

岩土工程化学导论

An introduction to the Geotechnical Chemistry

熊厚金 张良辉 邹小平
(中国科学院广州化学研究所, 广州 510650)

林天健
(珠江水利委员会, 广州, 510610)

文 摘 系统地介绍和阐述了将化学的理论和成果应用于岩土工程中所取得的经验和成就。提出了建立一门新的交叉学科——岩土工程化学的建议。阐述了这门学科的内涵、特征和基本框架, 包括: ①岩土工程中化学作用机理的研究; ②岩土工程性质的微观实验研究; ③岩土工程所使用的化学新材料开发和新工艺研究; ④与化学有关的特殊岩土工程; ⑤岩土工程化学的检测与化学材料的毒性、耐久性。最后指出了岩土工程化学的任务及发展方向。

关键词 岩土工程化学, 发展, 概况

中图法分类号 TU 472.5

作者简介 熊厚金, 男, 58 岁, 教授高工, 1963 年毕业于武汉大学, 同年分配到中国科学院广州化学研究所, 一直从事岩土工程化学的研究和应用。并于 1981 年创办了专业化的化学灌浆公司。

Xiong Houjin Zhang Lianghui Zou Xiaoping
(Guangzhou Institute of Chemistry, CAS, Guangzhou 510650)

Lin Tianjian
(Pearl River Water Resources Commission)

Abstract Abundant experience and important achievements of Chinese engineers in application of chemical theories and fruits to solve geotechnical engineering are systematically introduced and reviewed. A new concept, Geotechnical Chemistry, is presented for the first time as a new borderline subject which consists of following five parts: ①study of chemical action mechanism in Geotechnical engineering; ②micro test research of the engineering property of rock and soil; ③development and study of new materials and techniques; ④special geotechnical projects related with Chemistry; ⑤research on toxicology problems in Geotechnical Chemistry and usage of materials. Finally, the authors put forward some ideas of the developing strategy and direction of the new subject.

Key words Geotechnical Chemistry, development, outline

1 引 言

近代土力学与基础工程学的创立是近百年的事, 岩土工程作为一门技术学科也不过四五十年, 但岩土工程技术作为修建房屋、桥梁及其它各种土工构筑物等土木工程的一个重要部分已有数千年的历史。在这一历史中化学一直在以它不断发展的新成就从各方面影响和帮助着岩土工程, 其影响之深远和效果之巨大是众所周知的。关于灌浆学、混凝土化学、土工聚合物以及建材学科等有着十分详尽的报道^[1~5], 但令人遗憾的是人们还没有意识到一门新的交叉学科——岩土工程化学, 已经形成并迅速发展。也就是说人们还没有从一门新学科的高度来报道和总结这一类由化学与岩土工程相结合产生的新理论与新成就。考虑到上述情况, 本文试图在岩土工程化学的意义上系统地介绍和阐述我国工程技术人员以各种各样的方式应用化学领域的成果于岩土工程建设的情况。本文将首次向广大读者展示这门学科的定义、方法、内涵及迄今为止这门学科的成就, 并提出岩土工程化学理论体系和应用体系的设想。笔者希望本文能使国内外同行了解化学在岩土工程建设方面的作用和成就, 促进岩土工程化

学的发展。

2 岩土工程化学的框架

多少年来, 在岩土工程实践中, 尽管人们以各种各样的方式在应用化学的原理和成果, 但并没有意识到一门新的边缘学科正在孕育之中。直到近 20 年来岩土工程中的大量疑难问题借助于化学获得解决, 并在许多科研和工程项目中显示出它的影响和威力之时, 人们才不得不刮目相看。单项的具体问题的解决已不能适应形式, 而理论研究的成果和经验的积累却已为这一门学科的建立创造了条件。

岩土工程化学, 简单地说, 它研究和讨论的对象是如何应用化学的原理和方法研究有关岩土工程问题。具体地说, 岩土工程化学是以岩土体作为研究对象, 将化学、地质学、材料学、岩石力学、土力学、基础工程学及环境工程学的研究方法相结合, 研究岩体和土体的性能利用、整治和改造的综合性的技术学科。如岩石的化学改良和改性, 加固与防渗, 化学检查与勘测以及岩土工程中其他化学工程问题。

* 到稿日期: 1998

2.1 岩土工程中化学作用机理的研究

从化学的角度解释一些重要的岩土工程现象, 从而为岩土工程建筑的设计与施工提供理论依据, 是岩土工程化学的主要任务。例如岩土本构关系的化学途径, 化学灌浆机理的分析, 岩土工程措施的力学与化学综合作用机理解释, 岩土流变现象的化学研究, 核废料固结防扩散技术的理论探讨, 地层中的酸碱性地基土对化学固结效果的影响之理论解释等。

2.2 岩土工程性质的微观试验研究

岩土工程性质的微观试验研究包括软土和软弱夹层的成因和结构性的化学研究, 地下水作用于岩石的化学变化的研究, 岩石化学风化作用的机理研究。

2.3 岩土工程的化学新材料开发和新工艺的研究

岩土工程中所用化学新材料与新工艺的研究与开发几乎被应用于岩土工程的方方面面, 包括材料的特性、制造工艺、改性方法、防污处理、新材料开发、各种外加剂的寻找和试用以及电离子土壤强化剂的开发与应用等。

2.4 与化学有关的特殊岩土工程

这一部分主要阐述和探讨利用现代化学理论与技术处理一些特殊的岩土工程的理论、方法与实践。例如泥炭土与沼泽土的地基处理, 膨胀土地区、湿陷土地区岩土工程的施工, 油页岩地基中桩基的设计与施工。

2.5 岩土工程化学检测与化学材料的毒性和耐久性

一部分内容将讨论灌浆材料的毒性, 环境污染、水污染的预防和检测等。

随着科学的进步, 把“化学”作为“不牢固”、“不可靠”的贬义词的时代早以过去, 许多材料都在解决其耐久性与毒性问题上得到发展。岩土工程化学材料正向着价廉、无毒、稳定和使用方便的理想材料的方向发展。

3 岩土工程化学的特征

岩土工程化学主要解决的问题是岩土的原位变性、改良和加固, 因此其主要的特征是原位化学反应过程及对岩体或土体的改良作用机理。这些也正是岩土工程化学的核心问题。

3.1 原位化学(反应)工程

岩土工程化学的重要特征之一是因外来化学物质的加入而在原位岩土体内进行一系列的化学(反应)过程, 这些过程主要包括以下几方面:

(1) 化学浆液在低渗透介质中的化学作用: 某些具有高渗透性能的低粘度化学浆液, 由于其对岩土介质具有极强的亲和性, 在渗透过程中通过浆液-介质-

水之间的界面作用产生吸渗压力, 能够自动渗入粘土中, 达到一般压力渗透灌浆无法达到的效果。化学浆液的这一现象称为自动吸渗机制^[6,7]。同时由于浆液的介电常数比水小得多, 浆液的渗入能改变粘土的结构, 提高其渗透率, 使浆液能更有效地渗入土体中^[8]。此外还有在电动化学灌浆中存在的电动化学作用过程。

(2) 土体或岩体中外来化学物质的凝胶反应: 这类反应包括高分子材料的聚合反应、缩聚反应, 交联反应, 水泥的水化反应等。浆材的成分、配比, 添加剂等助剂的用量决定反应的过程、速度、凝胶时间以及凝胶体的物理力学性质。

(3) 外来化学物质与被固结土体的相互作用: 外来化学物质在凝胶过程中不但本身发生多种复杂的反应, 同时也会与土中的某些成分发生相互反应, 从而改变土的结构、提高土的强度。如水泥浆与土体的离子交换作用、团粒化作用、凝硬反应、碳酸化作用, 黄土的碱液加固作用, 聚氨酯与土中孔隙水的反应, 高分子材料与土粒发生的交联反应等系列反应。由此而释放大量的反应热量, 导致土体脱水、压密或土体结构与强度的改变。目前对固结材料与被固结体之间的相互作用的认识和研究仍然很不够, 应加强这方面的研究, 以便开发更优良的岩土改良材料。

3.2 低品质材料变高品质材料

岩土工程化学研究的主要目标是将低品质的岩土改良为高品质的符合工程要求的岩土, 使现有资源得到充分利用。岩土工程化学通过以下途径原位改良岩土:

(1) 化学胶结作用: 不管是水泥浆或化学浆都具有产生胶结力的化学反应, 把岩石或土粒胶结在一起, 提高整体结构强度。

(2) 充填作用: 固结材料固化后本身具有较高强度, 充填于孔隙中, 一方面限制土体变形, 一方面提高土体抵抗外力的能力。

(3) 挤密作用: 浆液在高压作用下灌入土体中, 使周围土体得到压实并排除部分孔隙水, 从而提高土体强度。

(4) 骨架作用: 劈裂灌浆中形成的脉状及网状浆体象一个空间结构体支撑外来压力, 同时限制其中土体变形。

(5) 防渗作用: 浆液充填于岩石裂隙、空洞及土孔隙中提高其防渗性能。

(6) 加筋作用: 土工织物置于土体中大大提高了土体整体稳定性和抵抗变形能力。

通过以上多种机制的协同作用, 使原来承载能力

低、防渗能力差、变形大的低品位的岩体或土体变为高品质的承载结构体或防渗体,以满足工程要求。

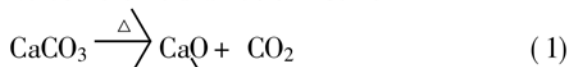
3.3 个性与综合性

象其他岩土工程一样,岩土工程化学最大的特点在于它的“个性”和“综合性”。岩土工程化学的工程更具有其特殊性。每一个工程都要按照工程实际情况进行设计与施工。有的还必须进行现场试验。任何生搬硬套的方式都将失败告终。岩土工程化学的另一个特点是“综合性”。这是不言而喻的。岩土工程化学的工程技术人员在工作中往往要面对一个复杂度很高的人机系统,各种专业都要在这个系统中发挥作用,现场组织人员的当机立断,协调、指挥这个系统也是工程成败的关键。

4 岩土工程化学的成就

4.1 化学应用于我国古代基础工程的探索

石灰的应用可以看作是化学原理应用于岩土工程的典型实例。很有可能石灰是人类最早发现的岩土工程化学材料。这是不难想象的:大规模的篝火燃烧在石灰岩上,突然下起雨来,篝火被淋熄了,伴随产生的大量热水流到或渗到岩石的底部,雨水使炽热的岩石即刻粉化为极细的粉末,并与雨水混合或反应,形成一种白色浆体。几天或几个星期后,人们回到原地,就会发现白色浆体已经固化,原来凹凸的岩体变成了一片白色而又比较平坦的石头。用现代化学的观点,将石灰石(碳酸钙 CaCO_3) 焙烧成生石灰(氧化钙 CaO),生石灰被水消化成消石灰(氢氧化钙 $\text{Ca}(\text{OH})_2$),消石灰吸收空气中的二氧化碳后又逐渐变成不溶于水的碳酸钙。它们可用以下化学反应方程式表示:



这些为现代人所熟悉的化学反应原理,就是被岩土工程广泛使用的科学依据。在现今的地基工程中,仍然广泛使用石灰作灰土地基、石灰桩、粉喷桩等工程。我国使用石灰的历史可追溯至原始社会晚期,在西安半坡村仰韶文化遗址博物馆陈列有一块新石器时代的石灰板和一些陶罐碎片。

我国是一个具有数千年灿烂文化的文明古国。笔者曾报道我国古代的灌浆概念和辉煌成就^[9],对我国6000年前的半坡村氏族遗址,4500年前的河南淮阳平粮台遗址,3000年前的殷墟,2000年前的万里长城,以及一些帝王陵墓等主要建筑物进行探索研究,将使我们的一个侧面了解古代人民凭借在生活及生产中

积累的丰富经验,极其成功而又富有创造性的解决各种土工及基础工程问题。由这些宝贵的文化遗产可以看出他们不但能够用无机化学材料,如粘土、岩石、石灰等,也懂得使用有机化学材料如树胶(树脂)、动物血(蛋白胨或多肽化合物)、江米汁(淀粉)等。应用的方法既有击打、夯实、堆砌、浇灌等物理方法,也有烘烤、焙烧、冶炼等化学方法。下面列举几个具体工程:

(1) 修筑万里长城时,因地制宜,就地取材,在高山峻岭以石修筑,在黄土地区以土夯筑,在无石无土的戈壁滩则以沙漠中特有的柳条和芦苇与砂、砾石互层铺筑,并泼以江米汁以增加土的坚固性和耐久性。

(2) 西汉时期的北京大堡台燕王刘旦夫妇的黄肠题奏式的棺廓和陪葬车马坑,长沙马王堆汉代女尸墓,都使用了专门的用于密封和防水的“白胶泥”,其化学成分含有 $\text{Al}(\text{OH})_3$, BaSO_4 等具有强凝聚力的化学物质。此外女尸的外棺还充填有化学上称为还原性物质的木炭、硫磺等,这些工程化学材料的加入,对防止尸体的氧化和腐烂毫无疑问地起了重要作用,并被认为是2000年前女尸得以保护的系统工程的一部分。

(3) 我国古代的桥梁不计其数,闻名于世且现今仍在使用的有河北的赵州桥、陕西的灞桥以及福建的洛阳桥等。除了它们牢固的地基基础和巧夺天工的设计与施工外,值得一提的是石块间的榫头连接及使用江米汁、牛血和石灰的混合物制成的浆液对其进行充填加固。洛阳桥位于洛阳江的入海处,江宽、浪急、潮水涨落,难以修建。为此建桥者用抛石的方法建造基础并在抛石表面和石缝间人工养殖牡蛎,使其大量繁殖,将分散的石块粘接成牢固的整体。这是一种现代称为生物工程的种蛎固结法。

4.2 构成文明世界的物质支柱——混凝土化学

目前大量应用的由硅酸盐水泥、砂、石、水以及必要的添加剂制成的普通混凝土是一种狭义的混凝土概念,广义的混凝土则是指具有胶结能力的材料将碎片或固体材料胶结成具有力学强度的整体。于是就有了粘土混凝土、石膏混凝土、石灰混凝土、沥青混凝土、硫磺混凝土以及聚合物混凝土等等^[10]。可以说古今中外的物质文明的大千世界,就是由这些具有不同胶结材料的混凝土王国所支撑。从半坡遗址的木柱周围所发现的粘土混凝土(由粘土、碎石、陶片夯实而成),发展到现代普通混凝土,历史给我们留下了光辉灿烂的混凝土文化。今天任何岩土工程都离不开混凝土,所以说混凝土化学是岩土工程化学的一个重要方面。可以预见随着材料科学、特别是高分子材料科学的发展,各种各样的高分子混凝土化学工程必将为岩土工程作出更大的贡献。石墨时代,陶器时代,青铜时代,

铁器时代, 钢铁时代以至所谓的高分子时代, 都是人类文明进步的标志。

4.3 岩土工程化学的原位加固技术

化学灌浆是岩土工程化学中的另一重要方面。随着时代的进步, 新工艺、新设备的不断涌现, 各种材料相互并存, 相互补充与配合, 发挥了意想不到的效果, 使许多工程难题得到解决, 有的材料甚至重放光彩。例如, 曾在几千年前受宠的陶瓷, 今天却成为了超导研究的热门, 沉寂多年的石墨时代近年来又焕发成高新技术的热点, 碳(石墨)纤维、金钢石薄膜、碳-60 具有特殊优异性能又把人们引入了一个充满幻想和诱人前景的应用领域。这难道是历史的巧合吗? 同样, 岩土工程化学材料在经过了研究—应用—改进—反复实践的艰难历程后跟上了时代的步伐, 扮演不可替代的角色, 使岩土工程的面貌焕然一新。

灌浆的实质在于对岩石的胶结、增强与加固。化学灌浆是一种用化学材料进行化学应对岩石、土体等介质进行原位加固的技术, 即将低品质的岩石、土体原位进行化学加固, 改变其物理力学性质和水力学性质, 以达到工程的要求。由于高喷、深层搅拌以及水泥灌浆都是通过水泥的水化反应或者石灰、石膏的化学反应使岩石胶结而得以增强加固的, 因此, 我们也将它们列入化学灌浆的范畴。

现代化学灌浆技术无论在理论研究、灌浆材料、灌浆工艺、施工机具及其构成规模、应用范围等方面都取得了重大进展, 并日趋成熟, 这些进展极大地推动了岩土工程化学的形成与发展。其主要成就有

(1) 低渗透介质灌浆理论的研究与工程实践取得了突破性进展, 一向被工程界视作渗透灌浆禁区的泥化夹层为中化-798 浆液所渗透固结。我国黄河上游龙羊峡大坝坝基灌浆, 中化-798 能渗入渗透系数为 $10^{-6} \sim 10^{-8} \text{ cm/s}$ 的低渗透介质中使软弱的夹泥层变得象岩石一样坚硬, 抗压强度达 23.5~33.4 MPa, 变形模量达 120 000 MPa, 为工程节省了上亿元的费用。以米勒(L. Müller) 为首的国际大坝执行委员会的专家在考察现场后给予了高度的评价。此外对长江三峡断层破碎带开发了 MMA 灌浆材料, 对三峡弱风化带进行处理后, 各项物理力学指标已提高到微新鲜岩石的水平。

(2) 对软粘土、包括流塑粘土的劈裂灌浆的研究解决了在溶岩地区开凿隧道的难题。我国的南岭隧道施工过程中曾一次性突泥 11 000 m^3 , 其含水量大、渗透性低、强度极低, 经化学灌浆处理后强度提高 18~40 倍, 最高强度达 2.34 MPa。

(3) 浅埋大洞室——北京西单地铁车站的修建在

化学灌浆固砂、管棚灌浆方面取得了在 -6 m 以下的繁华的大马路下施工, 控制地表沉降量不超过 3 cm 的良好效果。

(4) 高压灌浆在我国贵州东风水电站、湖北青江水电站、四川二滩水电站以及三峡水电工程等一系列水电站得到了广泛的使用, 在高压灌浆机理的研究方面也取得了一系列非常有价值的成果。

(5) 高压喷射灌浆技术在软土地基加固和地下防渗板墙两方面得到广泛的应用。加固后的地基强度达 30 MPa, 建筑物修建到 20 多层。防渗板墙目前已完成数百万 m^2 。它们用于深覆盖软土地层的防渗处理, 中细砂土层和砂砾石地层的加固和防渗处理已取得了巨大的经济效益和社会效益。这些工程包括长江三峡大坝围堰及其他许多大型水电站的围堰和高层建筑的地下基础的防水工程。

(6) 软土地基深层搅拌灌浆也是我国在沿海和内陆的冲淤积层的软土地区修建一般房屋和高速公路用得较多的方法之一。

4.4 土工合成材料在岩土工程中的应用

土工合成材料在岩土工程中的应用是近 20 年来开发的一门新技术^[11, 12], 它以人工合成的聚合物, 如塑料、化纤、合成橡胶等为原料制成的产品, 按照工程的需要置于土体内部、表面或各层土体之间, 以发挥加强或保护土体的作用。土工材料一般包括两种不同形式的材料, 即土工织物和超轻型填土材料。这两种材料分别被称为土工领域的新技术革命, 已在我国沿海地区得到广泛的应用。土工合成材料技术中的有关材料的蠕变、老化和其他性能的研究, 如支挡结构的计算模型和理论、防冻结构的设计理论及有关合成材料作用机理、设计计算原理和使用方法等都是岩土工程化学中很有特色的一部分内容。

4.5 岩土工程化学的理论基础及其相邻学科

与岩土工程化学相邻近的一些科学, 例如环境化学、高分子化学、岩石力学、土力学、材料科学以及数值方法等的成就早已不断渗透和被引进岩土工程化学中。此外还有其他一些值得借鉴的新兴学科, 如:

(1) 化学地理学借助对地表化学元素的迁移过程的研究, 揭露了复杂的进行于土层和风化层中的化学过程, 改变了对岩土工程分析和计算的单纯物理力学模式。

(2) 水文地球化学与岩土工程化学关系密切, 它的理论基础包括水的结构与性质、形成或改变地下水的物理作用、地下水的化学成分形成历史、地下水补给来源的化学特征、地下水和土层被污染后的治理以及水的地球化学作用等。它对作为岩土工程环境的水与土

体的固有特征及其变化规律的研究丰富了岩土工程化学的理论。

(3) 近 10 年来,一些研究者运用物理化学、生物化学方法对粘土和岩石的强度和变形性质进行了研究,从岩石的微观结构及其控制因素,岩土矿物的结晶化学结构及规律,岩石的流变、膨胀、收缩等特征,卓有成效地解决了许多岩土工程问题。

4.6 其他方面的成就

石油油井的建设与采油工艺的发展同样推动了岩土工程化学的发展,如油井的固砂技术,堵水不堵油的选择性堵水技术,油井压裂技术,驱油技术,二次采油技术,三次采油技术等一系列采油工艺的发展,更加深了一系列化学物理对岩土作用机理的研究。

经由催化油及电解水等用电化学来强化土壤的技术已被发现非常有用。近 30 年来,在道路工程中,化学方法与技术已在澳洲、欧洲、非洲和亚洲营造出 30 万公里的当地土道路,这种在我国称为“路之宝”的电离子强化剂已在广东、福建、台湾等地逐渐拓展应用开来。其实质是利用离子交换反应将当地土由亲水性改变为疏水性。经路之宝处理的路基土将再也不怕洪水侵袭,退水后道路畅通无阻,美国人称之为 20 世纪伟大发明之一。

还可以举出很多岩土工程化学的例子,例如岩土工程的化学勘探技术,预防和处理钻井过程中一系列复杂的情况(水浸、卡钻、井漏、硫化氢侵蚀等)的物理化学方面的处理技术,铀矿开采的化学地(溶)浸技术,黄金开采的堆浸技术,煤矿开采的井下汽化技术等,还有从化学的角度对岩土工程的环境反应、利用工艺技术开发等都有赖于岩土工程化学的发展。

5 迎接未来的挑战

岩土工程化学是一门实践性很强的应用技术学科。由于岩土工程的复杂多变,单纯的理论计算和试验分析往往解决不了实际问题,因而需要依靠实际的工程地质和工程要求,凭借工程技术人员的经验对关键技术问题进行现场处理。从这个意义上讲岩土工程化学虽然已经形成,但它还是一门不够成熟的技术学科。我们必须有一个明天的战略——建立完善岩土工程化学的理论体系。

(1) 从体制、布局以及力量等方面进行适当的变革和调整,在相当长的一段时间内解决岩土工程化学中

存在的一系列难题,例如低渗透介质中化学灌浆流场的计算理论和方法,从微观结构和微观处理探索岩土本构关系,岩土工程化学的环境反应理论研究的化学途径等待。

(2) 加强岩土工程化学的施工工艺领域的研究,在新材料、新工艺、消除毒害、防污处理、施工控制等特殊专题研究方面实现重大突破。

(3) 全面对岩土工程化学的理论进行整理、深化和验证,建立完善的理论体系,并开展与相邻学科的讨论,以扩大其边界及其在国民经济中的作用。

此外,分子工程在材料科学、特别是高新技术材料的发展中极为重要,分子工程学的研究是探索和发现在岩土工程化学新材料的有效途径。纳米技术和分子器件体现了强烈的分子工程意识。纳米级(10^{-9}m)的微粒结构有可能改变岩石的工程特性(如材料的高渗透性、高强度等)。溶胶-凝胶法是控制纳米粒子聚集的技术。我们期待着这些最新技术扩展到岩土工程中。这无疑需要聚集态物理学、材料学、化学地质工程学等方面的科技工作者携手并进,共同开拓。

参 考 文 献

- 1 熊厚金.地基处理技术·灌浆法.北京:中国环境科学出版社,1996.
- 2 中国科学院广州化学研究所等.化学灌浆技术.北京:水利电力出版社,1984
- 3 杜嘉鸿等.地下建筑注浆简明手册.北京:科学出版社,1992
- 4 韦汉道,熊厚金.全国灌浆技术学术讨论会论文集.广州 1992
- 5 熊厚金主编.国际岩土锚固与灌浆新进展.北京:中国建筑工业出版社,1996
- 6 叶林宏,何泳生,冼安如等.论化灌浆液与被灌岩石的相互作用.岩土工程学报,1994,16(6):47~55
- 7 张良辉,熊厚金,张清.浆液的非稳定渗流过程分析.岩石力学与工程学报,1997,16(6):564~570
- 8 张良辉.岩土灌浆渗流机理与渗流力学:[博士学位论文].北京:北方交通大学,1996
- 9 熊厚金.中国化学灌浆的过去、现在与未来.见:全国灌浆技术学术讨论会论文集.广州,1992
- 10 高学善.漫谈混凝土.北京:中国建筑工业出版社,1985
- 11 土工合成材料工程应用手册编写委员会.土工合成材料工程应用手册.北京:中国建筑工业出版社,1994
- 12 [日]轻量盛土工法.基础工.(特集).1994.10