

煤岩流体电动力学研究进展

郭俊庆, 康天合, 康健婷, 张惠轩, 柴肇云, 张 彬, 张晓雨

(太原理工大学 采矿工艺研究所, 山西 太原 030024)

摘要: 煤岩流体电动作用在地下资源开采中的工程应用逐渐增多, 如强化油气采收、井巷软岩加固和矿山导流增注等。但是工程设计与参数选取的盲目性折射出该方面理论的滞后。从介质运移特性、宏观物性和结构变化 3 个方面综述煤岩流体电动作用的研究进展, 指出新形势下存在的主要问题: 介质传输过程不清晰、多场耦合规律未开展、宏观物性的微结构响应机制不明确、表面吸附流体的界面调控理念未形成, 阐明煤岩流体电动作用的理论基础——双电层理论。在此基础上, 提出煤岩流体电动力学的概念, 即煤岩气液离子等多相介质在电场作用下的运动规律及其与外界的相互作用, 构建以双电层理论为核心、以“电渗、电泳与电迁移”等电动特性为内含、以外界物化场为环境的理论框架, 凝练煤岩流体电动力学理论的 5 个主要研究方向, 阐述 4 个关键技术。该理论适用于比表面积较大的煤岩多孔介质, 如煤、页岩、泥岩等, 为地下尤其是深部资源开采中涉及固液气运移的问题解决(如煤层注水困难、煤粉堵塞伤害、瓦斯解吸缓慢、膨胀软岩支护困难、胶体充填排水缓慢、煤矸石重金属污染等)提供了一种新的行之有效的方法和科学指导, 也为深部地电场作用下煤岩流体动力灾害的发生机制揭示提供了新的思路。

关键词: 岩石力学; 煤岩流体电动力学; 地电场; 电渗; 电泳; 电迁移; 深部开采

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2019)03 - 0511 - 16

Research progress of electrokinetic dynamics of rock and fluid

GUO Junqing, KANG Tianhe, KANG Jianting, ZHANG Huixuan, CHAI Zhaoyun, ZHANG Bin, ZHANG Xiaoyu
(*Institute of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China*)

Abstract: The electrokinetic effect(EKE) of rock and fluid is applied more and more in exploitation of underground resources such as enhancing oil and gas recovery, reinforcing soft rock in roadway and strengthening fluid flow in mine, et al. However, the blindness of engineering design and parameter selection reflects the lag of the theory. The researches of EKE were systematically summarized from three aspects, namely, the transport characteristics of the media, physical property and structural changes. Four main problems were pointed out including unclear transport process of multi-phase media, few researches of multi-field coupling, indistinct microscopic response mechanism of physical properties and unformed interface control concept of adsorption fluid, and the theoretical basis of double electric layers was clarified. On this basis, the concept of electrokinetic dynamics(EKD) of coal rock and fluid was proposed, which reveals the move rule of gas and liquid ions and the interactions with the external environment. The theory frame, taking double electric layers theory as the core,

收稿日期: 2018 - 07 - 04; **修回日期:** 2018 - 11 - 08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51174141, 51674173); 山西省自然科学基金资助项目(201701D221241)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51174141 and 51674173) and Basic Research Project of Shanxi Province(Grant No. 201701D221241)

作者简介: 郭俊庆(1987 -), 男, 2010年毕业于太原理工大学安全工程系, 现任讲师, 主要从事岩石力学与采矿工程方面的教学与研究工作。E-mail: 13753106501@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0790

focusing on the electrokinetic effects such as electroosmosis, electrophoresis and electromigration and considering the outside physical and chemical field, was built. Five main research directions and four key techniques of EKD theory were summarized. The theory is suitable for the rocks with a larger specific surface area such as coal, mudstone and shale, and provides an effective method for many problems existing in exploitation of deep resources including difficult flooding in coal seam, blockage injury of coal power, slow desorption rate of methane, difficult support of soft swelling rock, slow dewatering of colloid filling and serious pollution of heavy metal in coal gangue, etc. The research also provides a new idea for revealing the mechanisms of fluid dynamic disasters of rock under the action of deep geoelectric field.

Key words: rock mechanics; electrokinetic dynamic of rock and fluid; geoelectric field; electroosmosis; electrophoresis; electromigration; deep mining

1 引言

煤岩流体电动作用是指在电场作用下煤岩颗粒及其间的液体与离子等介质发生运移的物理现象。按照介质的不同,将固体颗粒、液体与离子的运移现象分别称之为电泳、电渗与电迁移。其中,电渗与电泳技术被广泛应用于软土地基/边坡脱水加固、煤矿与尾矿矿物脱水提质等领域,随着深部矿产与油气资源开采工程的增多与复杂,又逐渐被应用于解决非常规油气采收率低、膨胀性软岩支护困难、煤系气开采过程中的煤粉堵塞严重、高阶煤的瓦斯解吸能力差、煤层注水困难以及采空区胶结充填体排水慢等问题,取得了一定效果。但是普遍存在着工程设计与参数选取的盲目性、效率低等问题,原因在于这些方法的力学基础理论研究远远落后于其在世界范围内的工程实践,工程难以得到有效、科学指导,尤其是地下深部工程。并且人们对电动作用的性质(简称电动特性)缺乏了解,相关基本概念与理论尚未建立。

此外,自然界中地震发生前后期、地壳运动、太阳核子活动剧烈期、雷电发生等,会对煤岩中的瓦斯、地下水等流体运移产生显著影响,甚至出现动力灾害^[1-4],如:2000年夏秋时节,太阳核子活动高峰期,我国连续多次出现煤矿井下重大瓦斯灾害事故。分析认为这是由于地电场变化导致的结果,但是作用机制如何尚不明确。一般在矿山与油气开采领域,将地层中未受扰动的应力场、温度场和电场统称为天然地球物理场^[5-6]。其中煤岩物理性质在地应力场与地温度场影响下的研究已有大量成果,而在地电场作用下的研究国内外鲜见报道。

基于此,本文综述了煤岩流体电动作用的研究现状,分析了存在的主要问题,提出了煤岩流体电动力学的理论框架,凝练了5个主要研究方向和4

个关键技术,为地下资源高效开采中的诸多问题提供一种新的解决方法与机制揭示。

2 煤岩流体电动作用工程现状

(1) 强化油气采收领域

电动强化油气采收法是针对低渗油藏敏感性矿物丰富与孔隙喉道小的问题,以及在煤层气与页岩气等软煤层中钻孔如同“豆腐中打洞”般会出现钻孔易坍塌、造缝效果差、通道易堵塞等一系列问题,提出通过向煤岩层钻垂直井并形成以注液井为中心、油气井为角点的梅花形井网(见图1(a)),将阳极电极与阴极电极分别固定在注液井井口和油气井井底,利用加入电解质的压裂液对煤岩层实施压裂,接通电源后即可形成电化学强化系统^[7-8](见图1(b))。该系统产生的电渗方向由中心注液井井口指向四周油气井井底,煤岩层中的水在电渗作用驱动下运移并驱替油气,为微孔裂隙中的油气提供运移动力;电泳方向则由四周油气井井底指向中心注液井井口,储层孔裂隙通道、注液井井底和排采设备中的煤岩粉在电泳作用驱动下向注液井井口运移,解除煤岩粉堵塞伤害;电解酸化作用溶蚀煤岩储层中的碳酸盐类填充矿物,疏通油气运移通道;电加热作用升高储层及压裂液温度,降低石油黏度或提高甲烷解吸扩散特性。从而通过水压致裂作用以及电化学方法中的电渗驱动、电泳解堵、电解增透与电热升温等五位一体作用,有效强化煤岩储层的油气运移能力,提高油气采收率。1963年A. S. Anbah^[9]首次在生产井和注水井之间施加大于200 V的电压,大幅提高了油的流速。1991年,瓦希托夫^[10]通过电渗驱动作用使原油产量提高了30%~50%,采收率提高了20%,且对环境无污染。J. K. Wittle^[11]对美国California State的the Santa Maria油田和加拿大Alberta State的the Lloydminster油田进行了工业

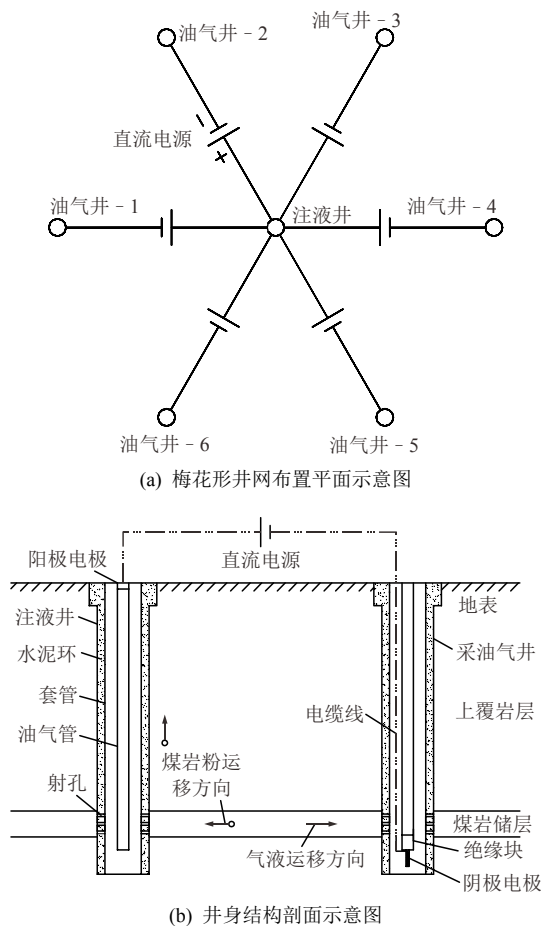


图 1 电化学强化煤岩储层油气采收工艺布置示意图
Fig.1 Improving the recovery ratio of oil-gas in coal rock reservoir by electrochemical method

试验,发现电化学方法中的电渗作用将石油储层有效渗透率提高了10~50倍,增透范围达40~200 m,采收率增幅近10倍。A. Ansari等^[12]针对传统油田酸化增产技术存在增透范围小的问题,提出了电动驱酸增产方法,研究发现酸浓度为1.2%时的作用效果最好,可使石油采收率提高17%~29%,渗透率增加11%~53%,同时成本降低20%~41%。国内,易兵等^[13]采用电化学方法对吉林油田进行强化,输入电流80 A,电压190 V,近60 d后产液量由5.2 t/d增至8.5 t/d,含水率由95%降至80%,产油量由0.4 t/d增至1.3 t/d,动液面由400 m降至370 m,取得了较好效果。

(2) 井巷软岩加固领域

软岩电化学改性加固法是针对井巷工程中膨胀性软岩层采取的锚喷、架棚或砌喧等传统支护方法存在“治标不治本”、维护时间短以及返修工程量大等问题,提出在软岩中置入电极,注入 CaCl_2 , AlCl_3 等电解液,施加电场后一方面通过电化学反应形成黏结物,填充于软岩孔裂隙中,将其胶结为一

个坚硬整体,提高锚杆的锚固力;另一方面通过电渗作用将软岩中的水驱出,通过电泳作用将软岩颗粒聚结为一体,共同改善软岩稳定性。1963年,N. I. Titkov等^[14]针对油气井中套管成本高、易腐蚀等问题,最早提出了采用电化学方法改变井壁软岩化学组分并固结软岩的想法,电解液选用浓度1.5%~2%的 CaCl_2 溶液和0.1%的水玻璃,电极选用铝或铁,电压初始值与最终值分别为20和100 V,电流强度5~30 A,初步实践证明该方法可形成黏合物,促进软岩与水泥快速混合,在井壁形成70 mm厚的固结圈,大幅改善井壁稳定性。国内,宋宏伟等^[15-16]提出了一种电化学加固黏土类软岩巷道围岩稳定性的方法,即在巷道全断面垂直围岩表面插入铁质构件作为电极,并且阳极与阴极按排间隔布置,施加电场后通过电解产生胶结物、电渗排水与电热蒸发排水等共同作用永久有效地加固软岩巷道。康天合等^[17]在其基础上优化了围岩电极布置方案,即在巷道围岩深部与表面(钻孔底端与孔口)分别固定阳极与阴极电极,如此可使电渗排水方向由围岩深部向浅部流动,使岩土颗粒电泳方向由浅部向深部迁移,有效加固软岩同时改变巷道围岩应力分布,从而显著提高软岩巷道围岩的长期稳定性。

(3) 矿山导流增注领域

矿山电渗导流增注是针对煤炭洗选或井下胶体充填过程中的脱水速度慢、效果差,矿山开采过程中煤储层注水困难、煤尘产量大,以及溶浸采矿过程中渗透性差、金属浸出率低等一系列问题,提出通过电渗作用强化煤岩脱水或增注的一种处理方法。早在1960年美国矿务局(USBM)^[18]就率先开始研究煤矿与尾矿矿物洗选领域的电渗脱水提质效果,对美国Idaho State采区金属尾矿中的长48.8 m、宽1.06 m、深0.91 m的地下回填料场进行了工业试验,在底部布置直径5 cm的铁电极,作为阴极,在顶部布置铁网,作为阳极。施加电压300~450 V,电流10~63 A,29 h后该区域表面承载力由0增至1.82 MPa。1970年澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)^[19-20]开始研究矿物电渗脱水技术,相继在60多所洗煤厂、选矿厂等进行了工业应用,发现浮选精煤的重量百分比由62%增至84%~88%,矿砂水含量由158%降至75%,并且能耗较低。1980年前苏联学者波尔特诺夫^[21]针对井下采空区胶结充填时,充填矿房料浆中的泌出水因排出过程缓慢而导致的充填体强度显著降低等问题,提出采用电渗法加快充填体脱水,并进行了工业试验。发现施

加电场后充填混合料的凝固和硬化过程明显加快，矿房的充填时间缩短，相邻矿房的回采时间也提前。国内，郭俊庆等^[22]提出了一种压动 - 电动耦合作用强化煤层注水法，通过对煤层高压注水同时施加电场，使水在注水压力、电渗力及毛细力等三方面、多级别驱动力的作用下，由大裂隙快速运移至微小孔裂隙，实现了煤体的高效全润湿(见图 2)。对煤储层作用后，单孔润湿范围扩大 1.2~3.4 倍，平均注水速率提高 2.31~6.87 倍，含水率提高 1.28~3.37 倍，同时还减少了钻孔工程量。王少勇等^[23-24]提出了一种电场强化细粒尾矿原地浸出的方法，具体是在尾矿库中布置阳极注液管与阴极抽液管，施加直流电场后，尾矿库中溶浸液渗流速度由 9.17×10^{-5} m/s 增至 0.007 m/s，增幅高达 70 倍。

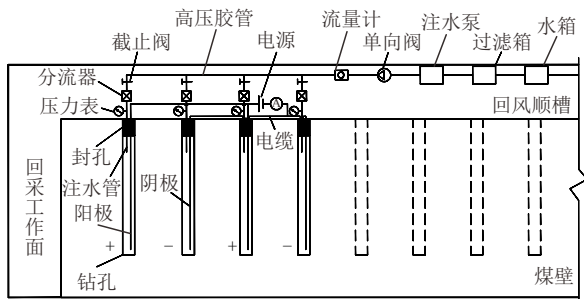


图 2 压动 - 电动耦合作用强化煤层注水法工艺示意图
Fig.2 Enhancing coal seam flooding by hydro-electric power

3 煤岩流体电动作用研究现状

早在 19 世纪初，国外学者已经开始研究黏土矿物电动作用。1809 年，F. F. Reuss^[25]首先发现了黏土矿物的电渗现象，通过对装有黏土矿物颗粒和水溶液的 U 形管外加直流电场，发现 U 形管的水位由两侧齐平变为阳极侧低、阴极侧高，说明矿物颗粒间的水在电场作用下由阳极向阴极运移。1859 年，G. Quincke^[26]发现了黏土矿物的另一电动现象，即电泳。黏土矿物颗粒在水溶液中带负电荷，施加电场后，颗粒向阳极侧移动，并且移动速度与电位梯度有关。自 1939 年 I. L. Casagrande^[27]首次将电渗技术成功应用于软土地基脱水加固工程后，煤岩电动作用研究开始了快速发展。代表性的有，英国 Newcastle University, Electrokinetic Limited，加拿大 University of Western Ontario、新加坡 National University of Singapore，澳大利亚 University of Western Australia 等就电渗技术在岩土脱水加固领域与尾矿脱水提质领域进行了大量研究，美国 University

of Southern California、沙特阿拉伯 King Fahd University of Petroleum and Minerals、法国 Ecole Normale Supérieure 等就电动作用在强化石油采收领域进行了大量研究。

近几年，随着国民经济的快速发展，我国资源勘探开发利用的需求迅速增加，我国特有的复杂地质条件催生了许多先进的科学技术和理论，比如在将电化学方法应用于特殊条件下的软岩土加固、矿物提质、油气开采等领域，浙江大学、武汉大学、清华大学、河海大学、哈尔滨工程大学、中南大学、太原理工大学等自主研发了很多试验装置，并开展了大量探索性工作。纵观该领域国内外的研究现状，可归纳为以下 3 个方面。

3.1 煤岩流体等多相介质的运移特性

(1) 煤岩中液体的运移特性(电渗特性)

目前，电渗特性方面的研究对象多为岩土，尤其是黏土矿物。其关键参数有 2 个：电动渗流速度与电动渗透系数。一般来说，细粒土的电动渗流速度比水力渗流速度快 2~4 个数量级^[28]，水力渗透系数为 $10^{-5} \sim 10^{-10}$ m/s，而电动渗透系数为 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ $m^2 \cdot V/s$ ，且不受粒径大小影响^[29]。对于岩石而言，G. V. Chilingar 等^[30]发现电场可将含黏土矿物砂岩中的水流速提高 2~32 倍。M. A. Aggour 等^[31]采用 Arabian 轻质油和 NaCl 水溶液研究了电场对砂岩油水两相相对渗透率的影响，发现加电后油水相对渗透率比值增大。总之，煤岩流体电渗特性方面的研究内容多集中于控制因素与作用机制两方面，其中控制因素主要有 8 个：

① 黏土矿物类型。G. V. Chilingar 等^[30]发现砂岩渗透率在电化学作用下的增透效果明显，且受矿物成分影响，由大到小依次为蒙脱石、伊利石、高岭石。

② 电极材质。常见的电极材质有铁、铜和铝等，这些金属电极普遍存在与岩土接触不紧密、阳极腐蚀严重、气体排出困难以及成本较高等问题。为此，国外学者 Jones 课题组研发了一种兼具导电、过滤、排水和加筋等功能的合成材料，称之为电动土工合成材料(简称 EKG)^[32]。国内，庄艳峰^[33]研究了 EKG 材料的型式、电阻率要求与导电方式，并将研发的 EKG 材料用于淤泥脱水和边坡加固工程。

③ 电位梯度。I. L. Casagrande^[27]发现黏土矿物的电渗速度与电位梯度呈线性正比，而 E. Mohamedhassan 和 J. Q. Shang^[34]认为，电渗速度应与有效电位梯度呈线性规律，这是由于黏土矿物

电渗过程中的电位梯度存在极化效应与潜在损失, 阳极处的电极损失高达 24%。此外, 陈雄峰等^[35-36]发现电位梯度过高会增大能耗, 建议工程中参数选取应根据实际要求确定。M. A. Aggour 等^[31]发现砂岩中油水相对渗透率的变化幅度随电位梯度升高而增大。

④ pH 值。J. Perrin^[37]研究了不同类型电解液对黏土矿物电渗作用的影响, 发现高介电常数的电解液(如盐类、酸类等)中才有电渗现象, 并且电渗速率随电解液 pH 值减小而降低, 当电解液 pH 值低至某一值时, 电渗流反向流动。J. X. Zhou 等^[38]也发现水溶液 pH 值为 7~10 时最有利于淤泥的电渗脱水。

⑤ 含盐量。M. Citeau 等^[39]指出高含盐量污泥的电渗排水效率低。李 瑛和龚晓南^[40]发现通过电渗法成功加固海相黏土中的含盐量大多低于 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

⑥ 含水量。R. C. Pugh^[41]研究发现适合土壤电渗排水的含水量为 60%~100%, 并且土壤电动渗透系数随含水量的升高而增大。

⑦ 通电方式。电渗时的通电方式主要有电极反转和间歇通电 2 种, T. Y. Wan 和 J. K. Mitchell^[42]研究发现电极反转可使土体的含水量与抗剪强度更加均匀, 但是反转后的电流会迅速降低进而弱化电渗。陶艳丽等^[43]试验发现采用间歇通电可减缓电极腐蚀, 提高电渗效果。

⑧ 电极布置方式。电极的布置方式主要有长方形、梅花形和平行错位等。S. Glendinning 等^[44]研究发现电极采用梅花形布置时的利用效率最高。

在电渗机制方面, 庄艳峰等^[45-47]研究了电渗过程中的电荷累积理论与能量梯度理论, 从能量的角度解释了电渗过程中的电流、电势与土体电阻率分布与变化, 并指出了电渗固结中的界面电阻问题。L. M. Hu 等^[48-51]建立了不同条件下的一维/二维电渗固结模型与理论。S. X. Li^[52]认为黏土矿物的电渗流作用是由于颗粒表面存在扩散双电层结构的结果, 并且电渗流速度随着双电层表面电位绝对值的增大而增大。

(2) 煤岩固体颗粒的运移特性(电泳特性)

自 Quincke 发现黏土矿物具有电泳特性之后, 1970 年, J. A. L. Campbell 等^[53-54]发现煤粒也具有电泳特性, 如图 3 所示。施加电场时, Na_2SO_4 水溶液($\text{pH} = 7$)中的煤粒向阳极方向运移, 说明煤粒带负电。随后, 很多学者研究了 pH 值、煤岩类型、电位梯度等对煤岩电泳特性的影响规律。J. S. Laskowski^[55]研究发现 pH 值越小, 不同类型煤的电动电位均降

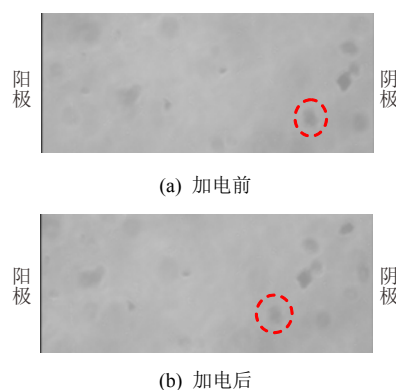


图 3 水溶液中煤粒加电运移

Fig.3 Movement of anthracite in electric field

低, 即电泳运移能力减小, 当 pH 值降至某一值时, 电动电位由负值变为正值, 即煤的运移方向转向, 并称电动电位为 0 mV 时外在溶液的 pH 值为等电点。S. Kelebek 等^[56]采用微电泳仪研究了褐煤、高度氧化煤、未氧化煤以及和它相关的黄铁矿的电泳特性, 确定了等电点依次为 2.1, 2.8, 5.1 和 2.2。王 东等^[57]采用自主研发的试验装置研究了电化作用过程中电位梯度与电解液浓度对含有蒙脱石矿物的岩石颗粒的沉降速度与膨胀性的影响, 指出其主要作用机制为电泳作用, 并确定了加速颗粒物沉降和抑制其稳定后的体积膨胀性的最大电位梯度为 0.5 V/cm 。

(3) 煤岩流体中离子的运移特性(电迁移特性)

在外加电场的情况下, 阳极和阴极会分别吸附煤岩体系中的阴离子与阳离子, 从而引起离子的迁移现象。煤岩体中离子电迁移特性主要应用于重金属污染土壤的电动修复以及尾矿矿石中金属离子的电解析出回收, Y. B. Acar 等^[58]研究发现外加电场作用下, 土壤中 Pb^{2+} , Cr^{3+} 等重金属离子的去除率高达 90%, 并且可以忽略电渗与电泳的作用。郭康仕等^[59]发现 Al^{3+} 的迁移能力远大于 Cu^{2+} 和 Fe^{2+} , 从而选择 Al^{3+} 作为软土电渗脱水固结的主要介质。

3.2 煤岩宏观物性变化

煤岩体电动作用同时存在电化学反应, 宏观物性会发生显著变化, 主要有:

(1) 力学特性。U. Pinzari^[60]对意大利某煤层顶板的软岩样进行了电化改性试验, 该岩样内的黏土矿物含量 40%~50%, 硬度较低。外加电位梯度为 $1.47 \sim 7.9 \text{ V/cm}$ 的直流电场, 作用时间 8 h, 改性后岩样抗拉强度提高了 3.3 倍。D. Wang 等^[61]试验发现电化作用后泥岩的抗拉强度提高了 16.79%~116.03%。B. Yin 等^[62]提出通过电化方法提高充填

开采中粉煤灰充填材料的早期强度，试验发现改性后粉煤灰充填料的单轴抗压强度和弹性模量分别提高了 51.2%~74.4%与 75.9%~112.9%，并确定了最优改性条件。柴肇云等^[63]试验发现泥岩经铜、铁、铝等 3 种类型电极电化学改性后的单轴抗压强度均呈现阳极>中间>阴性的趋势。

(2) 胀缩性。王东^[64]研究发现与黏土矿物中的伊利石和高岭石相比，相同条件下蒙脱石电动电位的电负值最大，从而表现出以蒙脱石为主的泥岩遇水极易膨胀崩解。对蒙脱石软岩进行电化学改性，其电动电位由 -38.1 mV 增至 -20.4 mV，甚至变为正值，胀缩性减小。

(3) 渗透性。张继红等^[65-66]发现岩石中水渗流速度随电场强度的升高呈指数规律增大，为此提出了一种提高油藏注水能力的方法，即对油藏外加与注水方向一致的电场，保证水在电渗作用下的渗流方向与压动作用下渗流方向一致。J. K. Wittle 等^[11]通过试验发现外加直流电场后，细粒黏土矿物的有效渗透率提高了 1~1.5 个数量级，这与现场 Santa Maria 监测井液面上升了 61 m 一致。

(4) 润湿性。吴新民等^[67-68]研究了电场对砂岩岩芯或矿堆中矿岩颗粒表面润湿性的影响规律，结果表明：岩石表面润湿性随电场强度或加电时间的增大由亲油转化为亲水。M. A. Menkovskii 等^[69]针对煤层注水润湿效果差的问题，基于增大电动电位可提高煤润湿性的指导思想，确定了煤层注水的最佳成分及浓度为：0.1%润湿剂、4%~7%水玻璃以及 1.5%~3%的 NaCl 溶液。郭俊庆^[70]通过试验发现电化学作用将无烟煤的煤水接触角由 85.5°降至 73°~74.4°，从而增强其润湿性。

(5) 解吸特性。郭俊庆等^[71]发现电渗作用可以解除煤层气开采中的水锁效应，电化学作用将无烟煤解吸率由 60.84%增至 87.26%，平均解吸速率提高 5.59 倍，并且在酸性电解液中，阳极侧的瓦斯解吸率较阴极侧高，而在中性或碱性电解液中，阳极侧解吸率较低。

3.3 煤岩结构变化

电动作用过程中的煤岩结构会发生变化，主要有：(1) 微晶结构。M. A. Aggour 等^[31]指出砂岩在电渗作用时，二氧化硅的晶层间距明显减小。王东^[64]通过试验发现蒙脱石软岩经电化学改性后，蒙脱石晶层结构的层间距由 1.4 nm 增至 1.52~1.58 nm，平均晶粒大小也发生明显变化。(2) 基质结构。吴

辉^[72]通过扫描电镜测试发现膨润土经电渗作用后，阳极区域土样的微观结构由絮状变为粒状堆积，孔隙减小，土的基质结构更加密实。结合能量色散 X 射线光谱和 X 荧光光谱仪测试结果，认为土颗粒表面双电层结构和晶层结构内的 Na⁺被高价金属离子替换，从而减小了双电层厚度，增强了晶层间的联结力。(3) 化学结构。A. J. H. A. Sethi^[73]指出，高岭石黏土矿物在电解液为 CaCl₂ 的电化学作用下会产生新物质——硅钙化合物，该化合物具有一定的胶结特性，可将矿物颗粒胶结在一起，提高其物理力学特性。(4) 孔隙结构。J. Guo 等^[74-75]通过扫描电镜与显微 CT 测试分析了无烟煤孔隙结构的变化，发现孔隙数量明显增多，这是由于阳极侧电解反应产生的 H⁺溶蚀了部分矿物质以及阴极侧的强电泳作用迁移走了煤岩颗粒(见图 4)。D. Wang 等^[61]发现泥岩经电化学作用后，阳极区域的孔隙率小于改性前的孔隙率，而阴极区域的孔隙率大于改性前的孔隙率。(5) 裂隙结构。L. Casagrande^[76]研究发现，黏土中的孔隙水在电渗作用的驱动下向阴极移动，导致在两电极间形成很多裂隙，并且裂隙的形态与电极间的等势线一致，离电极越远，裂隙间距越大。

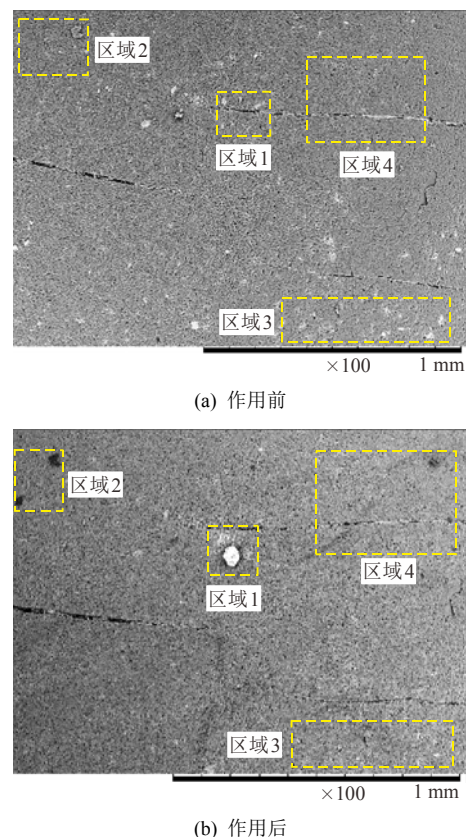


图 4 块煤中黏土矿物电动作用时迁移聚结^[74]

Fig.4 Migration of minerals in lump coal by electrokinetic effect^[74]

4 煤岩流体电动作用存在的主要问题

(1) 煤岩流体介质传输过程不清晰

煤岩流体电动作用极其复杂, 不仅涉及煤岩颗粒、气液流体与溶液离子等介质在电场作用下运移的动力学过程, 同时又是电场与荷载耦合作用下外部环境与内部结构进行氧化还原反应的电化学过程, 两者相伴相生, 而当下的研究将两者脱节, 单一考虑。因此, 煤岩流体的介质传输过程亟待深入研究。

(2) 煤岩流体多场耦合规律未开展

目前煤岩流体电动作用的研究与应用多集中于地面与表土层, 而油气储层与矿山都处于地下, 并且随着能源需求的增多, 浅部资源日益减少, 油气工程与采矿工程相继进入深部资源开采状态^[77-78]。深部储层因高地应力作用渗透性很低, 传统的压裂增透方法受限, 尤其是对于松软煤岩。而这些低渗松软储层有个共同特点: 微孔隙较多, 比表面积较大, 电动特性较明显。因此, 通过对煤岩外加电场可以突破水压渗透的限制, 提供新的动力源。如此煤岩流体在高应力作用下的电动作用规律研究便得以凸显。另外, 谢和平等^[79]面对深部地层环境与极限开采深度的限制, 认为传统采矿学与力学等理论难以解决深部煤炭开采出现的技术难题, 提出了深部煤炭资源流态化开采的颠覆性科学构想。采用电动作用会为此构想锦上添花。因此, 亟待研究深部煤岩流体电动作用规律, 尤其是煤岩流体渗流的电场-应力场-温度场等多场耦合问题。

(3) 煤岩宏观物性变化的微结构响应机制不明确

煤岩流体在电动作用同时存在电化学反应, 引起孔裂隙结构、基质结构、晶层结构、化学结构及组分等方面的变化, 进而出现力学特性、渗透性、润湿性、吸附性、胀缩性和崩解性等宏观物性方面的变化, 而宏观物性与微观结构之间具体存在何种联系尚不明确。

(4) 煤岩表面吸附流体的界面调控理念未形成

传统的水压致裂、爆破致裂与水力割缝等卸压方法因增加了煤岩中的孔裂隙等甲烷运移通道, 在非常规天然气开采前期能大幅降低气体压力, 取得了较好的抽采效果。但到开采后期, 因气体压力逐渐衰竭, 驱动力不足, 达到降压极限后煤岩体表面的吸附瓦斯无法解吸或放散, 需要靠借外力才能发生剥离^[80]。这是因为吸附瓦斯并不以严格意义上的

独立气态存在, 而是以近液态或煤层甲烷、水与煤等三者一起耦合形成的固流体的特殊物质形态而存在^[81]。已有研究表明, 对煤岩施加电场通过电渗作用可强化无烟煤中的瓦斯解吸^[71], 可促进岩土渗流盲区不动液的流动^[82]。这是由于煤岩中存在很多由毛细管与空腔相互搭接而形成的超细微孔隙结构, 尤其是中高阶煤与页岩^[83-84]。这些毛细管的管壁宽 10~30 Å, 它们的内表面积占据煤体比表面积的 95% 以上, 从而使得煤与泥页岩在施加电场后的界面作用力较强。因此, 对于煤岩表面吸附流体而言, 可通过毛细作用力与施加电场后形成的电渗作用力来协同调控界面。

5 煤岩流体电动作用的理论基础——双电层理论

1859 年, G. Quincke^[26]指出黏土矿物颗粒电泳特性是由于溶液中的颗粒表面存在着双电层结构, 并给出了双电层的定义。煤岩之所以会发生电渗、电泳现象, 主要机制是双电层理论。1879 年, H. Helmholtz^[85]建立了双电层结构的最初模型——平行板电容器模型, 即两块彼此平行放置的具有一定数量电荷的板构成的模型, 板间距为离子半径的数量级, 平行板的里层在矿物颗粒表面, 外层在颗粒周围的液体中。L. G. Gouy 等^[86-87]指出 Helmholtz 模型存在的问题: 带相反电荷的离子平行地束缚于颗粒表面的液相中。鉴于此他们提出了扩散双电层模型, 即反离子以扩散形式分布在颗粒周围的液体中。该模型的优点是较好地解释了黏土矿物电化改性过程中的电动现象, 给出了颗粒表面电位和电动电位 ζ 的区别, 同时又存在无法解释电动电位的正负值在变化等问题。

一般情况下, 煤粒与黏土矿物颗粒等溶胶粒子在水溶液中带负电, 因吸附溶液中反离子而使邻近溶液中的单位体积净电荷密度不为 0, 致使溶液中电荷重新分布以达到平衡, 形成由紧密层与扩散层组成的双电层(见图 5)。施加电场后, 在扩散层内距离固体表面某一位置处的溶液会发生相对滑动, 运移速率与滑移面上的电位有关, 即

$$V = \frac{\zeta DE}{4\pi\mu} \quad (1)$$

式中: ζ 为滑移面上的电动电位, D 为双电层的介电常数, μ 为电解液的黏度系数, E 为外加直流电场的电位梯度(V/cm)。

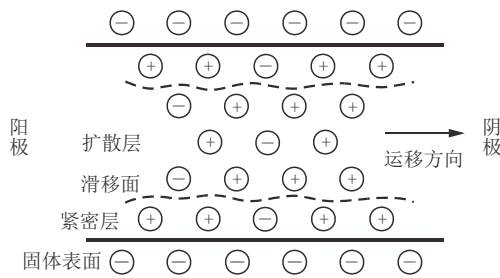
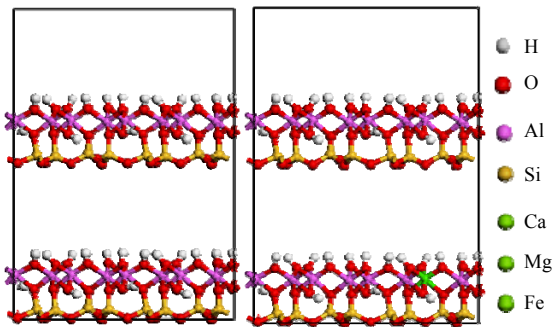


图 5 双电层结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of double electrode layer structure

煤岩颗粒在水溶液中带电的主要原因有以下 2 种:

(1) 晶格取代, 也称晶格置换, 以黏土矿物为代表。黏土矿物主要是层状结构硅酸盐和链状 - 层状结构的硅酸盐, 其晶体结构是由二维排列的硅氧四面体和铝氧八面体组成, 如图 6(a)所示。而硅氧四面体中的部分 Si^{4+} 易被三价铝离子替换, 铝氧八面体中的部分 Al^{3+} 易被二价钙、镁或铁离子替换(见图 6(b)), 从而使晶体结构因替换电荷的不等而永久带负电。外界的 Na^+ , K^+ , Mg^{2+} 或 Ca^{2+} 等阳离子会通过吸附于黏土矿物晶层表面, 来平衡这些多余的负电荷。当矿物颗粒与水接触后, 这些阳离子又重新解离于水中, 使颗粒显现出电负性。电负性的大小受黏土矿物晶体结构中被替换阳离子的数量和矿物颗粒的表面积影响。一般而言, 黏土矿物中被替换的电荷量排序为蒙脱石 > 伊利石 > 高岭石^[64]。



(a) 黏土矿物晶层结构 (b) Al^{3+} 被 Ca, Mg 或 Fe 离子取代

图 6 黏土矿物晶体结构晶格取代示意图

Fig.6 Schematic diagram of crystalline substitution of clay

(2) 电离, 以煤为代表。煤结构的主体是三维空间高度交联的非晶质的高分子聚合物, 每个大分子是由许多结构相似而又不完全相同的基本结构单元聚合而成(见图 7^[88])。以缩合芳香环为主、以氢化芳香环和脂环为辅构成了基本结构单元的核心部分; 以 3 个碳以下的烷基侧链和含氧官能团(包括酚羟基、羧基、甲氧基和羰基等)构成了基本结构单元的外围部分。基本结构单元之间通过桥键联结为煤大分子, 煤分子又通过交联及分子之间缠绕在空间形成不同的立体结构^[88-89]。煤颗粒带电主要是其大分子结构上含氧官能团的电离作用。S. Kelebek 等^[56]基于假设的表面基团模型, 探讨了煤样表面电荷产生的机制, 解释了表面电学行为和 pH 值间的关系。J. S. Laskowski^[55]提出水溶液中的煤颗粒表面既有负电荷又有正电荷。其中, 负电荷主要由羧基和酚基等含氧基团提供, 而正电荷则由无机物(Al_2O_3)和氮元素贡献。随后, 他又分析了煤颗粒表面电荷的 4 个主要影响因素, 即煤基质、煤中杂原子与官能团、煤中无机物以及电解质溶液等, 并发现煤水界面中的电化学性质主要受官能团和杂原子影响。D. W. Fuerstenau 等^[90]研究发现煤中的灰分越少, 等电点对应的 pH 值就越高, 即煤样脱灰后, 由于硅土矿物的消失, 等电点会升高。另外, 煤氧化度的增加会导致等电点对应的 pH 值降低。这表明煤表面电荷受煤基质表面氧化官能团控制, 同时也受灰分影响。

基于上述煤岩流体电动作用中的双电层理论, 结合矿山领域中的煤层气与页岩气等非常规天然气采收率低、膨胀性软岩支护困难、煤层气开采过程中的煤粉堵塞伤害严重、高阶煤的瓦斯解吸能力差、煤层注水困难、井下采空区胶结充填体强度低以及煤矸石重金属污染等等一系列工程问题, 运用煤岩流体的电渗、电泳与电迁移等电动作用及其附属的电化学作用从根本上解决上述工程问题中的煤岩渗透性差、膨胀性强、力学强度低、吸附能力强等核

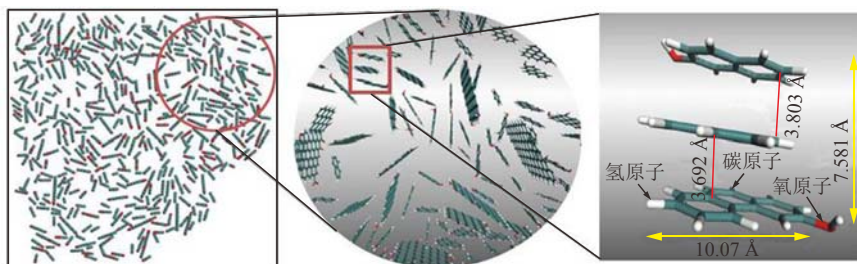


图 7 煤大分子结构模型示意图^[88]

Fig.7 Schematic diagram of coal macrostructure^[88]

心科学问题，为矿山领域的资源开采提供一种新的行之有效的思路。

6 煤岩流体电动力学的定义与框架

煤岩流体电动力学是指：煤岩气液离子等多相介质在电场作用下的运动规律及其与外界的相互作用。煤岩流体电动力学框架主要包括电泳(煤岩固体颗粒的运移)、电渗(气液流体的运移)和电迁移(液体中离子的运移)等电动特性，其核心基础为双电层理论，其作用环境主要有电场、应力场、温度场、化学场、压力场等，如图 8 所示。如果是地面工程，以电场与压力场为主，如果是地下工程，以电场、压力场与应力场为主。煤岩流体电动力学的各个方面并不是孤立的，而是相互联系，相辅相成的。因此，需要协同运用煤岩流体电动力学理论。

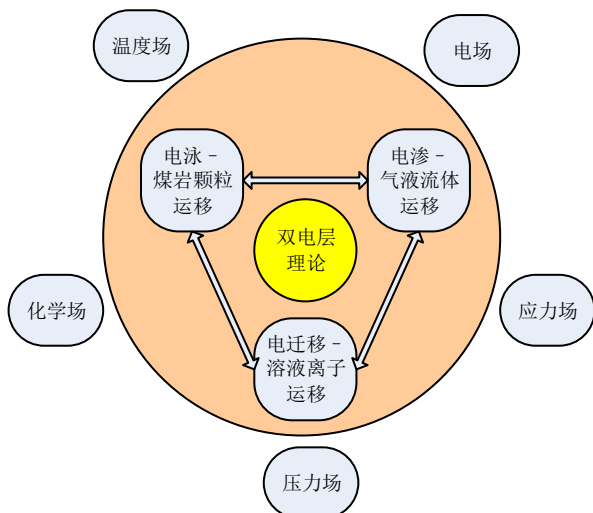


图 8 煤岩流体电动力学理论框架

Fig.8 Theoretical framework of hydro-electro-dynamics of coal rock

岩石力学、土力学、渗流力学、煤化学、胶体与界面化学、电化学、吸附科学等的理论与方法是煤岩流体电动力学的基础，煤岩流体电动力学又是采矿工程、油气工程、矿物加工工程、地质工程、边坡工程、环境工程等的基础。因此，煤岩流体电动力学成为连接岩石力学、渗流力学、电化学等基础学科与采矿工程、油气工程、边坡工程等应用学科的桥梁。

7 煤岩流体电动力学主要研究方向

虽然目前对于煤岩流体电动力学方面的研究已取得了一部分成果，但是这些研究成果普遍存在着

以现场工艺与参数选择为主、将自身实际条件理想化、对深地基础研究不够重视等一系列问题。结合我国油气与矿产等地下资源开采条件的复杂性与特殊性，要保证我国能源持续稳定供给，深入开展煤岩流体电动力学理论研究迫在眉睫。考虑到煤岩流体电动力学的特殊性，凝练了 5 个主要研究方向：

(1) 电化学作用下煤岩中液体的电渗流机制研究
研究电化学作用下不同种类煤岩中液体的电渗流速度及其与电位梯度、pH 值、电极材料、电解液种类及浓度等参量之间的关系，建立煤岩的电渗流速度方程，计算电渗透系数并探求其与煤岩比表面积、孔隙度、平均孔径等孔隙结构参数和 pH 值、电极材料、电解液浓度等电化学参数之间的定量关联程度；在线观测与模拟有无电渗作用时煤岩中液体的渗流过程与路径，对比分析液体在煤岩中的空间展布特征与优势运移路径差异；结合煤岩样的电动电位、电荷密度和分子结构等测试结果，阐明煤岩表面电动电位与电渗透系数、含氧官能团等之间的关系，建立煤岩表面电渗流的双电层结构模型，揭示煤岩电渗流机制。

(2) 深地环境下煤岩流体电动-压动双动力渗流规律研究

电动渗透系数与电动电位、电荷密度等表面电学特性有关，表面电学特性又受比表面积影响^[91]。压动渗透系数与孔容、平均孔径等孔隙结构有关，孔隙连通性程度由开孔孔隙率决定。可见，2 种渗透系数的落脚点为比表面积、孔隙率等孔隙结构。而煤岩孔隙结构在外应力场作用下会发生变化。因此应力场-电场耦合作用下的渗流规律较为复杂。

研究三向应力状态下电化学作用时煤岩中液体的渗透特性，获得总渗流速度与电位梯度、轴压、围压和孔隙压力等参量之间的关系，明晰电化学作用过程中电动渗流速度与压动渗流速度的差异和比重，探求不同种类煤岩电动渗透系数与有效应力之间的关系，建立煤岩中液体的电动-压动双动力渗流方程；研究三向应力状态下有无电化学作用时煤岩中气液两相渗透特性，对比分析气液相对渗透率、残余液体饱和度和残余液体时气体有效渗透率等参量变化，阐明电化学增透效果与电位梯度、电解液种类及浓度等参量间的关系。

(3) 电化学作用下煤岩颗粒的电泳特性研究

研究电化学作用对不同种类煤岩颗粒运移特性、沉降特性与粒度分布的影响规律，定性分析电化学作用下煤岩颗粒的电泳聚集、电渗固结与阴阳离子的电迁移等电动作用效应，结合扫描电镜能谱、

显微 CT 与电动电位等测试结果，表征煤岩微结构形态特征，并揭示电泳机制。

(4) 电化学作用下煤岩物性变化的微结构响应机制研究

通过研究电化学作用前后不同类型煤岩样渗透特性、力学特性、润湿性、胀缩性与电阻率特性等的变化规律，结合改性前后煤岩样的孔隙结构、基质结构、晶层结构与分子结构等参数的测试结果，从理论上描述电化学作用下煤岩宏观物性的变化过程及其间的相互作用关系，建立电化学作用下煤岩宏观物性变化的微结构响应模型。

(5) 电化学作用下煤岩表面吸附瓦斯的界面驱替机制研究

瓦斯多为表面吸附，在电化场作用下瓦斯解吸会受到电渗与渗吸的双重作用，因此研究这两者的耦合作用可有效调控界面瓦斯。研究电化学作用下电位梯度、电极种类、电解液种类及浓度等参量对煤岩瓦斯解吸特性的影响规律，分析解吸率、解吸速率与解吸时间等参数的变化，运用多种扩散模型获得电化学驱动瓦斯的速率常数与活化能；结合煤岩渗吸特性与电渗特性试验，分析电化学过程中的毛细作用力与电渗作用力等驱动力，揭示煤岩表面吸附瓦斯解吸扩散的电化学驱替机制，明晰煤层气与页岩气等非常规天然气开采中水锁效应的电渗与渗吸双作用解除过程。

8 煤岩流体电动力学的关键技术开发

(1) 煤岩中液体电渗流试验装置研制与在线测试

开展煤岩电渗流试验的关键是研制煤岩电渗试验装置。煤岩电渗试验装置由电渗筒、蠕动泵、电源、电极、电压表以及阳极与阴极侧的注液量杯、出液量杯和天平等组成(见图 9)。其中电渗筒为核

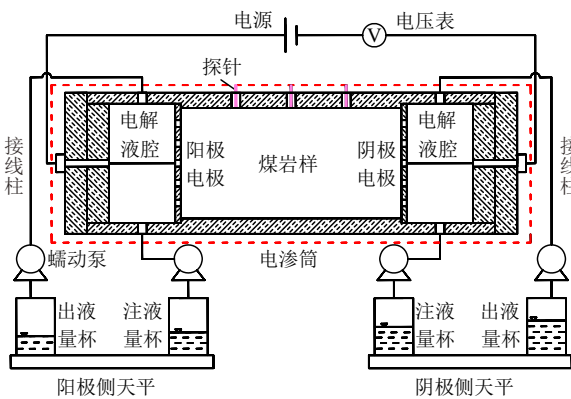


图 9 煤岩电渗试验装置

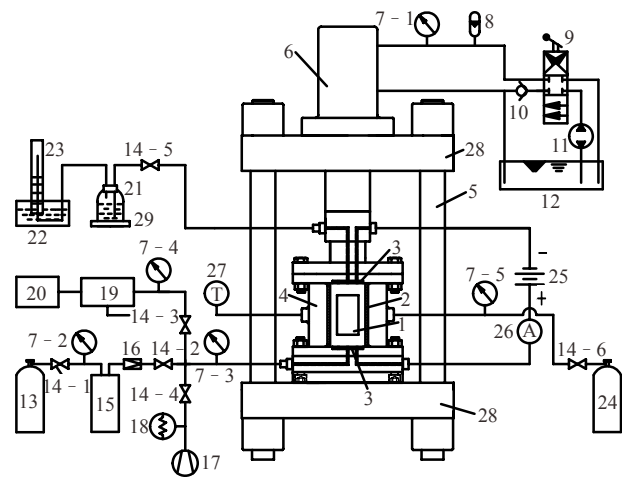
Fig.9 Electroosmosis testing apparatus of coal rock

心部件。采用该装置测试直径 50 mm、长 100 mm 煤岩试样在施加电场时阳极侧与阴极侧的排水量与电势变化，进而计算电渗流速度与电渗透系数。

采用核磁共振法(NMRI)在线测试煤岩中液体的渗流过程与路径，将煤岩电渗试验装置的核心部件电渗筒置于核磁共振仪的磁体腔中，通过成像探头分别观察有无电渗作用时煤岩中液体的渗流过程与路径(有电渗作用时，为避免施加电场对核磁共振观测时的干扰，间断性的施加电场并在观测时关闭电场)，对比分析液体在煤岩中的空间展布特征与运移优势路径差异。运用 COMSOL Multiphysics 软件模拟外加电场时煤岩中液体渗流场的分布。

(2) 煤岩电动 - 压动三轴渗流试验装置研制

揭示煤岩流体渗流的多场(电场、应力场与压力场)耦合作用机制，可以为煤岩流体电动力学理论建立提供指导。为实现三轴应力状态下煤岩流体在电动 - 压动双重动力作用时的渗透系数测试问题，太原理工大学采矿工艺研究所研制了煤岩电动 - 压动三轴渗流试验装置(见图 10)。该装置的核心模块是电动 - 压动三轴渗透仪(见图 11)，部分零部件见图 12。采用该装置可测试三轴应力状态下煤岩流体在电动 - 压动双重动力作用时的渗透系数，获得煤岩电动渗透系数；在电化场作用下可模拟煤岩三轴应力下电渗导流驱气的气液相对渗透特性，揭示煤岩电化学增透规律与机制，是煤岩流体电动力学这一新领域理想的试验装置。



- 1—试样；2—橡胶套；3—多孔电极板；4—三轴渗透室；5—加载机架；
- 6—加载油缸；7—压力表；8—蓄能器；9—三位四通阀；10—单向阀；
- 11—加载油泵；12—油箱；13—高压气瓶(加载孔隙压)；14—截止阀；
- 15—参考罐；16—稳压阀；17—真空泵；18—真空压力表；19—恒压恒流注液泵；
- 20—储液罐；21—集液瓶；22—水槽；23—集气量筒；24—高压气瓶(加载围压)；
- 25—直流电源；26—电流表；27—温度数显表；
- 28—承压板；29—天平

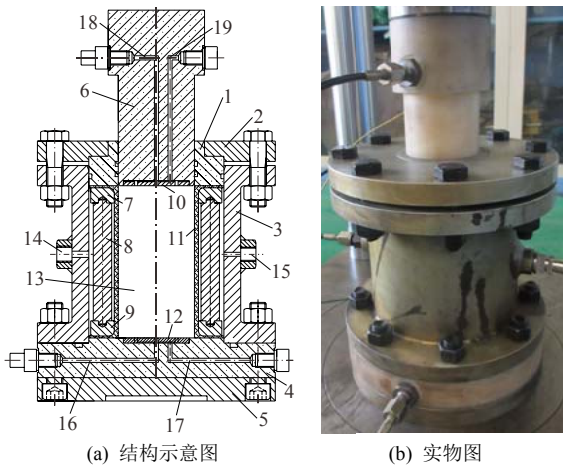
(a) 结构示意图



(b) 实物图

图 10 煤岩电动 - 压动三轴渗流试验装置

Fig.10 Traxial seepage experiment apparatus for coal rock under the coupling of pressure-motion and electro-motion



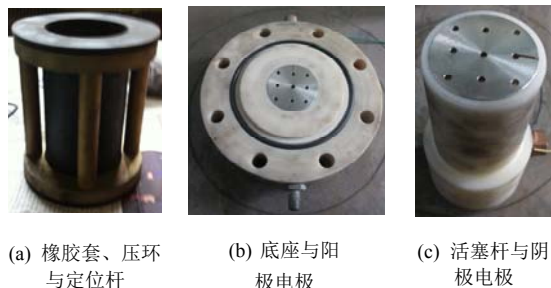
(a) 结构示意图

(b) 实物图

1—顶盖；2—顶盖法兰；3—外筒；4—底座；5—底座法兰；6—加压活塞；7—上压环；8—支撑杆；9—下压环；10—阴极多孔电极板；11—橡胶套；12—阳极多孔电极板；13—煤样；14—围压接口；15—温度传感器接口；16—进液/气孔；17—阳极导线孔；18—出液/气孔；19—阴极导线孔

图 11 三轴渗透仪

Fig.11 Traxial seepage chamber



(a) 橡胶套、压环与定位杆 (b) 底座与阳极电极 (c) 活塞杆与阴极电极

图 12 三轴渗透仪零部件

Fig.12 Components of traxial seepage chamber

(3) 煤岩流体电动力学综合测试体系构建

煤岩流体电动力学多参量综合测试主要从电学特性、宏观特性与微观结构 3 个方面进行，具体如

图 13 所示。主要进行的电学参数测试有：电动电位、电荷密度、电阻率、介电常数、离子数量等，采用的仪器主要有：电泳仪、电位滴定仪、电化学工作站、介电常数测定仪、离子浓度测量仪等。深入研究电学作用过程中的多参量动态变化特征，可以实现煤岩流体电动力学的传质动力学、微结构响应以及界面调控等机制的深入研究。

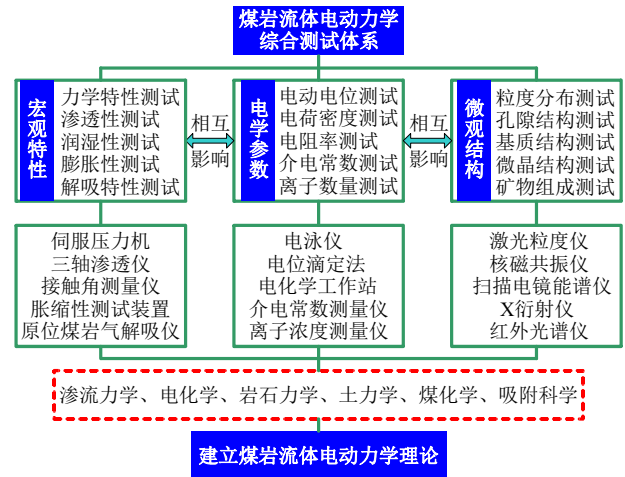
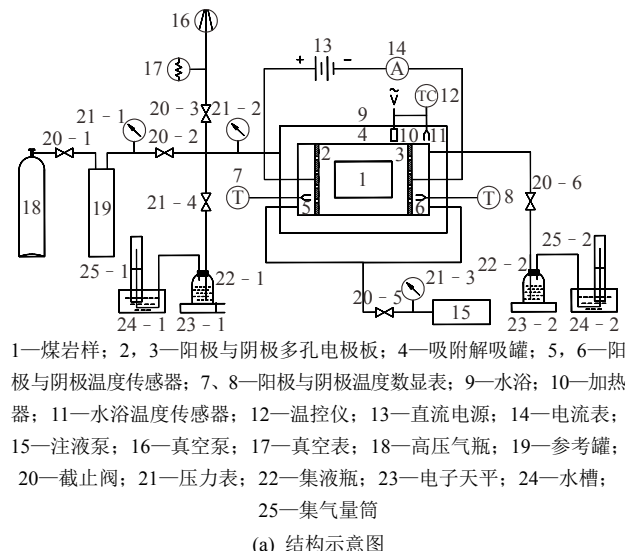


图 13 煤岩流体电动力学综合测试体系

Fig.13 Comprehensive test system of hydro-electro-dynamics of coal rock

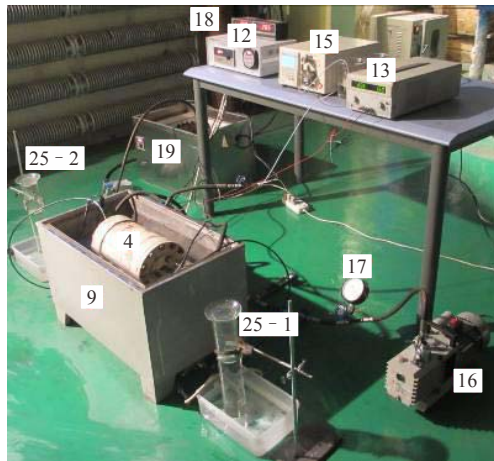
(4) 电化学强化煤岩气解吸试验装置研制

研究电学作用下煤岩表面吸附瓦斯的界面驱替机制的关键是研制电化学强化煤岩气解吸试验装置。图 14 为自主研制的煤岩气解吸电化学强化试验装置。该装置主要由电化学作用系统、高压注气系统、真空脱气系统、环境温度测控系统及数据采集系统 5 个部分组成。其中核心部件为吸附解吸罐，该罐是由 2 个配备法兰的塑料端盖与包裹绝缘内衬的金属外筒密封构成，两端盖内侧中心设有绝缘电



(a) 结构示意图

1—煤岩样；2，3—阳极与阴极多孔电极板；4—吸附解吸罐；5，6—阳极与阴极温度传感器；7，8—阳极与阴极温度数显表；9—水浴；10—加热器；11—水浴温度传感器；12—温控仪；13—直流电源；14—电流表；15—注液泵；16—真空泵；17—真空表；18—高压气瓶；19—参考罐；20—截止阀；21—压力表；22—集液瓶；23—电子天平；24—水槽；25—集气量筒



(b) 实物图

图 14 电化学强化煤岩气解吸试验装置

Fig.14 Experimental device of enhancing gas desorption from coal rock by electrochemical method

极定位环和与之紧密接触的阳极、阴极多孔电极板，两侧电极定位环的轴心空间均为电解液容腔，阳极与阴极多孔电极板之间的空间为可进行吸附解吸作用的储样室。两端盖上均设有出气/液孔、进液孔和温度传感器孔等，以获得气液运移方向。采用该试验装置可测试电化学作用过程中 $\phi 0\sim 120\text{ mm}$ 不同块度煤岩样在 $0.1\sim 10\text{ MPa}$ 不同吸附平衡压力下的瓦斯解吸试验。

9 结 论

(1) 本文综述了煤岩流体电动作用在地下资源开采中的强化油气采收、井巷软岩加固和矿山导流增注3个方面工程应用，以及煤岩流体多相介质的运移特性、宏观物性变化、结构变化3个方面研究现状。指出了煤岩流体电动作用存在的4个方面问题：介质传输过程不清晰，多场耦合规律未开展，宏观物性的微结构响应机制不明确，表面吸附流体的界面调控理念未形成。

(2) 阐明了煤岩类多孔介质及其内部气液流体在电场作用下运移的理论基础——双电层理论，即水溶液中的煤岩表面电荷存在紧密层与扩散层，两层交界面的电动电位决定了电动能力，岩石(尤其是黏土矿物)带电的主要原因是阳离子交换，而煤则是极性官能团电离。

(3) 提出了煤岩流体电动力学的概念，即煤岩气液离子等多相介质在电场作用下的运动规律及其与外界的相互作用，并阐明了以双电层理论为核心、

以“电渗、电泳与电迁移”等电动特性为内含、以外界物化场为环境的理论框架。凝练了煤岩流体电动力学理论的5个主要研究方向，阐述了4个关键技术。该理论适用于比表面积较大的煤岩多孔介质，如煤、泥岩、页岩等。

本文提出的煤岩流体电动力学新理论有望开辟新的学科和资源增产方法，解决矿产与油气资源开采中尤其是涉及固气液运移方面的诸多工程问题，如煤层注水困难、煤粉堵塞伤害、瓦斯解吸缓慢、膨胀软岩支护困难、胶体充填排水缓慢、煤矸石重金属污染等，实现深部资源高效开发利用，为我国经济可持续发展提供能源和资源保证，助推中国能源科技强国梦。也为深部地电场作用下煤岩流体动力灾害的发生机制揭示提供了新的解决思路。

参考文献(References):

- [1] 王宏图, 李晓红, 鲜学福, 等. 地电场作用下煤中甲烷气体渗流性质的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 303 - 306.(WANG Hongtu, LI Xiaohong, XIAN Xuefu, et al. Testing study on seepage properties of methane gas in coal under the action of geo-electric field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 303 - 306.(in Chinese))
- [2] 鲜学福, 辜敏, 杜云贵. 变形场、煤化度和外加电场对甲烷在煤层中渗流的影响[J]. 西安石油大学学报, 2007, 22(2): 89 - 91. (XIAN Xuefu, GU Min, DU Yungui. Effects of deformation field, coalification degree and the electronic field on the seepage law of methane gas in coal[J]. Journal of Xi'an Shiyou University, 2007, 22(2): 89 - 91.(in Chinese))
- [3] 朱兴珊. 煤和瓦斯突出与太阳黑子活动的关系[J]. 山东矿业学院学报, 1996, 15(3): 1 - 4.(ZHU Xingshan. The relationship between sunspot activity and coal-gas outburst[J]. Journal of Shandong Mining Institute, 1996, 15(3): 1 - 4.(in Chinese))
- [4] 和雪松, 李世愚, 潘科, 等. 矿山地震与瓦斯突出的相关性及其在震源物理研究中的意义[J]. 地震学报, 2007, 29(3): 314 - 327.(HE Xuesong, LI Shiyu, PAN Ke, et al. The relationship between earthquake and coal-gas outburst and its significance of source physic[J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(3): 314 - 327.(in Chinese))
- [5] 王宏图, 杜云贵, 鲜学福. 地球物理场中的煤层瓦斯渗流方程[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 644 - 646.(WANG Hongtu, DU Yungui, XIAN Xuefu. Gas seepage equation of coal in geophysical field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002,

- 21(5): 644 - 646.(in Chinese))
- [6] 左 恒, 吴爱祥, 王怡明, 等. 地电场对裂隙岩块中溶浸液渗流特性影响的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 972 - 976. (ZUO Heng, WU Aixiang, WANG Yiming, et al. Study on effect of geoelectric field on seepage properties of leaching solution in fractured rock block[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 972 - 976.(in Chinese))
- [7] TITUS C H, WITTLE K, BELL W. Apparatus for passing electrical current through an underground formation[P]. Canada: No.427708, 1985.
- [8] 郭俊庆, 康天合, 康健婷, 等. 一种电化学提高煤层气采收率的方法[P]. 中国: CN201610883325.8, 2016.10.10.(GUO Junqing, KANG Tianhe, KANG Jianting, et al. A method of improving recovery of CBM by electrochemical method[P]. China: CN201610883325.8, 2016.10.10. (in Chinese))
- [9] ANBAH A S. Use of direct electrical current for increasing the flow rate of reservoir fluids during petroleum recovery[Ph. D. Thesis][D]. Los Angeles: University of Southern California, 1963.
- [10] 瓦希托夫. 利用物理场从地层中开采石油[M]. 蔡天成译. 北京: 石油工业出版社, 1993: 141 - 238.(BAWNTOB. Oil explored from stratum by physical field[M]. Translated by CAI Tiancheng. Beijing: Oil Industry Press, 1993: 141 - 238.(in Chinese))
- [11] WITTLE J K, HILL D G, CHILINGAR G V. Direct electric current oil recovery(EOR)—a new approach to enhancing oil production[J]. Energy Sources, Part A, 2011, 33: 805 - 822.
- [12] ANSARI A, HAROUN M, RAHMAN M M, et al. Electrokinetic driven low-concentration acid improved oil recovery in Abu Dhabi tight carbonate reservoirs[J]. Electrochimica Acta, 2015, 181: 255 - 270.
- [13] 易 兵, 董启山, 董瑞春, 等. 吉林油田大功率直流电场强化采油技术研究进展[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(3): 898 - 901.(YI Bing, DONG Qishan, DONG Ruichun, et al. The advance of JiLin oil field strengthening recovery technology by powerful direct current electric field[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(3): 898 - 901.(in Chinese))
- [14] TITKOV N I, KORZHUEV A S, SMOLYANINOV V G, et al. Electrochemical induration of weak rocks[R]. Moscow: Consultants Bureau, 1963.
- [15] 宋宏伟. 电化学法巷道软岩变性方法初探[J]. 中国矿业大学学报, 1998, 27(3): 239 - 241.(SONG Hongwei. Research on modification of soft rock of roadway by electrochemical method[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1998, 27(3): 239 - 241.(in Chinese))
- [16] 周 辉, 程昌炳, 杨 鑫, 等. 软岩的电化学加固方法[P]. 中国: CN2008 10048489.4, 2008.12.(ZHOU Hui, CHENG Changbing, YANG Xin, et al. The stabilization of soft rock by electrochemical method[P]. China: CN2008 10048489.4. 2008.12.(in Chinese))
- [17] 康天合, 刘 宁, 王政华, 等. 一种巷道围岩稳定性的电极优化布置方法[P]. 中国: 201110462704.7, 2013.7.10.(KANG Tianhe, LIU Ning, WANG Zhenghua, et al. A method of electrode-optimized layout for stability of surrounding rock of roadway[P]. China: 201110462704.7, 2013.7.10.(in Chinese))
- [18] LOCKHART N C. Sedimentation and electro-osmotic dewatering of coal-washery slime[J]. Fuel, 1981, 60(10): 919 - 923.
- [19] LOCKHART N C. Electro-osmotic dewatering of coal froth flotation concentrates[J]. Fuel, 1982, 61(8): 780 - 781.
- [20] FOURIE A B, JONES C J F P. Improved estimates of power consumption during dewatering of mine tailings using electrokinetic geosynthetics(EKG)[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28(2): 181 - 190.
- [21] 波尔特诺夫. 充填体脱水试验[J]. 国外金属矿采矿, 1984, (4): 17 - 20.(BOER Tenuofu. Dehydration test of backfill[J]. Metal Mining in Foreign, 1984, (4): 17 - 20.(in Chinese))
- [22] 郭俊庆, 康天合, 康健婷, 等. 一种压动 - 电动耦合作用强化煤层注水法[P]. 中国: CN201711052761.1, 2018.5.18.(GUO Junqing, KANG Tianhe, KANG Jianting, et al. A method of enhancing coal seam flooding by hydraulic power coupling with electric power[P]. China: CN201711052761.1, 2018.5.18.(in Chinese))
- [23] 王少勇, 吴爱祥, 尹升华, 等. 一种电场强化细粒尾矿原地浸出的方法[P]. 中国: CN201310138992.X, 2013.04.20.(WANG Shaoyong, WU Aixiang, YIN Shenghua, et al. A method of enhancing tailing leached by electric[P]. China: CN201310138992.X, 2013.04.20.(in Chinese))
- [24] 王少勇. 电场作用下尾矿堆浸体系渗流机制及传质行为研究[博士学位论文][D]. 北京: 北京科技大学, 2012.(WANG Shaoyong. Investigation on mechanism of solution flow and transportation of solute within the dump leaching system of tailings under the effect of electric field[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2012.(in Chinese))
- [25] REUSS F F. Memoirs de la societe imperiales des[J]. Naturalistes de Moscou, 1809, (2): 327.
- [26] QUINCKE G. Ueber eine neue art electrischer strome[J]. Poggendorff's Ann der Phys, 1859, 107: 1.
- [27] CASAGRANDE I L. Electro-osmosis in soils[J]. Geotechnique, 1949,

- 1(3): 159 - 177.
- [28] JONES C J F P, LAMONT-BLACK J, GLENDINNING S. Electrokinetic geosynthetics in hydraulic applications[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2011, 29(4): 381 - 390.
- [29] MITCHELL J K. *Fundamentals of soil behaviour*[M]. New York: John Wiley and Sons, 1993: 437.
- [30] CHILINGAR G V, ELNASSIR A, STEVENS R G. Effect of direct electrical current on permeability of sandstone cores[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1970, 22(7): 830 - 836.
- [31] AGGOUR M A, TCHELEPI H A, A1-YOUSEF H Y. Effect of electroosmosis on relative permeabilities of sandstones[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1994, 11(2): 91 - 102.
- [32] KALUMBA D, GLENDINNING S, ROGERS C D F, et al. Dewatering of tunneling slurry waste using electrokinetic geosynthetics[J]. *Journal of Environment Engineering*, ASCE, 2009, 135(11): 1 227 - 1 236.
- [33] 庄艳峰. EKG材料的研制及其在边坡加固中的应用[博士学位论文][D]. 武汉: 武汉大学, 2005.(ZHUANG Yanfeng. The development of EKG materials and its application in slope reinforcement[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.(in Chinese))
- [34] MOHAMEDHASSAN E, SHANG J Q. Effects of electrode materials and current intermittence in electro-osmosis[J]. *Proceedings of the ICE-Ground Improvement*, 2001, 5(1): 3 - 11.
- [35] 陈雄峰, 荆一凤, 霍守亮, 等. 电渗法对太湖环保疏浚底泥脱水干化研究[J]. *环境科学研究*, 2006, 19(5): 54 - 58.(CHEN Xiongfeng, JING Yifeng, HUO Shouliang, et al. The research of environmental dredged sludge dewatering in Taihu lake by electro-osmotic[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(5): 54 - 58.(in Chinese))
- [36] 李 瑛. 软黏土地基电渗固结试验和理论研究[博士学位论文][D]. 杭州: 浙江大学, 2011.(LI Ying. Experimental and theoretic study on electro-osmotic consolidation of soft clay foundation[Ph. D. Thesis][D]. Hangzhou: University of Zhejiang, 2011.(in Chinese))
- [37] PERRIN J. Mecanisme de l'electrisation de contact et solutions colloïdales[J]. *Journal de Chimie Physique*, 1904, (6): 601 - 607.
- [38] ZHOU J X, LIU Z, SHE P, et al. Water removal from sludge in a horizontal electric field[J]. *Drying Technology*, 2001, 19(3/4): 627 - 638.
- [39] CITEAU M, LARUE O, VOROBIEV E. Influence of salt, pH and polyelectrolyte on the pressure electro-dewatering of sewage sludge[J]. *Water Research*, 2011, 45(6): 2 167 - 2 180.
- [40] 李 瑛, 龚晓南. 含盐量对软黏土电渗排水影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(8): 1 254 - 1 259.(LI Ying, GONG Xiaonan. Experimental study on effect of soil salinity on electro-osmotic dewatering in soft clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(8): 1 254 - 1 259.(in Chinese))
- [41] PUGH R C. The application of electrokinetic geosynthetic material to uses in the construction industry[Ph. D. Thesis][D]. Newcastle: University of Newcastle, 2002.
- [42] WAN T Y, MITCHELL J K. Electro-osmotic consolidation of soils[J]. *Journal of Geotechnical Geotechnical Division, ASCE*, 1976, 102(5): 473 - 491.
- [43] 陶艳丽, 周 建, 龚晓南, 等. 间歇通电模式影响电渗效果的试验[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2014, 46(8): 78 - 83.(TAO Yanli, ZHOU Jian, GONG Xiaonan, et al. Experimental research of the influence of current intermittence on electro-osmotic effect[J]. *Journal of Harbin institute of Technology*, 2014, 46(8): 78 - 83.(in Chinese))
- [44] GLENDINNING S, LAMONT-BLACK J, JONES C J F P. Treatment of sewage sludge using electrokinetic geosynthetics[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, A139: 491 - 499.
- [45] 庄艳峰, 王 钊. 电渗固结中的界面电阻问题[J]. *岩土力学*, 2004, 25(1): 117 - 120.(ZHUANG Yanfeng, WANG Zhao. Study on interface electric resistance of electro-osmotic consolidation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(1): 117 - 120.(in Chinese))
- [46] 庄艳峰, 王 钊. 电渗的电荷累计理论[J]. *岩土力学*, 2005, 26(4): 629 - 632.(ZHUANG Yanfeng, WANG Zhao. Electric charge accumulation theory for electro-osmotic consolidation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(4): 629 - 632.(in Chinese))
- [47] 庄艳峰, 王 钊, 林 清. 电渗的能级梯度理论[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2005, 37(2): 283 - 286.(ZHUANG Yanfeng, WANG Zhao, LIN Qing. Energy level gradient theory for electro-osmotic consolidation[J]. *Journal of Haerbin Institute of Technology*, 2005, 37(2): 283 - 286.(in Chinese))
- [48] HU L M, WU H. Mathematical model of electro-osmotic consolidation for soft ground improvement[J]. *Géotechnique*, 2014, 64(2): 155 - 164.
- [49] 吴 辉, 胡黎明. 考虑电导率变化的电渗固结模型[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(4): 734 - 738.(WU Hui, HU Liming. Numerical simulation of electro-osmosis consolidation considering variation of electrical conductivity[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(4): 734 - 738.(in Chinese))
- [50] 王柳江, 刘斯宏, 陈守开, 等. 基于热-水-力耦合的电渗排水试验数值模拟[J]. *中南大学学报*, 2016, 47(3): 889 - 896.(WANG Liujiang, LIU Sihong, CHEN Shoukai, et al. Numerical simulation of electro-osmotic drainage test based thermo-hydro-mechanical coupling model[J]. *Journal of Central South University*, 2016, 47(3):

- 889 - 896.(in Chinese)
- [51] 周亚东, 邓安, 刘中宪, 等. 考虑饱和度变化的一维电渗固结模型[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1 524 - 1 529.(ZHOU Yadong, DENG An, LIU Zhongxian, et al. One-dimensional electroosmosis consolidation model considering variable saturation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(8): 1 524 - 1 529.(in Chinese))
- [52] LI S X. Experimental studies of electrokinetic phenomena in brine-saturated porous materials[Ph. D. Thesis][D]. Massachusetts: University of Massachusetts Amherst, 1996.
- [53] CAMPBELL J A L, SUN S C. Bituminous coal electrokinetics[J]. Transaction of American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, 1970, 247(1): 111.
- [54] CAMPBELL J A L, SUN S C. Anthracite coal electrokinetics[J]. Transaction of American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, 1970, 247(2): 120 - 122.
- [55] LASKOWSKI J S. Coal electrokinetics: the origin of charge at coal/water interface[R]. United States: The University of British Columbia, 1987.
- [56] KELEBEK S, SALMAN T, SMITH G W. An electrokinetic study of three coals[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 1982, 21(2): 205 - 209.
- [57] 王东, 康天合, 柴肇云, 等. 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[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1 876 - 1 883.(WANG Dong, KANG Tianhe, CHAI Zhaoyun, et al. Experimental studies of subsidence and expandability of montmorillonitic soft rock particles under electrochemical treatment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1 876 - 1 883.(in Chinese))
- [58] ACAR Y B, GALE R J, ALSHAWABKEH A N, et al. Electrokinetic remediation: basis and technology status[J]. Journal of Hazardous Materials, 1995, 40(2): 117 - 137.
- [59] 郭康仕, 庄艳峰, 段伟. 蒙脱石电渗微观机制试验研究[J]. 浙江大学学报, 2017, 51(12): 2 373 - 2 382.(GUO Kangshi, ZHUANG Yanfeng, DUAN Wei. Experimental study on micro-mechanism of electro-osmosis using montmorillonite[J]. Journal of Zhejiang University, 2017, 51(12): 2 373 - 2 382.(in Chinese))
- [60] PINZARI U. Indagine sul trattamento elettrosmotico di un materiale argilloso[J]. Geotecnica, 1962, 9(3): 101 - 114.
- [61] WANG D, KANG T, HAN W, et al. Electrochemical modification of tensile strength and pore structure in mudstone[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(4): 687 - 692.
- [62] YIN B, KANG T H, KANG J T, et al. Experimental and mechanistic research on enhancing the strength and deformation characteristics of fly-ash-cemented filling materials modified by electrochemical treatment[J]. Energy and Fuels, 2018, 32(3): 3 614 - 3 626.
- [63] 柴肇云, 孙耀辉, 张亚涛, 等. 电极材质对泥岩电化学改性效果的影响[J]. 煤炭学报, 2017, 42(增 1): 68 - 75.(CHAI Zhaoyun, SUN Yaohui, ZHANG Yatao, et al. Influence of electrode material on argillaceous rock electrochemical modified effects[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(Supp.1): 68 - 75.(in Chinese))
- [64] 王东. 物化型软岩电化学改性机制研究[博士学位论文][D]. 太原: 太原理工大学, 2010.(WANG Dong. Electrochemical modified mechanism of physicochemical soft rock[Ph. D. Thesis][D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010.(in Chinese))
- [65] 张继红, 王江, 赵丽娟, 等. 单相液体在多孔介质中的电动渗流特性[J]. 大庆石油学院学报, 2002, 26(1): 24 - 26.(ZHANG Jihong, WANG Jiang, ZHAO Lijuan, et al. The electroosmosis of liquid in porous materials[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2002, 26(1): 24 - 26.(in Chinese))
- [66] 张继红, 陈寿平, 李跃辉, 等. 流体在外加直流电场作用下的电动 - 水力渗流特性[J]. 大庆石油学院学报, 2002, 26(3): 33 - 35.(ZHANG Jihong, CHEN Shouping, LI Yuehui, et al. Electro-hydraulic seepage property of liquid in the field of direct electric[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2002, 26(3): 33 - 35.(in Chinese))
- [67] 吴新民, 张宁生. 直流电场对岩心润湿性的影响研究[J]. 西安石油学院学报, 2001, 16(4): 46 - 49.(WU Xinmin, ZHANG Ningsheng. The influence of wettability of core in the field of electric[J]. Journal of Xi'an Shiyou University, 2001, 16(4): 46 - 49.(in Chinese))
- [68] 江怀春. 电场作用下高泥矿堆中溶浸液的渗流特性研究[硕士学位论文][D]. 长沙: 中南大学, 2007.(JIANG Huaichun. The seepage property of liquid in tailing in field of electric[M. S. Thesis][D]. Changsha: Central South University, 2007.(in Chinese))
- [69] MENKOVSKII M A, ZHURAVLEV V P, LIKHAREV Y D, et al. Determination of electrokinetic potential when coal is wetted by solutions[J]. Plenum Publishing Corporation, 1975, (4): 645 - 647.
- [70] 郭俊庆. 电化学强化无烟煤瓦斯解吸渗流特性及其机制研究[博士学位论文][D]. 太原: 太原理工大学, 2015.(GUO Junqing. Research on properties and its mechanisms of improving gas desorption and seepage from anthracite by electrochemical method[Ph. D. Thesis][D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.(in Chinese))
- [71] 郭俊庆, 康天合, 张惠轩. 电化学强化无烟煤瓦斯解吸特性及其机制[J]. 煤炭学报, 2018(增 1): 210 - 218.(GUO Junqing, KANG Tianhe,

- ZHANG Huixuan. Study on property and its mechanism of intensifying gas desorption from anthracite under electrochemical treatment[J]. The Journal of China Coal Society, 2018(Supp.1): 210 - 218.(in Chinese))
- [72] 吴 辉. 软土地基电渗加固方法研究[博士学位论文][D]. 北京: 清华大学, 2015.(WU Hui. Soft soil improvement by electro-osmosis techniques[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.(in Chinese))
- [73] SETHI A J H A. Electrochemical modifications in kaolinite-glass bead plugs[J]. Clays and Clay Minerals, 1973, 21(4): 219 - 227.
- [74] GUO J, KANG T, KANG J, et al. Accelerating methane desorption in lump anthracite modified by electrochemical treatment[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 131: 392 - 399.
- [75] KONG X, GUO J, KANG T. Change of pore-fracture structure of anthracite modified by electrochemical treatment using Micro-CT[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, (1): 1 - 9.
- [76] CASAGRADA L. Structures produced in clays by electric potentials and their relation to natural structures[J]. Nature, 1947, 4 066: 470 - 471.
- [77] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2 803 - 2 813.(HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2 803 - 2 813.(in Chinese))
- [78] 谢和平, 高峰, 鞠 杨. 深部岩体力学研究探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2 161 - 2 177.(XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2 161 - 2 177.(in Chinese))
- [79] 谢和平, 高峰, 鞠 杨, 等. 深部煤炭资源流态化开采理论与技术构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 548 - 556.(XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Theoretical and technological conception of the fluidization mining for deep coal resources[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(3): 548 - 556.(in Chinese))
- [80] 李志强, 王登科, 宋党育. 新扩散模型下温度对煤粒瓦斯动态扩散系数的影响[J]. 煤炭学报, 2015, 40(5): 1 055 - 1 064.(LI Zhiqiang, WANG Dengke, SONG Dangyu. Influence of temperature on dynamic diffusion coefficient of CH₄ into coal particles by new diffusion model[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(5): 1 055 - 1 064.(in Chinese))
- [81] 杨陆武. 难动用煤层气资源的高产开采技术研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 32 - 39.(YANG Luwu. Produce high rate gas from poor CBM reservoir-Study on CBM resource types and “Window-Longtail Effects” of reservoir during delivering gas[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 32 - 39.(in Chinese))
- [82] 胡凯建, 吴爱祥, 尹升华, 等. 电场改善细粒级尾矿浸出渗透效果试验研究[J]. 中南大学学报, 2012, 43(10): 3 889 - 3 994.(HU Kaijian, WU Aixiang, YIN Shenghua, et al. Experimental study on effect of electric field on permeability of fine tailings[J]. Journal of Central South University, 2012, 43(10): 3 889 - 3 994.(in Chinese))
- [83] BOND R L. Capillary structure of coals[J]. Nature, 1956, 4524: 104 - 105.
- [84] HERRERA L F, JUNPIROM S, DO D D, et al. Computer synthesis of char and its characterization[J]. Carbon, 2009, 47(3): 839 - 849.
- [85] HELMHOLTZ H. Studien über elektrische grenzsichten[J]. Ann Phys, 1879, 243(7): 337.
- [86] GOUY L G. Sur la constitution de la charge électrique à la surface d'un électrolyte[J]. Journal de Physique, 1910, (9): 457 - 468.
- [87] CHAPMAN D L. A contribution to the theory of electrocapillarity[J]. Philos Mag, 1913, 25(148): 475.
- [88] MARCANO F C. Improved generation of large-scale atomistic representations and pyrolysis /combustion simulations of illinois coal and coal char using the reaxff reactive force field[Ph. D. Thesis][D]. The Pennsylvania State: The Pennsylvania State University, 2012.
- [89] 谢克昌. 煤的结构与反应性[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 68 - 91.(XIE Kechang. The structure of coal and its reactivity[M]. Beijing: Science Press, 2002: 68 - 91.(in Chinese))
- [90] FUERSTENAU D W, ROSENBAUM J M, YOU Y S. Electrokinetic behavior of coal[J]. Energy and Fuels, 1988, 2(3): 241 - 245.
- [91] WANG D, KANG T H, HAN W M, et al. Electrochemical modification of the porosity and zeta potential of montmorillonitic soft rock[J]. Geomechanics and Engineering, 2010, 2(3): 1 - 12.