

物化型软岩电化学 改性机理与改性效果研究

王 东 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

物化型软岩电化学改性 机理与改性效果研究

王 东 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书系统论述了物化型软岩电化学改性机理与改性效果,主要内容包括:软岩电化作用作用的电渗流过程及机理分析、电化作用改变物化型软岩矿物学参数的试验研究、电化作用对蒙脱石软岩矿物成分和晶体结构的改变规律、电化作用对蒙脱石软岩颗粒物沉降与体积膨胀性影响的试验研究、电化作用对伊利石软岩孔隙结构和抗拉强度影响的试验研究。

本书可作为采矿工程、地下工程等相关专业本科生、研究生的参考书,亦可供现场相关专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

物化型软岩电化学改性机理与改性效果研究 / 王东

著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2012. 12

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1690 - 8

I. ①物… II. ①王… III. ①松软岩层—电化—改性—研究 IV. ①TD32②O646

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第251255号

- 书 名 物化型软岩电化学改性机理与改性效果研究
著 者 王 东
责任编辑 王美柱
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 江苏徐州新华印刷厂
开 本 890×1240 1/32 印张 5.875 字数 164 千字
版次印次 2012 年 12 月第 1 版 2012 年 12 月第 1 次印刷
定 价 35.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

物化型软岩,是指含有大量黏土矿物,在工程扰动下易发生失水—吸水产生胀缩性和工程特性持续降低的软弱岩体。它是矿业工程、岩土工程、水电工程、地下储库等领域经常涉及的重大岩石力学问题之一。常用的软岩与软岩工程控制方法为锚喷与注浆加固、强力棚式支护、砌碇或封闭混凝土反拱等,这些方法均是从力的平衡角度来考虑,没有从改变软岩自身的物理、化学和力学特性的角度来考虑。为此,本书提出了采用电化学固结改性技术改变有代表性软岩的矿物成分和组织结构,实现软岩与软岩工程长期稳定性的研究方法,为软岩工程灾害的控制提供卓有成效的理论依据和技术支持,对减少和防止软岩工程灾害的发生具有十分重要的科学意义和广泛的应用价值。

针对物化型软岩的晶层结构和阳离子交换能力,本书分别选取蒙脱石含量为主的软岩(蒙脱石软岩)和伊利石含量为主的软岩(伊利石软岩)作为研究对象,根据物化型软岩电化学固结改性过程中的双电层理论,理论分析物化型软岩电化学固结改性过程中的电化机理;分析蒙脱石软岩和电化学改性相关的矿物学性质,主要为带电性、电荷来源、电荷种类、双电层、pH 值、零净电荷点、永久电荷密度、比表面积、孔容和孔径等;分析蒙脱石软岩在电化学改性过程中的矿物成分和晶层结构的变化规律;分析电化学作用对蒙脱石软岩颗粒物沉降与体积膨胀性的影响;分析电化学作用对伊利石软岩孔隙结构和力学特性的影响。以下为本书的主要研究成果:

- ① 总结出黏土矿物和软岩在电化学固结改性过程中的电化

机理,即黏土矿物和软岩的电渗现象、电泳现象和电解现象等电化学现象。在电化学作用下,软岩的矿物成分会发生改变并生成新的矿物,电渗脱水固结使软岩的物理力学特性发生变化。

② 使用 X 射线衍射、X 射线荧光光谱、快速电位滴定、电泳和氮气物理吸附等方法对物化型软岩的阳离子类型、零净电荷点、永久电荷密度、 ζ 电位、等电点、比表面积、孔容—孔径分布等矿物学参数在电化学改性前后进行了系统分析研究。

③ 在不同 CaCl_2 电解液浓度和不同电位梯度条件下,电化学作用能够改变软岩的矿物成分,软岩中蒙脱石的含量降低且生成新的矿物,新生矿物为方解石、三水铝石、硬石膏和水铝英石。电化学作用后软岩阳极和中间区域的蒙脱石含量降低较小,阴极区域的蒙脱石含量降低较大。电化学作用后软岩中蒙脱石晶层结构的层间距和平均晶粒大小均发生了变化,软岩各区域层间距均呈指数规律递增。在不同 CaCl_2 电解液浓度条件下,软岩阳极和中间区域蒙脱石的平均晶粒大小随电解液浓度的增加呈指数规律变化,阴极区域蒙脱石的平均晶粒大小随电解液浓度的增加呈高斯规律变化;在不同电位梯度条件下,软岩各区域蒙脱石的平均晶粒大小均随电位梯度的增加呈高斯规律变化。

④ 蒙脱石软岩颗粒物在蒸馏水中的沉降过程为缓慢润湿、加速沉降和体积稳定等 3 个阶段。电化学作用能够加速颗粒物的沉降速度,但不能改变岩样颗粒物沉降稳定后的体积膨胀特性。

⑤ 使用 Matlab 对 CT 单张图像进行数字图像处理,生成 CT 图像序列,使用可视化重构算法中的体绘制算法对其进行三维重构,生成岩石的二值化三维数字图像。根据岩石的二值化三维数字图像可以计算出岩石的孔隙率;对岩石的 CT 单张图像进行压缩,再进行数字图像处理和三维重构,生成不同分辨率的岩石二值化三维数字图像,可以确定基于 CT 图像序列岩石的孔隙率随孔隙孔径的变化规律。电化学作用能够提高泥岩自身的力学特性,伊利石软岩原岩样的平均抗拉强度为 1.31 MPa,浸入蒸馏水中平均抗拉强度为

前 言

0.81 MPa;电化学改性后,平均抗拉强度均提高,提高了16.79%~116.03%。在泥岩的阳极区域,电化学改性后泥岩的孔隙率小于改性前的孔隙率;在泥岩的阴极区域,电化学改性后泥岩的孔隙率大于改性前的孔隙率。

本书出版过程中得到了山西煤炭运销集团科学技术研究有限公司的大力支持和帮助,孙春伟、吕兆兴、李义宝为本书出版亦提出了许多有益的意见,在此一并表示衷心的感谢!

由于时间和水平所限,书中错误之处在所难免,恳请广大读者提出宝贵意见。

著 者
2012年8月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 软岩电化学改性的研究背景	1
第二节 软岩电化学改性的研究现状	3
第三节 软岩电化学改性的研究内容	17
第四节 本书的研究内容、方法、目的和意义	20
第二章 软岩电化学作用的电渗流过程及机理分析	23
第一节 黏土矿物电化学作用过程中的毛细管电渗流模型	23
第二节 软岩电化学作用过程中的电渗流机理分析	28
第三节 软岩电化学作用过程中的稳态电渗流	32
第四节 电流对软岩的作用和电化学现象	38
第五节 本章小结	44
第三章 电化学作用改变物化型软岩矿物学参数的试验研究	46
第一节 物化型软岩的地质年代与矿物成分及其分类	46
第二节 黏土矿物颗粒的带电性、pH 值与电动现象	51
第三节 煤系地层物化型软岩主要阳离子类型试验	59
第四节 蒙脱石软岩零净电荷点和永久电荷密度研究	63
第五节 蒙脱石软岩 ζ 电位和等电点研究	70
第六节 蒙脱石软岩比表面积及孔容—孔径分布研究	76
第七节 本章小结	84

第四章 电化学作用对蒙脱石软岩矿物成分和

晶体结构的改变规律 87

- 第一节 电化学作用改变蒙脱石软岩矿物成分和
晶体结构试验 88
- 第二节 基于 X 射线衍射图谱的数据处理 91
- 第三节 电化学作用对蒙脱石软岩矿物成分的影响 93
- 第四节 电化学作用对岩样新生矿物及其含量的影响 100
- 第五节 电化学作用对岩样中各矿物层间距的影响 103
- 第六节 电化学作用对岩样矿物晶粒大小的影响 107
- 第七节 电化学作用对岩样龟裂特征的影响 112
- 第八节 本章小结 115

第五章 电化学作用对蒙脱石软岩颗粒物沉降与

体积膨胀性影响的试验研究 117

- 第一节 电化学作用下蒙脱石软岩颗粒物沉降与
体积膨胀性试验 118
- 第二节 电化学作用的试验现象及其机理 120
- 第三节 蒸馏水对软岩颗粒物沉降与膨胀性的影响 122
- 第四节 电解液浓度对软岩颗粒物沉降与
膨胀性的影响 124
- 第五节 加电时机对软岩颗粒物沉降与膨胀性的影响 127
- 第六节 电位梯度对软岩颗粒物沉降与膨胀性的影响 128
- 第七节 电化学作用对岩样电流强度和温度的影响 129
- 第八节 本章小结 131

第六章 电化学作用对伊利石软岩孔隙结构和抗拉强度

影响的试验研究 133

- 第一节 电化学作用下伊利石软岩孔隙结构和
抗拉强度试验 135

目 录

第二节	高精度显微 CT 系统	141
第三节	基于显微 CT 试验的岩石孔隙结构算法研究	143
第四节	电化学作用对伊利石软岩抗拉强度的影响	150
第五节	本章小结	157
第七章	结论和展望	160
第一节	主要结论	160
第二节	展望	164
参考文献		165

第一章 绪 论

第一节 软岩电化学改性的研究背景

物化型软岩,是指含有大量黏土矿物,在工程扰动下易于发生失水—吸水产生胀缩性和工程特性持续降低的软弱岩体,它是矿业工程、岩土工程、水电工程、地下储库等领域经常涉及的重大岩石力学问题之一。

软岩与软岩工程问题在 20 世纪 60 年代就作为一个世界性难题被提了出来,特别是在工程扰动后,物理、化学与力学性质极不稳定的物化型软岩岩层控制一直困扰着煤矿的生产和建设。随着国民经济的发展,工程建设的规模和数量不断扩大,大量的隧道、边坡、堤坝、矿山巷道、地下电站以及油气储库等大型构筑物或建筑物的建造不可避免地要涉及物化型软岩问题。长期以来,软岩的水化膨胀、碎胀扩容、强度降低等物理力学特性对这些工程的稳定性产生了极大的影响,造成了巨大的经济损失,软岩问题日益严重^[1,2]。因此,软岩破坏的工程控制基础理论与方法研究是国民经济和社会发展中迫切需要解决的关键科学问题,具有重要的科学意义和广泛的应用前景。

对于软岩,国内外学者与工程界已做了大量的工作,但多集中在以下几个方面:软岩的形成和软岩的矿物组成;软岩与工程软岩的概念及其分类;软岩的物理、化学与力学特性;软岩工程中的应力、变形与破坏特征;软岩破坏的时间、环境和力学效应;软岩工程的灾害及

其孕育与发展过程、发生机理;软岩工程的支护与锚固方法、参数选择及其控制效果;软岩工程锚固的失效机理;软岩工程的合理支护时间、合理锚固部位、锚固次数、让压理论与技术、多因素耦合理论与技术、锚固失效后的返修方法,以及软岩的注浆加固机理与工程应用等。通过对软岩工程控制方法的回顾与总结,常用的方法不外乎锚喷与注浆加固、强力棚式支护、砌碇或封闭混凝土反拱等几种,这些方法只是从力的平衡角度来进行考虑的,并未从改善软岩自身的物理、化学和力学特性的角度来考虑。用上述方法加固的软岩工程,往往只能维持一个相对较短的时间段,需要多次返修,而且返修工程量、费用以及对生产的影响都非常大。因此,寻找一种能够使软岩的物理、化学和力学特性改善及软岩工程长期稳定的方法是十分迫切和必要的。针对物化型软岩的工程特性和迄今常用的控制软岩工程稳定性方法所存在的根本问题,本书提出了采用电化学固结改性技术改变有代表性软岩的矿物成分和组织结构,实现软岩及软岩工程的长期稳定性的研究方法,为软岩工程灾害的控制提供卓有成效的理论依据和技术支持,对减少和防止软岩工程灾害的发生具有十分重要的科学意义和广泛的应用价值。

由于物化型软岩是一种物理、化学与力学性质都极为活泼的岩石,具有强风化、水化膨胀、碎胀、扩容、强度降低等物理、化学和力学特性,并且这些特性都只有在工程扰动后、软岩体与外界有水分交换的条件下才能发生。基于这种想法,笔者所在课题组在2004年提出了采用表面包覆的方法防止物化型软岩工程性质裂化的研究思路^[3],并得到了国家自然科学基金项目(50474057)的资助,已取得了较好的研究成果^[4-7]。软岩工程的应用实践表明,表面包覆可以在很大程度上延缓软岩巷道的变形与破坏时间,但由于高应力的作用,巷道围岩不可避免地会产生新的破裂。山西霍州李雅庄煤矿+435水平的主要巷道布置在富含黏土矿物的软岩中,巷道极易发生底鼓和顶、帮喷层破裂、严重变形与冒落。在对其围岩进行注浆包覆加固之前,每5~8个月就须进行一次大的起底和扩宽返修。在对围岩实施注浆

包覆后,返修间隔时间延长到 2~3 年,但仍不能从根本上确保软岩巷道的长期稳定性。

我国煤系地层中黏土类沉积岩的矿物成分主要有高岭石、伊利石、蒙脱石和伊—蒙混层等 4 种。在水的作用下,这 4 种黏土矿物的物理、化学与力学特性的改变主要有两种:一是黏结力降低导致软化、崩解和碎裂扩容,但矿物晶层不发生膨胀,体积增加很小,这类岩石的矿物成分主要是高岭石和伊利石。二是矿物晶层发生晶层膨胀和渗透性膨胀^[8,9],导致岩石的软化、松散,这类岩石的矿物成分主要是蒙脱石^[10,11]。导致软岩工程性质裂化的外在因素是工程扰动和岩体破裂,内在因素是软岩中黏土矿物特有的晶层结构和阳离子交换能力^[12-15]。所以,可以通过电化学方法改变物化型软岩自身的晶层结构和阳离子交换能力,以改变软岩自身的物理、化学与力学性能,从而达到电化学固结改性软岩的目的。

康天合教授领导的课题组在对软岩电化学改性这一领域的国内外研究现状进行全面、深入系统分析研究的基础上,提出了物化型软岩电化学改性机理与效果的研究课题,这一研究延续了国家自然科学基金项目(50474057)的研究思路,申请并获得了国家自然科学基金项目(50974093)的资助^[16]。

第二节 软岩电化学改性的研究现状

由于软岩含有大量的黏土矿物,黏土矿物的物理、化学与力学性质极其活泼,在很大程度上决定着软岩的物理、化学与力学性质。分析软岩电化学改性的研究现状,需要从黏土矿物电化学作用的研究现状和软岩改性的研究现状两方面来说明。

一、黏土矿物电化学理论的研究现状

黏土矿物电化学作用理论的研究是首先从电化学现象中的电渗现象开始的,发现黏土矿物电渗现象的是 Moscow 大学的

F. F. Reuss。1808 年, F. F. Reuss 在 U 形管中装入黏土矿物颗粒并加入水, 采用丝状铂电极, 外加直流电源为锌银伏打电池^[17], 图 1-1^[18]为 F. F. Reuss 的电化学作用黏土矿物发生电渗现象的实验示意图。F. F. Reuss 对实验现象进行了描述, 发现电化学作用下在水中生成氧气和氢气, U 形管中的水位发生变化, 电极阳极区域的水位降低, 电极阴极区域的水位升高, 水通过黏土矿物颗粒从电极阳极区域向电极阴极区域发生移动。但 F. F. Reuss 没能对这一现象作出解释。

J. Napier 就 F. F. Reuss 的实验进行了初步分析^[17], 指出: 在外加直流电场作用下, 黏土矿物所发生的电化学反应中, 氧气和氢气的生成是由于电解液分解, 即电解现象; 电极阳极区域和阴极区域水位的变化是由于电渗现象。Napier 区分了电解现象和电渗现象, 并说明这是两个不同的电化学反应。电解现象和电渗现象之间没有直接关系, 但进一步指出通过黏土矿物的电流强度越大, 电渗现象越明显, 电解现象却越小。

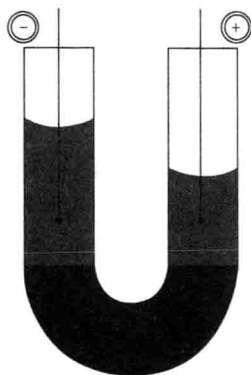


图 1-1 黏土矿物中的电渗现象^[17]

G. Wiedemann 使用电化学方法对含有黏土矿物的岩芯进行了电渗流实验, 在不同的电流强度和作用时间等条件下, 观察电解液流过不同高度的岩芯时所发生的电渗现象^[11]。在这个实验中, G. Wiedemann 发现: 加入硫酸锌、硫酸钾、硫酸钠和硫酸铜电解液, 会降低电渗流速度, 并且电渗流速度的降低导致岩芯电阻的降低。G. Wiedemann 总结出了电渗流压力公式:

$$P = C \frac{IRd}{A} \quad (1-1)$$

式中, P 为电渗流压力; C 为常量; I 为电流强度; R 为岩芯的电阻; d 为两电极之间的距离; A 为岩芯的横截面积。

P. Winke 发现了电化学作用下黏土矿物中的另一电化学现象, 即电泳现象^[19]。G. Quinke 对这一现象进行了分析, 给出了电泳现象的定义, 即在外电场作用下, 液相介质中的固体颗粒向与固体颗粒所带电荷符号相反的电极区域移动的现象。并且指出黏土矿物颗粒带负电荷, 带负电荷的黏土矿物颗粒向电极阳极区域移动, 带正电荷的水分子则向电极阴极区域移动。在电泳现象中, 黏土矿物颗粒的移动速度或在电渗现象中的水流速度都与电位梯度相关。由此指出, 在固液界面中黏土矿物的带电颗粒周围存在着双电层, 提出了双电层的概念。在电渗现象的研究中, 更详细地说明了电化学作用下黏土矿物发生的电渗现象中电极阴极区域的液位高度, 并证实了 G. Wiedemann 的电渗流压力与电流强度、电极距离成正比, 盐类和酸类的电解液会减小电渗流压力, 而醇类的电解液则会增加电渗流压力。

H. L. F. Helmholtz 在 G. Quinke 等人研究黏土矿物颗粒表面双电层的基础上, 提出了双电层模型^[20], 即平板电容器模型。指出: 黏土矿物颗粒表面的双电层是一种类似于简单平行板的电容器结构, 双电层的里层在矿物颗粒表面上, 带相反电荷的外层在颗粒表面的液体中, 两层间的距离很小, 为离子半径的数量级。这一模型在早期的电化学现象研究中起过一定的作用, 但不能很好地解释电化学现象中的电动现象。

U. Saxen 实验研究了在毛细管现象中电渗流速度和电位梯度之间的关系, 提出电渗流速度和电流强度的比值等于电位梯度和压力差的比值^[21], 即:

$$\frac{V_e}{I} = \frac{E}{\Delta P} \quad (1-2)$$

式中, V_e 为电渗流速度; I 为电流强度; E 为外加直流电场的电位梯度; ΔP 为压力差。

J. Perrin 实验研究了在不同成分的矿物和不同种类的电解液作用下所发生的电渗现象,指出电解液应分为极性电解液和非极性电解液。极性电解液为盐类和酸类电解液,该类电解液具有较高的介电常数,在电化学作用下,会发生电渗现象;非极性电解液为三氯甲烷、苯、松香和偶联剂等有机溶剂,该类电解液的介电常数较低,在电化学作用下,不会发生电渗现象。并且随着电解液 pH 值减小,电渗速度降低,当电解液 pH 值非常低时,电渗流的流动方向会发生反向^[21]。W. B. Hardy 指出,电渗流的流动方向发生反向时的 pH 值为等电点。

H. Freundlich 发现了黏土矿物的晶格取代现象^[22],指出晶格取代现象是黏土矿物带电的主要原因。

G. Gouy 和 D. L. Chapman 基于 H. L. F. Hemholtz 的平板电容器双电层模型,提出了 Gouy-Chapman 模型^[20]。G. Gouy 和 D. L. Chapman 认为 Hemholtz 模型最大的问题是反离子平行地束缚在相邻颗粒表面的液相中,G. Gouy 和 D. L. Chapman 修正了这一问题,认为液相中的反离子是扩散地分布在颗粒表面周围的空间里,提出了扩散双电层模型。Gouy-Chapman 模型能够解释电化学中的电动现象,区分了表面电位和 ζ 电位,并能解释电解质对 ζ 电位的影响,但不能解释 ζ 电位的正负,且有时 ζ 电位会高于表面电位等问题。

O. Stern 认为 Gouy-Chapman 的双电层模型可分为两层,一层为颗粒表面的吸附层或 Stern 层,另一层为扩散层。Stern 模型能较好地解释电化学中的电动现象,反映更多的电化学实验。

L. Casagrande^[23]在实验室应用电化学中的电渗法固结砂质土,并在其后所发表的一系列论文中^[24-28]说明如果在砂质土中不含黏土矿物,则不会发生电渗脱水固结现象。L. G. Adamson 等^[29]进一步从质量百分比角度说明当黏土含量占砂质土总质量 1.5%~3.5%时就可以通过电渗固结砂质土。

L. Casagrande^[27]提出了 Casagrande 电渗速度经验方程,L. Casagrande 认为:在外加直流电场的作用下,黏土矿物的电渗速度

与电渗透率、电位梯度呈线性关系。

B. A. Nikolaev^[30]指出黏土矿物是个复杂的物化系统,物理化学性质极其活泼。在外加直流电场的作用下,在黏土矿物中产生的电渗现象是电化学中的电动现象,明确定义这一过程为电化学过程。在正常状况下,黏土矿物处于平衡状态,不显电性。在外加直流电场的作用下,黏土矿物颗粒表面双电层中的扩散层的正电荷和极性水分子会发生定向移动,过量的正电荷在电极阴极区域和过量的负电荷在电极阳极区域发生中和反应。

R. S. Zianguirov 提出了黏土矿物电导率的概念^[31]。黏土矿物电导率随着电解液浓度的增加而增加,在低浓度的电解液中黏土矿物电导率的增加比在高浓度电解液中快。

N. Smoluchowski 在 H. L. F. Helmholtz 电渗流理论模型的基础上,扩展了 Helmholtz 方程,使用孔隙孔径尺寸比双电层厚度大得多的多孔介质得到了 Helmholtz-Smoluchowski 电渗流速度方程,该方程后来成为计算 ζ 电位的经典公式。

G. N. Zhinkin^[32]提出了电化学作用下黏土矿物的电解现象。在电解作用下,黏土矿物的物理和化学性质均发生了变化,小颗粒的黏土矿物产生固结,并生成新的矿物。

D. Burgreen 和 F. R. Nakache 提出了 Burgreen-Nakache 电渗流模型^[21],认为在外加直流电场的作用下,黏土矿物的电渗流速度是扩散双电层表面电位的函数,随着黏土矿物颗粒表面电位的增加,电渗流速度减小。

M. I. Esrig^[33]指出:在外加直流电场的作用下,黏土矿物的脱水固结不仅和电渗透系数相关,而且和电渗水渗透系数相关。具体包括黏土矿物的含水量、孔隙水、电解液浓度和黏土矿物的类型。随着黏土矿物含水量的增加、电解液浓度的减少和黏土矿物阳离子交换能力的降低,电渗水渗透系数增加。

D. H. Gray^[34]指出:在电化学作用下黏土矿物的成分和物理性质均会发生变化,可交换阳离子 Al^{3+} 在黏土矿物中形成水铝中间

层,蒙脱石黏土矿物的物理性质变化较伊利石或伊—蒙混层黏土矿物的明显。

A. J. Sethi^[35]采用电化学方法作用高岭石黏土矿物,电解液为 CaCl_2 。指出:电化学作用高岭石黏土矿物会新生成晶体和非晶体矿物。其中,新生成的硅钙化合物(CSH-1)具有很好的固结特性,该化合物对提高黏土矿物的物理力学特性起重要作用。

N. C. Lockhart^[36-38]指出:电位梯度在 $0.1\sim 5\text{ V/cm}$ 范围内,电渗脱水固结速率随着电位梯度的增加而增加,并且当电位梯度较高时,阴极区域的pH值也较高。盐类和酸类电解液浓度大于 0.001 mol/L 时,在较低的电位梯度情况下就可以发生电渗脱水固结现象;但当电解液浓度大于 0.1 mol/L 时,会发生电解液极化现象且电渗脱水显现会停止。醇类电解液不会发生电渗脱水固结现象。

J. M. Fleurea等^[39]从黏土矿物孔隙、裂隙的角度,分析了电化学作用对黏土类岩石结构组成的影响,指出:在黏土类岩石的固液界面,电化学作用能够降低其界面张力和润湿性,改变其固相和液相之间的相互作用。

在上述理论的基础上,黏土矿物电化学作用理论得到了长足发展,相继出版了一些关于黏土矿物或和黏土矿物电化学作用相关的著作^[12,40-49]。20世纪90年代以后,黏土矿物电化学作用理论的研究主要侧重于土壤电化学^[50]、尾矿脱水^[51,52]、矿物加工^[53-56]和环保去污^[57-60]等领域。

二、软岩改性的研究现状

对物化型软岩物理、化学和力学性质的研究表明,导致软岩工程性质裂化的外在因素是工程扰动和岩体破裂,内在因素是其晶层结构和阳离子交换能力。因此,可以从两方面考虑改变软岩工程的性质裂化:一是防止软岩工程岩体失水—吸水—泥化过程的发生;二是改变软岩矿物的晶层结构和阳离子交换能力。前者可以通过对软岩表面及软岩颗粒的包覆防止失水—吸水—泥化过程的发生,称为表