

岩土工程化学

熊厚金 林天健 李 宁 编著

科学出版社

2001

内 容 简 介

本书基础资料雄厚,是在国内外和作者本人大量研究成果的基础上编纂而成。由于历史上关于化学与岩土工程结合所做出的巨大贡献一直被埋没,未从理论上提炼上升为一门科学,因此,作者撰写本书的宗旨,除了把岩土工程的各行各业、各项分散的、用于岩土工程的化学理论和技术集中整理外,还对岩土工程实践中使用的一些新工艺和新方法进行了总结,尽可能展示岩土工程化学的真正内涵。

本书共 13 章,包括岩土工程化学的理论、岩土微观试验研究、化学灌浆的理论和技术、膨胀土工程化学、岩土工程环境反应的化学研究、水泥石和水泥稳定土研究、土建功能高分子材料与新技术、与化学有关的特殊岩土工程、数值分析方法在岩土工程化学中的应用以及绿色化学与岩土工程等。

本书可供土木建筑部门科研和工程技术人员及大专院校有关师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

岩土工程化学/熊厚金,林天健,李宁编著. —北京:科学出版社,2001

ISBN 7-03-009066-7

I. 岩… II. ①熊…②林…③李… III. 岩土工程—工程化学 IV. TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 81722 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2001 年 6 月第一次印刷 印张:43 1/2

印数:1—1 000 字数:1 005 000

定价:91.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

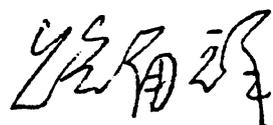
序

近年来,岩土工程的飞跃发展达到了令人惊叹的程度,尤其是沿海城市高耸入云的建筑物、地铁、海底隧道、大型水利枢纽、核电站等超大型工程的兴建,给岩土工程化学的发展带来机遇,提供了契机。岩土工程引入化学原理和方法,研究和改善其结构与受力机理,探索和创造新的结构和工艺类型,以满足工程建设的需要,日益受到有关各界的重视。

多少年来,化学以其巨大的威力在岩土工程中塑造了许多成功的典型实例,并由此而产生了一系列的理论与工艺。由于它的新颖、独特、有效性和工艺的丰富多彩,几乎被用于一切岩土工程,例如地基的处理和加固、大坝整治、二次采油、矿山开采、建筑物纠偏、混凝土构件裂缝的修补、边坡稳定工程、桩基工程处理、地铁和隧道的防渗止水、古建筑保护以及核废料储存等工程。岩土工程化学的迅速发展促进了工程建设的许多方面的创新。古往今来,科学技术的发展,大多数是实践先于理论,但如没有理论的相应发展,实践将会受到一定的制约。事实上,岩土工程化学之所以在漫长的历史中沉寂,直到20世纪才异军突起,显现出它的惊人的威力,正是由于这个原因,科学不在乎表面之新异,而在乎其内在之真实。从这个角度来看,撰写和出版本书,无疑有着十分重要的意义。我相信本书的问世将有助于相关的学科领域和行业获得更高、更深层次的综合、开创和发展。

“科学有无止境的前沿。”探讨科学前沿,研究新的学科分异与在此基础上的综合,总是永不停止的。了解新学科——岩土工程化学的变化和发展,促进岩土工程的创新,无疑具有重大的理论和实际意义。千里之行,始于足下,书此为序,愿与岩土工程各领域的有志之士共勉。

中国科学院院长



前 言

早在遥远的古代,化学就已悄悄地渗透进岩土工程之中,当然,那时的化学和岩土工程都还是很幼稚的,比起今天的规模和水平,可说是小巫见大巫。不过,古代化学与岩土工程结合所做出的成就,大多数就像古代文物被埋葬在历史的陈迹里一样,偶然有一些被考古活动所发掘,就足使现代工程界人士叹为观止,拍案称奇了。我国古建筑掺用糯米浆作为砌块胶结材料和防渗止水材料,埃及金字塔砌块的胶结等都是典型的例子。我国一些古代书籍如魏伯阳的《周易参同契》、葛洪的《抱朴子内外篇》等著作中都有关于胶结剂的制造和使用方法的记载,明代《天工开物》中记载用石灰 1 份加黄土、河砂 2 份、外加糯米、羊桃藤汁拌匀制贮水池等。

令人惋惜的是,历史上关于化学与岩土工程结合所取得的成就绝少记载,更不用说形成一门科学了。在漫长的一段历史时间里,岩土工程化学的产物和成就似乎被人们遗忘了,此情此事,不禁使人扼腕叹息:

前不见古人,
后不见来者。
念天地之悠悠,
独沧然而涕下。

(唐)陈子昂《登幽州台歌》

历史毕竟是公正的。经过了漫长的几个世纪的沉寂,到了 20 世纪,化学已经广泛地被用于岩土工程中,并做出了辉煌的成就。尽管如此,这一系列的理论和技术并未形成系统的学科,各行各业,各行其道,没有意识到把这些用于岩土工程的化学技术纳入岩土工程化学的范畴;而有一些人则把岩土工程化学只看作是化学灌浆;更使人难以理解的是,某些人干脆就把岩土工程化学技术看作是非正统的旁门左道,采取敬而远之的排斥态度。这些不正常的情况引起了一些著名学者和专家的重视,早在 1991 年,中国科学院前院长、国际著名化学家卢嘉锡为首届全国锚固与灌浆会议的题词:刻意进取,创新求实,应用岩土工程化学,发展化学灌浆技术,为我国经济建设服务!1992 年,以中国工程院副院长、两院院士潘家铮为首的 20 位著名岩土工程专家和化学专家又为岩土工程化学技术立项研究向国家计划委员会联合推荐,并对岩土工程化学研究的开展提出了许多创造性的书面建议。这充分说明了岩土工程化学已受到应有的重视,科学园地中,这朵含苞欲放的花正待脱颖而出,为科学、为国家的经济建设贡献更大的力量。

撰写本书的宗旨,除了想把岩土工程的各行各业、各项分散的、用于岩土工程的化学理论和技术集中整理以外,还试图将实践中使用的一些新工艺和新方法进行总结。多年来,身在工程施工现场的工程技术人员们,他们凭借自己的智慧、胆识和历经失败而积累起来的经验,为岩土工程化学提供了丰富的养料和新信息,其中有一些用化学工程方法解

决的疑难工程是用现有理论和传统技术无法解决的,而另一些技术,仅用简单的化学、力学原理就能加以解决。不难看出,这些信息十分宝贵和难得。

在写作本书过程中,作者尽可能展示岩土工程化学的真面目和深刻内涵。当然,这门新学科边界实际上并不明确,大量的课题等待着人们去探索和解决。有幸从事这项专业工作的我们,愿以这本不成熟的作品,献给正在科研工作和工程实践中的千千万万的同行。如果这本书能够在一定的程度上有助于他(她)们的工作,我们就感到欣慰了。

原苏联著名作家巴乌斯托夫斯基在他的名著《金蔷薇》的开篇中叙述了一个动人的故事:法国殖民军的一个士兵沙梅因患病被遣送回国,团长托他将八岁的女儿苏姗娜带回国。沙梅十分同情这个孤苦而善良的少女,希望她得到一些生活的欢乐。在他当巴黎清洁工的生涯中,把每天从手工艺作坊扫出的垃圾尘土收集在一起,从中筛出微量的金屑。他每天深夜辛勤劳动,日积月累,年复一年,最后积成可打造成一小块金锭的金屑并铸成一朵苏姗娜渴望的金蔷薇,但那时苏姗娜已从巴黎去了美国,一去不复返。贫病衰老的沙梅终日面对墙沉默着,终于在失望中悄悄死去。我们,文学作家和科技工作者,用几十年的时间来寻觅真理的金屑——这些无数的细沙,不知不觉地收集、积累、熔炼、制造成自己的金蔷薇——文艺或科学作品。

“恰如这个老清洁工的金蔷薇是为了预祝苏姗娜幸福而做的一样,我们的作品是为了预祝大地的美丽、祖国的富强,为幸福、欢乐、自由而战斗的号召、人类心胸的开阔以及理智的力量战胜黑暗,如同永世不没的太阳一般光辉灿烂”。

此时此刻我们怎能忘记,今天的成果是几代人的心血结晶,是时代造就和先辈关怀支持的结果。

——一代大师叶作舟教授是我国化学灌浆材料与工艺研究的开拓者和奠基人,他为此而艰辛探索、操劳一生,以年逾花甲之身在黄河的龙头——龙羊峡工地写下了壮丽的诗篇……,是他带领我们于1965年5月13日在北京向国家领导人汇报我们的试验成果,并受到了茅以升、张光斗、柳大纲等老一辈学者的赞誉,国家科委韩光主任称是“雪中送炭”;

——我们敬爱的周总理和国家计委与国家科委的领导人,多次关心过问,使我们从实验室跃上了主战场,一群年轻的科技人员提枪上阵、金戈铁马,将科研成果转变为工艺技术,进而转化成社会生产力;

——1958年3月,在成都召开的中央会议上,通过了“关于三峡水利枢纽和长江流域规划的意见”的决定,以著名的岩土力学专家陈宗基为首的“三峡岩基专题研究组”提出了深覆盖层防渗补强和坝体混凝土裂隙加固补强灌浆两大课题;

——1965年向西南铁路各级领导作汇报表演;同年8月,铁道部建议由中国科学院广州化学研究所成立化学防水战斗组的决定;铁道部部长吕正操、铁道兵司令员郭维城多次到我们的施工现场指导工作;

——1965年9月,中国科学院副院长张劲夫来广州亲自到试验车间指导工作,并于1967年3月10日在成都主持了西南工作会议;

——1988年9月14日国家科委主任宋健在人民大会堂亲授给作者熊厚金“优秀科技实业家”银奖。

数十年如一日,成果卓著。今天,我们又得到了中国科学院院长路甬祥教授的关怀,欣然为本书作序。中国科学院领导郭传杰教授给予了大力的支持与帮助,这一切的一切,

使我们感到非常荣幸,激动不已。

本书除第 12 章系由西安理工大学岩土工程研究所李宁撰写外,其余各章均由熊厚金和林天健二人编写。在本书编写过程中,还得到卢肇钧、曾国熙、周维垣、张在明、蒋硕忠等教授的帮助与支持,作者谨表示深切的谢意。本书吸收了许多科研、教学、生产单位的研究成果,除书后所列参考文献外,还参阅了其他一些研究报告,在此一并表示感谢。

限于水平和认识的局限性,不当或谬误之处,敬请读者及时给予指正。

编著者

目 录

序 前 言

第 1 章 绪 论	1
1.1 引 言	1
1.2 岩土工程化学的框架	1
1.3 默默无闻的 100 年	3
1.4 迎接未来的挑战	6
参考文献	7
第 2 章 岩土工程化学的理论基础	8
2.1 引 言	8
2.2 岩土工程化学的理论基础	8
2.2.1 岩石力学	8
2.2.2 土力学	9
2.2.3 工程地质学	9
2.2.4 岩土工程学	10
2.2.5 化学	11
2.3 理论总结的重要现实意义	14
2.4 岩土工程化学基本理论概述	14
2.4.1 与岩土工程有关的基本物理作用和化学作用	14
2.4.2 岩土工程化学基本理论与原理	20
参考文献	24
第 3 章 岩土工程性质的微观试验研究	26
3.1 简单的历史回顾	26
3.2 软土和软弱夹层的成因与结构性的物理化学研究	27
3.2.1 软土和软弱夹层的成因	27
3.2.2 软土和岩石的微结构及其结构性的物理化学研究	37
3.3 岩土微观试验研究的方法与设备	57
3.3.1 电子显微镜观测和透射电镜复型法研究	57
3.3.2 X 射线衍射分析	59
3.3.3 数字图像处理技术	61
3.3.4 差热分析	62
3.3.5 负孔隙水压力量测技术	63
3.3.6 仿真技术	68
参考文献	69
第 4 章 化学灌浆通论	71

4.1	岩土灌浆渗流机理	71
4.1.1	二维粗糙裂隙中的浆体流动	71
4.1.2	化学浆液对黏土渗透性能的影响	79
4.1.3	悬浊型浆液在岩土中的渗流	81
4.1.4	浆液在低渗透介质中的渗透规律	85
4.2	高压灌浆力学机理	87
4.2.1	高压喷射灌浆的主要特征	88
4.2.2	高压喷射灌浆加固机理	93
4.2.3	高压喷射灌浆的固化机理	110
4.3	灌浆加固原理	113
4.3.1	渗透灌浆	114
4.3.2	压密灌浆	115
4.3.3	充填灌浆	117
4.3.4	劈裂灌浆	119
4.3.5	强制灌浆	142
4.3.6	电动化学灌浆	142
4.4	灌浆材料的分析与评价	146
4.4.1	灌浆设计中对灌浆材料的考虑	147
4.4.2	水泥类化学灌浆材料	150
4.4.3	有机高分子灌浆材料	206
4.4.4	其他类型浆材	261
4.4.5	填料	262
4.5	灌浆材料的改性	264
4.5.1	水玻璃浆材的改性	264
4.5.2	脲醛树脂浆材的改性	264
4.5.3	丙烯酰胺浆材的改性	270
4.5.4	聚氨酯浆材的改性	271
4.5.5	环氧树脂浆材的改性	271
4.5.6	甲基丙烯酸甲酯浆材的改性	285
4.5.7	丙烯酸盐类浆材的改性	287
4.5.8	木质素类浆材的改性	288
4.6	有机高分子复合化学灌浆材料	288
4.7	灌浆新工艺的研究	292
4.7.1	双管胀圈式灌浆管	292
4.7.2	化学灌浆的定量法和定时法	292
4.7.3	诱导灌浆技术	293
4.7.4	储能复合灌浆技术	296
4.7.5	布袋灌浆技术	297
4.7.6	利用三元灌浆计进行灌浆控制	299

4.7.7	信息监控群孔灌浆法	300
4.7.8	“以水顶浆”法灌浆工艺	301
4.7.9	综合灌浆法	302
4.7.10	高压灌浆技术	303
4.7.11	灌浆新工艺的发展趋向	305
4.8	灌浆添加剂的研究与开发	308
4.8.1	添加剂的选择和使用原则	310
4.8.2	灌浆添加剂的发展和展望	324
4.9	国内外的灌浆新工艺	325
4.9.1	袖阀管灌浆法	325
4.9.2	双重管钻杆法(DDS 法、LAG 法、MT 法)	327
4.9.3	高压喷射灌浆	329
4.9.4	有效灌入法灌浆工艺	329
4.9.5	位差压力灌浆工艺	331
4.9.6	干水泥灌浆法工艺	331
4.9.7	黏土无压灌浆工艺	333
4.9.8	预应力高压灌浆工艺	335
4.9.9	爆破灌浆技术	337
4.9.10	高压旋喷桩的单管分喷施工法	338
4.9.11	无孔灌浆法工艺	339
4.10	化学灌浆主要技术参数的工程计算	340
4.10.1	浆液扩散半径计算和确定	340
4.10.2	关于灌浆压力的分析和确定	348
4.10.3	灌浆量的计算	359
4.10.4	灌浆历时	363
4.10.5	胶凝时间的设计	364
	参考文献	365
第 5 章	化学灌浆理论综述	369
5.1	非饱和土的灌浆理论	369
5.1.1	灌浆设计中非饱和土的考虑	369
5.1.2	非饱和土灌浆原理	371
5.1.3	非饱和土灌浆工程实例	376
5.2	用“灌浆强度值”方法设计和控制灌浆工程	379
5.2.1	涉及的理论和预备知识	379
5.2.2	GIN 方法的要点	380
5.2.3	应用 GIN 方法灌浆工程实例	381
5.3	灌浆施工控制理论	382
5.3.1	灌浆施工控制的理论基础	384
5.4	电渗固结及电动化学灌浆加固理论	391

5.4.1	电渗的基本规律	391
5.4.2	软黏土电硅化加固的基本原理	396
5.4.3	软土电渗处理工程实例	403
5.5	灌浆效应理论	405
5.5.1	灌浆效应理论的物理基础	405
5.5.2	灌浆效应的显现	422
5.6	灌浆流变理论	422
5.6.1	灌浆流变理论定理(原理)系统	424
5.6.2	灌浆工程实践中某些典型的流变表现	430
5.7	灌浆的离子交换理论	436
5.8	灌浆的湿面黏接理论	439
5.9	灌浆效果耐久性理论	440
5.9.1	灌浆效果耐久性通论	440
5.9.2	获得浆材(准确地说是灌浆效果)耐久性的原则	442
5.9.3	对几种主要化学浆材耐久性的评述	443
	参考文献.....	447
第 6 章	膨胀土工程化学	450
6.1	膨胀土的矿物成分和化学成分	450
6.2	膨胀土中黏土矿物的化学特性	452
6.3	膨胀土中的其他物质	453
6.4	膨胀土中的物理-化学活动	454
6.5	膨胀土化学加固的原理	456
6.6	硫酸盐渍土的盐胀机理	457
6.7	膨胀土物理化学反应的数学表述	461
6.8	有关膨胀土桩基的化学问题	468
6.8.1	设计中的考虑	468
6.8.2	地基胀缩变形对桩基工作状态的影响	469
	参考文献.....	472
第 7 章	岩土工程中工程环境反应的化学研究	473
7.1	环境和人类	473
7.1.1	岩土工程施工中使用化学方法所导致的环境问题	473
7.1.2	环境效应的防治和利用	475
7.2	施工过程中的环境污染	476
7.3	工程使用期间的环境污染	476
7.4	人类健康与化学元素	479
7.5	岩土工程化学研究中的毒理学问题	480
7.5.1	岩土工程化学毒理学的基本理论	480
7.5.2	几种主要化学材料的毒性	481
7.6	岩土本构关系研究的化学途径	493

7.6.1	岩石本构关系的困惑	493
7.6.2	运用物理-化学观点研究控制岩土强度与变形性能的基本因素	495
7.7	水质污染化学	498
7.7.1	水的形态和性质	498
7.7.2	地下水补给来源的化学特征	499
7.7.3	化学灌浆对环境水质的影响	499
7.7.4	水的污染及其防治	500
7.7.5	解决水质污染的绿色化学途径	501
	参考文献	501
第 8 章	水泥土和水泥稳定土	502
8.1	水泥土	502
8.1.1	水泥土的固化原理	502
8.1.2	水泥土的工程性质	507
8.2	水泥稳定土	515
8.2.1	水泥稳定土的固化原理	515
8.2.2	水泥稳定土的工程性质	516
8.3	关于水泥土和水泥稳定土的综合评述	518
8.3.1	表征水泥土和水泥稳定土的工程性质的某些特征参数	518
8.3.2	关于水泥土和水泥稳定土的综合评述	520
8.4	水泥土及水泥稳定土的工程实例	522
	参考文献	524
第 9 章	土建功能高分子材料与新技术	525
9.1	应用得最早和最广泛的土建功能高分子材料——水泥混凝土	525
9.2	高聚物在土建工程中的应用	527
9.3	高性能混凝土复合技术	533
9.3.1	高性能混凝土	534
9.3.2	高效减水剂	535
9.3.3	高性能混凝土的微观结构	539
9.4	混凝土聚合物复合技术	542
9.4.1	高聚物的物理、力学状态	542
9.4.2	高聚物材料和混凝土聚合物复合材料的分类	543
9.4.3	混凝土聚合物复合材料的形成机理	545
9.5	高性能混凝土和混凝土聚合物复合材料应用的潜力与风险	548
9.5.1	关于脆性和收缩的改善	549
9.5.2	关于高性能混凝土和混凝土聚合物复合材料耐久性的讨论	551
9.6	对特种混凝土的新的应用领域的探索	553
9.6.1	纤维增强混凝土(FRC)	553
9.6.2	FS-1 浸透型混凝土保护液的开发研究与应用	563
9.6.3	对未来社会与混凝土若干问题的探索	568

9.7	高聚物土工复合技术	571
9.7.1	土工织物	571
9.7.2	轻质填土材料	576
9.7.3	塑料排水板	579
9.8	环境材料	581
9.8.1	环境材料的内涵	581
9.8.2	土建工程材料的再生循环	581
9.9	高分子化学灌浆材料	586
9.9.1	高分子化学灌浆材料的特点	586
9.9.2	高分子化学灌浆材料的一般使用方法	586
9.9.3	成就与发展前景	587
	参考文献	588
第 10 章	与化学有关的特殊岩土工程	589
10.1	伊拉克拜社仕坝址的特殊坝基条件及其处理	589
10.2	灭蚁毒剂与灌浆材料的中和反应降低了毒效问题的探索解决	589
10.3	盐渍土地层的地基环境处理	590
10.4	矿渣黄土水化与硬化的机理	592
10.4.1	矿渣黄土的水解和水化反应	592
10.4.2	水化物质的凝结与硬化	594
10.5	静破碎技术及化学软化剂的应用	594
10.6	固壁泥浆受水泥污染的对策	596
10.7	硫酸根离子污染地基的处理	597
10.7.1	硫酸根离子腐蚀机理	598
10.7.2	污染地基处理	599
10.8	土工织物滤层化学淤堵的机理及其防治	601
10.8.1	土工织物化学淤堵机理	601
10.8.2	关于无纺土工织物化学淤堵的试验研究结论	602
10.9	海水对水泥土的侵蚀及其对策	603
10.9.1	海水对水泥土的侵蚀作用	603
10.9.2	海水对水泥土侵蚀的防治	604
10.10	石灰桩桩体材料的选用	605
10.10.1	有关石灰桩加固软土的化学问题	605
10.10.2	关于石灰桩桩体材料选用的若干经验规律	607
10.10.3	生石灰的化学加固作用	607
10.11	泥炭土及泥炭质土地基的处理	609
10.11.1	泥炭分类	610
10.11.2	泥炭地基物理化学特征	610
10.11.3	泥炭土地基处理的化学途径	611
10.12	混凝土碱-骨料反应及其对工程的危害	615

参考文献	615
第 11 章 岩土工程的化学破坏	616
11.1 化学反应侵蚀分类	616
11.1.1 混凝土的化学反应侵蚀	616
11.1.2 混凝土的碱-骨料反应损坏	629
11.1.3 岩土体的化学反应侵蚀	632
11.1.4 岩土工程中钢构件的化学腐蚀	635
11.1.5 岩土工程中高分子聚合物的化学腐蚀	640
11.2 岩土工程的化学破坏理论	641
11.2.1 岩土工程的化学破坏理论的定理系统	641
11.2.2 岩土工程中化学破坏的若干典型实例	650
参考文献	652
第 12 章 数值分析方法在岩土工程化学中的应用	653
12.1 化学胶结作用的数值模拟分析方法	653
12.2 灌浆对岩土介质变形性质的影响	654
12.3 灌浆对岩土介质强度性质的影响	655
12.4 灌浆对岩土介质损伤性质的影响	656
12.4.1 实际岩体中损伤张量的确定	657
12.4.2 损伤张量的室内试验确定	658
12.4.3 灌浆对损伤张量的影响	659
12.4.4 灌浆后岩体的损伤力学数值分析思路与方法	660
12.5 灌浆对岩土介质渗透性质的影响	661
12.5.1 渗流作用下裂隙岩土体的损伤特性与描述	661
12.5.2 裂隙渗透张量随岩体损伤断裂与灌浆作用的演化	663
12.6 土工织物仿真模型	665
12.6.1 薄层单元模型	665
12.6.2 接触单元模型	666
12.6.3 软基上土工网的拉力计算问题	668
12.6.4 填筑体的抗滑稳定验算问题	668
参考文献	670
第 13 章 绿色化学与岩土工程	671
13.1 绿色化学定义和意义	671
13.2 岩土工程施工的绿色过程	672
13.2.1 关于岩土工程中的绿色化学若干原理及其评述	672
13.2.2 岩土工程化学领域中开发的绿色化学反应和绿色工艺	674
13.2.3 绿色化学在岩土工程中的发展前景	675
13.3 绿色化学的启迪	675
参考文献	677
作者简介	678

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

在现代工程建设的有关理论与实践,早已广泛地引用着现代化学的研究成果和成就,岩土工程自然也不例外。化学对岩土工程领域的渗透,特别是高分子化学对岩土工程的渗透,打破了力学和地质学在岩土工程科学早期发展中的垄断地位。就好比肥料一样,化学给岩土工程科学注入了新的养分,防止和避免了学科的僵化。化学被应用于岩土工程的例子是相当普遍的,也是工程界最熟悉的。最典型的例子是被称为人工石的水泥混凝土——硅酸盐化学^[1]。可以说,现代城市建设、现代岩土工程建设是由硅酸盐化学工程构成的,混凝土工程构成了多姿多彩的大千世界,组成了人类社会的物质文明,是现代岩土工程的基础。可以举出很多关于化学被应用于岩土工程的其他例子,例如岩土工程的化学加固技术、化学防水技术以及化学勘探技术,铀矿开采的化学溶浸和地浸技术,金矿开采的堆浸技术,煤矿开采的井下气化技术,石油油井的化学增油技术以及土工聚合物的应用等;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……的解释和处理,岩土流变问题的化学解释与分析等。正如数学对力学的深远影响和密切关系那样,化学对岩土工程科学也产生了越来越大的影响。

但是,十分遗憾的是,上述在岩土工程实践中应用现代化学成就的一系列技术与观点,由于种种客观上的原因并未形成系统的理论或学科,这种状况在一定程度上限制了化学在岩土工程科学领域中的潜力发挥。中国科学院院长卢嘉锡先生在给 1991 年全国灌浆学术会议的题词中第一次提出“岩土工程化学”的学科的涵义,对这门学科的形成和创立提出了希望。科学的发展需要概念的更新,作为数十年从事这门尚未形成和被定名的学科的科学工作者,作者曾从各种途径报道和宣传了有关这方面的信息,特别是已有成果及其在工程建设中的作用,这些工作促进了岩土工程化学学科的建立和发展。作者真诚地希望有更多的同行拿起笔来撰写这方面的文章,使“岩土工程化学”这朵富有生命力的含苞欲放的花蕾早日绽开,为祖国的科学增添光彩。

1.2 岩土工程化学的框架

多少年来,尽管在岩土工程的实践中,人们以各种各样的方式应用化学的原理和成果,但并没有意识到他们是在促成一门新兴边缘学科的诞生。直到最近,岩土工程中大量疑难问题借助于化学获得解决,一向为工业专宠的化学骄子,才开始向一个新的领域渗透,并在许多科研和工程项目中显示了它的影响和威力,事实使得人们不得不对它“刮目相看”。正如巴甫洛夫所说:“我们达到了更高的水平,看到了更广阔的天地,见到了原先

在视野之外的东西”,单项的具体的实际问题的解决已不能适应形势,同时,理论研究成果和经验的积累已为这一门学科的建立创造了条件,本节叙述的就是这方面的内容。我们将在篇幅许可的条件下阐明“岩土工程化学”的内涵,它的定义和方法,以及迄今为止关于这门学科我们知道了些什么?有待探索和开发整理的又有些什么?

“岩土工程化学”,顾名思义,研究和讨论的对象是与岩土工程有关的化学问题;准确地说,它是指应用于岩土工程中的化学理论、工艺和材料知识的综合。换句话说,它研究的对象是如何应用化学的原理和方法来解决有关的岩土工程问题,如岩石的化学加固、改良与改性、防水以及岩土工程中的化学工程问题。但即使在阐述化学问题,它的陈述方式和重点也明显地与一般化学不同,例如,在化学中对常见的一些化学作用,如氧化还原作用、催化、螯合、络合作用、聚电解质作用和离子交换作用的理论被引用于岩土工程化学中时,我们更关心的是这些作用在岩土工程的环境条件下的响应和效果以及如何利用这些响应和效果。

一般地说,要从如下几个方面构成岩土工程化学这门学科的框架:

(1) 岩土工程中工程环境反应的化学研究。这是岩土工程化学理论部分的主要内容,它将从化学的角度去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。例如岩土本构关系研究的化学途径、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的机理解释、岩土流变现象的化学研究、核废液固化技术的理论探讨、地层中的酸性地基土对灌浆效果影响的理论解释等。

(2) 岩土工程所使用化学材料的新材料开发与新工艺研究。这一部分内容过去在有关的论文和专著中已有较多的研究和报道,内容十分丰富,包括关于材料的特性、制造工艺、改性方法、防污处理、新材料开发、耐久性的改善、防毒工艺和措施、各种添加剂的寻找和试用等。

(3) 土建功能高分子材料与新技术研究。土建功能高分子材料是一种新开发的具有特殊多样的功能的高分子材料,这种功能材料充分地体现了岩土工程化学的巨大威力,它使现代建筑大大有别于旧式的传统建筑,具备更加优异的技术经济效果和更舒适的生活和工作环境,以满足现代人的需要,这一部分内容只有在岩土工程化学发展的现代水平基础上才有条件达到今日的规模。

(4) 岩土工程性质的微观试验研究。此项研究包括软土和软弱夹层的成因和结构性的化学研究,地下水作用下岩石的化学变化的研究,岩石化学风化作用的机理研究、特殊土类(膨胀土、分散土等)的化学分析及其处理方法等。

(5) 与化学有关的特殊岩土工程。这一方面主要是阐述和探索利用现代化学理论与技术来处理一些特殊岩土工程的理论、方法与实践,例如泥炭土与沼泽地的地基处理、膨胀土地区岩土工程的施工、油母页岩地基中的桩基设计与施工等。这一部分内容要有开拓性,充分显示出这些特殊岩土工程的化学特色。在这一点上,作者十分赞赏世界拱坝大师关纳(Andre Coyne)的作法和创新精神,关纳的创造性,对自然世界和物质世界的洞察能力使得他的设计思路和概念十分新奇,他提出的挑流式溢洪道、振弦、锚墙等是创新的典型成果,他探索修建最薄的坝,把拱坝应用于宽河谷,首创在拱坝中使用多拱结构等。今天,我们在岩土工程化学的创建和发展中应该可以从关纳的设计思想中获得珍贵的启迪。

1.3 默默无闻的 100 年

我们姑且把现代散见于工程实践及科研工作的一些与岩土工程有关的化学成就和方法或概念,笼统地称为“岩土工程化学”,和别的技术学科一样,它的形成、发展和公认都依赖于工程实践,并反过来对工程实践起作用。

难以用一两页纸的篇幅全面描述岩土工程化学的发展现状,作为一种“掠影”式的介绍,我们列举一些有代表性的成就和事件。

1. 水电工程大坝坝肩与坝基的加固与防渗灌浆处理

这是岩土工程化学最先开辟和大显身手的战场,尽管灌浆技术的问世,迄今已有两个世纪的历史,但化学灌浆的历史却是从 20 世纪初开始的,已默默走过 100 年。我国在 20 世纪 60 年代开始了有机高分子化学灌浆材料的研究和结合工程的实验和试用。在随后的 30 年中,我国在化学灌浆的工程实践特别是水利水电工程方面的实践,是世界各国望尘莫及的。以三峡工程的灌浆研究开始的 10 多个大型水利水电工程,以及铁道、冶金、煤炭、建筑系统有关工程的理论探索和实践,大大地丰富了岩土工程化学的内涵和成就。化学灌浆技术是岩土工程化学的一个重要方面,它的进展大大地推动了岩土工程化学的形成和发展。这方面的主要成就可以举出:

理论方面——各种类型灌浆的机理、灌浆加固与防渗结构与优化设计原理。如化学灌浆与其他防渗加固方法联合使用的协同工作原理,灌浆施工控制理论,提高灌浆效果外掺剂理论,灌浆复合地基理论以及化学灌浆的环境效应理论等。理论研究的辉煌成就是许多高难度的灌浆工程取得成功的基础。

工程实践方面——在施工技术方面取得了许多突破性的成就。例如低渗透性软土层的施灌技术,储能复合灌浆技术,化学灌浆加固纠偏技术,高压喷射灌浆技术,以及袖阀管法和胀圈式灌浆管法灌浆技术等,在应用这些施工工艺的基础上,完成了巨大数量的灌浆工程量,仅水利水电工程方面即可举出丹江口大坝 3 000m 化学灌浆帷幕,凤滩大坝 2 000m 化学灌浆段,青铜峡混凝土大坝有水缝的处理,葛洲坝 1 500m 施工缝的化学灌浆止水。此外,刘家峡、大化、二滩、陈村、龙羊峡等水利枢纽的化学灌浆工程量都是十分巨大的。正是这些巨大规模的工程实践基础、这种世界各国少见的巨大工作量、多样的类型、复杂的对象为化学灌浆技术研究与新工艺、新材料的开发提供了科学依据与技术启迪。

同样,类似在水利水电工程领域中的成就在铁道、采矿、交通,特别是建筑工程领域中也有卓越的表现,而且具有其各自的风格和特点。这个领域中的独特成就,如桩基的化学灌浆处理与大型混凝土构件的增强加固,文物与古建筑物的修复,倾斜高层建筑物的化学灌浆纠偏等化学处理技术。

2. 构成文明世界的物质支柱——混凝土化学^[1,2]

目前大量应用的由硅酸盐水泥、砂、水、石子及必要的外加剂或掺和料配制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凝能力的材料将碎片或固体

物料块胶结成具有力学强度的整体都称为混凝土,于是就有黏土混凝土、石膏混凝土、石灰混凝土、沥青混凝土、聚合物混凝土、硫磺混凝土、普通混凝土等等,它们含有不同的胶凝材料并构成品种繁多、性能各异的混凝土王国。

从古老的黏土混凝土发展到现代普通混凝土经历了几千年的演变过程。我国在新石器时代就用石灰掺黏土作建筑物地基;在西安半坡博物馆陈列了一块已有 4 000 多年历史的石灰板;在公元前 2 000 多年开始修建举世闻名的万里长城,大量采用了以石灰作胶凝材料,加入砂、黏土配制的石灰混凝土(俗称三合土)。而现代混凝土是由波特兰水泥的发明(1824 年获得专利)开始的。目前,世界上生产的水泥约有 100 余种,各种外加剂 600 余种,在 20 世纪末每年消耗的混凝土将达到 150 亿~170 亿吨。世界无处不有混凝土,不难想象,如果没有混凝土,今日世界将会是什么样子,它的辉煌成就涉及世界的各个方面。现举例说明:

现代混凝土技术的发展,归纳起来,可分为以下几个阶段:① 初期的大流动性混凝土;② 塑性混凝土;③ 由于机械设备的改进,发展成半硬性干硬性混凝土;④ 新的高效减水剂出现,发展了流体混凝土;⑤ 由于高分子材料工业的飞速发展使混凝土技术水平得到很大提高,又发展为今天的高强度、高性能混凝土,混凝土技术已进入高科技行列。其表现为:

(1) 特种水泥,如球状水泥、调粒水泥、活化水泥、超细水泥、微膨胀水泥等的问世和应用。这些水泥比普通水泥的流动性大,如果流动性相同,则可减少用水量,降低水灰比,提高强度。

(2) 高性能混凝土的提出和问世。目前在国际上使用抗压强度在 100~150 MPa 的高性能混凝土已很普遍,强度可达 400 MPa 的高强度混凝土的研制成功,耐久性可达 500 年以上的混凝土的研制,其主要特征和要求是高的强度、高的抗渗性、高的工作性能、体积稳定性,这些成就使混凝土的性能设计和控制达到了更高的水平。

(3) 各种高效减水剂的出现,以及利用矿渣、粉煤灰、天然沸石等制造超细粉和硅粉等,对改善和提高混凝土的性能起着重要的作用,成为高性能混凝土不可缺少的组分。在施工技术方面,各种新型搅拌设备,自动监测和检测设备,计算机的应用等高新技术可准确地预测最终强度,保证混凝土在搅拌、运输和施工中呈高流态,泵送后的混凝土可自流平与自密实。换句话说,高性能混凝土可以按照材料科学的方法,进行设计和施工。

(4) 混凝土中碱-骨料反应问题是 T. E. Staton 于 1940 年首先报道的^[3],它是混凝土的一个自身腐蚀反应问题,是混凝土建筑物的头号“杀手”。这种碱-骨料界面间产生的化学反应是一种恶性反应,它导致某些岩石骨料中活性 SiO_2 的溶解,生成碱-硅络合物,在界面上产生膨胀力,导致混凝土开裂而失去整体性。我国自 20 世纪 50 年代初期开始结合三峡大坝、丹江口大坝等工程开展碱-骨料反应研究,将近半个世纪以来,探讨了碱-骨料反应机理和膨胀机理,提出了有效的抑制措施,解决了国内外 48 个工程的碱-骨料反应问题。我国学者徐华荣等的三篇有关论文曾分别收入国际会议的论文集中。刘崇熙研究了碱-骨料反应机制、膨胀开裂的历程和突变机制以及膨胀的渗透压力形成规律、反应产物的微结构和最终引起混凝土全面大腐蚀的结局,他应邀在法国工作期间提出的《碱-骨料反应体系研究的贡献及应用于中国三斗坪大坝》论文集获得了法国巴黎高等矿业学院和居里大学的博士学位。

3. 土工合成材料在岩土工程中的应用

这是 20 世纪最后 20 年来开发的一门新技术,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各种类型产品,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,即土工织物和超轻量的填土材料,号称土工领域的两场新技术革命。土工织物技术自从 20 世纪 70 年代被引进以来,已在水利、建筑、铁路等 10 多个产业部门兴建的 5 000 多项工程中应用并取得良好的效果。有关土工合成材料的作用机理、设计计算原理和方法等理论研究也取得了很有实用意义的结果。该项材料及技术的多功能的优点及其已有的实践历史,为岩土工程化学的发展和成长提供了丰富的“养料”。而超轻量填土材料是一种硬质聚苯乙烯泡沫材料(EPS)。它主要作为桥台和挡土墙背面或箱涵上面的填土材料,以减少地基沉降,减轻作用于结构物的土压、侧向流动压力及结构物的位移。该项技术于 1972 年在挪威的一座大桥的引桥改造工程中得到应用后,瑞典、法国、日本也先后对 EPS 轻量填土进行了广泛的研究,在处理软弱地基方面得到了满意的效果。随着我国沿海地区高速公路的建设,该项技术必将在我国得到发展。土工合成材料技术中关于合成材料的蠕变、老化和其他性能的研究,如支挡结构的计算模型和理论,防冻结构设计理论,深基坑开挖中的土工合成材料应用技术,以及一些才开发的新工艺和新材料等都是岩土工程化学中很有特色的一部分内容。

4. 新材料研制是岩土工程化学的卓有成效的又一个分支

新材料的研制可说是名副其实的百花齐放,从无机建筑材料到有机高分子化合物,新品种层出不穷,仅以化学灌浆材料来说,它只是岩土工程化学新材料研制领域中的一个分支,其“战绩”已达到令人惊叹的地步。如水玻璃这样一种常用的化学灌浆材料,常用的配方就有 100 多种,我国研制了一些水玻璃改性浆材以改善水玻璃浆液胶凝时间不易调节、强度低、耐久性差的缺点。对于高分子化学灌浆材料,我国在 20 世纪后半世纪研制开发的新品种就有:脲醛树脂类、丙烯酰胺类、聚氨酯类、环氧树脂类、甲基丙烯酸甲酯类、丙烯酸盐类、木质素类、单宁类等数十种化学灌浆材料,其中特别是具有高渗透性的中化-798 的研制,我国除注意了浆液的可灌性和胶凝后的防渗和补强性能外,还特别注意了浆材的耐久性和毒性的研究,这些具有较大深度和难度的研究所取得的成果大大地丰富了岩土工程化学的内涵。

5. 岩土工程化学理论基础的加强及邻近学科的发展^[4]

20 世纪后半世纪以来,基础理论学科由于材料与工程科学的迅速发展和带动,进展迅速。与岩土工程和化学有关的一些基础理论由于学科之间的互相渗透,无形中为岩土工程化学前身的各种分支科学和技术起着联系和集于一体的桥梁作用。另一方面,基础理论的发展,又进一步将刚形成体系的岩土工程化学推向新的水平。与此同时,与岩土工程化学相邻的一些学科,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地渗透和被引进岩土工程化学中。

在基础理论科学与岩土工程化学的邻近学科的成就及其对岩土工程化学的影响方

面,显然难以用短短的篇幅来阐述,这里略举数例以见一斑。

(1) 化学地理学借助对地表化学元素迁移过程的研究揭露了复杂的进行于土层和风化壳中的化学过程,因而岩土工程分析和计算的纯物理力学模式应当有所改变,在岩土工程实践中,能够而且应该把阐明和研究工程过程的化学方面的分析提高到应有的高度上。

(2) 水文地球化学的形成是在 20 世纪 50 年代,这门新兴的边缘学科与岩土工程化学关系密切,它的基础理论研究包括水的结构和性质,形成或改变地下水的物理化学作用,地下水的化学成分的形成历史,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。水文地球化学对作为岩土工程环境或材料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,促进了该学科的发展。

(3) 在 20 世纪 50 年代,经由催化油及电解水等用电子化学来强化土壤的技术已被发现非常有用。

(4) 20 世纪最后 30 年来,道路工程化学已默默无闻地在大洋洲、欧洲、美洲、非洲和亚洲营造出 30 余万公里的当地土道路,这种在我国称之为“路之宝”电离子土壤强化剂,已在广东、福建、台湾等地逐渐拓展应用开来。其本质是利用化学电离子交换将当地土由亲水性改为憎水性。经“路之宝”处理的路基土将再也不怕洪水侵袭,退水后道路通畅无阻,美国人称此为 20 世纪伟大发明之一。

(5) 近 10 多年来,一些研究者运用物理化学观点对黏土类的土和岩石的强度与变形性能的本质进行了研究,其内容包括岩土矿物的结晶化学结构及其规律,岩土的微结构及其控制因素、岩土的结构等,这些研究改变了过去单纯从力学途径去研究和解释岩石的变形和破坏机理的作法,全面运用物理、化学、力学的观点,成功地解释了诸如压缩、剪切、流变、长期强度、触变、膨胀及收缩等岩土特性,成功地解决了许多岩土工程问题。

(6) 岩土工程施工实践中涌现了许多新的具有特色的物理-化学方法,这些方法易于实施,行之有效。例如预防和治理钻井过程中一系列复杂情况(水浸、卡钻、井漏、硫化氢侵蚀等),过去只采用工艺方法,而现在已提出和应用了物理-化学方法,对这种方法的研究进展很快,并在工程实践中获得极好的效果。

100 年过去,弹指一挥间,岩土工程化学经历了漫长的形成过程,终于脱颖而出,成为一门独立的新兴边缘学科,它以许多新的成就和多功能的特点正为国民经济建设做出巨大的贡献。

1.4 迎接未来的挑战

从发展战略的角度来看,岩土工程化学的基础理论系统研究显然不够,理论体系也未充实。未来 21 世纪的形势将是严峻的,岩土工程化学将要承受来自多方面的挑战,它主要包括三个方面的内容:应付战争(对侵略者),应付斗争(对大自然)和应付竞争(对国际国内市场)。针对这三个应付,作者认为,岩土工程化学这门科学或行业应本着“立足现实国情,抓住发展机遇,迎接严峻挑战”的原则,而向经济建设的大方向发展。有关领导部门在安排该门学科的发展计划时应着重抓几项工作。

(1) 从体制、布局以及力量等方面进行适当的变革或调整,在相当一段时间内解决当前岩土工程化学领域存在的一系列难题。例如低渗透介质中化学灌浆渗流场计算理论的

建立,从微观结构和热处理化学途径探索岩土本构关系的理论和方法的研究,岩土工程环境反应理论研究的化学途径等等。

(2) 加强岩土工程化学施工工艺领域的研究,在新材料、新工艺开发,消除毒害与防污染处理,施工控制理论等特殊专题研究方面实现重大的突破。

(3) 全面地对岩土工程化学理论进行整理、深化、系统化和验证,建立完善的理论体系,并开展与相邻学科交界边缘地区的专题研究,以扩大岩土工程化学学科边界及其在经济建设和国防建设的作用。

(4) 分子科学在材料科学特别是高新技术材料的发展中是极为重要的,也是在岩土工程化学中探索和发现新材料的有效途径。分析人士普遍认为,纳米技术将是21世纪新产品诞生的源泉。纳米技术和分子元件体现了强烈的分子工程意识。溶胶-凝胶法是控制纳米粒子聚焦的技术。因此,通过纳米技术改变灌浆材料的渗透性和聚集态,使岩土获得优异的工程特性。这是十分诱人的课题,还需要工程界和化学界的科技工作者共同来开拓。

参 考 文 献

- [1] 高学善,漫谈混凝土,中国建筑工业出版社,1985年11月。
- [2] 张云理、卞保芝编,混凝土外加剂产品及应用手册,中国铁道出版社,1994年12月。
- [3] 刘崇熙、文梓云,坝工混凝土专论(一)——混凝土碱-骨料的反应,华南理工大学出版社,1995年12月。
- [4] 陈德棉等,化学科学发展战略,科学出版社,1994年。

第 2 章 岩土工程化学的理论基础

2.1 引 言

为使应用现代化学成就于岩土工程建设中的一系列理论、技术与方法系统定型成为一门新的学科——岩土工程化学,本书试图向这个目标迈开第一步,这样一来,弄清并向读者阐明岩土工程化学的理论基础自然是十分必要的了。

如前所述,从研究的内容和采用的理论及方法来看,正在形成的岩土工程化学可以说是在一些最新科学成就基础上发展起来的一门新兴边缘学科,但目前有关这方面的报道和评论,多数是解决某些具体问题的总结或工艺叙述,而有关基础理论系统的研究却很不够。作者认为,实际问题的解决固然很重要,但如不加强理论研究,就会延缓这门新兴学科的发展,也会影响更多更广泛的实际问题不能得到满意的解决。

基于以上考虑,下面将在篇幅容许的限度内对岩土工程化学的理论基础做必要的阐述。

2.2 岩土工程化学的理论基础

岩土工程化学至今尚未建立本学科自己的系统理论,现在它使用的技术、方法和工艺均来自如下一些与其关系密切的学科:岩石力学、土力学、岩土工程学、化学以及地质学等。为便于本书以后的叙述,下面将对这些学科做简单的说明。

2.2.1 岩石力学

岩石力学是从工程地质学派生出来的一个工程力学分支,是研究当进行有关工程实践时岩体中所发生的力学过程的科学。具体地说,它的任务是研究岩石和岩体的工程性质(即物理力学性质,特别是强度特性和变形特性),这些性质在外界温度和湿度改变时发生的变化,岩石和岩体对外来荷载、温度变化和湿度变化的抵抗能力和稳定性以及所导致的环境效应等,其目的在于藉以解决有关采矿、水利、建筑、交通和国防等工程中的岩石动态问题——如何破坏岩石或防止岩石的破坏。

几千年来,人们通过劳动和工程实践,在不断揭露事物的固有矛盾中了解岩石,在促进事物转化的斗争中利用和改造岩石,并积累了丰富的知识。今天,在地球深处开采矿藏,钻几千米以上的超深钻孔,建造深层的地下建筑物,进行不良地质条件下的深挖坑槽以及高速开挖岩石等,已经不是幻想。许多巨大而复杂的岩石工程,如矿山和水利枢纽的大型地下硐室、大坝基础、地下电站和防核防原子结构工程等的建造给岩石力学的发展创

造了条件。但是,在岩石力学研究方面,形成一个系统的学科,给以“岩石力学”的名称,并在专门理论指导下应用它解决具体工程问题,还只是近半个世纪的事情。特别是20世纪最后二十年,岩石力学有了很大的发展,除了通常的有关测试技术、弹性理论对于岩石工程问题的应用以及某些经验规则的总结等内容外,又增添了不连续体力学的处理方法、动态岩石力学、岩体破坏机理的微观研究、高温下岩石的性质研究以及岩石流变理论、断裂力学和损伤力学在岩土工程中的应用等新的篇章。

在最近的时期内,岩石力学已经逐渐地建立了本学科的一套研究方法,并且充分利用了其他科学领域中的新成就。由于考虑到岩体中裂隙和节理的存在,因而很重视在现场进行大型试验并结合必要的室内试验来全面了解岩体的工程特性。同时,对岩石力学问题的数值解法,也在一定程度的批判基础上,做了许多很有成效的尝试,并非常注意建立完整岩石的数学模型,对于不连续体占重要地位的岩体的分析,也进行了关于不连续体力学处理方法的一些探索,特别是利用有限元分析将有节理的岩体当作被节理分割开的大块岩石块体的集合体来处理,获得了较好的效果。

2.2.2 土力学

土力学是利用力学的一般原理和地质学的一些基本概念研究荷载作用下土体的应力、应变强度、稳定性和渗透等特性及其随时间变化规律的一门学科。土力学有着悠久的历史,但却是20世纪后70年来才迅速发展起来的。可以说,1925年是一个里程碑,那一年美国的泰沙基(Terzaghi)出版了专著《土力学》,从此土力学才作为一门独立的学科得到系统的研究和发展的。20世纪80年代,又开拓了“非饱和土土力学”,在继承经典土力学的基础上,建立了一整套有关具有负孔隙水压力的非饱和土的理论 and 试验方法。

由于一些与土力学关系密切的学科的渗透以及工程实践的影响和促进,土力学的内涵变得更为丰富多彩。在研究方法上,采用了多学科的综合研究方法;在理论上达到了更高、更深的水平。特别应该指出的是,土力学的研究和发展的,得助于化学甚多。可以说,土力学的每个分支,每一项理论,无不打上化学的烙印。例如,可以从如下常见的研究专题和方法可以看出:土层渗水过程中的物理化学作用对软弱夹层性质影响的研究;软黏土地层的化学灌浆加固;膨胀土的化学固化;黏土矿物亲水性的结晶化学规律的研究;土层加固措施的力学与化学综合作用机理的研究;地层中的酸性地基土对灌浆效果的影响研究以及土的流变现象的化学研究,等等。现代土力学之所以获得迅速的发展,与化学的渗透和影响关系很大。

2.2.3 工程地质学

工程地质学是从工程建设的角度出发,运用地质学和力学的观点研究作为工程环境的地壳构造和地壳运动规律、岩土地层的组成和工程性质以及地下水的动态等的一门学科。

恩格斯在他的名著《反杜林论》中曾指出:“地质学按其性质来说主要是研究那些不但我们没有经历过而且任何人都没有经历过的过程,所以,要挖掘出最后的、终极的真理就

要费很大的力气,而所得是极少的”。正因为这样,比起岩石力学和土力学来说,工程地质学的充实和发展远逊于前两门学科,事实上,时至今日,在工程地质学领域中还存在着不少模糊认识和矛盾,例如,根据 Heyne(1982)统计,全世界已知的和付诸使用的岩体分类不下百种,而且还有大量新的分类建议正源源提出。可见,工程地质学还存在不少使人困惑和混乱的问题。

一般地说,工程地质学的任务是调查、研究和解决与兴建各类工程建筑有关的地质问题,特别是评价各类工程建设场区的地质条件、预测在工程建设作用下地质条件可能出现的变化和产生的作用、选择最佳建筑场地和克服不良地质条件应采取的工程措施,为保证工程的合理设计、顺利施工和正常使用提供可靠的科学依据。为此而进行的具体工作包括岩土的工程地质研究、工程动力地质作用的工程地质研究以及某些专门的地质研究等。

2.2.4 岩土工程学

很难对岩土工程学给出一个确切的严格的定义。从字面上看,所谓岩土工程学可以解释为一门研究以岩土为对象或工程环境的工程设施的科学,但事实上并不那么简单,稍微留意一下就可以看出,一些阐述岩土工程的书,甚至是规范,都对岩土工程学避免直接给出一个解释。这可能是因为:第一,长期以来,人们都把岩土工程包括在各种综合工程中,作为结构工程的一部分。国际上,真正公认岩土工程学作为一门技术学科,也不过是20世纪后三四十年的事,并引用了“Geotechnical Engineering”这个名词来代表岩土工程学;第二,岩土工程学是一门十分古老的随着工程实践不断得到发展的综合性很强的学科,它至今还不够严谨、不够完善,也不够成熟,不同行业的人士各自按照自己的理解来看岩土工程学,既然大家都心中有数,又何必画蛇添足,多此一举?

我国第一部岩土工程勘察规范《高层建筑岩土工程勘察规程》(JGJ72-90)是1990年12月30日颁布,1991年8月1日实施的。它从法规上承认岩土工程是土木工程这个大行业中的一个自成系统的新专业。

除了采矿、隧道开挖以及边坡稳定等工程外,在许多情况下,岩土工程往往只是其他结构工程的一部分,岩土工程学应该定义为:它是一门以工程地质学、岩石力学、土力学、基础工程学、结构动力学和化学为理论手段去求解建造于岩土中的建筑物(或构筑物)及其周围环境(包括岩土体)的力学动态及其稳定性问题的学科。当然概念不是永恒不变的,岩土工程学的概念也是随着社会历史和人类认识的发展而变化的,随着与岩土工程有密切关系的一些学科以及工程设计理论与方法等的发展和取得的新成就,岩土工程学的边界也在拓广,有的学者认为,在岩土工程发展的过程中,可以划分为三个阶段:结构工程、岩(土)体工程和地质工程。应该考虑以地质工程概念来代表岩土工程学,地质工程概念的基本特征是,“把地质工程作为一个系统,充分考虑岩体、环境因素、支护三者的相互作用,把科学、技术、管理三者结合起来,以谋求最佳的效益。”地质工程概念的先进性在于,重视环境因素的影响,不仅充分发挥岩(土)体自稳能力,而且强调岩(土)体、环境和支护三者的相互作用,注重维护与改善环境稳定性,以期使工程地质体的工程能力得到充分发挥,从而获得地质工程系统的最佳效益、优质高效地实现工程的目的。这种概念的转变促使了研究方法的转变,即从单学科的研究转变为多学科的综合研究,运用控制论研究工

程地质体控制与调节规律,并把科学、技术与管理结合起来。

地质工程概念实际上在岩土工程实践中早已存在,许多岩土工程研究者和设计者正是这样做的,它是岩土工程学方法论的核心,作者认为倒不一定要用地质工程概念来表征。

岩土工程学有着某些独有的特点,可概述如下:

(1) 难度大,潜力也大。岩土是一种最复杂的材料,且具有显著的时空变异性和地区性特点,又由于岩土工程常与其他结构工程连接,边界条件复杂;岩土的特性难以准确测定,这就给岩土工程的设计和计算带来较大的困难,但另一方面,也由于这些不确定性,使得岩土工程的承载能力具有较大的潜力。

(2) 岩土不同于混凝土和钢材等人工材料,是自然产物,受自然条件的影响甚大,加上我国的工程地质条件复杂,又是多地震国家,这些因素更增加了岩土工程设计和施工的难度。

(3) 岩土工程学与众多的学科关系密切,在理论和方法上深受其他有关学科的渗透和影响,内涵丰富多彩,综合性很强。

作为参考,在图 2-1 中给出了岩土工程大致的型谱。

2.2.5 化 学

化学是自然科学中一门最重要的学科。化学是在分子、原子或离子等级层次上研究物质的组成、结构、性质及其变化规律和变化过程中的能量关系的一门科学,简单地说,化学是研究物质变化的科学。化学反应或化学变化的基本特征是:① 化学变化是“质变”,其实质是化学键的重新改组,即旧的化学键破坏和新的化学键形成的过程。② 化学变化是“定量”的变化,在化学变化中参与反应的元素种类不会变化,参与反应的元素的原子核和核外的电子的总数不变。服从质量守恒定律。③ 化学变化中伴随着能量的变化,服从能量守恒定律。

在 19 世纪,化学已经建立了自己的学科体系。从理论到实验,学科框架的建筑已经相当完善。化学的精髓是化学反应,而化学反应是合成各类物质的关键。化学来源于生产,它的发生和发展一开始就是由生产决定的。从最初的制陶、金属冶炼以至纸张的发明、火药的使用等等。化学为人类丰富多彩的物质生活带来繁荣,也为现代岩土工程提供了性能优异的多种人造材料。化学将在它对人类生活的影响方面发挥日益重大的作用。

化学不同于物理学、生命科学的地方在于它是研究物质变化的科学。参与变化的物质其本质或结构如何与物理学相呼应,具体变化的物质对象则又与生命科学、地球科学、材料科学等关系密切,物质变化后产生的新物质又有结构、性能等问题^[9]。所以化学自身的内容非常丰富和庞大,它是一门综合性很强的学科,有许多分支学科,如无机化学、有机化学、分析化学、物理化学、量子化学、环境地球化学、环境工程化学,岩土工程化学等。

有的分支学科还划分更细的学科领域,例如环境地球化学又分为同位素地球化学、微量元素地球化学、岩石地球化学、矿床地球化学等。

应该特别指出在化学的发展过程中各学科对它的渗透和影响,同时,化学又在支持其他学科(例如岩土工程学)的发展。因此,化学是联系各基础科学的纽带。在各学科对化

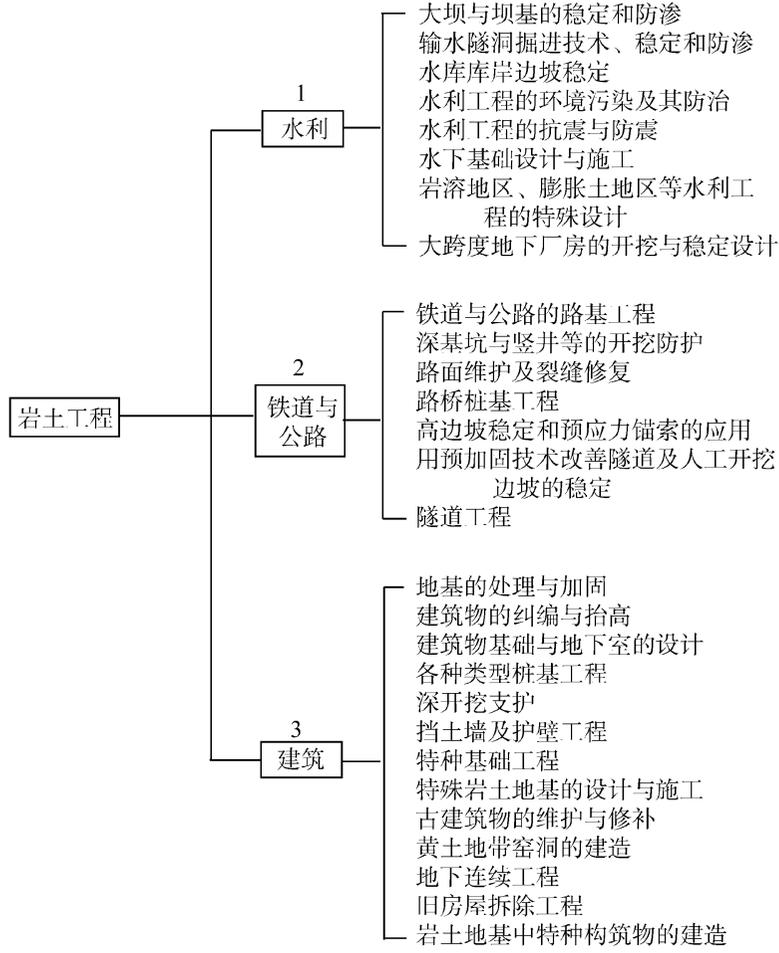
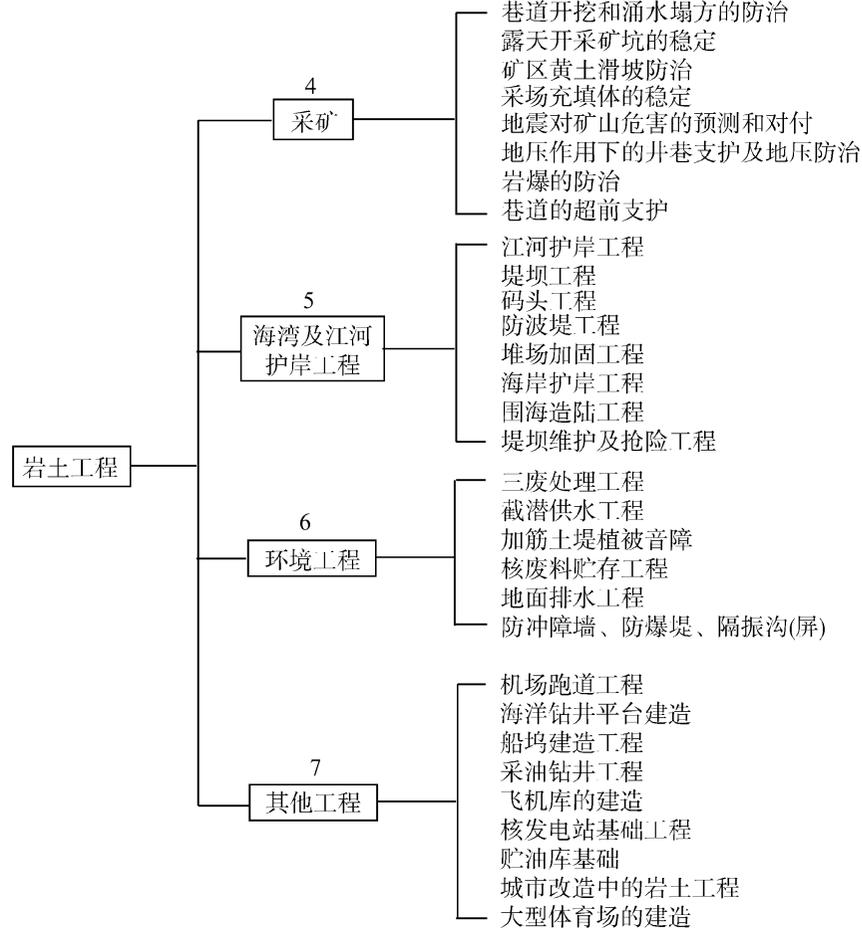


图 1-2 典型岩土工程分类



学的渗透和影响方面,数学的渗透更具有特殊的意义。数学向化学的各个角落渗透,使得化学从实验科学向理论和实验相结合的阶段迈进。特别是拓扑学、非线性理论、混沌理论和群论在化学中的应用推动了理论化学的发展,因此,计算分子和原子的结构与性能以及反应活性成为现实,进行分子设计与分子工程有了理论指导。目前,化学正处在高速发展的最活跃时期,一方面是近代物理方法如激光技术和计算机技术的广泛应用,使化学变化最快的电子转移、能量转移过程都可以进行探索了。原子和分子的图像可以在电视屏幕上实时观察,人们已经能够掌握到几乎是单分子了,这些成就给化学的理论探索提供了必要的手段,因而“分子轨道对称守恒原则”在合成维生素 B-12 中得以发现,1985 年碳-60 的发现也引起轰动,带动了世界性的研究热潮,与此类似的原子团簇物质的研究可能又开创一个新的化学领域。而另一方面,化学更注重宏观的复杂体系的研究,如生命过程、光合作用、资源(包括岩土资源)的保护和利用等是化学的重要研究课题,当然,这些也是其他学科研究的重要课题。因此,未来化学的发展,无论在微观上还是在宏观层次上的极端方向上,将与物理学、生命科学、环境科学、岩土工程科学的发展趋于一致,以至这些学科间的界限变得越来越模糊。这可能是科学发展到今天的特征,但也从另一侧面反映了交叉学科——岩土工程化学的发展趋势。对生理学、医学、化学工程学、环境保护学以及岩土工程学等,化学处在将会做出重要贡献的地位。

化学科学体系是一个庞大的体系,而且由于客观需要使得研究对象增加,又由于研究内容的补充(例如极端条件下的化学)、新的化学分支学科还在不断的诞生,因此,有人认为,为便于研究学科领域之间的相互关系,可考虑将化学分成八大类^[7]。

(1) 基础化学。研究化学物质组成、结构、性能及其相互关系,以及合成路线、合成方法和合成战略等的化学;基础化学包括物理化学、合成化学和分析化学。物理化学除包括原有分类的内容以外,还包括了物理无机化学、物理有机化学、高分子物理化学、高分子物理、高分子理论化学,合成化学包括了无机化合物、有机化合物、金属和元素有机化合物、高分子化合物等一切天然和人工化合物合成的途径、方法和理论的研究。分析化学除包括了原有分类的内容外,还包括了分离化学、分离技术和设备。

(2) 生命化学。研究生命物质的化学行为与特性,并旨在裨益人类健康、增产和改善人类赖以生存的食物;生物化学包括了生物无机化学、生物有机化学、药物化学的全部和配位化学、同位素化学、应用有机化学、功能高分子、高分子应用的部分。

(3) 材料化学。研究材料的结构、性能、合成及制备方法与战略,旨在改善人类的生活品质,提高人类改造自然能力的化学;材料化学包括了丰产元素化学、固体无机化学的全部和功能高分子、配位化学、金属有机及元素有机化学、应用有机化学、天然高分子、高分子应用的部分。

(4) 环境化学。研究环境的污染来源、分析方法和控制手段,并旨在改善人类生存环境的化学;环境化学包括了原有的环境化学及分析化学的部分。人类社会的发展对人类生存环境产生愈来愈明显的影响。人类为发展物质生产,以满足人类生存的物质需要而进行的地球化学活动,如采矿、冶炼、能源和矿物原料的加工与利用等,将各种废弃物散发到自然环境中,不断地改变着环境地球化学的成分与性质。改变了的环境地球化学的成分与性质对自然环境和人类,将直接或间接地带来不良的影响和危害。因此,人类在物质生产与生活活动过程中进行防治环境污染时,需要研究环境化学。具体地说,环境化学研

究自然环境中各种环境要素之间化学物质的迁移与形式转化的运动规律。研究人类活动释放的化学污染物质参与天然化学物质在自然循环过程中的运动规律与环境质量、人体健康和生物正常生存与发展之间的关系,以改善环境,促使环境质量向有利于人类方面发展。

(5) 国防化学。旨在增强国防能力的化学问题研究;国防化学包括了放射化学、核化学、同位素化学、固体无机化学、高能化学等有关学科的部分。

(6) 能源化学。研究人类生存和社会发展所必须的地壳能源的高效和清洁利用以及新能源的发展途径、方法和战略的化学;能源化学包括了核化学、放射化学、生物无机化学、生物有机化学、应用有机化学、化学动力学、胶体与界面化学、电化学与磁化学、光化学、热化学、高能化学、高分子应用、天然高分子的部分。

(7) 化学工程和工业化学。

(8) 工程化学。工程化学将化学研究应用到工程实际中去,它包括建筑化学、环境工程化学、岩土工程化学等。

岩土工程化学属于最后一类——工程化学,可见基础化学和材料化学等是岩土工程化学主要的理论基础。其他如高分子物理化学、结构化学、化学动力学等对岩土工程化学都有重要的影响。

2.3 理论总结的重要现实意义

本书的序言曾经指出了岩土工程化学理论落后于实践的客观现象,事实上,由于这一门新学科正在形成,它的一些主要的概念和理论,尚未被科学地整理成完整的理论体系,这种情况影响着岩土工程化学向更高的水平发展,也使一些有效的工艺和方法缺乏理论基础。无独有偶,在化学发展的历史上也曾有着这样的例子,长期以来,化学一直停留在实验科学的阶段,致使它的巨大的威力受到制约,直到人们将拓扑学和群论应用于化学,才使得理论化学有了很大的发展。

历史的经验值得注意,加强岩土工程化学的基本理论研究,进行全面的理论整理、总结和提高刻不容缓。理论工作的总结还有着另一个重要的意义,它将使广大岩土工程化学工程技术人员和科研工作者加深对岩土工程化学的理解和认识,激发他们为发展本门科学、做出更大贡献的使命感。这也可说是我们撰写本书的一点愿望。

“路漫漫其修远兮,吾将上下而求索”,理论工作任重而道远,期望不久的将来会看到有关岩土工程化学的更多专著。

2.4 岩土工程化学基本理论概述

2.4.1 与岩土工程有关的基本物理作用和化学作用

2.4.1.1 基本物理作用

(1) 吸渗作用。任克昌等人的研究指出:化学浆液对低渗透性软弱部位($K \leq 10^{-6} \sim$

10^{-8} cm/s, K 为渗透系数)的渗透,主要不是由于灌浆压力的压渗作用,而是由于浆液对岩石的润湿能力和亲和力,即所谓吸渗作用。浆液对岩石的润湿性以其接触角 θ 来表示,岩石产生吸渗作用,即浆液的人渗不需借外加压力的条件是 $\theta < 90^\circ$,而亲和力则是促进浆液渗入的功能,由吸渗作用产生的吸渗速度与岩石的渗透性有关, $v \propto \sqrt{K}^{[1]}$ 。

(2) 流动和扩散。在灌浆工程施工中,浆液注入岩石体中后,产生流动而逐渐形成渗流场。浆液的渗透和流动机理十分复杂,原因是被灌介质存在不均质性和不确定性(如岩石体渗透性质的各向异性、裂隙的几何特征和分布的不均匀性、不确定性),其次是浆液本身和灌浆过程中反应的多变性以及岩石与环境对浆液性能产生影响,对浆液的流动和渗透的影响因素花样繁多,变化复杂,使人“数不尽,理还乱”,较详细的叙述请见后面有关渗透灌浆理论的章节。

传统的概念认为,浆液的渗流服从达西定律,即浆液在压力作用下可在土体孔隙或岩石体裂隙中移动,其流动速度与颗粒级配和尺寸(对土),裂隙开度与密度(对裂隙岩石)以及水头梯度有关。不管岩石的结构如何,有无水充填和位于什么深度,只要有一定的压差,并大于其静水压力,浆液就可流动。

在电动化学灌浆的情况下,浆液除承受外部的灌浆压力外,还有施加于土体上的电场力的作用。实践证明,电渗排水对于颗粒很细,比表面积较大而渗透系数却很小的土确有较好的效果。

有关浆体在裂隙中运动规律的研究指出,浆体流动的本质取决于其流变特性,即在灌浆过程中浆体内部及浆体与裂隙面之间产生的阻力的性质,常规灌浆材料的流动形式可粗略地分为牛顿(Newton)型和宾汉姆(Bingham)型。溶液型浆体,如化学浆液,属于牛顿型,其流动性由浆体的黏度决定,黏度愈小,在裂隙中的渗透性愈好;粒状悬浮体系浆体,如泥浆、稳定性水泥浆,属于宾汉姆型,其流动性由流变曲线上的两个参数——屈服强度和黏度决定。非稳定性水泥浆易于沉降析水分层,在灌注过程中,浆液的流动性能有较大的变化,其运动规律复杂。

扩散是指浆液离开注入点往岩石体各方向的流动,显然,浆液的流变参数越小,浆体在流动过程中压力损失越小,流动性愈好,扩散愈容易,扩散范围越大。

在后面将要介绍的刘嘉材推导出的计算化学浆液在裂缝中运动规律的理论表达式可以看出扩散半径与灌浆时间、浆液初始黏度、灌浆孔半径、灌浆压力、灌浆段的地下水静压力以及裂缝宽度等因素有关。

(3) 劈裂和冲剪。这是浆液在压力下灌注入软黏土层中主要的运动形式,两者的作用均系对土体产生破坏,但其效果却不相同。在存在潜结构面的软黏土层中灌浆且压力适当时,浆液的发展一般以劈裂为主;而在剪切强度非常小软弱黏土层或软夹层中灌浆时,若灌浆压力较大,浆液对土体的作用不一定以劈裂为主,而是以冲剪为主。在劈裂为主的灌浆时,在灌浆压力作用下,浆液克服地层的初始应力和抗拉强度,引起土体结构的破坏和撬动,使土层中原有的裂隙或孔隙张开,形成新的或更大一些的裂隙或孔隙,促使浆液的可灌性和扩散距离增大,浆液凝结后在土体中形成浆脉并挤密土体。当然,劈裂是有限的和可控制的。在冲剪为主的灌浆中,当浆液的冲击力超过土体的抗剪强度时,软黏土层将在浆液的推挤作用下发生流动,土体整体游移,这样,浆液就不能有效地压密灌浆点周围的土体而达到加固的目的,反而使结构遭到破坏。

(4) 能量耗散。软土灌浆时的劈裂主要是要克服土的强度,这自然要耗费浆液的一部分能量。软土的强度主要是由内摩擦力贡献的,林天健曾经指出,可以用耗散比来衡量克服内摩擦的过程,即耗散比^[2]

$$L = \frac{\Delta W}{W}, \quad (2-1)$$

式中 ΔW ——一个应力循环(将一次加压灌浆和间歇作为一个应力循环)滞后回路所包的面积,亦即耗散的能量;

W ——此一应力循环中应变最大时介质中贮存的弹性能。

(5) 水气同轴复合喷射流冲切作用。在高压喷射灌浆中,由于考虑到高压水射流的压力在地层中衰减很大,即使喷嘴出口压力较高,也常达不到预期的高效率破坏地层的效果,因此在高压灌浆时在高压水射流的外圈四周同时喷射空气流(气把水柱包起来),形成一股同向同轴的高压喷射水气流,在水气两种介质的射流作用下,外圈气射流不但减少了高压水射流与四周介质发生能量交换,而且还大大地改善了高压水破坏地层的条件,从而增加了有效射程。

文献[3]指出,对空气射流的运动可用数学表述如下:根据绝热能量守恒的一维气体动力学公式

$$P \cdot dV \cdot A = C, \quad (2-2)$$

取对数及微分,据伯努力方程得

$$\frac{dV}{V} = \frac{-dA}{A(1-M^2)}, \quad (2-3)$$

式中 P ——压力/MPa;

V ——气流速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

A ——喷嘴孔径面积/ m^2 ;

C ——常数;

M ——马赫数(气流速度与音速之比)。

通过实验发现,气流速度若能达到音速的一半,即 $M=0.5$,则高压水射流衰减较小,对地层仍然有较好的破碎与搅拌的效果。此外,若空气射流的气量愈大,则高压水射流冲蚀切削地层的长度愈大。

(6) 膨胀作用。对岩土工程来说,膨胀作用有利亦有弊。膨胀土和某些黏土,特别是膨润土都会吸水膨胀,例如膨润土遇水后在 48h 内其体积可膨胀 15 倍,最大膨胀量约为自身体积的 30 倍。土体膨胀最常见的原因是吸水,膨胀土由于其组成含有多量的强亲水性黏土矿物,所以吸水量大、膨胀性强烈;而黏土因具有绒粒结构,遇水后膨胀并形成胶体,而膨润土则是以蒙脱土为主的一种活性指数很大的黏土,吸水膨胀是必然的。

土体的膨胀作用表现为软化,体积增大,强度大幅度衰减,水被黏土矿物结合形成附层和扩散层。水化膨胀后的膨润土形成一种不沉淀的胶体悬浮液,它可与地下工程的外围护结构紧密结合。又由于水化后的膨润土具有很小的渗透系数($K=10^{-9} \sim 10^{-12} \text{ m/s}$),抗渗性良好。

土体的膨胀作用对岩土工程造成的不利影响是其膨胀效应的主要方面,例如膨胀导致地表水渗入、土体中水分转移、强度减低、影响上层建筑物开裂破坏、渠坡混凝土衬砌产生裂缝、深开挖支护结构失稳等等。

2.4.1.2 基本化学作用

岩土工程化学的基本化学作用包括了高分子化学、结晶化学、胶体化学以及普通化学的各个方面。兹结合岩土工程化学的实际情况作简要分叙:

(1) 化学结合。以灌浆成桩为例,浆液与地基土或混合料相互作用而产生的化学反应,它可以单独发生,亦可能伴随着机械结合而产生。例如,当压注水泥浆液于粒状土中时,胶结作用主要靠硅酸钙和铝酸钙与矿质颗粒表面的结合。这种结合包括机械结合和化学结合两部分。当向黏性土层及向非黏性土层压注水泥浆造桩时,其化学反应是不尽相同的。前者的粉粒和黏粒含量高、颗粒的表面积大,因而水化水泥和颗粒表面间产生化学作用的机会也大。水化过程中产生的氢氧化钙在此化学过程中起着明显的作用。其次,石灰与硅土(和铝土)作用,在硅土颗粒表面形成辅助的含水硅酸钙(和铝酸钙)。这种离子交换作用使土的塑性减小,并使土对水分变化的敏感性减小。辅助的含水硅酸钙是胶体结构,它进一步使颗粒相互结合。当土中的水泥增加时,土中形成一种持水能力低、体积稳定性增加,承载能力增大的粗颗粒,若水泥继续增加至一定数量,粗颗粒的数量也增加,直至全部土颗粒都保持在一个固体内,像是一种结构,最终形成一根由水泥稳定土构成的水泥土桩。在非黏性土中造桩,由于其单个土颗粒的尺寸大于水泥颗粒,水泥有可能全部或部分地包裹单个土颗粒,当水泥硬化时,它们将胶结在一起,从而使非黏性土或低黏性土具有明显的黏性,并使形成的水泥土桩能抵抗荷载所引起的变形。总的来说,由于水泥的化学作用,改变了土的塑性,并增加了影响半径内土的强度和稳定性,使其有异于周围的土,这就是水泥土桩基于化学结合固化成桩的实质。

具体地说,水泥土桩的成桩过程包含如下的化学反应^[3]:

- 1) 水泥土的水解和水化反应;
- 2) 离子交换团粒化作用;
- 3) 凝硬反应。

当使用水泥系固化材料时,其固化原理除上述水泥的固化外,还有火山灰掺料及无机化合物通过火山灰反应生成各种水化物,这些水化物有助于水泥土的强度增长。

(2) 表面活性反应。表面活性物质的分子结构是不对称的,它的结构中包含两种基因,一是极性基,和水易溶,称为亲水基;一种是非极性基,和水不溶,和非水性溶液如油易溶,称亲油基或憎水基,表面活性物质具有增加溶解、润湿、起泡、去污、乳化及增加混凝土强度和减少水泥浆用水量等作用。在浇筑混凝土时加入表面活性物质能起到减水作用的,通常称为“减水剂”,浇制混凝土桩时,加入减水剂可以较少用水量,获得较高流动性,以提高混凝土强度。

(3) 吸附与黏接。吸附分为物理吸附和化学吸附,一般来说,物理吸附不太牢固,化学吸附是化学键结合,比较牢固。工程中应用结构黏结剂的例子较多,桩基施工中预制桩桩段的连接在桩端界面之处实现的,最常用的接桩方法之一是使用黏接剂,例如硫磺胶