

深圳海积软土的矿物成分及结合水特征*

宋晶^{1,2}, 方敬锐¹, 巩文腾¹, 唐群艳³

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 珠海 519082
2. 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室 / 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室 / 广东省深地探测与地质工程技术研究中心, 广东 珠海 519082
3. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230

摘要: 为探究深圳海积软土施工后地基沉降大、工程性质较差的原因, 本文基于海积软土的基本物理力学性质, 从微观角度入手, 通过 X 射线衍射试验和同步热分析试验, 定量分析海积软土的矿物成分及结合水特征。X 射线衍射试验结果显示, 深圳海积软土中矿物含量较多, 约占 22%, 以蒙脱石为主要成分。同步热分析试验结果显示原状土结合水含量约占 3%, 细粒土样结合水含量约占 3.5% 且完全脱去结合水所需温度更高。结果说明黏土矿物含量高的软土往往具有含量更高的结合水, 这也导致其工程性质较差。

关键词: 黏土矿物; X 射线衍射; 微观结构; 同步热分析

中图分类号: TU411 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2023)01-0057-07

The material composition and binding water characteristics of marine soft soils in Shenzhen

SONG Jing^{1,2}, FANG Jingrui¹, GONG Wenteng¹, TANG Qunyan³

1. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China
2. Guangdong Province Key Laboratory of Geodynamics and Geological Hazards / Guangdong Province Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources / Guangdong Province Deep Earth Exploration and Geological Engineering Technology Research Center, Zhuhai 519082, China
3. CCCC Fourth Navigation Engineering Survey and Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China

Abstract: Marine soft soils in the Shenzhen area show large foundation settlement and poor engineering properties after construction. To investigate the mechanism, we quantitatively analyzed the mineral composition and bound water characteristics by using X-ray diffraction and thermogravimetric tests. The results show that the bound water content of the as-built clay is about 3%, while the bound water content of the fine-grained clay sample is about 3.5%; The temperature required to completely remove the bound water is higher when the bound water content is higher. It indicates that soft soils with high clay mineral content tend to have high bound water content, which also leads to poor engineering properties.

Key words: clay minerals; XRD; microstructure; thermal analysis

* 收稿日期: 2021-06-22 录用日期: 2021-07-16 网络首发日期: 2022-09-20
基金项目: 国家自然科学基金(41877228, 41402239); 广州市科技计划项目(201904010136)
作者简介: 宋晶(1982年生), 女; 研究方向: 软土工程及微观结构; E-mail: songj5@mail.sysu.edu.cn

沿海地区土地稀缺,越来越多的构筑物建设在填海造陆地基上,需要进行大量的软基处理。作为主要填海材料的海积软土,其强度、变形和稳定性直接决定该人工地基的适宜性^[1]。未经地基处理的海积软土,初始含水率大($w=47.9\% \sim 127.8\%$)、抗剪强度低($\varphi=0 \sim 8.3^\circ$, $c=1.0 \sim 48.0 \text{ kPa}$)、压缩性高($\alpha=0.44 \sim 4.31 \text{ MPa}^{-1}$)、地基承载力小($En=0.83 \sim 4.41 \text{ MPa}$),处于流塑状态,整体工程性质较差,需进行地基处理以提高强度和抗变形能力。

深圳海积软土不仅力学性质特殊,其物质组成和结构也较为复杂,目前缺乏全面的统计分析结果。从矿物组成角度分析,深圳海积软土中的次生矿物含量高(40%~60%)^[2],其中绝大多数次生矿物中是黏土矿物。黏土矿物广泛分布于土壤、沉积岩层、海洋沉积物和河流沉积物中,不同的黏土矿物组合类型往往反映了形成时的环境和介质条件。黏土矿物通常呈片状结构,比表面积大,可吸附水汽形成较厚的结合水膜,降低土体的抗剪强度与内摩擦角,增大黏聚力^[3],对软土地基工程性质有较大影响。因此,探究黏土矿物类型及各矿物相对含量具有一定的研究价值^[4]。

目前研究软土中黏土矿物成分的方法主要是X射线衍射分析法(XRD)。在提高XRD定量测试准确性方面,前人做了大量工作。伍月等^[5]为了消除层状硅酸盐矿物择优取向对检测结果的影响,完善了X射线粉晶衍射基体清洗法在矿物定量分析中的应用。张照鹏等^[6]通过对黄海的岩芯短柱开展XRD测试,对比了峰高与峰面积法统计量表示黏土矿物相对含量这两种方法,为本文分析黏土矿物含量提供了参考。目前国际上新兴一种黏土矿物定量方法——矿物强度因子(MIF, mineral intensity factor)法,周翔等^[7]利用该法对选取自不同产地的纯相黏土矿物进行研究,进一步完善了伊利石和蒙脱石的MIF。2017年,林伟伟等^[8]利用XRD对沉积物中常见的矿物组合进行了研究,对比了面积积分法与强度参比法的优缺点,为沉积物矿物相分析提供了可靠依据。针对蒙脱石、伊利石、高岭石3种常见黏土矿物,王琦等^[9]建立了黏土矿物含量与衍射特征峰面积的定量关系、黏土矿物-石英含量比值与特征峰面积的定量关系,通过这两种定量方法及软件分析结果,提高了黏土矿物定量分析的准确性。本文XRD试验采用峰强度对比法(K值法),综合前人经验,寻求关于矿物晶面反射的积分强度与其相对含量之间的对应

关系,从而求出混合物中各组分的相对含量^[10]。

同步热分析法在结合水类型及含量的测定上有广泛应用。同步热分析试验是在程序控制温度下,测量物质的物理、化学性质与温度的关系的一类技术,可以提供热失重曲线(TG曲线)和微商热重曲线(DTG曲线)。在目前热分析可以到达的温度内,任何两种物质的所有物理、化学性质是不会完全相同的,TG与DTG曲线甚至可以作为物质的“指纹图”。早在20世纪70年代,文献[11-13]曾利用热分析法对黏土中的结合水进行了深入研究,包括温度对黏土固结的影响作用及不同荷载下黏土的结合水状态。2013年,谢刚等^[14]通过试验证明热分析中的DTG曲线可以清楚地看到自由水和弱结合水的温度拐点,并对黏土中结合水类型及含量进行了定量分析。2018年,邓明毅等^[15]研究了不同吸附水类型及含量对岩石力学参数的影响并建立了相关的力学模型。2019年,LI等^[16]采用等温吸附、热重分析和比重测试等方法,认为黏土矿物与结合水膜的物理特性直接受到吸附水含量的影响。2020年,朱赞成等^[17]通过对多种类型的黏土进行微商热重分析和热重分析,认为在测量蒙脱石含量较高的土样的含水率时,应将烘箱温度提高到150℃。2021年,莫燕坤等^[18]介绍了容量瓶法、等温吸附法、热分析法、定性分析法这几种方法的优缺点、适用性及影响因素,认为等温吸附法和热分析法获取的结果相对准确。由此可见热分析法在结合水方面的应用较为普遍,本身还具备操作简单、试验速度快、试验结果准确等优势。

海积软土中含有大量的黏土矿物,尤其是极易水化的蒙脱石,在排水固结过程中容易再次水化,使得地基出现失稳。研究发现结合水是决定土体变形性质强弱的内在因素,结合水含量直接影响到颗粒之间的相互接触、咬合和滑动摩擦的状态和性质,从而影响土体变形时颗粒之间的滑移、转动等运动和变形状态^[19]。土体中黏土颗粒表面的强结合水到弱结合水的形成过程,往往会使得土体性质从脆性固体转变为塑性体和黏滞流动介质。除此之外,黏土的强度特性实质上是各种矿物成分颗粒之间的摩擦和胶结黏聚作用的综合体现。以胶结作用为主的矿物颗粒,具有较高的黏聚力、较低的抗剪强度和内摩擦角。而水分是胶结和吸附作用形成黏聚力的重要媒介,其中强结合水是维持土体抗剪强度的重要因素,弱结

合水则是削弱土体强度的根本原因^[20]。针对弱结合水削弱软土地基强度这一问题,娄云雷等^[21]在通过真空预压-电渗法的基础上,加入少量盐溶液,取得良好的实验效果。结合水膜的厚度对黏土的渗透性、吸附性、渗透性、膨胀性与导电性等物理性质及强度变形性质有较大影响,崔德山等^[22]推导了结合水膜厚度计算公式,认为用塑性指数的变化来表征结合水膜厚度变化是可行的。基于结合水对软土性质影响较大这一事实,对海积软土中矿物和结合水的研究颇具意义。本研究从微观角度出发,利用X射线衍射试验与同步热分析试验,探究海积软土的矿物组成和结合水特征。

1 样品制备及试验方法

1.1 样品的制备

样品是取自深圳大鹏新区滨海处的海积软土,含水率76.3%、密度1.6 g/cm³、孔隙比1.71,具有含水率高、压缩性高、孔隙比高、承载力低、抗剪强度低、渗透系数低、结构性强等特点,工程性质较差。

将采集到的5 kg海积软土置于干燥处自然风干,弃去贝壳类等碎屑物。烘干结束后,研磨样品,每组样品称量20 g。本次XRD试验设置了3组样品,每组样设置3个平行样。

第1组样品是经过自然烘干后碾碎的原状土样,记为A1、A2、A3。第2组样品为筛分后粒径<0.075 mm的细粒土样,记为B1、B2、B3;第3组样品为从海积软土中提取出来的黏土矿物样,记为C1、C2、C3。第3组样品经物理、化学处理获得。先利用盐酸去除碳酸盐类物质,后用30% H₂O₂溶液去除有机质,从而保证了黏土矿物的纯度。黏土多半不能充分分散,需选择合适的分散剂。试验选用的是分散剂是六偏磷酸钠(Na₆P₆O₂₁)。在试管中加入20~25 mL蒸馏水,倒入10 g的Na₆P₆O₂₁粉末,充分搅拌,并放入超声波振荡机中振荡2~3 min,震荡后将试管静置1 h。

离心分离后的黏土经浓度调整,按照斯托克斯沉淀规律,用吸管取约2 mL悬浮液展布在玻片上。让玻片自然干燥形成自然定向片。自然定向片在乙二醇饱和蒸气中饱和后(40 °C, 7 h),形成EG膨胀片。之后将自然定向片放置在温度550 °C的条件下3 h,得到高温片。制作高温片是为了区别高岭石和绿泥石,在高温下高岭石基本被破坏而绿泥石的峰值得到加强。

1.2 试验方法

XRD试验使用的仪器是X射线粉末衍射仪(Empyrean)。试验条件:在铜靶X射线管的条件下进行,管电压40 kV,管电流40 mA。扫描是连续的,2 θ 角范围为10°~60°,扫描步长0.026 260 6。TG试验使用的仪器是同步热分析-红外联用仪(STA449F3/Nicolet 6700)。试验条件:升温范围为23~900 °C,升温速率为25 °C/min,气流速率为20 mL/min。两组试验均于中山大学测试中心完成。

2 结果及分析

2.1 XRD试验结果及分析

分析X射线衍射试验数据采用软件Jade6.5,先对衍射图谱进行平滑、去除背景、寻峰处理,得到每个峰的峰值,后通过与标准矿物PDF卡片进行对比,判定其中的矿物类型,并将所得矿物标定在相对应的峰上,分析结果如图1所示。

对于黏土矿物样,由于已除去碳酸盐和有机质,故其分析只针对黏土矿物。乙二醇饱和片是为了区分蒙脱石与绿泥石,550 °C加热片则是为了区分绿泥石、高岭石以及其他1.4 nm矿物。对比自然定向片、乙二醇饱和片和550 °C加热片,发现乙二醇饱和片的1.8 nm处出现明显的蒙脱石特征峰,原因是有机溶液甘油更易进入蒙脱石层间,这一现象说明样品中含有蒙脱石。试验中发现高岭石用甘油及用酸处理后层间结构不受影响,但550 °C加热片中的高岭石特征峰降低。原因是高岭石属于1:1型层状结构硅酸盐黏土矿物,晶体结构中无阳离子的类质同相取代,层间无电荷,遇水、甘油均不发生膨胀。但高岭石在高温下脱水形成烧高岭,这便导致550 °C加热片中的高岭石特征峰降低。样品中的绿泥石特征峰经过甘油处理后无明显变化,但经过550 °C加热后,原来的1.42 nm衍射峰后移至1.36 nm,而其他特征峰强度均大大减弱。伊利石属于2:1型层状结构铝硅酸盐矿物,也会发生同晶置换现象。乙二醇饱和片和550 °C加热片均显示伊利石特征峰没有太大变化。

整理数据后得表1,该海积软土主要含有原生矿物是石英、白云母和长石,次生黏土矿物则主要有高岭石、蒙脱石、伊利石和绿泥石。原生矿物石英的含量较高,占比近50%,其次是白云母。而黏土矿物中,蒙脱石含量约15%,其次含有少量伊利石和绿泥石。黏土矿物对海积软土中的结合水及土的结构均有一定影响。

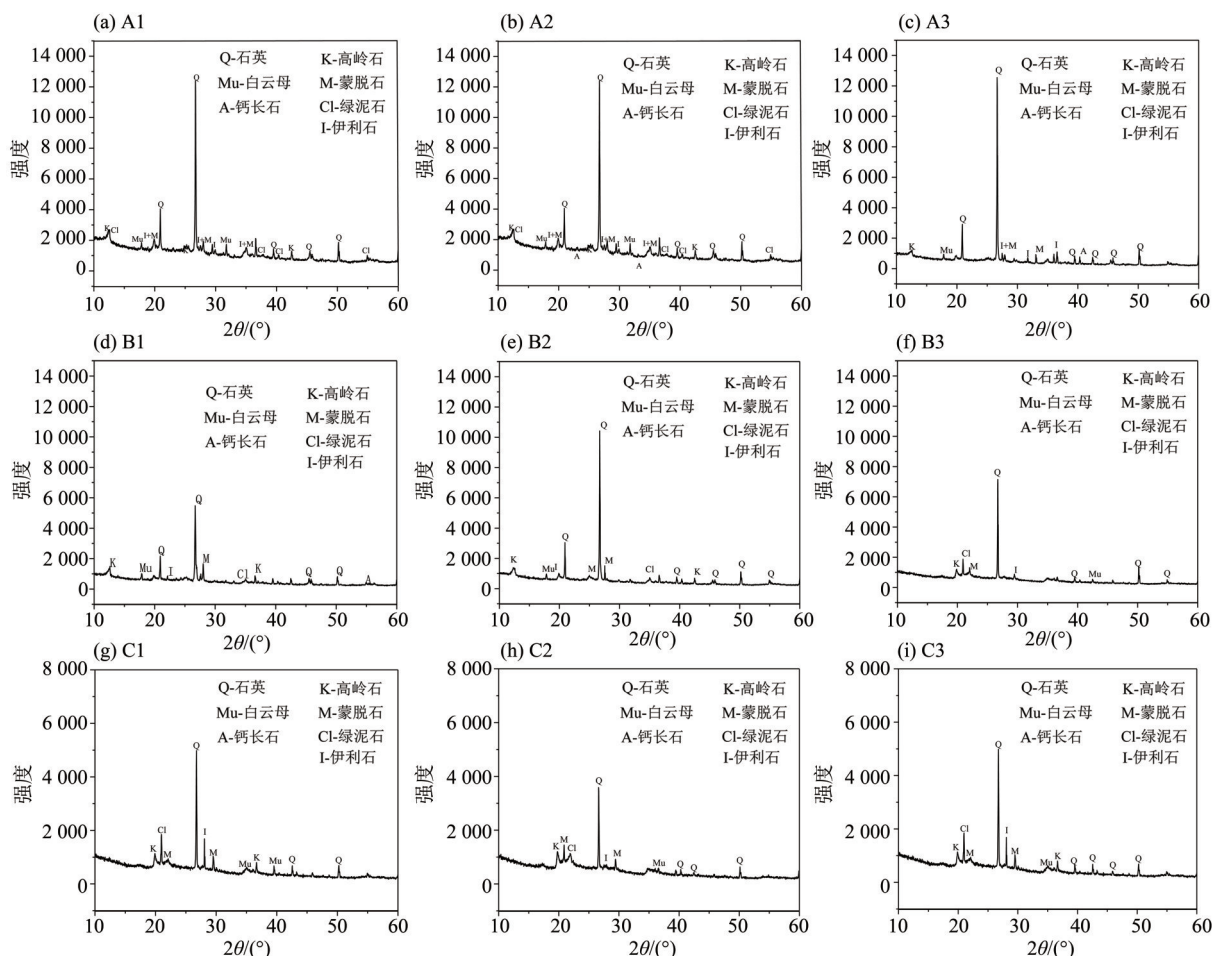


图 1 XRD 数据分析结果

Fig. 1 Results of XRD data analysis

表 1 土样的矿物组成

Table 1 Statistics of mineral contents in soil samples w/%				
矿物类型	矿物成分	原状土样	细粒土样	黏土矿物样
原生矿物	石英	67.83	41.12	12.84
	白云母	7.35	6.34	-
	长石	2.31	2.89	-
黏土矿物	蒙脱石	10.02	19.08	24.65
	绿泥石	6.77	12.04	23.78
	伊利石	3.18	14.67	20.13
	高岭石	2.53	3.86	18.6

同时, 由于比表面积与土颗粒的表面活性、界面特性密切相关, 当黏土颗粒的粒径达到微米级时, 随着比表面积的增大, 颗粒表面能与表面活性增高, 表面与界面性质发生很大的改变, 对结合水的吸附能力也有很大提高。因此, 不同矿物成分颗粒由于比表面积相差较大, 颗粒的表面能与表面活性就不一样, 因此吸附结合水含量不同。由于蒙脱石比表面积大, 伊利石、高岭石次

之, 石英和长石最低, 加之所带电荷量差异, 颗粒的吸附结合水量按照从高到低排序为蒙脱石>伊利石>高岭石>石英>长石。当海积软土中蒙脱石、高岭石等黏土矿物含量高时, 由于黏土矿物吸附结合水能力强, 且黏土矿物颗粒细小, 黏滞的结合水易吸附细小颗粒, 对孔隙造成堵塞, 土中水不易渗流。因此, 海积软土的渗透性差, 工程上用真空预压法排水时, 效果不明显^[23]。

这样的矿物组合在一定程度上会影响海积软土的变形和强度, 结合土体的微观结构和物理化学特征, 可以反映沿海地区海积软土的固结排水模式, 揭示海积软土的次固结机制, 为软基处理工程提供全新的变形强度的时间效应计算方法。为了进一步研究黏土矿物成分对结合水的影响, 对原状土、细粒土、黏土矿物进行同步热分析试验, 探究不同矿物含量条件下结合水在海积软土中的赋存情况。

2.2 TG 结果及讨论

将上述 3 组土样(原状土、细粒土、黏土矿物)

放入恒温干燥箱, 设置 105°C 烘干 24 h, 取出后立即将土样装入密封袋内密封, 再利用同步热分析仪进行试验, 试验测试温度范围为 23~900°C。

图 2(a) 是原状土样的热失重 TG 曲线及相对应的 DTG 曲线。其中有 2 个热失重温度变化范围即 23~153 °C、418~582 °C。考虑到该土样在 105 °C 被烘干, 土样中的自由水含量可忽略不计。根据温度对水分子间相互作用力(包括水分子结构)及水分子与其共存物质间相互作用力的影响程度分析, 23~105 °C 脱去的是液态自由水, 105~153 °C 区间先脱去的是与黏土矿物相互作用最弱的结合水, 其次脱去的是与黏土矿物相互作用力较弱但有一定结合力的强结合水。第二个热失重范围为 418~582 °C, 此范围主要是蒙脱石中的结构水逸出, 伴随少量伊利石的结构水逸出。

图 2(b) 是细粒土样, 其变化失重变化趋势与

原状土样有较大差别。细粒土样第一阶段的失重温度在 23~189 °C, 该阶段失重的结束温度(189 °C)明显高于原状土样。原因主要是细粒土样的黏土矿物含量更高, 其结合水更不易脱去。细粒土样第 2 阶段失重范围是 422~627 °C, 相比原状土样第 2 阶段的失重结束温度明显延后。此时主要是蒙脱石等黏土矿物所包含的结构水脱出。

以上现象可由图 3 得到解释。蒙脱石的结构属于 2:1 型层状结构的硅酸盐矿物, 层间具有一定的不饱和电荷, 可吸附外来阳离子补偿中和, 且层与层间主要靠吸附的可交换离子来结合, 故晶体活动性大, 层间能吸附水分子或有机溶液, 并导致整个晶格膨胀。X 射线衍射试验中蒙脱石在高温片中的衍射峰变化也说明了这一点。随着温度的升高, 蒙脱石晶体结构中的层间结合水逐渐消散, 蒙脱石的层间间距减小。

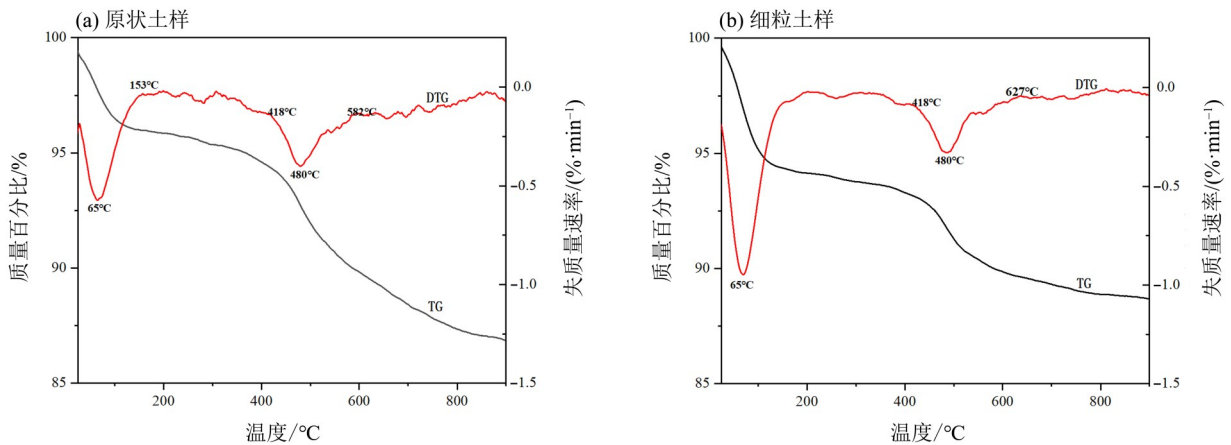


图 2 原状土样与细粒土样的 TG 和 DTG 曲线
Fig. 2 TG and DTG curves of undisturbed soil

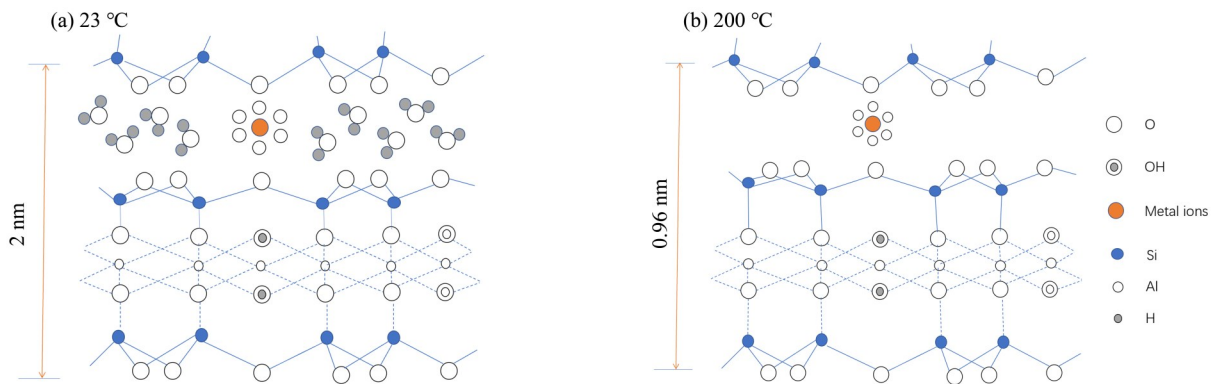


图 3 不同温度下蒙脱石矿物晶体结构变化
Fig. 3 Schematic diagram of the structure of montmorillonite at different temperatures

表 2 为两种土样热分析试验结果。随着温度升高, 原状土样从 23~153 °C 自由水、弱结合水和强

结合水先后逐渐蒸发, 自由水与结合水含量约占土体固体颗粒总量 5%, 105~153 °C 之间脱去的结

表2 原样土和细粒土样热分析结果
Table 2 Results of thermal analysis of two types of soil samples

特征点	原状土样			细粒土样		
	温度/°C	失重速率/(%·min ⁻¹)	剩余质量/%	温度/°C	失重速率/(%·min ⁻¹)	剩余质量/%
起始点	23	-	100	24	-	100.0
失重区间1	23~153	0.57	95.0	24~189	0.94	94.4
失重区间2	418~582	0.40	89.9	422~627	0.34	90.0
结束点	900	-	85.5	900	-	87.5

合水含量约占3%；细粒土样从23℃至189℃自由水、弱结合水和强结合水先后逐渐蒸发，结合水约占土体固体颗粒总量3.5%。原状土样与细粒土样中结合水分别在153和189℃才完全脱去，黏土矿物含量接近50%的细粒土与黏土矿物含量仅为22.5%的原状土相比，完全脱去结合水的温度显然更高，这在一定程度上说明对于黏土矿物含量较多的海积软土，升高温度对含水率影响较大。

分析结果可以定性判断黏土矿物颗粒中水分子主要存在4种形式吸附水，即自由水、弱结合水、强结合水和结构水。对比3组平行样品，可知该类海积软土的弱结合水的脱去区间约为105~153℃，结构水的脱去区间约为400~500℃。

为了进一步探究黏土矿物与结合水的结合机制，对从海积软土中提取出的黏土矿物粉末做热分析试验，同样得到其TG和DTG曲线。图4为黏土矿物在室温23~900℃区间内的热失重TG曲线及相对应的DTG曲线。相比前两种土样，黏土矿物样增加了1个热失重区间。这3个热失重区间分别是23~155、155~292和375~553℃，结合前面的分析可知23~155℃为自由水、弱结合水的失重阶段，155~292℃为强结合水的失重阶段，375~

553℃为结构水的失重阶段。通过对比这3类土样的热失重图，发现黏土矿物的弱结合水和强结合水完全失重时的温度(292℃)以及失去的质量明显高于原状土样和细粒土样。试验结果说明结合水主要赋存于黏土矿物中，且与黏土矿物的联结作用力更强。海积软土中蒙脱石等黏土矿物含量越高，其结合水越不容易脱去。

2.3 土-水的相互作用机理

土是固相、液相、气相三相组成的天然介质，在固相成分中，黏土和非黏土成分又占据主导地位，并且非黏土矿物成分更高，然而真正影响土性质的却是黏土矿物，黏土矿物成分对土的性质的影响远大于矿物本身相对含量的影响。

由于蒙脱石两结构单元之间没有氢键，相互间的联结能力弱，水分子易进入两晶胞间，故其亲水性最大、结合水的能力最强；伊利石晶格层组间具有结合水，亲水性低于蒙脱石；高岭石晶胞之间的距离不易改变，水分子不能进入，其亲水性最小。在酸性环境长期风化条件下，蒙脱石会慢慢变成高岭石，在富钾的碱性介质环境下，蒙脱石逐渐变成伊利石^[24]。

水-土相互作用的机理：①自由水，在温度范围为20~50℃的条件下即可全部蒸发。②弱结合水，是较弱静电引力和范德华力下的渗透结合水，其形成是在黏粒表面负电荷与电解质自由水溶液的离子之间建立溶度平衡的结果，性质接近液体。③强结合水，是氢键力和静电引力作用下的紧密吸附水，由于各种作用被牢固地结合在土粒表面，性质接近固体。④结构水，主要为层状硅酸盐矿物的基本构造单位Al-(O,OH)八面体中的OH，其脱出温度随构造不同而不同，一般在500℃以上脱出较多，在800℃左右基本脱出干净。自由水、弱结合水、强结合水和结构水特性上的差异，使得它们在升温的条件下，先后脱附黏土颗粒。

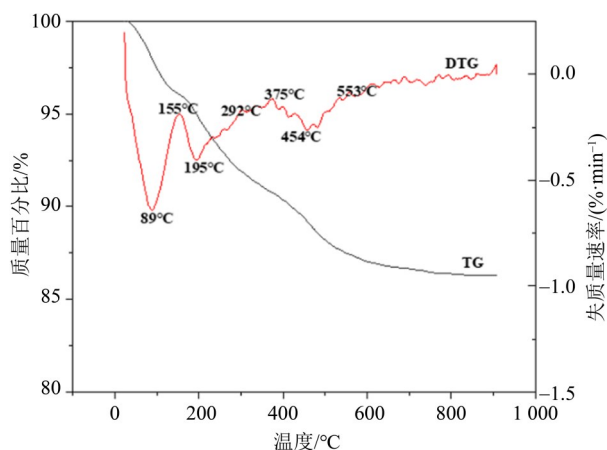


图4 C3的TG和DTG曲线

Fig. 4 TG and DTG curve of C3

3 结 论

1) 根据X射线衍射试验结果,该深圳海积软土地矿物成分中,原生矿物以石英为主,占60%~65%。次生矿物以蒙脱石和绿泥石为主,蒙脱石占9.1%~10.0%,绿泥石占6.7%~12.1%,较大地影响整个土体的性质,使得深圳海积软土的天然含水率大,结合水量多,真空预压法处理效果不明显。

2) 热失重法定性地论证了土中结合水的存在类型、界限及相对含量,即土中水为自由水、弱

结合水、强结合水和结构水。原状土样中弱、强结合水含量约占土体固体颗粒总量的3%,细粒土样中弱、强结合水含量约占土体固体颗粒总量的3.5%,说明结合水主要赋存于黏土矿物等细小颗粒。

3) 结合X射线衍射试验和同步热分析试验结果可知,黏土矿物含量接近50%的细粒土与黏土矿物含量仅为22.5%的原状土相比,完全脱去结合水的温度更高,这在一定程度上说明对于黏土矿物含量较多的海积软土,完全脱去结合水所需能量越高。

参考文献:

- [1] 王清,肖树芳.海积软土的工程地质研究现状[J].世界地质,2000,19(3):253-257.
- [2] 梁爱华,孙万禾,刘爱民,等.流泥的工程特性分析研究[J].中国港湾建设,2011(3):1-4.
- [3] 周晖.矿物成分对软土强度性质的影响分析[J].工业建筑,2013,43(7):61-64.
- [4] 乔淑卿,石学法,方习生,等.渤海-北黄海沉积物黏土矿物特征及其环境意义[J].海洋科学进展,2020,38(2):253-262.
- [5] 伍月,刘欣,张波,等.X射线粉晶衍射基体清洗法在矿物定量分析中的应用[J].地质与资源,2017,26(3):323-328.
- [6] 张照鹏,褚忠信,李应坤.峰高与峰面积统计量表示岩心黏土矿物相对含量的差异[J].海洋科学,2016,40(12):107-113.
- [7] 周翔,刘冬,卜红玲,等.基于MIF法的几种黏土矿物X射线衍射定量研究[J].中国矿业,2018,27(11):121-127.
- [8] 林伟伟,宋友桂.沉积物中X射线衍射物相定量分析中的两种方法对比研究[J].地球环境学报,2017,8(1):78-87.
- [9] 王琦,马龙,黄康俊,等.蒙脱石,高岭石和伊利石X射线衍射定量分析[J].贵州地质,2021,38(1):71-78.
- [10] 王大奇.X射线衍射实验的更多思考[J].科技风,2021(21):62-63.
- [11] PAASWELL R E. Temperature effects on clay soil consolidation [J]. ASCE Soil Mechanics and Foundation Division Journal, 1967, 93(3):9-22.
- [12] HABIBAGAH K. Temperature effect and the concept of effective void ratio [J]. Indian Geotechnical Journal, 1977, 7(1):14-34.
- [13] MORIN R, SILVA A J. The effects of high pressure and high temperature on some physical properties of ocean sediments [J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89(B1):511-526.
- [14] 谢刚,邓明毅,张龙.黏土结合水的热分析定量研究方法[J].钻井液与完井液,2013,30(6):1-4.
- [15] 邓明毅,刘洋洋,谢刚,等.钠蒙脱土结合水的热分析定量研究方法[J].钻井液与完井液,2018,35(2):17-22.
- [16] LI S, WANG C, ZHANG X, et al. Classification and characterization of bound water in marine mucky silty clay [J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(5):2509-2519.
- [17] 朱赞成,李纪伟,林法力,等.不同矿物成分下土样脱附曲线试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(1):175-180.
- [18] 莫燕坤,刘观仕,牟智,等.黏土中结合水含量测试方法研究进展[J].土工基础,2021,35(3):393-399.
- [19] 王平全.粘土表面结合水定量分析及水合机制研究[D].成都:西南石油学院,2001.
- [20] 袁建滨.粘土中结合水特性及其测试方法研究[D].广州:华南理工大学,2012.
- [21] 娄云雷,李洪艺,张碧龙,等.真空预压-电动条件下珠三角地区软土力学性质变化过程研究[J].中山大学学报(自然科学版),2015,54(1):64-69.
- [22] 崔德山,项伟,曹李靖,等.ISS减小红色黏土结合水膜的试验研究[J].岩土工程学报,2010,32(6):944-949.
- [23] 汤连生,夏涵,宋晶.真空预压软土的排水通道演变特征[C]//全国工程地质学术年会.长春,2015.
- [24] 陈浩,周连福.XRD定量相分析方法及其在湖泊沉积研究中的应用[J].盐湖研究,2013,21(4):60-66.

(责任编辑 秦社彩)