

软黏土的比表面积测试与机理探讨

梁健伟, 曾锐碧

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 软黏土主要由粒径极细的颗粒组成, 其物理力学特性与颗粒比表面积有密切联系, 测试软黏土的比表面积有助于分析其物理力学特性。基于乙二醇乙醚(EGME)吸附法和氮吸附(BET)法分别对膨润土、高岭土、石英、长石及其混合物、深圳土、科威特土等软黏土的比表面积进行了测试。测试结果表明: 矿物类型对比表面积影响极大, 深圳土比表面积小于科威特土, EGME法与BET法能够分别测出试样的总比表面积与外比表面积, 给出的比表面积测试对了解影响软黏土的物理力学特性的物理机制具有重要的参考意义。

关键词: 软黏土; 乙二醇乙醚吸附法; 氮吸附法; 比表面积

中图分类号: TU442

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)04-0102-05

Investigation on Test and Mechanism of Specific Surface Area of Soft Clay

LIANG Jianwei, ZENG Ruibi

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Soft clay is mainly composed of tiny-particle. Its physical and mechanical properties are closely related to specific surface area (SSA for short). Therefore, SSA test of soft clay is helpful for analyzing its physical and mechanical properties. EGME method and BET method are adopted to carry tests on bentonite, kaolinite, quartz, feldspar and their mixtures, Shenzhen soil and Kuwait soil. The results show that the mineral type has great influence on SSA; the SSA of Shenzhen soil is smaller than Kuwait soil; total and external SSA of samples can be measured respectively by EGME and BET method. The SSA tests in this paper possess great reference significance for understanding of physical mechanism that influences the physical and mechanical properties in soft clay.

Key words: soft clay; EGME method; BET method; specific surface area

在我国沿海和河流的中下游及湖泊三角洲地区, 分布有极为广泛的软黏土, 其中最为典型的有淤泥和淤泥质土, 它们主要由极细粒径的黏土矿物和胶状物质组成, 颗粒直径多为微米级, 具有很大的比表面积^[1-3], 表面带电现象非常显著, 其颗粒的表面电位可达数十至数百 mV^[4], 在其电场作用下颗粒表面可形成较厚的结合水膜。吸附在土颗粒表面的结合水是粘滞性很强的类固体介质, 对自由水的流动产生很大阻力, 在土颗粒间变形时起到润滑的作用, 此外, 结合水和胶体等物质既可产生变形又可产生流动, 可统称为流变相物质^[5], 是软黏

土具有流变性的主要物质基础之一。因此, 软黏土的比表面积、表面电荷性质等微观特性与其力学性质、渗透性和流变性等宏观性质有着极为密切的关系, 可从微细观层面对软黏土的各种工程特性作出合理的解释, 比表面积的测试成为土体微细观分析和特性研究的重要内容。

从土矿物学角度而言, 软黏土中固相成分可分为黏土矿物、非黏土矿物以及有机物等。黏土矿物具有极小的颗粒尺度以及较大的比表面积, 以至于其相互间的物理-化学作用和土中水-电解液相间的相互作用可以达到很大; 而非黏土颗粒可以看作是惰性较大的物质, 它们之间的相互作用的本质属物理作用^[4]; 有机物通常以胶凝质的形式存在, 包裹着矿物颗粒, 或是将矿物颗粒胶结在一起。

国内外已有许多文献^[1,3-4,6-14]对包括土壤在内的多孔物质以及固体粉末的比表面积测试进行过报

道, 但对于软黏土的比表面积测试方面尚未有深入的研究。本文在试验的基础上, 对软黏土的比表面积测试结果进行初步探讨, 测试了膨润土、高岭土、石英、长石的以及其不同比例的混合土样、深圳土、科威特土的比表面积。试验结果表明, 对于同样颗粒尺度的土情况, 膨润土的比表面积远大于高岭土, 而石英的比表面积与长石相近; 深圳土的比表面积小于科威特土; 随着试样中膨润土百分比含量的增加, 试样的比表面积迅速增加; 膨润土的比表面积包括内外比表面积, 其中内比表面积主要指土颗粒内部孔结构的表面积, 外比表面积主要指土颗粒外部的表面积, 两者之和即为总比表面积, 膨润土的总比表面积适宜采用乙二醇乙醚吸附法(简称 EGME 法)^[15], 而外比表面积可采用氮吸附法(简称 BET 法)测得^[15], 高岭土几乎没有内比表面, 故两种方法的测试结果非常接近。文中利用各种单一成分的测试结果估算了混合试样的比表面积, 与混合试样的实测结果相近, 为预测天然土样的比表面积提供了一种思路。本文的测试结果对从微观层面上了解影响软黏土的渗流固结与流变性等的物理机制具有参考意义。

1 比表面积测试

比表面积室内测试所采用的测试方法主要有吸附法、计算法和浸润热法, 其中吸附法应用较多^[1]。吸附法可分为液体吸附法和气体吸附法, 前者主要包括甘油法、乙二醇法、乙二醇乙醚法、亚甲基蓝法和压汞法, 后者主要包括氮气法和水蒸气法等。现场快速测法有 CST 值测试法和岩屑介电常数估测法, 但其准确性不高。本文主要采用乙二醇乙醚(EGME)吸附法对膨润土、高岭土、石英、长石的以及其不同比例的混合土样、科威特土进行测试, 然后利用氮吸附(BET)法测试了膨润土、高岭土、石英及长石、深圳土的比表面积。

1.1 试样选择及其制备

对于软黏土的比表面积测试, 以往文献中多以特定的天然土为试验对象, 如泥页岩、壤土、潮棕壤、黄赤土和黄红壤等, 由于天然土的成分非常复杂, 其矿物成分的分析鉴定费用较高, 任何一种成分的影响都难以隔离, 矿物成分对试验结果的影响通常限于定性和半定量分析; 人工土试样可用单一成分或按设定比例的多种高纯度矿物的人工混合土

制备而成, 各种矿物成分明确且准确定量, 其比表面积和阳离子交换量等表面物理化学参数易于测定, 从而节省了大量的试验费用。作为软黏土比表面积的初步探讨, 本文先采用人工土试样进行比表面积测试, 然后与已知矿物成分的深圳土与科威特土进行对比分析, 利用各单一成分的比表面积分别估算了上述两种天然土的比表面积。

试验所用的人工土试样为高纯度超细粉末人工土, 由膨润土、高岭土、石英、长石和混合土制成, 其中混合土由上述四种成分按照一定的比例均匀混合而成, 各试样的组成成分及平均粒径见表 1。天然土试样包括深圳土与科威特土, 其矿物成分及比例见表 2。其中 EGME 法测试共采用 12 组试样, 每组含有 3 个相同的试样; BET 法测试共采用 5 组试样, 每组含有 1 个试样。在试验前各试样均在恒温干燥箱中以 106℃ 烘干 6 h 以上。

表 1 人工土试样的组成成分及平均粒径

Tab. 1 Ingredient and average particle size of artificial samples

试样编号	组成成分及比例	平均粒径/ μm
S_1	膨润土	2.5
S_2	高岭土	2.5
S_3	石英	1.6
S_4	长石	2.5
S_5	66.7% 高岭土 + 33.3% 膨润土	2.5
S_6	50% 高岭土 + 50% 膨润土	2.5
S_7	33.3% 高岭土 + 66.7% 膨润土	2.5
S_8	20% 高岭土 + 80% 膨润土	2.5
S_9	20% 膨润土 + 53.3% 石英 + 26.7% 长石	1.6 ~ 2.5
S_{10}	40% 膨润土 + 40% 石英 + 20% 长石	1.6 ~ 2.5
S_{11}	60% 膨润土 + 26.7% 石英 + 13.3% 长石	1.6 ~ 2.5

注: $S_1 \sim S_4$ 试样采用 EGME 法和 BET 法进行对比测试; 其余仅采用 EGME 法进行测试。

表 2 天然土试样的组成成分及比例

Tab. 2 Ingredient and proportion of natural samples

试样编号	土样名称	组成成分及比例									
		蒙脱石	伊利石	高岭石	石英	钾长石	钠长石	石盐	方解石	透辉石	白云石
S_{12}	深圳土	14.5	26.0	29.2	20.3	4.6	3.4	2.0	—	—	—
S_{13}	科威特土	18.4	11.8	5.2	8.9	6.1	9.0	4.7	21.2	8.8	6.0

注: S_{12} 试样采用 BET 法进行测试, S_{13} 试样采用 EGME 法进行测试。

1.2 EGME 法测试

1.2.1 EGME 法原理及仪器设备

乙二醇醚吸附法的原理是使极性有机分子(如甘油、乙二醇、乙二醇醚和乙二酸二溴化物等)成单分子层吸附在黏土颗粒表面上,然后根据吸附的有机分子的重量和大小计算比表面。

本实验所采用的试剂及主要仪器设备见表3,各仪器用优质胶管连接。连接完毕后的真空仪器装置如图1所示,试样分别放置在两个并联的真空干燥器中,可同时进行两组试样测试。测试前应仔细检查各部件的连接处是否密封完好,以免抽气后漏气,确保真空干燥器内的真空度。

表3 试验所用的试剂及仪器设备

Tab. 3 Reagents and instruments of the test

设备	名称	说明
试剂	乙二醇醚	分析纯级
	无水氯化钙	分析纯级
	五氧化二磷	分析纯级
主要仪器及设备	真空泵	抽气压减低至0.25 mm 汞柱,带真空表
	缓冲瓶	容积500 ml
	干燥塔	容积500 ml
	真空干燥器	瓷板直径为20~25 cm
	铝盒	直径不小于5.0 cm,高度不大于2 cm
	分析天平	精度等级0.1 mg
	小型干燥器	瓷板直径为13~15 cm
恒温室	温度控制在(25±2)℃以内	

后通过式(1)求出试样的比表面积 $S_s(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$ 。

$$S_s = \frac{W_2 - W_1}{2.86 \times 10^{-4} \times (W_2 - W_0)} \quad (1)$$

式中: W_0 为铝盒质量, g; W_1 为铝盒 + 干样质量, g; W_2 为铝盒 + 干样 + 吸附的 EGME 质量, g; 2.86×10^{-4} 为换算因数。

1.2.2 EGME 法测试结果

对表1、表2中的 $S_1 \sim S_{11}$ 、 S_{13} 试样采用 EGME 法进行比表面积测试,结果列于表4之中。

表4 EGME 法测试结果

Tab. 4 Test results by EGME method

试样编号	$S_s/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$		$\bar{S}_s/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	
S_1	453.4	457.0	457.1	455.8
S_2	18.8	15.7	18.0	17.5
S_3	6.6	6.4	6.8	6.6
S_4	3.5	4.0	4.2	3.9
S_5	187.2	185.9	182.2	185.1
S_6	291.2	289.5	283.6	288.1
S_7	367.9	365.2	363.6	365.6
S_8	440.6	424.6	421.4	428.9
S_9	114.5	110.1	108.7	111.1
S_{10}	197.7	196.8	196.5	197.0
S_{11}	297.1	298.5	297.5	297.7
S_{13}	87.8	88.5	90.3	88.9

1.3 氮吸附(BET)法测试

1.3.1 BET 法原理及仪器设备

氮吸附(BET)法属于较常用的气体吸附法,目前已经列入国家标准和我国国家标准。其主要原理是:

样品置于气体体系中,其物质表面(指颗粒外部和内部通孔的表面积)在低温下将发生物理吸附,当吸附达到平衡时,测量平衡吸附压力和吸附的气体体积,根据 BET 方程式(2)采用图解法或线性回归法可求出试样单分子层吸附量,从而计算出试样的比表面积。

$$\frac{P/P_0}{V(1 - \frac{P}{P_0})} = \frac{C - 1}{V_m C} \times \frac{P}{P_0} + \frac{1}{V_m C} \quad (2)$$

式中: P 为氮气压力, Pa; P_0 为饱和蒸汽压, Pa; V 为平衡吸附体积, cm^3 ; C 为 BET 常数; V_m 为单分子层饱和吸附体积, cm^3 。

本实验采用北分仪器技术公司生产的比表面积



图1 真空干燥仪器装置

Fig. 1 Vacuum drying instruments

EGME 法的简要步骤如下:先对试样进行反复脱气干燥至恒重,然后滴加约 3 mL 吸附质 EGME,并使试样在真空干燥器中蒸发过量的 EGME 而保留单分子层 EGME,测出吸附稳定后土样的质量,最

测试仪, 见图 2。测试前先对试样进行真空脱气处理, 以去除试样表面物理吸附的物质, 待气体压力和组成、试样质量达到稳定后冷却至测量温度开始测试。一般情况下, BET 方程中的 C 值较大, 尤其是采用氮气作为吸附气体, 采用单点法测量可大大提高效率, 测试结果相对于多点法的误差通常不大于 5%。实验时相对压力 P/P_0 可在 0.2 ~ 0.3 范围内取值, 只测出一点即可求出单层吸附体积 V_m , 再利用式(3)求出试样的比表面积 S_w , m^2/g 。

$$S_w = \frac{4.35V_m}{m} \quad (3)$$

式中: m 为试样质量, g。

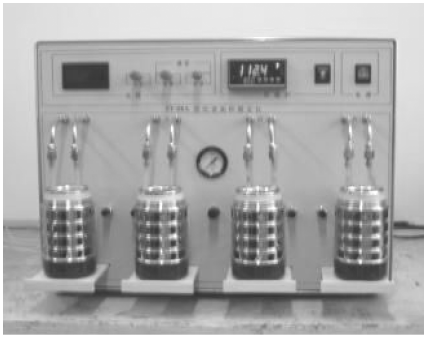


图 2 ST-08 A 型比表面积测定仪

Fig. 2 Specific surface area determinator of type ST-08 A

1.3.2 BET 法测试结果

对表 1、2 中的 $S_1 \sim S_4^{[5]}$ 、 S_{12} 试样采用 BET 法进行比表面积测试, 结果列于表 5 之中。

表 5 BET 法测试结果

Tab. 5 Test results by BET method

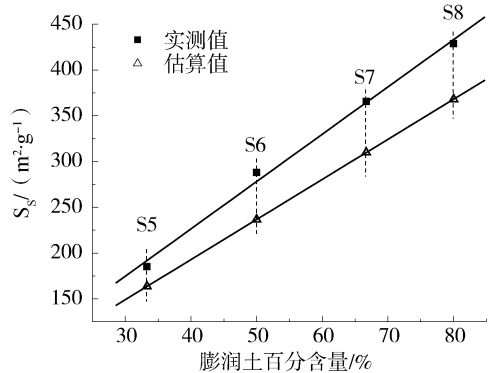
试样编号	V_m/m^3	m/g	$S_w/(m^2 \cdot g^{-1})$
S_1	0.601 8	0.065 8	39.8
S_2	0.181 1	0.045 2	17.4
S_3	0.056 0	0.269 5	0.9
S_4	0.044 5	0.124 1	1.6
S_{12}	—	—	25.3

2 测试结果分析

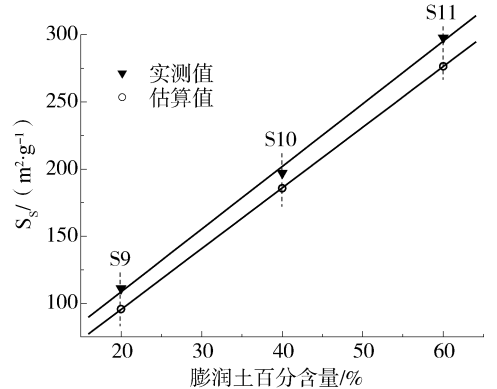
2.1 矿物成分对比表面积的影响

软黏土的比表面积与其组成成分有关, 而不同矿物成分的比表面积有时相差较大, 因此矿物成分是影响软黏土比表面积的主要因素。图 3(a) ~ (b) 分别为试样 $S_5 \sim S_8$ 、 $S_9 \sim S_{11}$ 的比表面积与膨润土相

对含量的关系曲线, 土中实心点表示各试样的实测值, 空心点为根据各单一矿物成分的实测值按成分比例叠加而成的估算值。从图 3 来看, 矿物成分对软黏土的比表面积有显著影响。随着膨润土相对含量的增大, 试样的比表面积呈线性递增趋势。图 3(a) 中当膨润土相对含量从 33.3% 依次增加到 50%、66.7%、80% 时, 试样的实测比表面积依次增大了 1.6 倍、2.0 倍和 2.3 倍; 图 3(b) 中当膨润土相对含量从 20% 依次增加到 40%、60% 时, 试样的实测比表面积依次增大了 1.8 倍和 2.7 倍。图中各试样比表面积的实测值均稍大于估算值, 两者之间相差 5.7% ~ 17.9% 以内。可见膨润土的相对含量对试样比表面积的影响较大, 而且试样的比表面积可以近似用各单一成分的比表面积按混合比例叠加来表示。



(a) 组成成分: 膨润土 + 高岭土



(b) 组成成分: 膨润土 + 石英 + 长石

图 3 比表面积与膨润土百分含量的关系曲线

Fig. 3 Relationships of specific surface area and relative content of bentonite

表 6 列出了深圳土与科威特土的实测结果与根据各主要成分的比表面积估算的结果, 两者非常接近。因此, 在不考虑土样中各成分之间相互作用的

前提下,其总(外)比表面积近似等于各成分的总(外)比表面积之和。

2.2 比表面积测试方法的适用性

EGME法与BET法都是常用的比表面积测试方法,但从表4和表5来看,软黏土的比表面积测试结果受测试方法的影响极大,其中膨润土的测试结果相差可达11倍以上,石英与长石分别相差7.3倍和2.4倍,而高岭土则非常接近。

表6 天然土比表面积的实测值与估算值比较

Tab. 6 Comparison of measured and estimated value of natural soil specific surface area

试样编号	测试方法	比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	
		实测值	估算值
S_{12}	BET	25.3	28.0
S_{13}	EGME	88.9	93.3

通常用BET法适用于黏土矿物的外表面积的测定。在脱气样品制备阶段,低温真空条件会引起黏土矿物晶层间失水,层间收缩,从而阻止氮气进入内晶层表面,结果氮气仅仅吸附在外表面。所以用BET法测得的表面积只能代表外表面积。膨胀性黏土矿物如蒙脱石在极性分子如乙二醇乙醚、甘油等溶液中干燥时,其内层与外层都能够吸附极性分子。当极性分子吸附在蒙脱石内层时,由X射线衍射分析测得的内层间距不变,而当蒙脱石在逸去过量的极性分子后,层间能够在较长时间内保持吸附单层极性分子。通过测量吸附极性分子的数量并利用换算因数进行计算,即可得出样品的总比表面积。因此,EGME法适用于一般黏土矿物的比表面积测定^[15]。对于几乎不具有内表面的高岭土,两种方法的测试结果相当接近,可任选其一。

非黏土矿物如石英、长石,前者的主要成分是 SiO_2 ,晶体属于三方偏方面体晶类,常发育成完好的柱状晶体,后者的主要成分有 SiO_2 、 Al_2O_3 与 K_2O 等,常发育为平行 a 轴、 b 轴或 c 轴的柱状或厚板状晶体^[16]。由于不具有层状结构,石英与长石的比表面积一般较小,通常采用BET法测定其比表面积比较可靠;EGME法的测试结果往往受阳离子的影响^[3],对于比表面积较小的石英、长石而言,其误差可能较大。

3 结论

通过对不同矿物成分及含量的软黏土试样进行

比表面积测试和相应的分析,得出以下主要结论:

1)黏土矿物由于具有层状结构,其比表面积远大于非黏土矿物,其中膨润土的比表面积大于高岭土,石英与长石的比表面积相近。

2)矿物成分及含量对软黏土的比表面积的影响相当明显。随着膨润土相对含量的增大,试样的比表面积迅速提高。

3)不考虑天然土中各种成分之间的相互作用,天然土的总(外)比表面积可近似用其主要成分的总(外)比表面积的总和表示。

4)EGME法适用于黏土矿物总比表面积的测试,而BET法适用于黏土矿物外比表面积以及非黏土矿物比表面积的测试。对于几乎不具有内比表面高岭土而言,两种测试方法均适用。

参考文献:

- [1] 邱正松,丁锐,于连香. 泥页岩比表面积测定方法研究[J]. 钻井液与完井液, 1999, 16(1): 9-11.
QIU Z S, DING R, YU L X. The determining method researching of specific surface area for mud shale [J]. Drilling Fluid and Completion Fluid, 1999, 16(1): 9-11.
- [2] 杨亚提,张一平,张兴福. 恒电荷土壤胶体表面的电荷特征[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2002, 30(1): 47-51.
YANG Y T, ZHANG Y P, ZHANG X F. Charge characteristics of constant charge soil colloids [J]. Jour. of Northwest Sci-Tech Univ. of Agri. and For. (Nat. Sci. Ed.), 2002, 30(1): 47-51.
- [3] 梁大川. 粘土和泥页岩比表面积测定和计算方法综述[J]. 钻井液与完井液, 1995, 12(5): 11-15.
LIANG D C. Review on the determination and calculation methods of specific surface area of clay and shale [J]. Drilling Fluid and Completion Fluid, 1995, 12(5): 11-15.
- [4] MITCHELL J K. Fundamentals of soil behavior [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1976.
- [5] 谷任国. 软土流变的成分影响和渗流的离子效应研究[D]. 广州: 华南理工大学建筑学院, 2006.
- [6] 胡小芳,胡大为,吴成宝. 土壤透气性及粘土颗粒比表面积与粘土颗粒粒度分布分形维数关系[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 215-219.
HU X F, HU D W, WU C B. Correlation of soil air permeability and specific area with clay particle size distribution fractal value [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(2): 215-219.
- [7] 孟昭福,张一平,郭仲义. 有机修饰壤土表面特性的研究: I. CEC和比表面[J]. 土壤学报, 2008, 45(2): 370-374.
MENG Z F, ZHANG Y P, GUO Z Y [J]. Surface characteristics of organic modified soil I. CEC and specific surface area. acta pedologica sinica, 2008, 45(2): 370-374.

(下转第112页 Continued on Page 112)

表2 几何质量评价

Tab. 2 Geometric quality evaluation

序号	d_1/m	d_2/m	$\Delta d/m$	序号	d_1/m	d_2/m	$\Delta d/m$
1	4.778	4.789	-0.011	10	0.954	0.961	-0.007
2	2.641	2.632	0.009	11	1.093	1.084	0.009
3	2.347	2.336	0.011	12	1.105	1.095	0.010
4	2.312	2.317	-0.005	13	1.357	1.351	0.006
5	1.625	1.634	-0.009	14	1.642	1.647	-0.005
6	1.579	1.572	0.007	15	1.724	1.731	-0.007
7	1.283	1.293	-0.010	16	0.389	0.384	0.005
8	0.701	0.693	0.008	17	0.489	0.479	0.010
9	1.271	1.289	-0.018	18	0.386	0.403	-0.017

4 结论

使用地面激光雷达和无人机技术制作大型古塔立面正射影像图是一种非接触测量的手段,不会对文物造成损伤。通过点云模型纠正了照片中心投影所引起的变形,精度满足工程要求;同时利用无人机立面拍摄系统采集古塔立面纹理,有效克服了脚手架遮挡等问题,不仅大大减少了数据内业处理的时间,而且最大程度保证了古塔纹理的真实性。在此基础上,古建筑设计和保护人员可以精确对窗户、斗拱等构件进行测量,借助CAD绘图软件便

可制作出用于施工的CAD数据图及塔体病害分布图。因此本研究结果对大型古塔数字化测绘有重要的参考价值,具有一定的现实意义和应用价值。

经过实践,下一步需要研究的问题是:脚手架遮挡产生的大量点云噪声自动去除算法、建立大型古塔三维模型变形监测的研究理论以及监测数据与模型精度的评价体系。

参考文献:

- [1] 卢小平,王玉鹏,卢遥,等. 齐云塔激光点云三维重建[J]. 测绘通报, 2011(9): 11-14.
- [2] 张序,李兆堃,李兆堃,等. 苏州虎丘塔三维数字化表达研究与应用[J]. 测绘通报, 2012(12): 51-53.
- [3] 张荣,李贞娥,徐世超. 安岳石窟经目塔5.12汶川大地震后抢救性修缮—兼论三维激光扫描、计算机模拟技术在文物保护中的运用[J]. 文物保护与考古科学, 2010, 22(2): 40-47.
- [4] 王晏民, 豁辉, 王国利, 等. 地面激光雷达技术在白居易吉祥多门塔变形分析中的应用[J]. 北京建筑工程学院学报, 2011, 27(4): 11-15.
- [5] 陈秀忠, 王晏民. 太和殿3维激光扫描精密控制网建立研究[J]. 测绘通报, 2006(10): 49-50, 61.
- [6] 王力. 基于人工标志的激光扫描数据自动拼接技术研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2010.
- [7] 周俊召, 薛天纵, 李秋英, 等. 基于罗德里格矩阵的点云与影像配准方法研究[J]. 工程勘察, 2011, 39(8): 76-79.

(责任编辑 郑文棠)

(上接第106页 Continued from Page 106)

- [8] 詹义正, 陈立, 王明甫, 等. 泥沙比表面积的测定[J]. 武汉水利电力大学学报, 1996, 29(5): 6-9.
ZHAN Y Z, CHEN L, WANG M F, et al. Determination of specific surface area of sediment [J]. Wuhan Univ of Hydr. & Elec. Eng., 1996, 29(5): 6-9.
- [9] 邵旭平, 陶精言, 张慧中, 等. 吸附法测定 U_3O_8 粉末比表面积[J]. 原子能科学技术, 2004, 38(4): 366-369.
SHAO X P, TAO J Y, ZHANG H Z, et al. Specific surface area measurement of U_3O_8 powder by absorptiom [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2004, 38(4): 366-369.
- [10] 田英姿, 陈克复. 用压汞法和氮吸附法测定孔径分布及比表面积[J]. 中国造纸, 2004, 23(4): 21-23.
TIAN Y Z, CHEN K F. Determination of pore size distribution and surface area of several materials using mercury porosimetry and gas adsorption [J]. China Pulp & Paper, 2004, 23(4): 21-23.
- [11] 魏智强, 乔宏霞, 温贤伦, 等. 镍纳米粉的比表面积测试研究[J]. 甘肃工业大学学报, 2003, 29(3): 146-148.
WEI Z Q, QIAO H X, WEN X L, et al. Investigation of measurement of specific surface area of ni nanopowder [J]. Journal of Gansu University of Technology, 2003, 29(3):

146-148.

- [12] 王虎, 张萍. 非金属矿物比表面积及孔隙度测试方法研究[J]. 矿产保护与利用, 2001(4): 18-23.
WANG H, ZHANG P. Study of measurement methods for specific surface area and pore volume of non-metallic minerals [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2001(4): 18-23.
- [13] 张茂林, 徐伟昌. 气体吸附法测定坡缕石的比表面积[J]. 江西地质, 2000, 14(1): 62-65.
ZHANG M L, XU W C. Determination of specific surface area of palygorskite by gas adsorptive method [J]. Jiangxi Geology, 2000, 14(1): 62-65.
- [14] 王兴业. 硅溶胶中二氧化硅粒径及比表面积测定[J]. 材料工程, 1997(5): 34-36.
WANG X Y. Measurement on the diameter and the specific surface area of silica particles in a silica gel [J]. Journal of Materials Engineering, 1997(5): 34-36.
- [15] 赵杏媛, 张有瑜. 粘土矿物与粘土矿物分析[M]. 北京: 海洋出版社, 1990.
- [16] 潘兆麟, 万朴. 应用矿物学[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1993.

(责任编辑 郑文棠)