln V = -\left(\frac{1}{m}\right) \ln(-\ln(X)) + C, \quad (4)$$

式中: C 为常数; m 为与表面分形维数相关的系数; V 为吸附量; $X = P/P_0$ 为相对压力。

考虑水分子在 25 °C 时的表面张力为 $\sigma = 7.21 \times 10^{-2} \text{ N/m}$, 通过计算可得滑带土冻干样和烘干样的表面分形维数(表 5, 图 5)。结果表明, 滑带土烘干样

表 5 滑带土冻干样与烘干样的表面分形维数

Table 5 Fractal dimension of dried and freeze-dried sliding zone soils

样品名称	吸附/脱附阶段	考虑吸附质表面张力	相关系数
冻干样	脱附	2.8717	0.986
	吸附	2.8416	0.857
烘干样	脱附	2.8615	0.910
	吸附	2.8277	0.936

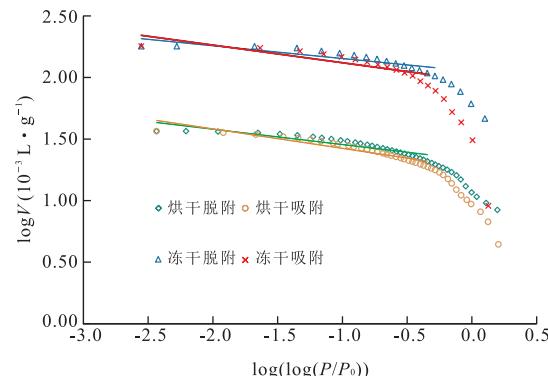


图 5 滑带土冻干样和烘干样的表面分形维数

Fig.5 Surface fractal dimension of freeze-dried and dried sliding zone soils

的表面分形维数比冻干样的小, 说明在失水收缩、分子引力和氢键作用下, 孔隙表面粗糙度减小。

2.5 压汞一退汞孔隙特征

压汞实验适宜评价滑带土中的中孔和大孔, 从累积进汞一退汞曲线(图 6)可以看出, 烘干样的累积进汞体积为 $0.1129 \times 10^{-3} \text{ L/g}$, 冻干样的累积进汞体积为 $0.1053 \times 10^{-3} \text{ L/g}$ 。这说明在中孔和大孔阶段, 烘干样的孔隙体积反而较大。

进一步分析孔隙直径和孔隙体积的关系(图 7), 可以看出, 不仅是在微孔区间, 冻干样的孔隙体积大于烘干样, 在 $11.63 \sim 132.99 \text{ nm}$ 区间, 冻干样的孔隙体积几乎都是大于烘干样($23.81 \sim 27.71 \text{ nm}$ 区间除外)。但孔隙直径在 $132.99 \sim 129.051.40 \text{ nm}$ 区间, 基本上都是烘干样的孔隙体积大于冻干样。究其原因, 可能是因为液限滑带土在烘干过程中, 由于失水收缩, 表面发生许多龟裂, 且其孔宽大部分在大孔阶段, 导致烘干样的累积孔隙较大。

压汞数据除了可以评价滑带土的孔隙特征外, 还可以用来计算滑带土的比表面积, 假设毛细管孔为圆柱形, 在 dP 压力作用下滑带土中汞体积增量为 dV , 则比表面积 S :

$$S = \frac{1}{M\sigma \cos \alpha} \int_0^V P dV, \quad (5)$$

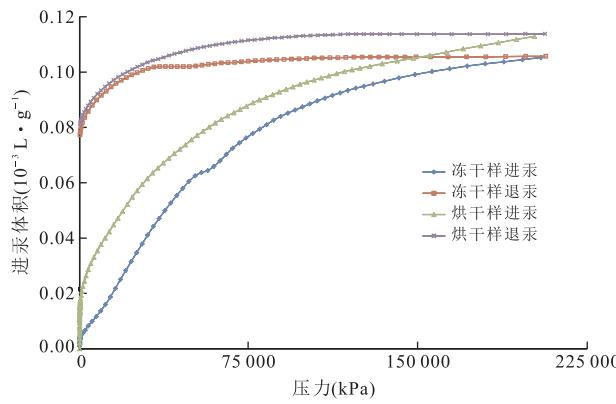


图 6 滑带土冻干样与烘干样的进汞与退汞曲线

Fig.6 Mercury intrusion and extrusion of dried and freeze-dried sliding zone soils

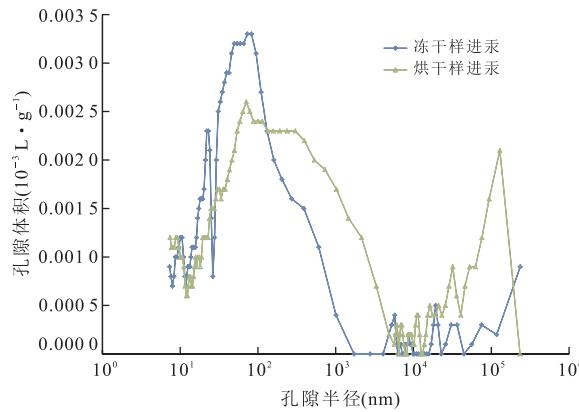


图 7 滑带土烘干样与冻干样的压汞孔隙分布

Fig.7 Mercury intrusion distribution of dried and freeze-dried sliding zone soils

式中: P 为将汞压入半径为 r 的孔隙所需要的压力; V 为半径小于 r 的孔体积; σ 为汞的表面张力; α 为汞与土的浸润角; M 为土的质量.由于公式(5)未考虑孔道几何形状,它规定材料中孔道截面应均匀,即汞在孔道中的弯月面移动须可逆.但在岩土体中这种情况不多,所以压汞法测比表面积须用汞的进汞曲线,而不用退汞曲线.如果孔道的形状不规则,则会使压汞法测量的比表面积与 BET 吸附法计算的比表面积相差较大.采用恒速压汞实验数据计算的比表面积结果见表 6.可见,虽然烘干样的孔隙体积大

于冻干样,但是比表面积却小于冻干样,这可能是因为冻干样中的黏土颗粒保持了较好的分散性,使汞能够接触到更多的黏土颗粒表面.而烘干样的团粒排列较紧闭,虽然孔隙体积大,但是内部连接更紧密,使汞难以进入,导致测量的比表面积偏小.

2.6 颗粒大小分布

滑带土的孔隙特性还与土壤颗粒大小有关(郭飞等,2005),Mayer and Stowe(1965)研究认为既然压汞—退汞曲线可以用来计算颗粒之间的孔隙特征,那么应该也可以用来计算颗粒粒径的大小,于是根据不均匀球形颗粒的压汞曲线,提出计算颗粒粒径分布的公式如下:

$$P_b = \frac{f K \gamma}{D}, \quad (6)$$

式中: P_b 为突破压力; D 为颗粒间的孔隙直径; γ 为汞的表面张力; f 为颗粒形状因数; K 是 MS 比例常数,其与汞的接触角、颗粒的排列形式有关.实验结果如图 8 所示,滑带土冻干样中颗粒直径小于 $41.421 \mu\text{m}$ 的体积要大于烘干样,而烘干样中颗粒直径大于 $41.421 \mu\text{m}$ 的体积则要多一些.这是因为烘干样由于体积收缩,在各种分子键和氢键综合作用下,相互之间连接得更加紧密.因此,冻干样的孔隙体积较小,比表面积较大.

3 结论

通过研究黄土坡滑坡 I 号支洞滑带土冻干样和烘干样的孔隙特征,可以得出如下结论:

(1)综合水蒸气吸附法和恒速压汞法可以测量孔径的范围更大,揭示的孔径范围更广.

(2)滑带土烘干样中墨水瓶形和狭缝形结构的孔隙容易使水分子与黏土矿物形成氢键,阻止水蒸气的进一步吸附,导致测量的比表面积和孔隙体积比冻干样的少,且其表面分形维数比冻干样的小,说明在引力作用下,孔隙表面粗糙度减小.

(3)水蒸气吸附实验适宜评价的孔径范围是微孔区间 $0.825 \sim 17.925 \text{ nm}$;恒速压汞实验适宜评价的孔隙范围是中孔和大孔区间.在微孔和中孔区间,

表 6 恒速压汞实验结果

Table 6 Data of constant-rate mercury injection

样品名称	重量(g)	压力范围(kPa)	孔隙直径(nm)	孔隙体积($10^{-3} \text{ L} \cdot \text{g}^{-1}$)	比表面积($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)
滑带土冻干样	0.486 6	6.247~204 916.122	235 338.59~7.18	0.105 7	15.638 6
滑带土烘干样	0.799 4	6.267~204 779.881	234 692.59~7.18	0.114 0	13.981 9

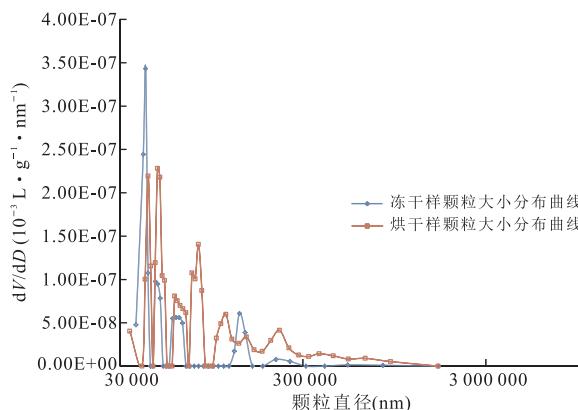


图 8 MS 颗粒大小分布曲线

Fig.8 Particle size distribution by MS method

冻干滑带土的孔隙直径和孔隙体积均大于烘干样,但孔隙直径在 132.99~129 051.40 nm 区间,烘干样的孔隙体积大于冻干样。

(4)滑带土烘干样由于失水体积收缩,在分子键和氢键作用下,颗粒之间连接得更加紧密,团粒直径比冻干样的大,特别是颗粒直径大于 41.421 μm 的体积几乎均大于滑带土冻干样。

References

- Brunauer, S., Emmett, P. H., Teller, E., 1938. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of the American Chemical Society*, 60(2): 309~319. doi: 10.1021/ja01269a023
- Cui, D. S., Xiang, W., 2010. Pore Diameter Distribution Test of Red Clay Treated with ISS. *Rock and Soil Mechanics*, 31(10): 3096~3100 (in Chinese with English abstract).
- Guo, F., Xu, S. H., Liu, J. L., 2005. Characteristics of Pore Profile Fractal Dimension of Soil Images and Its Application. *Transactions of the CSAE*, 21(7): 6~10 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. B., Shi, B., Wang, B. J., 2004. Quantitative Research on Micropores of Modified Expansive Soils. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 26(4): 526~530 (in Chinese with English abstract).
- Lü, H. B., Zhao, Y. L., Kong, L. W., et al., 2005. Determining Parameters of Damage Model of Soft Soils Using Mercury Intrusion Porosimetry. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(5): 854~858 (in Chinese with English abstract).
- Mayer, R. P., Stowe, R. A., 1965. Mercury Porosimetry Breakthrough Pressure for Penetration between Packed Spheres. *Journal of Colloid Science*, 20(8): 893~911. doi: 10.1016/j.jcis.2004.11.067
- Pfeifer, P., Avnir, D., 1983. Chemistry in Noninteger Dimensions between Two and Three. I. Fractal Theory of Heterogeneous Surfaces. *The Journal of Chemical Physics*, 79(7): 3558~3565. doi: 10.1063/1.447307
- Sing, K. S. W., Everett, D. H., Haul, R. A. W., et al., 1985. Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity. *Pure and Applied Chemistry*, 57(4): 603~619. doi: 10.1351/pac198557040603
- Tao, G. L., Zhang, J. R., 2009. Two Categories of Fractal Models of Rock and Soil Expressing Volume and Size-Distribution of Pores and Grains. *Chinese Science Bulletin*, 54(6): 838~846 (in Chinese).
- Wang, X. Y., Liu, C. L., 2003. New Understanding of the Regularity of Water Seepage in Cohesive Soil. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(1): 91~95 (in Chinese with English abstract).
- Xiang, W., Cui, D. S., Liu, L., 2007. Experimental Study on Sliding Soil of Ionic Soil Stabilizer-Reinforces. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(3): 397~402 (in Chinese with English abstract).
- Xie, H. P., 1992. Fractal Geometry and Its Application to Rock and Soil Materials. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 14(1): 14~24 (in Chinese with English abstract).
- Xie, H. P., 1993. Fractal Pores and Fractal Particles of Rock and Soil Materials. *Advances in Mechanics*, 23(2): 145~164 (in Chinese with English abstract).
- 崔德山,项伟,2010.ISS 加固红色黏土的孔隙分布试验研究. 岩土力学,31(10):3096~3100.
- 郭飞,徐绍辉,刘建立,2005.土壤图像孔隙轮廓线分形特征及其应用.农业工程学报,21(7):6~10.
- 刘志彬,施斌,王宝军,2004.改性膨胀土微观孔隙定量研究. 岩土工程学报,26(4):526~530.
- 吕海波,赵艳林,孔令伟,等,2005.利用压汞试验确定软土结构性损伤模型参数.岩石力学与工程学报,24(5): 854~858.
- 陶高梁,张季如,2009.表征孔隙及颗粒体积与尺度分布的两类岩土体分形模型.科学通报,54(6):838~846.
- 王秀艳,刘长礼,2003.对粘性土孔隙水渗流规律本质的新认识.地球学报,24(1):91~95.
- 项伟,崔德山,刘莉,2007.离子土固化剂加固滑坡滑带土的试验研究.地球科学——中国地质大学学报,32(3): 397~402.
- 谢和平,1992.分形几何及其在岩土力学中的应用.岩土工程学报,14(1):14~24.
- 谢和平,1993.岩土介质的分形孔隙和分形粒子.力学进展,23(2):145~164.