

8-25-2019

Modification function of magnetic treatment on grouting clay slurry

XUE Weifeng

College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; Shaanxi Coal and Chemical Technology Institute, Xi'an 710065, China; National & Local United Engineering Research Center of Green Safety Efficient Mining, Xi'an 710065, China

WANG Sujian

Shaanxi Coal and Chemical Technology Institute, Xi'an 710065, China; National & Local United Engineering Research Center of Green Safety Efficient Mining, Xi'an 710065, China

DENG Zengshe

Shaanxi Coal and Chemical Technology Institute, Xi'an 710065, China; National & Local United Engineering Research Center of Green Safety Efficient Mining, Xi'an 710065, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://cge.researchcommons.org/journal>



Part of the [Earth Sciences Commons](#), [Mining Engineering Commons](#), [Oil, Gas, and Energy Commons](#), and the [Sustainability Commons](#)

Recommended Citation

XUE Weifeng, WANG Sujian, DENG Zengshe, et al. (2019) "Modification function of magnetic treatment on grouting clay slurry," *Coal Geology & Exploration*: Vol. 47: Iss. 4, Article 19.

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.018

Available at: <https://cge.researchcommons.org/journal/vol47/iss4/19>

This Hydrogeology, Engineering Geology, Environmental Geology is brought to you for free and open access by Coal Geology & Exploration. It has been accepted for inclusion in Coal Geology & Exploration by an authorized editor of Coal Geology & Exploration. For more information, please contact 380940179@qq.com.

Modification function of magnetic treatment on grouting clay slurry

Authors

XUE Weifeng, WANG Sujian, DENG Zengshe, HUANG Kejun, HAN Lei, JI Ruijun, and LIANG Shaojian

文章编号: 1001-1986(2019)04-0117-07

磁处理对注浆用黏土浆液的改性作用

薛卫峰^{1,2,3}, 王苏健^{2,3}, 邓增社^{2,3}, 黄克军^{2,3}, 韩磊^{2,3}, 冀瑞君^{2,3}, 梁少剑^{2,3}

(1. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西煤业化工技术研究院有限责任公司, 陕西 西安 710065; 3. 煤炭绿色安全高效开采国家地方联合工程研究中心, 陕西 西安 710065)

摘要: 对黏土浆液进行磁化处理, 研究磁化处理后黏土浆液的黏度、密度、pH 值、电导率、析水率、结石率及抗渗性等物理性质变化特征。磁处理后, 黏土浆液密度、黏度、析水率均减小, pH 值、电导率、结石率增大, 黏土浆液的析水率与结石率的改善效果随磁化时间的增长而增大, 磁处理改善了浆液的流变性能, 磁化后黏土浆液固结体的抗渗性能较未磁化黏土浆液固结体抗渗性能有了大幅提高。黏土浆液经磁化后 Zeta 电位值、pH 值增大, 使得其分散程度提高, 从而降低了析水率, 提高了结石率, 同等质量黏土浆液抗渗性能的提高得益于磁处理后黏土浆液结石率的大幅增加, 而其黏度的降低, 是因磁处理后黏土浆液颗粒间有较强的排斥力导致。

关键词: 磁处理; 黏土浆液; 改性; 结石率; 抗渗性能

中图分类号: TD12 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.018



Modification function of magnetic treatment on grouting clay slurry

XUE Weifeng^{1,2,3}, WANG Sujian^{2,3}, DENG Zengshe^{2,3}, HUANG Kejun^{2,3},
HAN Lei^{2,3}, JI Ruijun^{2,3}, LIANG Shaojian^{2,3}

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Coal and Chemical Technology Institute, Xi'an 710065, China; 3. National & Local United Engineering Research Center of Green Safety Efficient Mining, Xi'an 710065, China)

Abstract: Clay slurry was treated through magnetization. The characteristics of the physical property change of the clay slurry after magnetic treatment such as viscosity, density, pH value, conductivity, syneresis rate, concretion rate and anti-permeability were studied. After magnetic treatment, density, viscosity and syneresis rate of the clay slurry decrease, pH, conductivity and concretion rate increase, the syneresis rate and the concretion rate are improved with the magnetization time. The magnetic treatment improves the rheological property of clay slurry, the anti-permeability performance of the cemented body of clay slurry after magnetic treatment rises greatly compared to the cemented body of clay slurry not treated by magnetization. After the magnetic treatment, the Zeta electrical potential and pH of the clay slurry increase, resulting in increase of dispersion, reducing the syneresis rate and increasing the concretion rate. The improvement of anti-permeability performance of the same quality clay slurry benefits from the significant increase of the concretion rate of the magnetically treated clay slurry, while the decrease of its viscosity results from the strong repulsion among the particles of clay slurry after the magnetic treatment.

Keywords: magnetic treatment; clay slurry; modification; concretion rate; rheological performance

黏土是含沙粒很少、有黏性的土壤, 具有较好的可塑性。一般黏土均由硅酸盐矿物在地球表面风化后形成, 主要矿物为高岭石、蒙脱石、伊利石。黏土浆液因具有抗渗性及可塑性, 被广泛应用于地

质勘探、工程地质、矿井开采防治水领域^[1-4]。根据不同工程需要, 针对黏土特性进行了一系列改性研究, 针对黏土在海洋污染治理^[5]、路基处理^[6]、垃圾填埋场建设^[7]等工程运用中的特点, 利用化学试剂

收稿日期: 2018-10-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2014CB047100)

Foundation item: National Basic Research Program of China(973 Program)(2014CB047100)

第一作者简介: 薛卫峰, 1985 年生, 男, 陕西韩城人, 工程师, 博士研究生, 从事矿井水文地质与地球化学研究工作。E-mail: weifengxue@163.com

引用格式: 薛卫峰, 王苏健, 邓增社, 等. 磁处理对注浆用黏土浆液的改性作用[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(4): 117-123.

XUE Weifeng, WANG Sujian, DENG Zengshe, et al. Modification function of magnetic treatment on grouting clay slurry[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(4): 117-123.

或添加物对黏土进行改性^[8-10]。但酸、碱和其他添加物对黏土的改性会带来两个方面的问题：一是环境污染，黏土作为一种天然矿物集合体对环境无害，但添加剂的使用势必会带来环境污染的风险；另一方面，黏土作为最廉价的工程材料在全球范围内大面积分布，基于此，许多工程活动均将其纳入首选的应用材料之列，添加剂的使用势必会造成工程造价增加。与上述改性活动不同的是，磁处理本身具备安全可靠，不会带来新的污染，在黏土改性研究方面显示了优势。以往黏土磁处理改性研究主要集中在以下 2 个方面：**a.** 石油钻井领域，对主要成分为黏土浆液的钻井液进行磁化处理，揭示磁处理技术在降黏、降切和抑制黏土造浆方面具有良性作用^[11-15]；**b.** 运用磁性氧化物对黏土进行磁处理，研究磁性氧化物改性黏土及其聚合物-黏土，揭示磁处理后黏土对特定离子的良好吸附作用及良好的热稳定性^[16-17]。但针对黏土浆液在矿井防治水、注浆工程领域中的应用特性，如磁处理后的结石率、析水性、可注性及抗渗性等物理性质的研究却鲜有报道。本文针对注浆领域黏土浆液的应用特性，设计了固定稀土永磁磁场对黏土浆液进行了磁化处理研究，以期对磁处理黏土浆液在注浆领域的应用提供参考。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

实验材料选取韩城地区红色黏土，过 30 到 35 目筛，黏土粒径 0.5~0.6 mm。

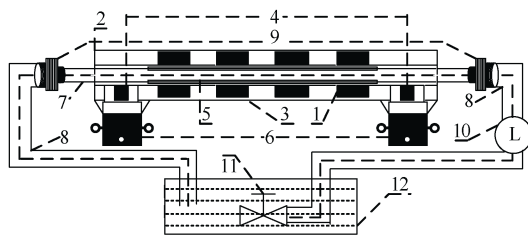
1.2 实验装置设计

磁化装置设计 永磁体类型(单个)为稀土永磁，剩磁 13.7~14.1 kGs，磁场强度 1.37~1.41 T，单个磁体尺寸为 100 mm×25 mm×10 mm，共 16 块，该磁化装置包括上下放置的上壳体和下壳体，其结构一致并上下对称放置，组成外壳体，在上下壳体组成的空间内嵌有永磁体，上下各 8 块，各永磁体横向间隔为 40 mm，上下间隔 4 mm，用固磁体固定，上排磁体与下排磁体间隙内有水管通过，水管与外部的水槽相通，水经过水泵的循环在上下磁体间流动并被磁化^[18](图 1)。

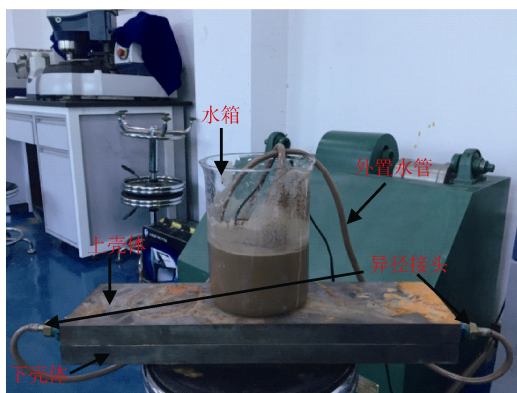
渗透性测试装置设计 如图 2 所示，取 2 个 3 L 放水瓶，分别选取粒径约 9 mm 石子 2.53 kg 装入放水瓶，石子体积约为 1.7 L，将底部放水孔堵住备用。

1.3 实验方法

经测试该磁化实验装置磁场强度为 1 T，分别将不同液固比黏土浆液在该磁化装置中进行磁化，且分别与未磁化黏土浆液进行对比，并测试黏土浆液经磁化后的物理性质。



1—永磁体；2—上壳体；3—下壳体；4—接口；5—固磁体；6—内置水管；7—外置水管；8—异径接头；9—流量计；10—水泵；11—水箱
(a) 结构示意图



(b) 实物图

图 1 磁化装置图

Fig.1 Magnetic equipment



图 2 抗渗性测试装置

Fig.2 Impermeability testing equipment

a. 未磁化黏土浆液对比样制作及测试

分别按水与黏土液固比 2:1、1.7:1、1.4:1 配制 4 500 g、2 700 g、2 914 g 浆液。上述配比浆液分别取 1 500 g、1 350 g、1 457 g 通过 100 L/h 水泵循环 50 min 后作为磁化前对比样，用 1006 型漏斗式泥浆黏度计测试黏度，用哈希 HQ430d 电导率仪、HQ411dpH 计分别测试电导率与 pH 值，各量取 100 mL 测试密度并观察析水率与结石率变化情况，其中将液固比为 1.7:1 浆液剩余部分倒入准备好的放水瓶中。静置 28 d 后量取 1 000 mL 自来水装入放水瓶中，打开底部放水孔接取 500 mL 并记录放水时间，根据放水时间测量黏土浆液固结体的抗渗性。

b. 磁化黏土浆液样制作及测试

选取液固比 2:1、1.7:1、1.4:1 浆液 1 500 g、

1 350 g、1 457 g 进行磁化,磁化时间为 50 min^[19],磁化完毕后同样测试电导率与 pH 值。量取 100 mL 测试密度并观察析水率与结石率变化情况。其中将液固比为 1.7 : 1 浆液剩余部分倒入准备好的放水瓶中,静置 28 d 后量取 1 000 mL 自来水装入放水瓶中,打开底部放水孔接取 500 mL 并记录放水时间,根据放水时间测量黏土浆液固结体的抗渗性。另外选取液固比 2 : 1 浆液 1 500 g 进行磁化,分别在 20 min、30 min、50 min 量取 100 mL 观察析水率与结石率变化情况。

2 实验结果与分析

根据上述实验测试得出液固比分别为 2 : 1、

1.7 : 1、1.4 : 1 黏土浆液磁化和非磁化的密度、黏度、pH、电导率、析水率和结石率的变化特性(表 1)。

2.1 密度与黏度变化

液固比分别为 2 : 1、1.7 : 1、1.4 : 1 的黏土浆液在磁化 50 min 后,如图 3、图 4 所示密度与黏度均呈现下降趋势,但下降幅度较小。密度是因物质受到重力作用而产生的一种效果,以单位体积的重量来表示,黏度是分子间力的作用效果,是物质分子微观作用的宏观表现。流体密度与流体黏度无本质相关性,但对同一种物质而言,重力场强度大,其静观密度与表观黏度都会变大。所以黏土浆液在经过磁化后密度与黏度变化表现了一致性,不同液固比黏土浆液在磁化后密度较磁化前减小,其表观黏度亦降低。

表 1 磁化前后黏土浆液物理特性测试结果
Table 1 Testing results of the physical properties of clay slurry before and after magnetization

浆液配比 (水 : 黏土)	浆液质量/g	密度/(g·cm ⁻³)		黏度/(Pa·s)		pH		电导率/(μs·cm ⁻¹)		24 h 析水率/%		24 h 结石率/%	
		非磁化	磁化	非磁化	磁化	非磁化	磁化	非磁化	磁化	非磁化	磁化	非磁化	磁化
2 : 1	1 500	118	116	17.45	17.22	8.46	8.55	372	408	59.0	51	41.0	49
1.7 : 1	1 350	122	120	17.54	17.36	8.41	8.58	394	419	53.5	33	46.5	67
1.4 : 1	1 457	130	129	18.28	17.91	8.13	8.31	436	457	47.0	26	53.0	74

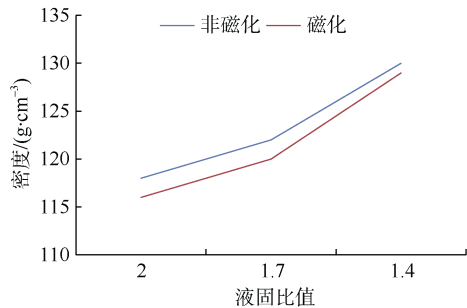


图 3 不同液固比黏土浆液磁化前后密度变化

Fig.3 Density variation of clay slurry with different liquid-solid ratio before and after magnetization

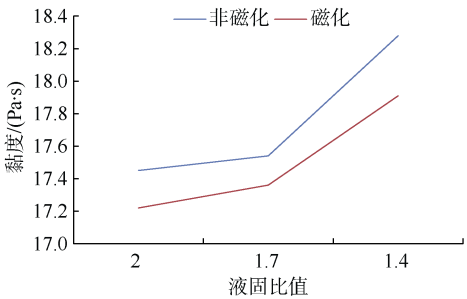


图 4 不同液固比黏土浆液磁化前后黏度变化

Fig.4 Viscosity variation of clay slurry different liquid-solid ratio before and after magnetization

2.2 pH 值与电导率变化

磁化后黏土浆液的 pH 值与电导率均有增加,其中电导率增加最为明显。不同液固比黏土浆液的

电导率在磁化后增大了 5%左右,pH 值和电导率变化与浆液的液固比相关,随着浆液浓度的增大而增大。磁化黏土浆液与非磁化黏土浆液均保持了这一特性。

2.3 析水率及结石率变化(24 h)

a. 不同液固比黏土浆液析水率及结石率变化规律(24 h)

在磁化 50 min 条件下,液固比为 2 : 1 浆液经磁化后析水率减小 13.56%,结石率增大 19.51%;液固比为 1.7 : 1 析水率减小 38.32%,结石率增大 44.09%,液固比 1.4 : 1 浆液析水率减小 44.68%,结石率增大 39.62%。不同液固比黏土浆液析水率均呈现减小趋势,结石率呈现增大趋势,且增减幅度明显(图 5),改性效果显著,随着液固比的降低磁化对黏土浆液的改性作用更为明显。

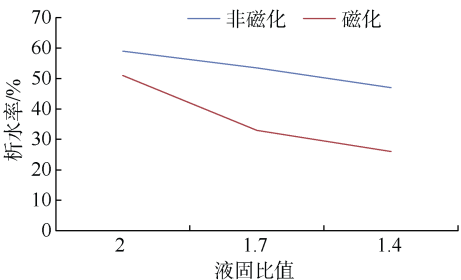


图 5 不同液固比黏土浆液磁化前后析水率变化曲线

Fig.5 Syneresis rate change of different liquid-solid ratio clay slurry

b. 黏土浆液析水率及结石率随时间变化规律

在磁化 50 min 条件下,对液固比分别为 1.7 : 1 与 1.4 : 1 的黏土浆液析水率与结石率在 24 h 内进行了观察,未经磁化的 2 种液固比黏土浆液析水率与结石率随时间变化曲线均呈 L 状(图 6),析水率与结石率在浆液静置初期急剧变化,在较短时间达到稳定,其中液固比 1.7 : 1 浆液在 3 h 左右达到稳定,液固比 1.4 : 1 浆液在 1.5 h 左右达到稳定(表 2),液固比较小浆液提前达到稳定。磁化后黏土浆液析水率与结石率随时间变化曲线整体呈线性变化,斜率趋向于 1,且在经过 24 h 静置后并未达到稳定状态,析水率呈增大、结石率呈减小趋势。

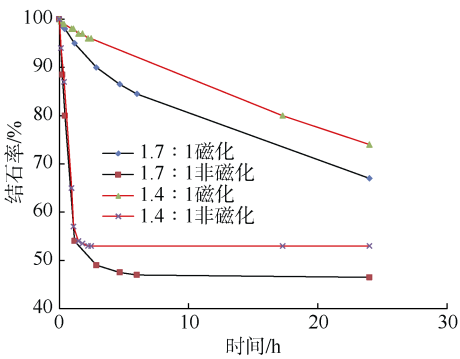


图 6 黏土浆液结石率随时间变化曲线
Fig.6 Variation of concretion rate of clay slurry with magnetization time

表 2 黏土浆液析水率与结石率随时间变化表
Table 2 Variation of syneresis rate and concretion rate of clay slurry with magnetization time

浆液配比(水 : 黏土)	浆液量/g	静置时间/h	析水率/%		结石率/%	
			磁化	非磁化	磁化	非磁化
1.7 : 1	1 350	0.23	1.5	11.5	98.5	88.5
		0.43	2.0	20.0	98.0	80.0
		1.18	5.0	46.0	95.0	54.0
		2.87	10.0	51.0	90.0	49.0
		4.68	13.5	52.5	86.5	47.5
		6.0	15.5	53	84.5	47.0
		24.0	33.0	53.5	67.0	46.5
1.4 : 1	1 457	0.13	0.5	6	99.5	94
		0.37	1	13	99	87
		0.95	2	35	98	65
		1.10	2	43	98	57
		1.48	3	46	97	54
		1.80	3	46.5	97	53.5
		2.23	4	47	96	53
		2.46	4	47	96	53
		17.28	20	47	80	53
		24.00	26	47	74	53

c. 不同磁化时间黏土浆液析水率及结石率变化规律(24 h)

在液固比为 1.4 : 1 条件下,黏土浆液经过不同时间磁化,测定其静置 24 h 后析水率与结石率。图 7 为不同磁化时间黏土浆液的析水率与结石率测试结果,显而易见,随着磁化时间的增长析水率减小,结石率增大。而磁化 30 min 黏土浆液较磁化 20 min 析水率减小 18.92%,结石率增大 11.11%,磁化 50 min 黏土浆液较磁化 30 min 析水率减小 13.33%,结石率增大 5.71%(表 3)。磁化时间从 20 min 增长到 30 min,对析水率与结石率的影响明显大于从 30 min 增长到 50 min,由此证明随着磁化时间的增长,磁化对黏土浆液析水率与结石率的影响逐渐减弱,趋于稳定。

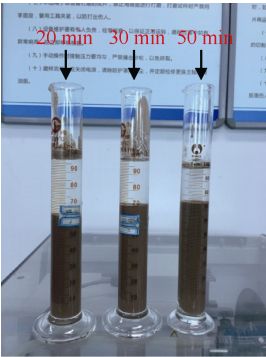


图 7 不同磁化时间黏土浆液析水率与结石率测试结果图
Fig.7 Syneresis rate and concretion rate of magnetized clay slurry in different magnetization time

表 3 不同磁化时间黏土浆液析水率与结石率变化表
Table 3 Variation of syneresis rate and concretion rate with different magnetization time

浆液配比(水：黏土)	浆液量/g	磁化时间/min	析水率/%		结石率/%	
			磁化	非磁化	磁化	非磁化
1.4：1	1 457	20	37		63	
		30	30	47	70	53
		50	26		74	

2.4 可注性及渗透性变化

磁化黏土浆液黏度较未磁化浆液减小，由于黏度与浆液的可注性关系密切，黏度的减小会使得浆液的可注性提高，此外，根据磁化 50 min 液固比 1.7：1 黏土浆液渗透性测试结果，磁化黏土浆液的抗渗性能要远远大于未磁化黏土浆液，2 种浆液注入渗透性测试装置固结 28 d 后，分别倒入 1 000 mL 自来水，打开底部放水孔接取 500 mL 水并记录放水时间，磁化黏土浆液所需时间为 83 s，非磁化黏土浆液为 48 s。如图 12 可见，磁化黏土浆液的结石率要远远大于未磁化黏土浆液，28 d 后，磁化黏土浆液依旧将石子完全覆盖，而未磁化黏土浆液顶部石子已随着浆液的沉淀完全露出，在加入等量自来水情况下，磁化黏土浆液由于其结石率较高，使得自来水的渗流通道变长，提高了其自身的抗渗性。磁处理对黏土浆液抗渗性的提高是显著的。

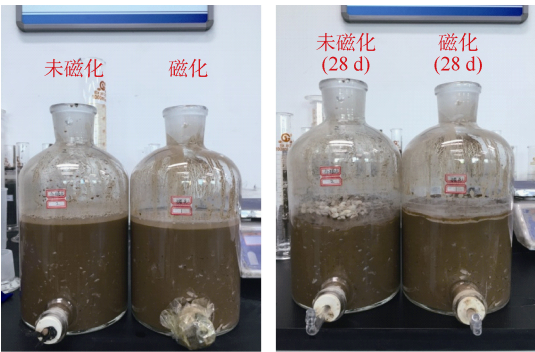


图 8 磁化黏土浆液抗渗性实验图
Fig.8 Impermeability test of magnetized clay slurry

3 磁处理对黏土浆液 Zeta 电位的影响及对黏土浆液的改性机理

为了研究磁处理对黏土浆液的改性机理，现对实验用黏土浆磁处理前后的 Zeta 电位进行测量，采用仪器为马尔文 Zeta 电位测试仪(Zetasizer Nano)，该仪器测试原理为利用检测样品散射光的微小频率移动得到带电颗粒电泳运动速度，利用 Herry 方程得到电位。由于该仪器对待测试样品浓度有严苛要求，需要样品保持较高的透光度，一般测试样品浓度不能大于 1%，所以取待测黏土 2 g 将其溶于 2 000 mL 水

中，分别在磁处理前与磁处理 20、30、50 min 后对其 Zeta 电位进行测量，测试结果见表 4 及图 9。

表 4 不同磁化时间黏土浆液 Zeta 电位值
Table 4 Zeta potential value of clay slurry in different magnetization time

分类	未磁化		磁化	
磁化时间/min	0	20	30	50
Zeta 电位/mV	-13.2	-13.4	-14.0	-14.3

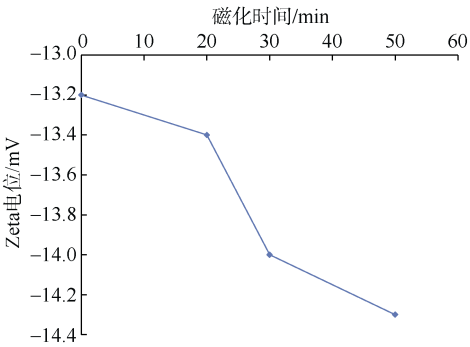


图 9 不同磁化时间黏土浆液 Zeta 电位值变化曲线
Fig.9 Zeta potential value of clay slurry with different magnetization time

黏土浆液随着磁化时间的加长，其 Zeta 电位绝对值增大(图 9)，磁化 20、30、50 min 其 Zeta 电位值分别增长 1.5%、6.0%、8.3% (表 4)。磁处理对黏土浆液 Zeta 值产生了较大影响。

颗粒性浆液是不稳定的，黏土浆液的析水率、结石率、黏度受到固相含量、黏土颗粒分散程度的影响。同等条件下，黏土浆液越分散其体系越稳定，越不容易产生沉淀，其析水率越低，结石率也就越高，磁处理后黏土浆液的 Zeta 电位提高了，证明其浆液体系的稳定性提高了，浆液更为分散，而浆液的分散程度与析水率紧密相关，分散程度的提高会使得浆液的析水率降低，结石率变大。此外，pH 值对黏土悬液性状具有重要的影响，低 pH 值会引起颗粒带正电荷的边缘与带负电荷的表面相互作用，导致颗粒从悬液中絮凝^[5]；高 pH 值使悬液稳定或黏土颗粒分散^[10]。黏土浆液经磁化后 pH 值增大，使其分散程度提高，降低了析水率，提高了结石率。不同液固比黏土浆液结石率提高 19.51%~44.09%，

同等质量黏土浆液抗渗性的提高完全得益于磁处理后黏土浆液结石率的大幅增大。

固液悬浮体系可藉凝聚或(与)絮凝作用形成固体颗粒的网状结构,而网状结构的形成是决定体系流变特性的主要因素^[20]。黏土浆液形成的网状结构在磁场作用下,黏土晶胞中的-OH 基极化后更易于在碱性条件下电离,使黏土颗粒表面的负电荷增多,黏土颗粒表面发生电荷变化^[14],其 Zeta 电位提高了,而 Zeta 电位是衡量颗粒边界带静电荷量的指标,体系具有高 Zeta 电位,不论是正值还是负值,表明颗粒间有较强的排斥力,当黏土颗粒间互相碰撞时易分开不易聚结,使得黏土浆液体系稳定性进一步提高,黏土浆液的网状结构变弱,内部摩擦力变弱,从而使得其黏度降低。

4 结 论

a. 在磁场强度为 1 T 的条件下,磁处理减小了黏土浆液的密度与黏度,在一定程度改善了黏土浆液的流变性。不同液固比黏土浆液的析水率与结石率在磁处理后均有明显改善,且随着液固比的减小磁处理对黏土浆液改性作用变得更为显著,磁处理后的黏土浆液具有更高结石率,使其抗渗性能有明显提升,其在注浆工程中的益处是显而易见的。

b. 磁处理增大了黏土浆液的 Zeta 电位与 pH 值,对提升浆液分散程度与稳定性均有正向作用,黏土浆液分散程度提高,进而降低析水率,提高结石率。同等质量黏土浆液抗渗性的提高得益于磁处理后黏土浆液结石率的大幅增大,而其黏度的降低,是因磁处理后黏土浆液颗粒间有较强的排斥力导致。

c. 本次实验初步阐述了磁化处理对注浆用黏土的改性作用,但要完全揭示磁处理对注浆用黏土浆液的改性作用仍需针对实际工程应用中黏土颗粒粒径与黏土成分存在差异的具体情况,采用不同磁场,针对含有不同黏土颗粒粒径、不同黏土成分的浆液进行磁处理,进一步揭示磁处理对注浆用黏土浆液的改性机理。

参考文献

- [1] 王星华. 黏土固化浆液在地下工程中的应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998.
- [2] 勾攀峰, 张义顺. “水泥-黏土-粉煤灰-生石灰”固化浆液性能实验[J]. 煤炭学报, 2002, 27(2): 148-151.
GOU Panfeng, ZHANG Yishun. Performance experiment on solidifying slurry of “cement-clay-fly ash-quicklime”[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 27(2): 148-151.
- [3] 许光泉, 严家平, 夏小亮. 矿井底板突水新型注浆材料配比优化实验[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(12): 22-24.
XU Guangquan, YAN Jiaping, XIA Xiaoliang. Optimization experiment on mixing ratio of new grouting material to prevent mine floor water inrush[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(12): 22-24.
- [4] 张贵金, 杨松林, 陈安重, 等. 适应深厚复杂岩土层防渗透浆浆的可控性黏土水泥稳定浆材及快速配制[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 3428-3436.
ZHANG Guijin, YANG Songlin, CHEN Anzhong, et al. Development and quick-preparing of controllable clay cement stable slurry adapt to anti-seepage grouting in deep complex rock and soil stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 3428-3436.
- [5] 闫新亚, 杨维东, 谭绍早, 等. 不同有机改性黏土对海洋卡盾藻去除作用的研究[J]. 安全与环境学报, 2010, 10(3): 45-48.
YAN Xinya, YANG Weidong, TAN Shaozao, et al. On the effects of different organic modified clays on removing *Chattonella marina*[J]. Journal of Safety and Environment, 2010, 10(3): 45-48.
- [6] 曹豪荣, 李新明, 樊友杰, 等. 考虑干湿循环路径的石灰改性红黏土路用性能实验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2619-2624.
CAO Haorong, LI Xinming, FAN Youjie, et al. Experimental study of pavement performances of lime-treated laterite soil considering drying-wetting cycle paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2619-2624.
- [7] 董祎掣, 陆海军, 李继祥, 等. 垃圾填埋场污泥灰改性黏土衬垫的强度特性及微观结构[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 1): 187-192.
DONG Yiqie, LU Haijun, LI Jixiang, et al. Strength properties and microstructure of landfill clay liner containing sewage sludge ash[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 187-192.
- [8] 侍倩, 李翠华. 酸、碱对黏土物理性质的影响的实验研究[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2001, 34(5): 84-87.
SHI Qian, LI Cuihua. Laboratory study on effects of acid and alkali upon physical properties of clay[J]. Engineering Journal of Wuhan University(Engineering Science), 2001, 34(5): 84-87.
- [9] 卢雪清, 党进谦, 樊恒辉, 等. 不同介质环境对黏土分散性的影响及分散性黏土改性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(5): 208-214.
LU Xueqing, DANG Jinqian, FAN Henghui, et al. Effect of different media environment on dispersion of clay and treatment with lime on the dispersive soil[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2011, 39(5): 208-214.
- [10] 王中妮, 樊恒辉, 贺智强, 等. 分散性土改性剂对土的分散性和抗拉强度的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 425-432.
WANG Zhongni, FAN Henghui, HE Zhiqiang, et al. Influence of modifiers on dispersity and tensile strength of dispersive clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 425-432.
- [11] 王波. 磁化处理对钻井液性能影响的初步研究[J]. 油田化学,

- 1990, 7(4): 339-342.
- WANG Bo. A preliminary study on properties of drilling fluids as influenced by magnetic treatment[J]. Oilfield Chemistry, 1990, 7(4): 339-342.
- [12] 王厚燕. 磁化钻井液在中原油田的应用[J]. 钻井液与完井液, 1994, 11(5): 40-43.
- WANG Houyan. Application of mud magnetization in Zhongyuan oil field[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 1994, 11(5): 40-43.
- [13] 丁岗, 周开学, 陈长恩, 等. 磁化钻井液应用性实验研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1995, 19(4): 35-39.
- DING Gang, ZHOU Kaixue, CHEN Chang'en, et al. Experimental study on the application of magnetized drilling fluid[J]. Journal of the University of Petroleum, 1995, 19(4): 35-39.
- [14] 王贵和, 郑艳芹. 磁化膨润土浆流变性实验研究[J]. 石油钻探技术, 1997, 25(3): 27-28.
- WANG Guihe, ZHENG Yanqin. Lab study on the rheology of magnetized bentonite muds[J]. Petroleum Drilling Techniques, 1997, 25(3): 27-28.
- [15] 庄杰, 刘孝义, 梁冬梅. 磁处理对黏土矿物比表面的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 1996, 27(2): 148-153.
- ZHUANG Jie, LIU Xiaoyi, LIANG Dongmei. Effects of magnetic treatment on specific surface area of clay minerals[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 1996, 27(2): 148-153.
- [16] SHAH K H, ALI S, SHAH F, et al. Magnetic oxide nanoparticles(Fe_3O_4) impregnated bentonite clay as a potential adsorbent for Cr(III) adsorption[J]. Materials Research Express, 2017, 5(9): 96-102.
- [17] SUNDARAM J S E, DHARMALINGAM P. Synthesis and characterization of magnetized clay polymer nanocomposites and its adsorptive behaviour in removal of Chromium(VI) from aqueous phase[J]. Asian Journal of Chemistry, 2018, 30(3): 667-672.
- [18] 韩磊, 薛卫峰, 陈通, 等. 一种可调磁流体磁化装置: 陕西, CN205419874U[P]. 2016-08-03.
- [19] 薛卫峰, 王苏健, 邓增社, 等. 一种基于磁化水的底板防水注浆材料及其制备方法: 陕西, CN105753414A[P]. 2016-07-13.
- [20] 邢军, 徐俊杰, 丁仕强, 等. 絮凝处理后固相浓度对悬浮液黏度的影响研究[J]. 过滤与分离, 2010, 20(4): 1-3.
- XING Jun, XU Junjie, DING Shiqiang, et al. Studying the effect of solid concentration on the viscosity of flocculated suspensions[J]. Journal of Filtration & Separation, 2010, 20(4): 1-3.

(责任编辑 周建军)