

略论岩土化学力学^{*}

汤连生

(中山大学地球科学系, 广东 广州 510275)

摘 要: 提出了岩土化学力学学科及化学环境—岩土介质动态系统的新概念, 指出岩土力学研究应回归到岩土介质的物理性质和化学性质的研究上来, 因为岩土物性决定其力学性质。岩土物性的变化不仅来源于机械作用, 更重要的是来源于化学环境—岩土介质动态系统中化学作用的改变。因此, 传统的岩土力学应对化学作用导致物性的变化加以深入研究。还就岩土化学力学作为一门学科的若干要点作了讨论。

关键词: 岩土化学力学; 物性; 化学作用; 力学性质; 力学效应

中图分类号: TU458.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2002) 03-0086-05

1 岩土化学力学的涵义

岩土化学力学是研究岩土介质中的化学环境和化学行为导致岩土力学性质的变化规律的学科, 它是固体力学的一部分。

化学作用改变岩土物质的成分、结构, 必然改变岩土的力学性质^[1-13]。既然我们研究材料力学性质的载体是处于自然环境中易受物理化学作用的岩土介质, 就必须研究控制力学性质及导致其变化的主控因素——岩土的物理性质和化学性质 (以下统称为物性) 本身在物理化学作用下的演变规律。

岩土化学力学是岩土力学与化学及地球化学的相交叉的一门学科, 主要研究岩土体与环境 (尤其是水) 相互作用产生的化学作用的过程、类型、规律对 (受力) 岩土体变形、强度、破坏等力学性质的作用机理。虽然岩土化学力学要研究岩土中物质的化学运动形式和本质, 但其研究的中心内容仍然是化学环境中岩土介质的力学性质。它属于岩土力学、工程地质学与环境灾害地质学研究范畴。例如, 研究地球化学作用 (尤其是水化学作用) 对斜坡、洞室围岩稳定性的影响及作用机制。

2 岩土化学力学思维及特点

2.1 物性决定岩土力学性质

岩石是天然产出的具有一定结构构造的矿物集合体, 是地质作用的产物。土是指覆盖在地球上大部分陆地表面和部分海底的碎散岩石的堆积物, 都是岩石风化的产物。岩土力学之所以作为一门独立

的 (不同于一般材料力学) 的固体力学学科, 就是因为岩土的物性决定了岩土力学性质有别于一般固体材料的力学性质。这种不同于一般材料的物性, 主要表现在: ①岩土是由三相不同物质组成的集合体, 而且, 这三相物质之间容易发生物理化学作用; ②岩土介质的多样性; ③岩土物性具有易变性。

岩土的物性是岩土最基本的性质, 它决定岩土的力学性质, 也是分析岩土工程性质的重要依据。岩土化学力学研究的正是岩土的物性受化学场及温度场、力学场的物理化学作用下的变化规律, 以及由此产生的力学效应。在表生环境下, 化学风化作用相当剧烈, 它可以分为地球化学风化和生物化学风化两大类, 其作用具有强烈的岩土力学效应。

不能低估低温矿物—水界面反应在化学风化作用和元素地球化学循环过程中的重要性, 这些反应最终控制着通过河流和地下水入海的大部分溶解阴、阳离子。沉积岩中的碳酸盐矿物约占入海的溶解物质的一半, 结晶岩仅占 10%。低温矿物—水界面化学作用对岩土物性的改变在短时间内虽然不大, 但其力学效应却很大^[1-10]。

图 1 为在各环境因素对岩土物性的影响及力学效应。我们一直以来这样认为, 机械力学作用控制岩土物性的主要因素, 但只是短期的; 而比较忽略了的环境因素的长期影响的作用^[12], 而且其作用主要在对岩土物性上的, 它对岩土的力学性质起着决定性和控制性的作用。虽然环境因素的作用和机械作用一样随着时间最终也趋于零, 但是当环境状

* 收稿日期: 2001—03—03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59779019); 广东省自然科学基金资助项目 (970127)

作者简介: 汤连生 (1963—), 男, 博士, 副教授; E-mail: eestls@zsu.edu.cn

态受到扰动而发生变化后环境因素（如第 n 次扰动后的化学作用）对岩土物性或力学效应的作用又会恢复到类似于其原始系统的类似程度。因此，当某项建设工程机械作用一定时，对多变的环境因素影响岩土物性及力学效应的研究是相当重要的。

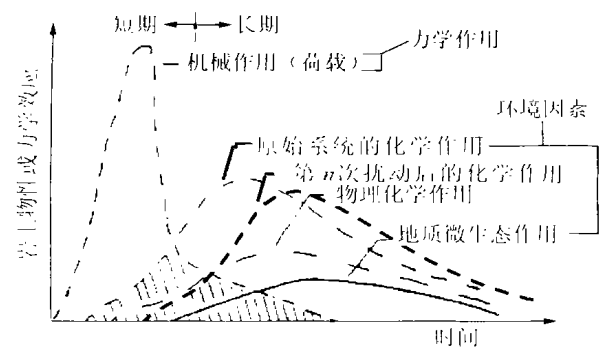


图 1 岩土物性及效应相对影响的比较
(据方晓阳^[12]修改)
Fig 1 Schematic comparison of relative effects on rock and soil performance

2.2 化学作用力学效应的特点

2.2.1 在岩石力学方面 实验研究^[1-6,9,11]表明化学作用的力学效应是显著的，具有时间效应。化学作用主要发生在岩石（体）以下的结构构造上^[7-9]：①微观的位错、晶内缺陷、晶粒间的微孔或微裂纹等；②细观的节理、劈理、缝合线和裂隙等；③宏观的层理、裂隙、断层等；④巨观的造山带、断裂带或剪切带；⑤结构面的充填物，如方解石、绿泥石及粘土矿物；⑥结构面中的水溶液及其对流、扩散和沉淀作用等。在巨观上，化学作用的岩体力学效应，还要考虑地质环境特征——水文地质及自然灾害的分区性的制约。

化学作用加剧了受力岩体裂隙相互作用及裂隙聚集效应，使得岩体强度降低及其破坏条件更易满足，而裂隙的聚集、扩展又为化学作用及地下水渗透提供了更有利的环境。

2.2.2 在土力学方面 自然界的土体是由固相（矿物颗粒和有机质）、液相（水溶液）和气相（气体）组成的三相分散体系。土的性质取决于三相物质本身的特性以及它们之间的相互作用和相对含量的影响。作为多孔介质的土由于它的空隙性和渗透性，使水溶液更容易渗入而影响其力学性质。这也是土有别于其它材料（如钢、混凝土和岩石等）的主要特性。化学作用很容易改变土中的粘土矿物、粘粒含量、孔隙水中离子成分、浓度等，这些都能够改变土的物性，进而影响土的力学性质。

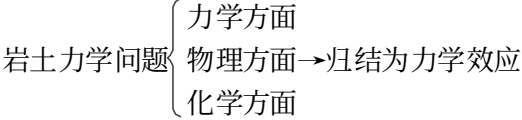
土颗粒表面对偶极化分子的吸引有关，而且与孔液的化学性质有密切联系。这也是结合水形成机理的“化学连接说”的主要观点^[9]。土颗粒相对稳定，而孔液的化学成分及性质容易变化，因此要注重水溶液成分及性质的变化对水—土反应的影响。

化学作用对土力学性质的影响主要体现在：①对土基本物理力学性质方面的作用，如对双电层、粘粒含量及可溶盐或难溶盐的含量的影响等；②对土颗粒间的湿吸力和可变结构吸力的作用；③对土结构的影响，尤其是对受水土体结构的动态变化具有重要作用；④对土含水量和渗透性的影响。

2.3 岩土化学力学的思维方法

化学作用在自然界广泛存在着。尤其是水—岩石的化学作用，它一般是指水溶液与岩石或土之间的相互作用，对于岩土力学，则是指水溶液与石土在岩石和土固相线下的温度、压力范围内进行的所有化学反应和物理化学作用。化学作用不仅导致化学元素在岩土与水之间重新分配，而且导致岩土微观结构的改变，这两者的变化都将导致岩土力学性质的改变。

全面而深入地认识岩土力学问题的各个侧面：



它需要岩土力学从力学角度、物理学角度和化学角度并综合运用力学、物理学和化学的成就来研究岩土力学问题^[7-9]。这是一种全面的研究，它对研究工程地质问题、地质灾害机理及防治提供了新的多种思路和途径。这也标志着人们对自然界中岩土变形破坏过程的认识将更加深刻。

岩土体的变形破坏实质上是岩土体成分、结构和环境三要素控制下的变形破坏过程。其中岩土体赋存的地质环境，是很重要的一方面。这些场相互耦合作用，对岩土体产生各种损伤，而利用损伤场，可将它们之间复杂的耦合关系表示出来，如图 2 所示。这种多重耦合作用是动态的演化及逐渐协调和变异的过程。岩体力学应当研究此耦合作用过程及其力学效应，使岩土力学的研究与应用更加贴近实际^[8,10]。

岩土化学环境由地质环境决定，地质环境特征又是受内动力和外动力地质作用两主控因素制约的，因此岩土化学力学的研究要重视对地质环境及其两主控因素的分析。在各水文地质分区的水—岩石相互作用，都有其各自的特点，地质环境决定了岩土化学环境条件，也决定了岩土的基本力学性质。

对土起着重要作用的结合水及双电层，不仅与

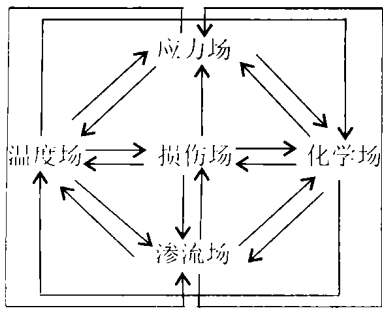


图 2 化学环境—岩土介质动态系统示意图

Fig 2 Schematic dynamic system of the effects of chemical environment on rock and soil

人类工程活动必将导致岩土化学环境产生多方面的不平衡，它对岩土化学环境的扰动，将引起岩土力学性能的变化。岩土化学力学为了研究自然或人类工程活动造成的岩土化学环境演变对岩土的力学效应，就必须将化学环境（场）与岩土介质看作一个有机整体，即化学环境—岩土介质动态系统。此动态系统是开放体系中一种非平衡的化学动力过程，应从历史演化的角度，回溯岩土介质动态系统中化学作用的演化历程及演化趋势。

这就决定了岩土化学力学具有复杂和综合特性的研究对象，有着广泛的内容和工程实际意义，需要采用多学科的理论与方法。化学作用对岩土的力学效应相当复杂的，是个广阔的研究领域，其未知的问题很多。作为学科的岩土化学力学，其主要目的乃至意义是开拓工程地质学及环境地质灾害学的理论、方法研究的新思路。

3 岩土化学力学学科若干要点

3.1 建立岩土化学力学学科的必要性

岩土的物性是其最基本的性质，它决定岩土的力学性质，也是分析岩土工程性质的重要依据。越来越多的研究表明，自然环境中的岩土介质的变形和破坏不仅是一种力学作用，其中化学行为起着相当重要的作用。岩土介质与环境之间存在着明显的力学—化学耦合关系。实际上，从机械力诱导而发生化学变化或物理化学变化的现象研究过程中，Wilhem Ostward 和 Peter 分别在 50 年代和 60 年代就提出了有关机械力化学的概念^{13,14}。其主要观点是，从能量角度分析机械力的能量转换为化学能。由 Peter 开始的机械力化学及效应的研究着重在力导致的化学现象。

岩土力学及其各分支学科从不同角度对岩土的力学规律进行过深入的研究，但是从岩土力学诞生起就忽略了岩土的物性及其对岩土力学性质的决定

性作用的研究。虽然在工程地质学、土质学也有研究岩土介质的物性对岩土介质力学性质的影响，但这种研究是比较表层的，更没有研究化学过程对力学性质变异的影响及机理，定量化方面的研究就更缺乏。当前，岩土力学研究中遇到自然界岩土力学性能难以解释的困难，其中主要原因是没有考虑化学环境的作用，研究的对象是理想材料的岩土介质，而不是化学环境—岩土介质动态系统。

涉及力学、物理和化学三方面的化学环境—岩土介质动态系统是一个相当复杂的系统。对此动态系统力学特性的研究属化学和力学两个研究领域的交叉，目前该领域的研究还很少，其研究的理论与方法还在探索中，其未知的问题很多。

化学作用力学效应的整体性、历时性、复杂性，使得难以用传统岩土力学的方法加以分析、定量化表述、处理和解决。岩土化学力学是工程地质学学科发展的要求。岩土化学力学的核心是揭示在应力状态、化学状态、时间状态和空间状态下岩土体的物性及其决定和控制的力学性质及发展演化趋势。岩土化学力学的建立，是化学对岩土力学的渗透，将丰富岩土力学整个的研究领域。

随着岩土化学力学效应及环境问题的日益突出，岩土力学普遍考虑化学作用是势在必行了。在此学科领域的研究，也必将对推动世界这一领域的研究工作起到很大程度的倡导作用。岩土化学力学是 21 世纪工程地质学、地质工程及岩土工程的生长点，它为岩土力学的发展开创了新方向，具有重要的理论意义和广泛应用前景。

把握化学作用的岩土力学效应问题可以为工程地质学、地质工程及岩土工程开辟崭新的研究领域。岩土化学力学学科概念及其发展方向的提出，是想唤起更多的有识之士对岩土化学作用的力学效应问题的关注和重视，以达到抛砖引玉之目的。

3.2 岩土化学力学学科若干要点

3.2.1 明确研究内容 由于岩土化学力学是化学与力学的交叉学科，其主要研究内容可能是模糊的。岩土化学力学是研究岩土在化学环境作用下的变形、破坏的规律，其研究对象是化学环境—岩土介质动态系统，最终研究目标是弄清化学力学效应的机理并定量化，形成科学理论并应用于实际。

岩土化学力学是研究岩土介质在化学环境及化学行为作用下引起的物理性质和力学性质变异过程或现象的一门学问，其主要研究内容是可归纳为六个方面：①化学环境—岩土介质动态系统的化学行为；②化学行为与岩土介质微观结构的耦合关系；③化学行为对岩土介质粒间作用力的影响；④

化学行为作用下岩土力学性质的变化及物理力学指标的定量关系；⑤化学力学耦合关系量化及定量参数；⑥工程应用。

也只有明确了研究内容，才能更深入理解岩土化学力学的研究意义。

3.2.2 实验研究 化学作用过程及其力学效应主要靠实验来研究，然后在实验的基础上进行理论分析，才形成理论方法，这也是整个岩土力学的普遍研究方法。实验研究是岩土力学研究初级阶段的必经阶段，也是化学和力学两学科的基本特点。

化学作用对岩土的力学效应是一种复杂的岩土物性、力学性质变化的过程，其机理很复杂。只有通过大量的实验研究，探测化学的过程和结果及其产生的力学效应，才能了解环境—岩土介质动态系统力学行为的基本规律。不详细了解岩土的化学作用及其力学效应的过程，发展岩土化学力学的理论、方法是不可能的，因此化学和力学的重要手段——实验方法是岩土化学力学的基本手段和研究基础。

只有运用化学和物理学中一些重要的研究方法进行实验测试研究，方能见到化学作用各阶段的元素活动迁移留下的痕迹，据此推测难以直接观察到很多岩土化学作用的过程，也才能将化学动力过程与岩土力学效应联系起来，推断出化学环境—岩土介质动态系统中尚未发现的自然规律。显然，精确和有效的分析实验方法本身的研究也是至关重要的。

3.2.3 理论研究与量化 化学环境—岩土介质动态系统力学效应的量化，是建立起岩土化学力学的理论方法并将研究成果应用于实际的关键。在此方面，虽然已经有了具实际意义的研究成果^[10, 11, 15, 16]，但是，化学作用力学效应是不同尺度之间的多重耦合和相互作用，是一种非线性动态过程，其机理很复杂，对其解释可以各种理论或观点。在自然界中，岩体的变形破坏涉及结构破坏之间不同尺度的相互作用，它涉及应力场、温度场和由岩石性质、水溶液成分所决定的化学场之间及其不同尺度的多重耦合和相互作用。这种多重耦合的相互作用是复杂的，将构成多个自组织反馈子系统。因此，量化的研究道路还很长远，需要我们相当重视和投入大量研究时间。

岩土化学力学分析的方法论和思维是严密和清晰的，它强调以化学为基础，以工程力学为基本方法，以实验为基本研究手段。但是，这种分析仍要重视其自身理论和定量方法的研究。因为，只有将微观化学过程和宏观化学结果与其岩土力学效应宏

观行为密切联系起来，根据化学环境—岩土介质动态系统的相互作用过程、结构、功能及输入输出关系，用数学模型、逻辑模型等描述出来，岩土化学力学才有其理论和实际意义。量化过程既要理论方法又需要经验知识，还要有真实的统计数据和相关实验观测资料。

如何把微观的机制放大到岩石宏观力学性质分析领域，建立符合实际又能定量解释化学作用的力学效应的定量模型是量化的关键。从化学作用的微观过程到力学特性的宏观表现，比起从化学过程的宏观结果到工程力学上的宏观表现的之间，建立起定量关系要困难许多。因此，在研究岩土化学力学过程中，一方面要重视量化的研究，另一方面还要重视定性定量相结合的综合集成方法。有了定性的约束框，界定了系统边界，清楚了那些是状态变量、环境变量、控制变量和输出变量，就能更准确地架起化学过程与工程力学表现的桥梁，或建立起化学环境—岩土介质动态系统的本构关系。

3.2.4 化学环境变异的岩土介质场的力学效应

由于岩石的渗透性能和水溶液渗流速率所决定的渗透速率对反应的模式和强度起控制作用。溶液速率决定着岩土化学作用的大模式，而水溶液化学成分、性质与岩石的矿物化学成分决定着岩土化学作用的小模式^[7, 16]。环境渗流场的改变，将导致岩土化学作用的模式及强度改变，由此导致岩土化学作用的力学效应的变化。

人类活动对化学环境—岩土介质动态系统具有扰动作用，主要是通过对地下水流动系统（包括介质场、水势场、化学场、温度场）的扰动达到对整个系统的改变。因而，人类活动的加入使自然界中这种长期的水—岩土化学作用模式发生剧烈变化，从整体上加剧了水—岩土化学作用，从而导致相应的岩土力学效应，例如地质灾害频繁发生。

因此，岩土化学力学相当重视化学环境的变异导致的沿途介质场的力学效应。这也是岩土化学力学的研究目的之一。

3.2.5 应用研究 化学场在岩土体所赋存地质环境——应力场、化学场和温度场的整个系统中是一个很重要的子系统。化学作用对岩土体的力学效应既有负（有害）效应，也有正（有益）效应^[16]。地质工程的核心就是地质体的改造。这种改造一般多理解为物理力学上的，而实际上其化学上的改造更应受到重视，因为化学作用改造的是岩土的性质。自然应充分利用岩土中现有的物性有利的一面，加以化学的改造，以达到改变岩土体的力学性能而服务于人类。例如，地震、滑坡、水土流失、

泥石流与岩土化学作用有着密切联系。通过分析岩土化学作用的过程,综合利用地质环境中的化学作用力学效应的规律来达到预防、控制和治理地质环境及地质灾害,这是一个新思路^[17]。有时利用化学环境—岩土介质动态系统的规律来解释自然界岩土体的一些力学现象,预防、控制和治理地质灾害显然更为合理。又如,泥流、泥石流和固化泥流是几种重要的滑坡类型,引起的原因和破坏机理复杂,是没解决好的滑坡问题。传统的极限平衡或极限分析方法基本不适用^[13],其主要是因为化学作用等环境因素在这些滑坡类型中起着控制性的作用。

显然,将岩土化学作用与工程岩土体的变形、破坏联系起来,岩土化学力学与地质灾害学联合起来,在环境地质学中值得很好地开拓,其应用前景广阔。这也是岩土化学力学的落脚点。

参考文献:

[1] DUNNING J D, MILLER M E. Effect of pore fluid chemistry on stable sliding of Berea sandstone[J] . *Parageoph*, 1984/ 1985, 122: 447— 462.

[2] ATKINSON B K, MEREDITH P G. Strees corrosion cracking of quartz: A note on the influence of chemical environmen[J] . *Tectonophysics*, 1981, 77: T1— T11.

[3] FREIMAN S W. Effects of chemical environments on slow crack growth in Glasses and Ceramics[J] . *J Geophys Res* , 1984, 89(B6): 4072— 4076.

[4] LISTE J R, KERR R C. Fluid-mechanical models of crack propagation and their application to magma transport in Dykes[J] . *J Geophys Res*, 1991, 96 (B6): 10049 — 10077.

[5] LASAGA A C. Rate laws of chemical reactions, in *Kinetics of geochemical Processes* // LASAGA A C et al, eds. *Rev Mineral[M]* . Washington DC: Mineralogical Society of America, 1981: 1— 67.

[6] 汤连生,王思敬,张鹏程,等. 水—岩土化学作用与地质灾害防治[J] . *中国地质灾害与防治学报*, 1999, 10(3): 61— 70.

[7] 汤连生. 水—土化学作用的力学效应及其机理分析[J] . *中山大学学报(自然科学版)*, 2000, 39(4) : 104— 109.

[8] 汤连生,王思敬. 水—岩土化学作用的力学效应研究与进展[J] . *工程地质学报*, 2000, 8 (增刊): 395— 400, 403.

[9] 汤连生,张鹏程,王思敬. 水—岩化学作用的岩石宏观力学效应的实验研究[J] . *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(4) : 526— 531.

[10] 汤连生,王思敬. 水—岩化学作用对岩体变形破坏力学效应研究进展[J] . *地球科学进展*, 1999, 14(5) : 433 — 439.

[11] 冯夏庭,赖户政宏. 化学环境侵蚀下的岩石破裂特性——第一部分:实验研究[J] . *岩石力学与工程学报*, 2001, 19(4) : 403— 407.

[12] 方晓阳. 21 世纪环境岩土工程展望[J] . *岩土工程学报*, 2000, 22(1) : 1— 11.

[13] 杨南如. 机械力化学过程及效应(I) . 机械力化学效应[J] . *建筑材料学报*, 2000, 3(1) : 19— 25.

[14] 曾凡,胡永明. 矿物加工颗粒学[M] . 北京: 中国矿业大学出版社, 1995.

[15] 王泳嘉,冯夏庭. 化学环境侵蚀下的岩石破裂特性——第二部分:时间分形分析[J] . *岩石力学与工程学报*, 2001, 19(5) : 551— 556.

[16] 汤连生. 水—岩土化学作用的环境效应[J] . *中山大学学报(自然科学版)*, 2001, 40(5) : 103— 107.

On Chemical Mechanics for Rock and Soil

TANG Lian sheng

(Department of Earth Sciences, Sun Yat sen (Zhongshan) University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The concepts of chemical mechanics for rock and soil and chemical environment rock and soil system are proposed, and the scientific thinking in chemical mechanics and its characteristics are discussed. Rock and soil mechanics should return to the study of physical properties and chemical properties of rock and soil, because the mechanical properties are determined by the physical properties and chemical properties of rock and soil. The changes of these properties are rooted not only in mechanical action, but also in the prior altering of chemical action in rock and soil. Therefore, more attention should be paid to the changes of physical properties and chemical properties of rock and soil from chemical action by chemical mechanics for rock and soil, not by the conventional rock and soil mechanics. Finally, some of the methodology of chemical mechanics for rock and soil is discussed.

Key words: chemical mechanics for rock and soil; physical properties and chemical properties; chemical action; mechanical property; mechanical effects