

化学成分对花岗岩残积土抗拉张力学特性的影响*

孙银磊^{1,2}, 汤连生¹

(1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 广州 510275;
2. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要: 结合花岗岩残积土的受拉特性, 将花岗岩残积土筛分成不同粒径范围的土样, 通过浓盐酸处理, 利用XRD光谱分析处理前后土样化学成分的变化情况。利用自制土体直拉强度测试仪, 对盐酸处理前后不同粒组土样进行不同含水量下的单轴抗拉强度试验。利用微观层析成像技术分析处理前后颗粒的变化情况, 探讨花岗岩残积土抗拉强度的主要影响因素及变化规律。结果显示: 经过盐酸浸泡处理后, 5种粒组花岗岩残积土样中的游离氧化铁, 如 $\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$ 、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 Fe_3O_4 等均消失, 仅剩下 SiO_2 和少量的 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ 。盐酸处理前各粒组的土样的抗拉强度随着含水量的增大呈现先增大后减小趋势, 存在一个“凸峰”现象。HCl与花岗岩残积土中的铁、铝氧化物发生化学反应, 消耗掉包裹在花岗岩残积土基本团粒单元外围的铁、铝胶质, 与此同时也损耗了连接各结构单元体的胶结物质, 使得花岗岩残积土微观结构遭到破坏, 团聚体失去胶结物质等的约束。土颗粒之间的粒间吸力, 特别是结构吸力的减小导致土样在拉应力的作用下容易被拉断。

关键词: 花岗岩残积土; 抗拉强度; 化学成分; X射线衍射; HCl; 微观层析成像

中图分类号: P642.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2018)03-0007-07

The effect of chemical composition on tensile mechanics of residual granite soils

SUN Yinlei^{1,2}, TANG Liansheng¹

(1. School of Earth Science and Engineering, Sun Yat-sen University,
Guangzhou 510275, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Resources and Geological Processes,
Guangzhou 510275, China)

Abstract: The granite residual soils were sieved into five groups to study their tensile mechanics. The soil mineral compositions before and after HCL treatments were measured with X-ray diffraction, and the tensile strengthes of granite residual soils were tested with the direct tension apparatus. The changes of particles before and after HCL treatments were analyzed with micro-tomography method. The results showed that $\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, and Fe_3O_4 disappeared after HCL treatment. The tensile strength of different groups of soils firstly increased and then decreased with water content increasing (existing a convex peak). After HCl treatments, the iron and aluminum colloids wrapped around the basic aggregate units of the granite residual soils and the cements between the different structural units were consumed in the chemical reaction with HCl treatments, which resulted in the particle sizes of the granite residual soils decreasing. The destruction of microstructures led to the granite residual soil aggregates losing cements

* 收稿日期: 2017-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(41572277); 广东省自然科学基金(2015A030313118); 广州市科技计划项目(201607010023)

作者简介: 孙银磊(1986年生), 男; 研究方向: 岩土工程; E-mail: sunylei@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 汤连生(1963年生), 男; 研究方向: 岩土工程; E-mail: eestls@mail.sysu.edu.cn

binding. The decreasing suctions, especially the structure suctions, between grains of the granite residual soil led to that the samples were easily broken under the direct tension effect.

Key words: granite residual soil; tensile strength; chemical constituents; X-ray diffraction; HCl; micro-tomography method

抗拉强度是花岗岩残积土一个比较重要的力学性质,许多自然现象及工程破坏,如土坡崩岗、崩塌及土坝、堤防、路基破坏都与土的抗拉特性有关,因此,对花岗岩残积土抗拉强度进行深入研究具有重要的工程意义^[1]。

花岗岩残积土作为一种在华南地区广泛分布的特殊土,其结构性对土的工程性质有着显著的影响,研究表明:土体结构的宏观变形现象都是土体微观结构改变的结果^[2],因此,花岗岩残积土工程特性的决定因素归根到底是其结构的特殊性。吴能森^[3]针对花岗岩残积土的遇水崩解及软化造成其微观结构变化特性,全面分析了土体崩解的结构性机制,在此基础上,将花岗岩残积土的崩解过程划分成扰动性、结构性及溶解性 3 个阶段。周小文^[4]利用不同围压下的三轴排水试验对比分析了原状和重塑花岗岩残积土的剪切屈服特性。汤连生^[5]基于堆砌体模型的思路,利用孔隙比和结构脆性参数来构建花岗岩残积土损伤过程函数,建立了能够反映非饱和花岗岩残积土脆弹塑性胶结损伤模型。Alias 等^[6]通过直接剪切及三轴试验研究了重塑花岗岩残积土的有效剪切强度参数。国内外对花岗岩残积土抗剪强度和结构性方面已经取得了较多的研究成果,而对其抗拉强度及结构性的研究相对较少,归根结底是在传统岩土工程研究过程中,通常不将花岗岩残积土作为抗拉材料使用,主要是因为土的抗拉强度通常较小或几乎被视为零,因此,在实际工程中土体的抗拉强度通常被忽略,相对于抗压和抗剪强度,对花岗岩残积土抗拉强度的研究较少^[7]。而抗拉强度但是种种的工程及自然破坏现象表明,忽略抗拉张强度不利于对花岗岩残积土的强度特征进行全面认识。同时,花岗岩残积土作为华南及西南地区的一种特殊土,受工业及生活排气的影响,在一些区域降雨的 pH 值会呈现酸性^[8],在该区域往往发生土坡崩岗、崩塌等地质灾害,表观上来看这些地质灾害(拉张破坏)与土体的 pH 值相关,从深层来说,花岗岩残积土的抗拉强度与其化学成分是否有一定的联系?

本文结合花岗岩残积土的受拉特性,将花岗岩残积土筛分成不同粒径范围的土样,通过浓盐酸处理,利用 XRD 光谱分析处理前后土样矿物成分的

变化情况。利用自制土体直拉强度测试仪,对盐酸处理前后不同粒组土样进行不同含水量下的单轴抗拉强度试验,基于微观层析成像技术分析盐酸处理前后不同粒组土样颗粒的变化情况,探讨花岗岩残积土抗拉强度的主要影响因素及变化规律。

1 试验方法

1.1 试验样品

试验土样取自广州地铁 21 号线镇龙站某一边坡,根据现场勘察资料,此浅埋段为全风化花岗岩残积土,试验室测其湿密度为 1.87 g/cm^3 ,天然含水量为 23.7%,液限为 36.5%,塑限为 23.7%,塑性指数为 12.8,勘察报告揭示土样为可塑状砂质花岗岩残积土。根据《ISSS soil particle size limit classification》^[9]按直径(d/mm)大小将土样筛分成 5 种不同粒径范围土样:小于 0.002, 0.002 ~ 0.02, 0.02 ~ 0.2, 0.2 ~ 1.0, 1.0 ~ 2.0 (如图 1)。对于花岗岩残积土来说,颗粒之间的胶结物对其抗拉强度影响较大,为了研究胶结物的化学成分对抗拉强度的影响,选取不同粒径范围的土样 500 g 浸泡在 φ 为 37.5% 的盐酸中 24 h,在 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 的环境下恒温 3 h,然后离心,蒸馏水洗至 pH 约为 7, $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干,研磨过筛后放入干燥器内备用^[10]。利用 D-MAX 2200VPC 型 X 射线粉末衍射仪对盐酸处理前后的土样分别进行测试分析, Cu 靶, K_α 辐射,扫描范围 $10^\circ \sim 80^\circ$,扫描步长 0.2° 。为了能够准确对比盐酸处理前后,土样中矿物成分的变化情况,放入盐酸前称取土样质量 m ,盐酸浸泡并离心干燥后的土样质量为 n ,进行 XRD 测试时候,采集的盐酸处理前土样质量为 k ,那么采集的盐酸处理后的土样质量为 kn/m 。

1.2 拉张试验

分别将处理前后的土样加蒸馏水,采用分层击实的方法制成不同含水量的拉张土样,含水量分别为 5%、7.5%、10%、12.5%、15%、17.5%、20%、22.5%,误差为 $\pm 0.2\%$ 。将制作成的拉张土样利用保鲜膜密封,放入 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 的储样柜中 48 h,使土样中水分均匀分布。利用自制土体直拉强度测试仪(专利号:CN201310546003.0)进行拉张试验(见图 2a)。为了保证土样的拉张破坏过程,本

次试验采用滴水的方法进行加载，液滴的速度为 120 滴/min。拉张试验完毕后取拉断面附近的微观土样，主要是利用 Peek 管插入土中，粗砂、中砂、细砂、粉土及黏土对应的 Peek 管的内径为 5, 3, 1, 0.5, 0.5 mm (由于后期对粉土与黏土样品进行微观扫描采用相同分辨率的镜头，该分辨率对 Peek 内径的要求是不能超过 0.65 mm)。将制成的土样利用液氮冷冻并在冷冻干燥仪中进行干燥处理 24 h，干燥过程中保持真空度在 90% 以上，冷干温度在 -45 ℃ 以下。

1.3 微观层析成像

本次微观层析成像试验是利用上海光源 BL13W1 线站进行 μ CT 扫描，该扫描系统主要由射线源、样品台、探测器和计算机数据处理系统组

成。样品台位于射线源和探测器之间，X 射线源发射的 X 射线在穿过样品时与样品发生相互作用，放射性 X 射线穿过物体时，其能量由于被部分被吸收，而发生强度衰减。本次试验的分辨率为 3.25 μ m (砂粒) 和 0.325 μ m (粉粒和黏粒)，光线能量为 19.5 keV，在进行 μ CT 扫描时，样品沿轴向旋转 180°，光束以 X 射线源和探测器中心连线方向射向样品。由于样品在不断旋转，因此将得到样品在不同角度的 μ CT 扫描，并等角度间隔采集。本次试验的时间间隔为 0.25°，最后得到 720 幅二维投影。这些二维投影，经过 Pitre 软件进行图像处理，将一组连续的二维图像排列重构，就构成了一个三维的数据场^[11]，见图 2b 所示。利用三维可视化软件 Avizo 软件进行显示分析，对图像进

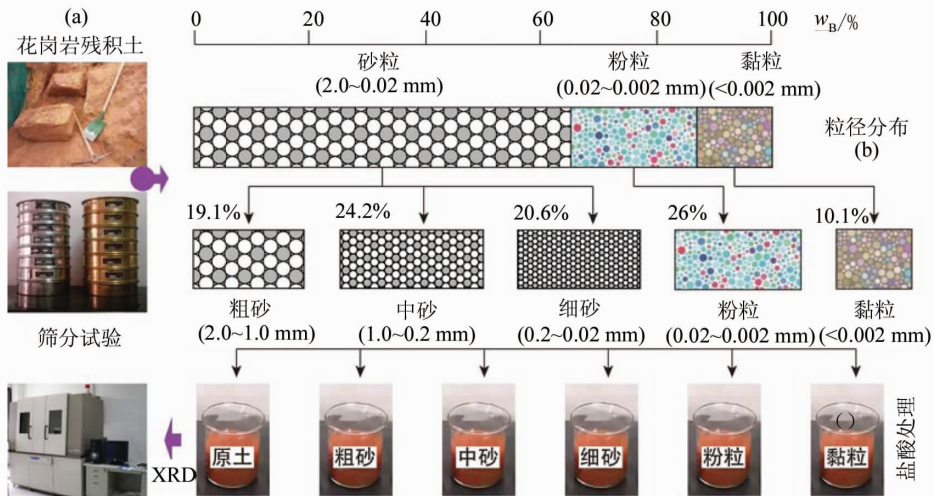


图 1 花岗岩残积土颗粒级配及盐酸处理

Fig. 1 Grain size distributions and HCL treating of the granite residual soils

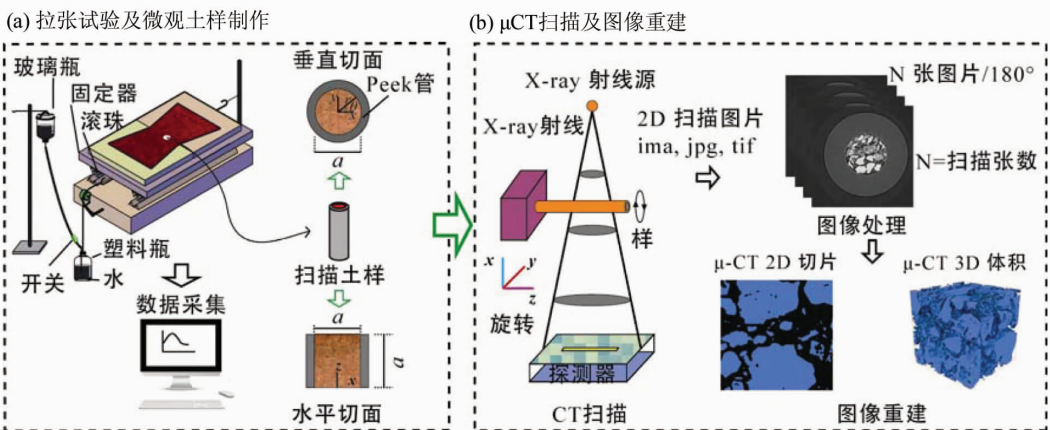


图 2 拉张及扫描试验

Fig. 2 Tensile and scanning methods

行图像分割, 将所有孔隙空间对应的体素顶点都标记为 1 (或 0), 而所有土颗粒对应体素顶点都标记为 0 (或者 1)^[12]。由于扫描时间限制 (1 h/样, 申请周期为半年), 本次试验只进行了含水量为 15% 的土样扫描试验, 包括盐酸处理前后的土样。

2 结果与讨论

2.1 X 射线衍射 (XRD) 测试结果

土样原样的 XRD 图谱显示 (图 3a), 不同粒径的花岗岩残积土的曲线特征大体相似, 说明各组土样中具有相似的化学成分, 图谱中显示 5 种粒组的花岗岩残积土样主要的化学成分是 SiO_2 , 其次是 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, 含有部分游离氧化铁, 如 $\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$ 、 Fe_3O_4 、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 等。经过浓盐酸浸泡处理后, 土样中的 $\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$ 、 Fe_3O_4 、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 及 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ 等均不同程度地减少, 而 SiO_2 的含量基本维持不变 (图 3b)。

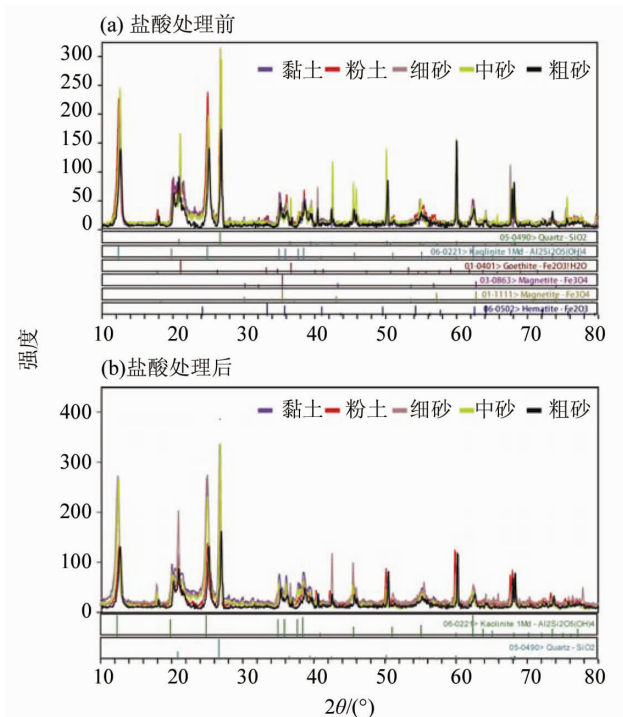


图 3 盐酸处理前后土样 X 射线衍射图

Fig. 3 X-ray diffraction patterns of the granite residual soils before and after HCL treatment

2.2 抗拉强度结果

由图 4 可知, 对于盐酸处理前各粒组的土样, 随着含水量的增大, 其抗拉强度均先增大后减小, 存在一个“凸峰”现象。即在含水量变化过程中存在一个临界含水量, 当含水量小于此临界含水量

时, 抗拉强度随含水量的增大而增大; 当含水量大于临界含水量时, 抗拉强度随含水量的增大而减小。并且随着含水量的增大, 在临界含水量左侧的抗拉强度增长率要大于在临界含水量右侧的抗拉强度减小率。在临界含水量右侧, 随着含水量的增大, 抗拉强度逐渐减小, 并趋于某一稳定值, 即随着含水量的增大, 抗拉强度并不会一直减小, 而是减小到某一程度后将趋于稳定, 存在某残余抗拉强度。此规律与 Tang 等^[13]对黏土抗拉强度的试验结果类似, 这说明当含水量超过临界含水量后, 抗拉强度随着含水量的增大而减小并趋于某一稳定的残余抗拉强度, 并不是一个单独的现象, 很可能是一个普遍存在的现象。对于盐酸处理后的不同粒组花岗岩残积土样的抗拉强度, 其随含水量的变化趋势与盐酸处理前的抗拉强度变化趋势大致相同。对于同种粒组相同含水量的花岗岩残积土, 盐酸处理后的抗拉强度比处理前减小的幅度较大, 减小幅度为 5 ~ 10 kPa 不等, 并且这种规律随着颗粒粒径的减小呈现增大的趋势。

2.3 三维微观结构重建结果

本次进行三维结构重建的土样只有含水率为 15%, 包括五种不同粒组的土样。经过 Pitre 软件进行切片处理后, 利用 Avizo 三维可视化软件对不同粒组的土样进行二维及三维图像分析, 见图 5 所示。从图中可以看出, 无论是黏土颗粒还是砂土颗粒, 经过盐酸处理后的颗粒尺寸相应减小了, 处理后的颗粒整体上呈现相对碎散的状态, 颗粒与颗粒之间的胶结情况较少。而盐酸处理前的颗粒之间都有一定的胶结, 特别是当颗粒尺寸较小的时候, 颗粒的胶结情况最为明显。

2.4 抗拉强度影响因素分析

花岗岩残积土中的 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 是其主要的倍半氧化物, 经过盐酸处理后他们大量地减少与消失, 直接影响着花岗岩残积土的拉张力学性质。倍半氧化物对抗拉强度的影响主要表现在它们可以起到包裹的作用, 以“包膜”的形式将土颗粒包住 (图 6), 也可以起到胶结的作用, 以“桥”的形式将土颗粒连接起来形成聚集体^[14], 还可以起到充填的作用, 以“填充物”的形式将土颗粒之间的孔隙填塞, 可见倍半氧化物是花岗岩残积土中最为重要的组分之一。花岗岩残积土中的结构单元体是由游离铁、铝胶质通过较强静电作用形成的基本团粒单元, 其外围被铁锅质包裹^[15]。花岗岩残积土结构单元体主要包括较为稳固的蜂窝状及絮凝状结构, 这些结构主要是由土体自身化学性质相对稳

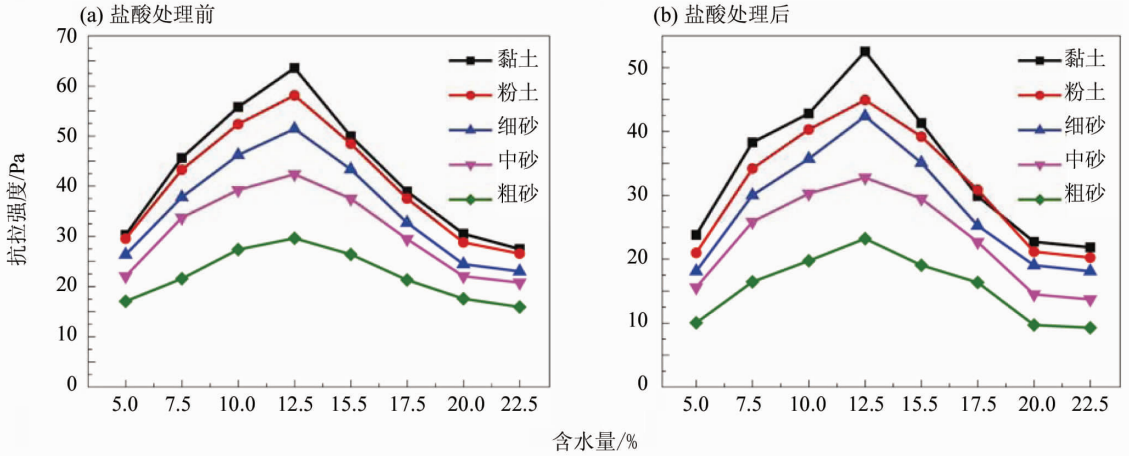


图 4 盐酸处理前后土样的抗拉强度

Fig. 4 Tensile strength of granite residual soils before and after HCL treatment

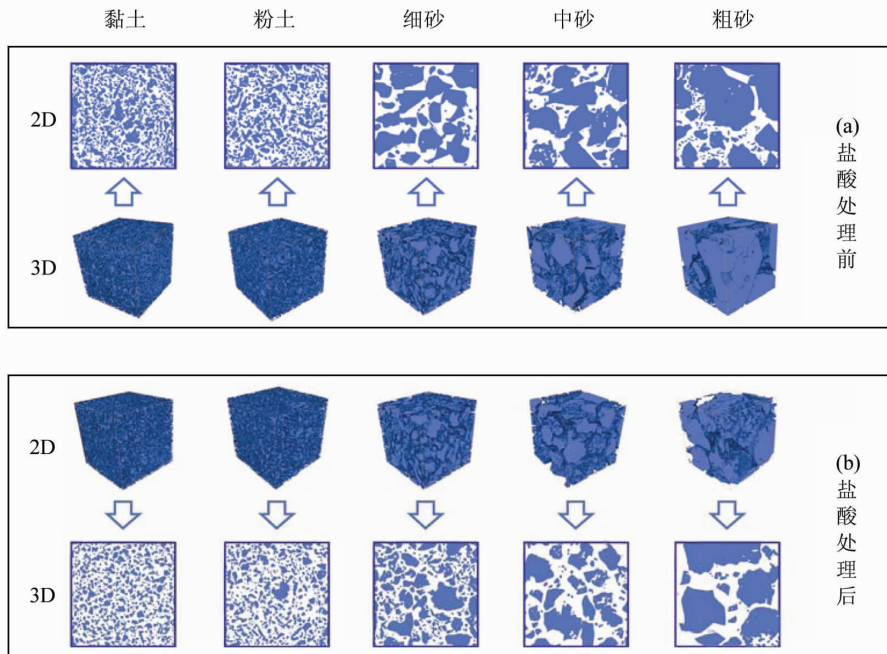


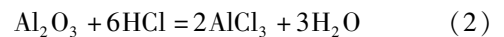
图 5 盐酸处理前后土样的抗拉强度

Fig. 5 Tensile strength of granite residual soils before and after HCL treatment

定的游离铁、铝胶结物以及硅溶胶胶结而形成的，且这些结构单元体外围覆盖一层结合水膜，加强了彼此间的胶结作用，最终结构单元体形成团聚体结构，因此花岗岩残积土具有较高的抗拉强度。相比较而言，当颗粒中黏土含量越高，这种胶结作用越强。

花岗岩残积土中的 SiO_2 不与 HCl 反应，而 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 却易溶于 HCl ，且与之发生化学反应，生成溶于水的 FeCl_3 和 AlCl_3 ， Fe^{3+} 和 Al^{3+} 离子经过水洗及离心干燥后随之排出土体，如图 6 所

示，造成了花岗岩残积土化学成分的变质，其化学反应方程式如下所示：



根据汤连生提出的非饱和土粒间吸力理论，土颗粒之间的联结作用力包括范德华力、双电层引力、胶结力、颗粒之间的咬合力、结合水的黏结力、湿吸力等^[13]，它们都对颗粒之间的抗拉承担责任。如果将这些力分为两组：①湿吸力，由表面张力引起的作用于土颗粒之间的力（图 7）；②

范德华力、双电层引力、胶结力、颗粒之间的咬合力、结合水的黏滞力 (图 7)。它们是与土颗粒自身的化学成分、孔隙液成分、土体结构等因素有关, 这一部分正是结构吸力。相比湿吸力, 花岗岩残积土的结构吸力对其抗拉强度影响更大。结构吸力是土体内与结构性质相关的内拉应力的总和, 包括胶结力、静电力、磁力以及咬合力等, 以上提到的各力均受含水量、土颗粒堆积方式以及孔隙水溶液化学成分的影响, 但受各因素的影响程度不同。它充分体现了土的结构特征, 主要包含土的骨架、孔隙、颗粒以及成分等特征。而土的抗拉强度之所以能够存在其本质是因为颗粒之间有联结力, 它来源于范德华力、双电层引力、胶结力、毛细吸力等。土体之所以被拉断, 就是由于土颗粒之间的联结力被克服了。利用盐酸浸泡花岗岩残积土, HCl 与铁铝氧化物等发生化学反应, 消耗掉包裹在花岗岩残积土基本团粒单元外围的铁、铝胶质, 与此同时也损耗了连接各结构单元体的胶结物质, 使得花岗岩残积土团粒粒径变小, 其微观结构遭到破

坏; 团粒内的矿物成分也含有铁铝氧化物, 随着化学反应的进行, 团粒结构也将遭到 HCl 的侵蚀破坏, 进一步分散成更为细碎的物质, 这也解释了图 6 中盐酸处理后的颗粒呈现碎散状态的原因; 最终起到包裹、连接、填充作用的胶结物质被溶蚀后生成的易溶盐以及细小颗粒被冲洗的蒸馏水带走, 使花岗岩残积土颗粒之间的孔隙增大, 并将红土颗粒架空。花岗岩残积土团聚体失去胶结物质等的约束, 颗粒之间的粒间吸力, 特别是结构吸力的减小造成盐酸处理后的土样在拉应力的作用下容易被拉断。相对而言, 黏土受盐酸处理的影响较大, 颗粒越小, 颗粒之间的“桥”的消失现象越为明显, 其抗拉强度减小的幅度较大。

3 结 论

1) 经过盐酸浸泡处理后, 5 种粒组花岗岩残积土样中的 $\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$ 、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 Fe_3O_4 及 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ 等均不同程度的减少, 而 SiO_2 的含量基本上维持不变。

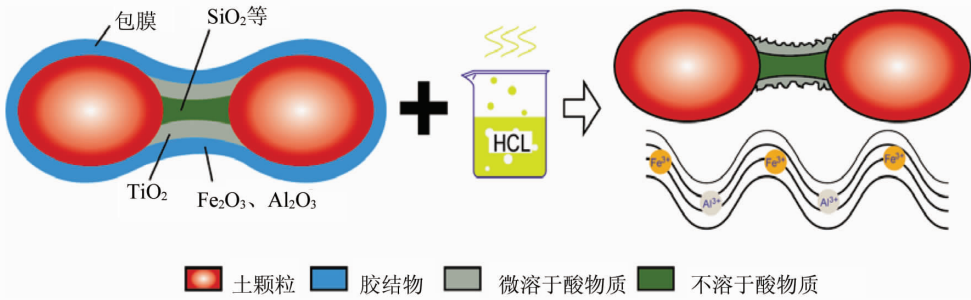


图 6 盐酸作用下花岗岩残积土团聚体变化情况

Fig. 6 The changes of granite residual soil aggregates before and after HCL treatment

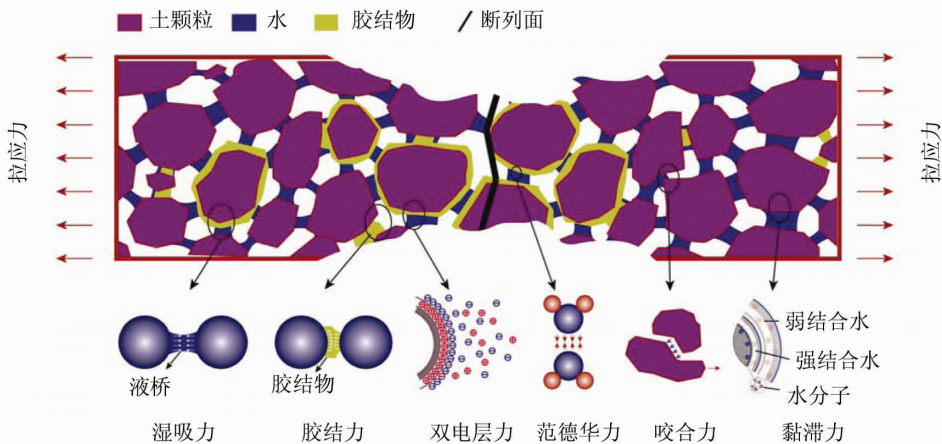


图 7 土颗粒之间的联结作用力

Fig. 7 The coupling force between soil particles

2) 盐酸处理前后各粒组的土样的抗拉强度随着含水量的增大均呈现先增大后减小趋势。对于同种粒组相同含水量的花岗岩残积土, 盐酸处理后的抗拉强度比处理前减小的幅度较大, 减小幅度为5~10 kPa不等, 并且这种规律随着颗粒粒径的减小呈现增大的趋势。

3) 通过对不同粒组进行微观层析成像分析, 无论是黏土颗粒还是砂土颗粒, 盐酸处理前的颗粒之间都有一定的胶结, 特别是当颗粒尺寸较小的时候, 颗粒的胶结情况最为明显。经过盐酸处理后的颗粒尺寸相应减小了, 处理后的颗粒整体上呈现碎散状态, 颗粒与颗粒之间的胶结情况较少。

4) HCl与花岗岩残积土中的铁、铝氧化物发生化学反应, 消耗掉包裹在花岗岩残积土基本团粒单元外围的铁、铝胶质, 与此同时也损耗了连接各结构单元体的胶结物质, 使得花岗岩残积土团粒粒径变小, 其微观结构遭到破坏, 花岗岩残积土团聚体失去胶结物质等的约束, 颗粒之间的粒间吸力, 特别是结构吸力的减小造成盐酸处理后的土样在拉应力的作用下容易被拉断。

参考文献:

- [1] 汤连生, 桑海涛, 罗珍贵, 等. 土体抗拉张力学特性研究进展[J]. 地球科学进展, 2015, 30(3): 297-309.
TANG L S, SANG H T, LUO Z G, et al. Advances in Research on the Mechanical Behavior of the Tensile Strength of Soils[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(3): 297-309.
- [2] CHANDLER R J, LEROUEIL S, TRENTER N A. Measurements of the permeability of London clay using a self-boring permeameter[J]. Géotechnique, 1990, 40(1): 113-124.
- [3] 吴能森. 花岗岩残积土的分类研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2299-2304.
WU N S. Study on classification of granite residual soils[J]. Rock & Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2299-2304.
- [4] 周小文, 刘攀, 胡黎明, 等. 结构性花岗岩残积土的剪切屈服特性试验研究[J]. 岩土力学, 2015(S2): 157-163.
ZHOU X W, LIU P, HU L M, et al. An experimental study of shear yield characteristics of structured granite residual soil[J]. Rock & Soil Mechanics, 2015(S2): 157-163.
- [5] 汤连生, 桑海涛, 宋晶, 等. 非饱和花岗岩残积土粒间联结作用与脆弹塑性胶结损伤模型研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2877-2888.
TANG L S, SANG H T, SONG J, et al. Research on soil particle joint function and brittle-elastoplastic cement damage model of unsaturated granite residual soil[J]. Rock & Soil Mechanics, 2013, 34(10): 2877-2888.
- [6] ALIAS R, KASA A, TAHA M R. Effective shear strength parameters for remolded granite residual soil in direct shear and triaxial tests[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 19: 4559-4569.
- [7] PENG H, HORTON R, LEI T, et al. A modified method for estimating fine and coarse fractal dimensions of soil particle size distributions based on laser diffraction analysis[J]. Journal of Soils & Sediments, 2015, 15(4): 937-948.
- [8] 杨乐苏, 周光益, 于彬, 等. 广州市酸雨成分及其相关分析[J]. 生态科学, 2005, 24(3): 254-257.
YANG L S, ZHOU G Y, YU B, et al. Acid rain composition and its correlation analysis at Guangzhou[J]. Ecologic Science, 2005, 24(3): 254-257.
- [9] PADARIAN J, MINASNY B, MCBRATNEY A. Using genetic programming to transform from Australian to USDA/FAO soil particle-size classification system[J]. Soil Research, 2012, 50(1): 67-75.
- [10] 王文己, 陈浩, 王爱勤. 热酸处理凹凸棒石黏土对 P_b^{2+} 吸附性能的研究[J]. 非金属矿, 2006, 29(4): 42-45.
WANG W J, HAO C, WANG A Q. Study on adsorption properties of heat-and acid-treatment palygorskite clays for P_b^{2+} [J]. Non-Metallic Mines, 2006, 29(4): 42-45.
- [11] CHEN R C, DROSSI D, MANCINI L, et al. PITRE: software for phase-sensitive X-ray image processing and tomography reconstruction[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2012, 19(15): 836-845.
- [12] LIU J, PEREIRA G G, REGENAUER L K. From characterisation of pore-structures to simulations of pore-scale fluid flow and the upscaling of permeability using microtomography: A case study of heterogeneous carbonates[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 144(5): 84-96.
- [13] 汤连生, 桑海涛, 侯涛, 等. 花岗岩残积土抗拉强度试验研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2014, 53(6): 98-105.
TANG L S, SANG H T, HOU T, et al. Experimental study on tensile strength of granite residual soil[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2014, 53(6): 98-105.
- [14] 廖义玲, 朱要强, 赵坤, 等. 对贵州红粘土成因的再探讨[J]. 贵州大学学报: 自然科学版, 2006, 23(4): 361-365.
LIAO Y L, ZHU Y Q, ZHAO K, et al. To discuss the origin of guizhou red clay again[J]. Journal of Guizhou University, 2006, 23(4): 361-365.
- [15] 李晋豫, 杨华舒, 陈刚, 等. 氯离子侵蚀筑坝红土的试验研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(1): 162-164.
LI J Y, YANG H S, CHEN G, et al. Experimental study on erosion of chloride ions to laterite of dam construction[J]. Water Resources & Power, 2012, 30(1): 162-164.