

微生物诱导碳酸镁沉淀固化钻屑试验研究

唐国旺¹, 杨勇², 邓强¹, 赵中军¹, 周锴¹, 张雨¹, 于培志³, 王贵和³

(1. 北京城建集团有限责任公司, 北京 100088; 2. 建设综合勘察研究设计院有限公司, 北京 100010;

3. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 钻屑是在钻井工程中产生的一种固体废弃物, 通常利用水泥对其进行固化处理。然而, 水泥的生产过程伴随着大量二氧化碳的排放, 这不仅增加了温室气体的排放量, 也对环境保护造成不利影响。针对上述情况, 本文提出了微生物诱导碳酸镁沉淀固化钻屑新方法。微生物诱导碳酸镁沉淀固化钻屑力学性能研究表明, 固化体的强度随着含水量和尿素浓度的增加而降低, 随着活性氧化镁浓度和养护时间的增加而升高。最低强度 0.21 MPa, 最高强度 3.5 MPa, 充分说明了优选配比的重要性。FTIR、XRD 和 SEM 等表征结果发现, 微生物诱导碳酸镁沉淀产物为玫瑰花状水菱镁石 ($4\text{MgCO}_3 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 和针状水碳镁石 ($\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$); 产物以致密的碳酸盐网络状结构将松散的颗粒胶结成结构完整的固化体, 从而阐明了微生物诱导碳酸镁沉淀固化钻屑的作用机制。

关键词: 微生物; 活性氧化镁; 固化; 钻屑

中图分类号: P634 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2024)03-0076-08

Experimental study on drill cuttings consolidated by microbial induced magnesium carbonate precipitation

TANG Guowang¹, YANG Yong², DENG Qiang¹, ZHAO Zhongjun¹,
ZHOU Kai¹, ZHANG Yu¹, YU Peizhi³, WANG Guihe³

(1. Beijing Urban Construction Group Co. Ltd., Beijing 100088, China; 2. CIGIS (China) Limited, Beijing 100010, China;

3. China University of Geosciences-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Drilling cuttings are a type of solid waste generated in drilling engineering, usually treated with cement for solidification. However, the production process of cement is accompanied by a large amount of carbon dioxide emissions, which not only increases greenhouse gas emissions but also has adverse effects on environmental protection. In response to the above situation, this article proposes a new method of microbial induced magnesium carbonate precipitation and solidification of drilling cuttings. The study on the mechanical properties of microbial induced magnesium carbonate precipitation solidified drilling cuttings shows that the strength of the solidified body decreases with the increase of water content and urea concentration, and increases with the increase of active magnesium oxide concentration and curing time. The minimum strength is 0.21MPa and the maximum strength is 3.5MPa, fully demonstrating the importance of selecting the most suitable ratio. The characterization results of FTIR, XRD, and SEM showed that the microbial induced precipitation products of magnesium carbonate were rose shaped magnesite ($4\text{MgCO}_3 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) and needle shaped magnesite ($\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$); The product uses a dense carbonate network structure to bond loose particles into a structurally intact solidified body, thereby elucidating the mechanism of microbial induced magnesium carbonate precipitation and solidification of drilling cuttings.

Key words: microorganism; active magnesium oxide; solidification; drill cuttings

收稿日期: 2024-03-03; 修回日期: 2024-04-08 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.03.010

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 41772388)

第一作者: 唐国旺, 男, 汉族, 1991年生, 工程师, 博士, 研究方向为岩土工程、固废处理等, 北京市海淀区北太平庄路18号, 986732206@qq.com。

引用格式: 唐国旺, 杨勇, 邓强, 等. 微生物诱导碳酸镁沉淀固化钻屑试验研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(3): 76-83.

TANG Guowang, YANG Yong, DENG Qiang, et al. Experimental study on drill cuttings consolidated by microbial induced magnesium carbonate precipitation[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(3): 76-83.

0 引言

随着中国经济的快速增长,能源需求不断上升,石油和天然气作为国民经济发展的主要能源,已成为中国经济增长的主动动力^[1-5]。在油气勘探开发过程中,钻屑通过钻井液被输送到地表^[6],利用压滤法可将其从钻井液中过滤出来,但钻屑中仍会残留大约15%的钻井液^[7]。钻井液中的可溶性盐、重金属离子(如砷、锌、铜、钡和镍等)以及碳氢化合物成为了钻屑的主要污染源^[8-9]。据统计,单井可以产生大约1000 m³钻屑,大量钻屑的形成对环境保护产生了巨大的压力。同时,根据我国生态环境部印发的《危险废物环境管理指南 陆上石油天然气开采》,来自水基钻井液、合成基钻井液和油基钻井液中的钻屑被归类为危险固废^[10]。因此,实现钻屑的无害化处理成为油气田勘探开发中亟待解决的关键问题。

当前,针对钻屑的处理方法主要有路基填料、烧制水泥、免烧和烧结陶粒、混凝土掺合料和水泥固化/稳定等方法^[11-14]。其中普通硅酸盐水泥固化/稳定钻屑是一种高效、经济的处理方法^[15-17],其通过物理封装和化学固定方式使得固废与普通硅酸盐水泥材料形成高碱性混合物,稳定固废中的污染物,从而降低其迁移率^[18]。在基于水泥的固化/稳定系统中,重金属离子稳定化的机制是形成不溶性沉淀物(如:氢氧化物)^[19],有机污染物的稳定化机制是一部分碳氢化合物通过碱催化降解,另一部分与金属阳离子形成稳定的络合物^[20]。然而,由于钻屑中碳氢化合物的大量存在,会严重抑制水泥的水化反应^[21]。此外,普通硅酸盐水泥的大量使用还会进一步增加二氧化碳的排放^[22]。因此,针对钻屑中污染物特性及现有固化剂存在的不足,研发高效、环保固化剂对钻屑的无害化处理和实现“碳达峰、碳中和”的国家战略目标具有重要意义。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

1.1.1 活性氧化镁

通过XRF(X-Ray Fluorescence)揭示了活性氧化镁物相组成,证明其主要由高纯度MgO组成,详细组分如表1所示。

通过分析其微观形貌,观察到活性氧化镁主要是以不光滑球形为主,表面为不规则片状结构,大小以微米计量,如图1所示。

表1 活性氧化镁中元素含量

Table 1 Chemical composition of active magnesium oxide

氧化物	MgO	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO	SO ₃
质量百分比/%	96.142	1.791	0.863	0.324	0.057	0.035	0.789

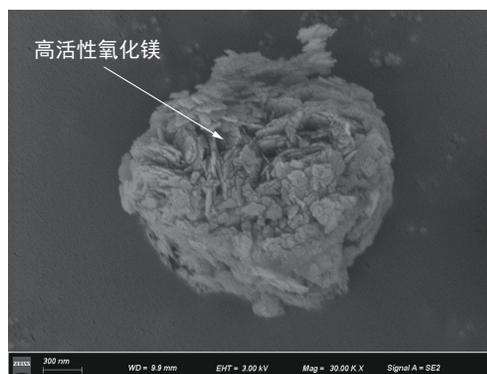


图1 活性氧化镁微观形貌

Fig.1 SEM images of active magnesium oxide samples

1.1.2 钻屑

钻屑取自四川省内江市威远县页岩气生产区块,地层为龙马溪组,其微观形貌如图2所示。图2(a)、(b)和(c)为钻屑的微观结构,其对应的放大图像如图2(d)、(e)和(f)所示。由图2可知,钻屑也由不规则松散颗粒组成。

图3给出了钻屑的FTIR曲线,表2是FTIR曲线中波数及对应的物相组成。由图3和表2可知,钻屑是由夹杂了碳氢化合物的SiO₂、Al₂O₃组成。

1.2 实验方法

1.2.1 微生物培养

培养基配方:在1000 g去离子水中加入2%的尿素、1.5%酪蛋白胨、0.5%大豆蛋白胨和0.5%氯化钠。通过盐酸和氢氧化钠将培养基的酸碱度调整到7.3左右。培养基在121 °C下灭菌30 min。取出培养基冷却到28 °C,接种巴氏芽孢杆菌(ATCC11859),并放入28 °C和转速120 r/min的恒温培养箱中培养18 h。培养过程中对微生物浓度进行测定,当浓度(*OD*₆₀₀)达到2.0时,取出备用,并称其为菌悬液。

1.2.2 钻屑固化体制备方法

本研究使用4种浓度的活性氧化镁,分别为20%、15%、10%和5%;3种含水量,分别为30%、25%和20%;3种尿素浓度,分别为6 M、3 M和0

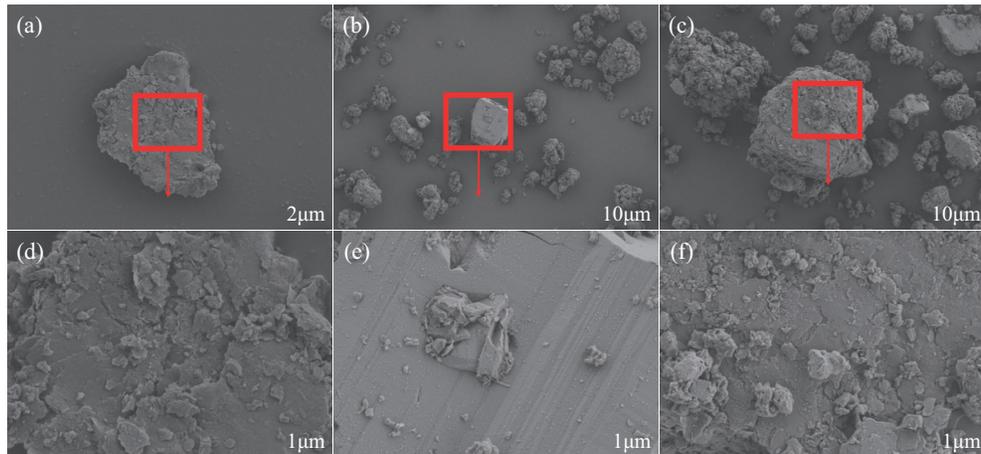


图2 钻屑微观形貌

Fig.2 SEM images of drill cuttings samples

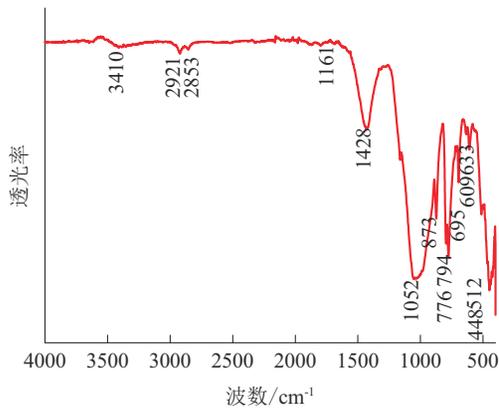


图3 钻屑FTIR曲线

Fig.3 FTIT pattern of drill cuttings samples

表2 钻屑FTIR曲线中波数及对应的物相组成

Table 2 Wavenumber and corresponding phase composition in the FTIR curve of drilling cuttings

波数/cm ⁻¹	官能团	物相组成
2921	CH ₃	脂肪烃
1428	CH	脂肪烃
2853	CH ₃ O	甲氧基
1161, 1052	C-O	羟基
448	Si-O	SiO ₂
609	Al-O	Al ₂ O ₃

M。对照实验采用同等质量的去离子水替代菌悬液。首先,将称取的尿素、钻屑和活性氧化镁加入搅拌容器中,在240 r/min转速下搅拌2 min;然后,将菌悬液或去离子水加入搅拌容器中,在120 r/min转速下搅拌1 min;其次,将搅拌均匀的混合物倒入

立方体模具中(尺寸:50 mm×50 mm×50 mm),24 h后将固化体脱模;最后,将固化体放置室温养护,养护温度25℃±1.5℃,湿度20%±5%,时间分别为3、7、14和28 d。

1.2.3 强度、作用机理及微观结构测试

根据抗压强度的标准测试方法,使用微机控制电子万能试验机对固化体进行无侧限抗压强度测试,试验机的加载速率为1 mm/min。为保证实验数据的准确性,每组实验测试3次。取养护了28 d的固化体进行机理分析。为了观察固化体产物的微观结构及分布特征,采用SEM对提取的固化体进行测试。采用FTIR测试了固化体中产物的化学键,利用XRD测试了固化体中产物衍射峰的位置和相对强度,明确固化体中产物种类。

2 结果与讨论

2.1 钻屑固化体强度影响因素

表3为活性氧化镁、含水量、尿素、养护时间等因素交互作用下钻屑固化体的强度值。

2.1.1 活性氧化镁浓度

图4~6是含水量20%、25%和30%时,活性氧化镁浓度与钻屑固化体强度的关系。

由图4和表3可知,含水量20%时,固化体强度与活性氧化镁浓度的关系。在养护28 d、3 M尿素条件下(见图4a),每增加5%活性氧化镁,固化体强度分别增加62.1%、90.5%和160%。在养护28 d、6 M尿素条件下(见图4b),每增加5%活性氧化镁,强度分别增加14.1%、53.8%和103.8%。说明养护

表3 各因素交互作用下钻屑固化体的强度值

Table 3 Strength values of drilling cuttings solidified body under the interaction of various factors

含水量/%	活性氧化镁/%	强度值/MPa							
		养护3 d		养护7 d		养护14 d		养护28 d	
		3 M 尿素	6 M 尿素	3 M 尿素	6 M 尿素	3 M 尿素	6 M 尿素	3 M 尿素	6 M 尿素
20	5	0.26	0.21	0.41	0.44	0.65	0.48	0.95	0.78
	10	0.51	0.48	0.72	0.58	1.06	0.76	1.54	0.89
	15	0.95	0.76	1.07	0.95	1.66	1.15	1.81	1.20
	20	0.28	1.06	1.58	1.14	2.09	1.53	2.47	1.59
25	5	0.19	0.14	0.41	0.19	0.63	0.42	0.71	0.76
	10	0.50	0.50	0.69	0.68	0.98	0.62	1.25	0.92
	15	0.78	0.77	1.12	0.69	1.58	0.98	1.68	0.98
	20	1.12	0.92	1.35	0.88	1.88	1.05	1.92	1.21
30	5	0.24	0.12	0.40	0.18	0.57	0.41	0.62	0.63
	10	0.52	0.38	0.87	0.54	1.21	0.58	1.24	0.83
	15	0.87	0.70	0.97	0.64	1.43	0.89	1.45	0.93
	20	0.88	0.76	0.98	0.92	1.83	1.07	1.87	1.10

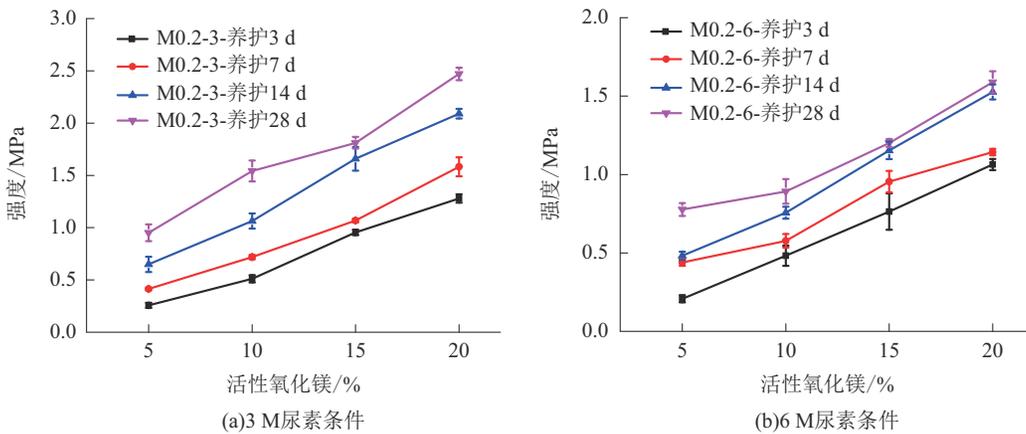


图4 活性氧化镁浓度与钻屑固化体强度的关系(含水量20%)

Fig.4 The relationship between magnesium oxide concentration and the strength of oil-based drilling cuttings solidified body (water content 20%)

时间和尿素浓度一定时,固化体强度随活性氧化镁浓度增加呈上升趋势。

由图5和表3可知,含水量25%时,钻屑固化体强度随活性氧化镁浓度增加而升高。在3 M 尿素条件下(见图5a),养护时间为3、7、14和28 d,强度随活性氧化镁浓度增加而逐渐升高,变化范围分别为0.2~1.1、0.4~1.4、0.6~1.9和0.7~1.9 MPa,最大和最小增长倍数分别为5.9和2.7倍。在3 M和6 M(见图5b)尿素条件下,固化体强度变化规律基本相同。

由图6和表3可知,含水量30%时,在相同养护时间、3 M(见图6a)或6 M(见图6b)尿素条件下,固

化体的强度随着活性氧化镁浓度增加而升高。当尿素浓度为3 M时,养护时间为3、7、14和28 d,强度随活性氧化镁浓度增加而逐渐升高,变化范围分别为0.2~0.9、0.4~1.0、0.6~1.8和0.6~1.9 MPa,最小增长率为145%,最大增长率为266.7%。

2.1.2 养护时间

图7是养护时间与钻屑固化体强度的关系。在各因素交互作用下,养护3 d时,固化体形成了较高强度。养护7 d时,强度增长较为缓慢。养护14 d时,强度增长最为明显,增长率达到了1倍左右。养护时间从14 d延长到28 d时,固化体强度基本保持

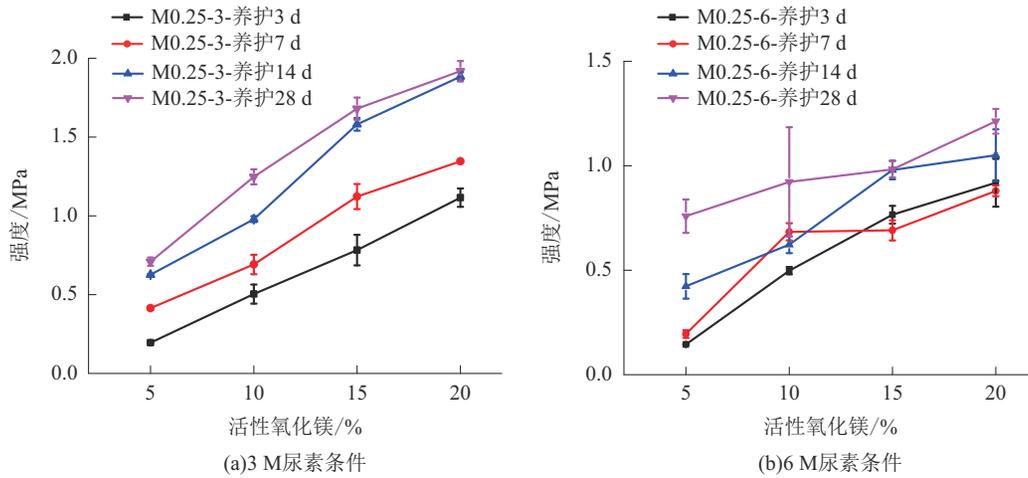


图5 活性氧化镁浓度与钻屑固化体强度的关系(含水量25%)

Fig.5 The relationship between magnesium oxide concentration and the strength of drilling cuttings solidified body (water content 25%)

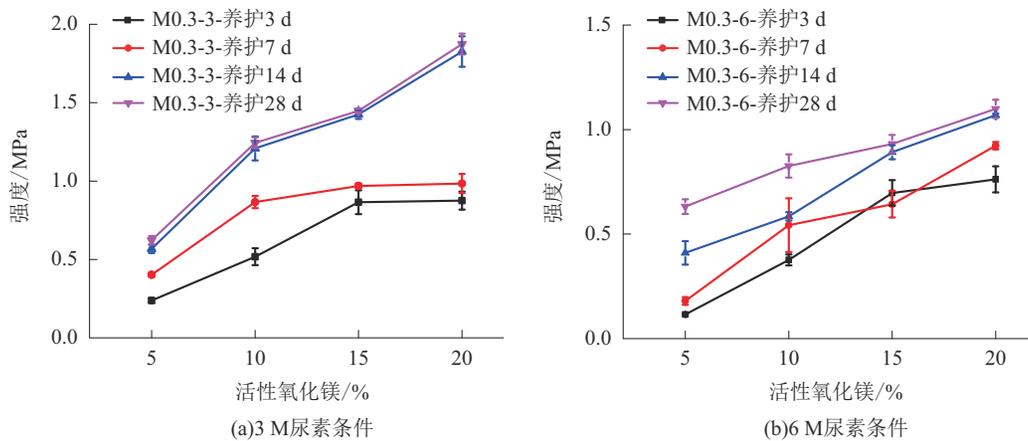


图6 活性氧化镁浓度与钻屑固化体强度的关系(含水量30%)

Fig.6 The relationship between magnesium oxide concentration and the strength of drilling cuttings solidified body (water content 30%)

稳定。说明固化体强度总体呈增长趋势,随着养护时间的延长而逐渐增大。

2.1.3 含水量

图8所示为含水量与钻屑固化体强度之间的关系。由图8可知,固化体养护28 d后,强度随着含水量增加呈下降趋势。当活性氧化镁浓度为20%、尿素浓度为3 M时,随着含水量增加,固化体强度分别为2.5、1.9和1.9 MPa,说明固化体强度先降低后保持稳定。当活性氧化镁浓度为20%、尿素浓度为6 M时,随着含水量增加,固化体强度降低率分别为23%和9%。说明含水量25%时,强度下降的最显著,随后缓慢下降或保持稳定。在多种活性氧化镁浓度和尿素浓度条件下,固化体强度均随着含水量

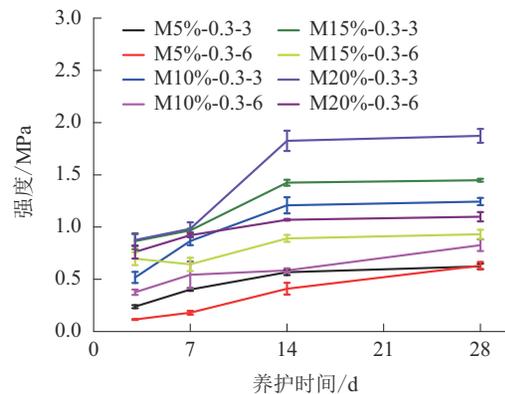


图7 养护时间与钻屑固化体强度的关系

Fig.7 The relationship between curing time and the strength of drilling cuttings solidified body

增加呈下降趋势,说明该规律具有普遍性。

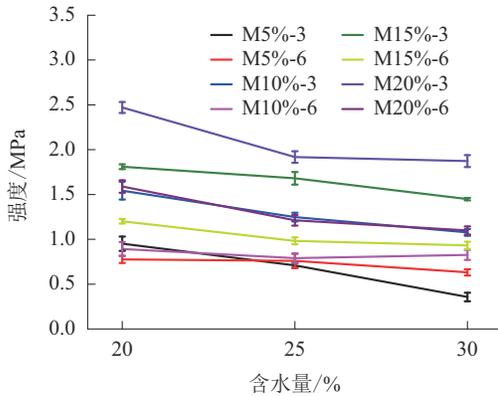


图 8 含水量与钻屑固化体强度之间的关系

Fig.8 The relationship between water content and the strength of oil-based drilling cuttings solidified body

2.1.4 尿素浓度

图 9 是尿素浓度与钻屑固化体强度的关系。养护 28 d 时,固化体强度随着尿素浓度升高而大幅度降低。尿素浓度为 0 M 时,强度较高,是由于培养基中含有 2% 质量分数尿素。强度变化范围为 3.5~1.1 MPa,降低了 68.6%,说明高浓度尿素不利于固化体强度发展。当尿素浓度为 6 M 时,养护时间从 3 d 增加到 28 d,强度变化范围在 1.7~1.8 MPa 之间,说明在高浓度尿素条件下,延长养护时间无法提高固化体强度。

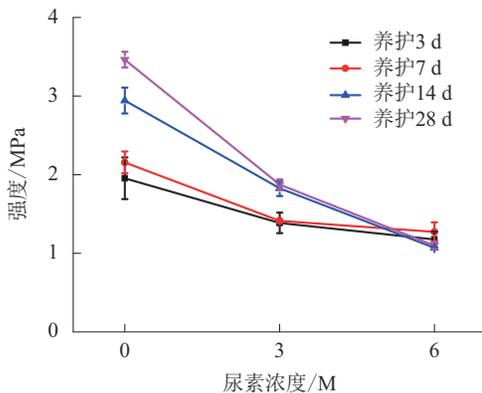


图 9 尿素浓度与钻屑固化体强度之间的关系

Fig.9 The relationship between urea content and the strength of drilling cuttings solidified body

2.2 生物碳化固化钻屑作用机理

2.2.1 化学基团

图 10 是钻屑固化体的 FTIR 曲线。表 4 给出了钻屑固化体 FTIR 曲线中波数及对应的物相组成。

与钻屑相比,固化体在波数 514、2204、3627 和 3701 cm^{-1} 处发现新的峰值,说明固化体中形成了矿化产物。由图 10、表 4 可知,主要产物为水菱镁石、水碳镁石和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$,还伴随了未完全反应的活性氧化镁。

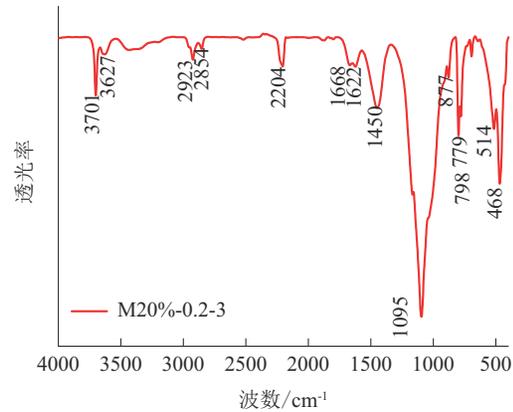


图 10 固化 28 d 后钻屑固化体的 FTIR 曲线

Fig.10 FTIR pattern of drill cuttings solidification after 28 days of curing

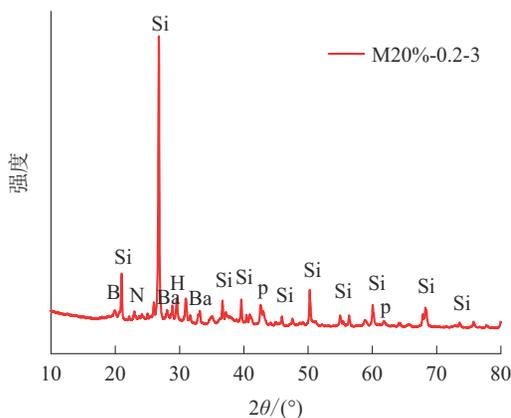
表 4 钻屑固化体 FTIR 曲线中波数及对应的物相组成

Table 4 Wavenumber and corresponding phase composition in the FTIR curve of drill cuttings solidification

波数/ cm^{-1}	官能团	物相组成
2923	CH_3	脂肪烃
1450	CH	脂肪烃
2854	CH_3O	甲氧基
1095	C-O	羟基
468	Si-O	SiO_2
3701	O-H	$\text{Mg}(\text{OH})_2$
3627	O-H	水菱镁石
2204	C-O	水菱镁石、水碳镁石
514	Mg-O	活性氧化镁

2.2.2 物相组成

图 11 所示为钻屑固化体的 XRD 曲线。与钻屑的峰值相比,固化体 XRD 曲线分别在 29.58° 和 22.9° 处新增了 2 个特征衍射峰,对应于矿化产物水菱镁石(H: hydromagnesite)和水碳镁石(N: nesquehonite)。在 2θ 为 20.0° 和 42.6° 处,观察到了氢氧化镁(B: $\text{Mg}(\text{OH})_2$)和活性氧化镁(P: MgO)的特征衍射峰,说明活性氧化镁和氢氧化镁未完全反应,上述结果与 FTIR 测试的结果一致。



Si— SiO_2 ; Ba— BaSO_4 ; H—水菱镁石; N—水碳镁石; P—活性氧化镁; B— $\text{Mg}(\text{OH})_2$

图 11 固化 28 d 后钻屑固化体的 XRD 曲线

Fig.11 XRD pattern of drill cuttings solidification after 28 days of curing

2.2.3 微观结构

图 12 是钻屑固化体(M20%-0.2-3)的微观结构图。从图 12(a)和(b)中观察到矿化产物水菱镁石和水碳镁石相互连接形成了致密的碳酸盐网络结构,将松散钻屑颗粒胶结成结构完整的固化体。在图 12(c)中观察到了水菱镁石。在图 12(d)中观察到了水碳镁石,上述两种产物证实了XRD和FT-IR结果的准确性。

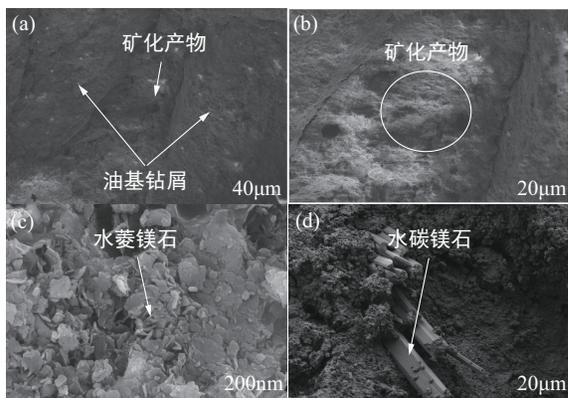


图 12 钻屑固化体的 SEM 图像

Fig.12 SEM images of drill cuttings solidification

3 结论

(1)基础试验研究表明:微生物诱导碳酸镁沉淀固化钻屑的主要影响因素为活性氧化镁浓度、养护时间、尿素浓度和含水量,且固化体的强度随着活性氧化镁浓度和养护时间增加而升高,随着尿素

浓度和含水量增加而降低。当活性氧化镁浓度为 20%、尿素加量 0 M、含水量 20% 时,固化体最高强度为 3.5 MPa。

(2)XRD 和 FTIR 表征显示:固化体中除钻屑外,其余组分主要为活性氧化镁、氢氧化镁、玫瑰花状水菱镁石和针状水碳镁石,说明固化体中的主要产物为玫瑰花状水菱镁石和针状水碳镁石;活性氧化镁未完全反应,水解形成的氢氧化镁也未充分矿化,这解释了随着养护时间的延长固化体强度升高的原因。基于微观结构观察,发现产物以连续的碳酸盐网络将松散的钻屑颗粒胶结成结构完整的固化体。

参考文献 (References):

- [1] 汤凤林,赵荣欣,周欣,等.俄罗斯油气钻采废弃物处理及其利用研究[J].钻探工程,2022,49(5):202-207.
TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, ZHOU Xin, et al. Research on processing and use of wastes in oil and gas drilling and production in Russia[J]. Drilling Engineering, 2022,49(5):202-207.
- [2] 赵洪波,朱芝同,梁涛,等.页岩气基础地质调查钻井技术进展及展望[J].中国地质,2023,50(2):376-394.
ZHAO Hongbo, ZHU Zhitong, LIANG Tao, et al. Shale gas geological survey drilling technologies: Progress and prospect [J]. Geology in China, 2023, 50(2):376-394.
- [3] 何远信,胡志方,单衍胜,等.公益性陆域油气地质调查钻探工程技术进展与攻关建议[J].钻探工程,2022,49(5):3-10.
HE Yuanxin, HU Zhifang, SHAN Yansheng, et al. Advances and research suggestions for onshore oil & gas survey drilling engineering for the public benefit[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(5):3-10.
- [4] 张金成.第一性原理思维法在页岩气革命中的实践与启示[J].钻探工程,2022,49(2):1-8.
ZHANG Jincheng. First principle thinking promotes innovation of shale gas revolution[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(2): 1-8.
- [5] 赵全民,张金成,刘劲歌.中国页岩气革命现状与发展建议[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(8):1-9.
ZHAO Quanmin, ZHANG Jincheng, LIU Jingge. Status of Chinese shale gas revolution and development proposal[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling, 2019, 46(8):1-9.
- [6] 张晓昂,刘国卫,齐治虎,等.河南省煤层气钻井技术发展历程及展望[J].钻探工程,2022,49(5):86-93.
ZHANG Xiao'ang, LIU Guowei, QI Zhihu, et al. Development and prospect of coalbed methane drilling technology in Henan province[J]. Drilling Engineering, 2022,49(5):86-93.
- [7] Ball A S, Stewart R J, Schliephake K. A review of the current options for the treatment and safe disposal of drill cuttings[J]. Waste Management and Research, 2012,30(5):457-473.
- [8] Liu D S, Wang C Q, Mei X D, et al. Environmental perfor-

- mance, mechanical and microstructure analysis of non-fired bricks containing water-based drilling cuttings of shale gas[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 183:215-225.
- [9] Balgobin A, Ali A, Shah K, et al. Assessment of toxicity of two types of drill cuttings from a drilling rig on the Trinidad East coast using *Metamysidopsis insularis*[J]. *Toxicological and Environmental Chemistry Reviews*, 2012, 94(5):930-943.
- [10] Johnson J D, Graney J R. Fingerprinting Marcellus Shale waste products from Pb isotope and trace metal perspectives [J]. *Applied Geochemistry*, 2015, 60:104-115.
- [11] Authority E F S. Technical Guidance: Extrapolation of data from major species to minor species regarding the assessment of additives for use in animal nutrition[J]. *Efsa Journal*, 2008, 803:1-5.
- [12] 刘宇程,陈文博,陈媛媛,等.水泥窑协同处置掺加萃余钻屑对水泥熟料性能的影响[J].*环境工程*, 2020, 38(11):157-162.
LIU Yucheng, CHEN Wenbo, CHEN Yuanyuan, et al. The effect of synergistic disposal of cement kiln with added residual drilling chips on the performance of cement clinker[J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(11):157-162.
- [13] 徐亚红.页岩气油基钻屑降解固化处理及其制备免烧陶粒的技术研究[D].绵阳:西南科技大学, 2018.
Xu Yahong. Technical research on degradation and solidification treatment of shale gas oil-based drilling cuttings and their preparation of unburned ceramic particles [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2018.
- [14] 焦艳军,罗方宇,秦丰,等.页岩气油基钻屑剩余固相建材资源化利用进展[J].*油气田环境保护*, 2023, 33(3):15-19.
JIAO Yanjun, LUO Fangyu, QIN Feng, et al. Progress in the resource utilization of residual solid state building materials from shale gas oil based drilling cuttings [J]. *Environmental Protection of Oil and Gas Fields*, 2023, 33(3):15-19.
- [15] 何焕杰,张淑侠,王爱华,等.气田深井聚磺钻井液废液复合固化处理技术研究[J].*环境工程学报*, 2010, 4(11):2489-2493.
HE Huanjie, ZHANG Shuxia, WANG Aihua, et al. Study on complex solidification treatment technology for polymer sulfated waste drilling fluids from gasfield's deep wells[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(11):2489-2493.
- [16] 张博廉,操卫平,赵继伟,等.油基钻井岩屑处理技术展望[J].*当代化工*, 2014, 43(12):2603-2605.
ZHANG Bolian, CAO Weiping, ZHAO Jiwei, et al. Prospect of oil-base drilling cuttings processing technologies [J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2014, 43(12):2603-2605.
- [17] 蔡浩,姚晓,华苏东,等.页岩气井油基钻屑固化处理技术[J].*环境工程学报*, 2017, 11(5):3120-3127.
CAI Hao, YAO Xiao, HUA Sudong, et al. Solidification treatment technology of oil-based drilling cuttings in shale gas well[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(5):3120-3127.
- [18] Falciglia P P, Romano S, Vagliasindi F G A. Stabilisation/solidification of 137Cs-contaminated soils using novel high-density grouts: γ -ray shielding properties, contaminant immobilisation and a γ RS index-based approach for in situ applicability [J]. *Chemosphere Oxford*, 2017, 168:1257-1266.
- [19] Paria S, Yuet P K. Solidification/stabilization of organic and inorganic contaminants using portland cement: a literature review [J]. *Environmental Reviews*, 2006, 14(44):217-255.
- [20] Shah S J, Shroff A V, Patel J V, et al. Stabilization of fuel oil contaminated soil—A case study[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2003, 21(4):415-427.
- [21] Kogbara R B, Al-Tabbaa A, Iyengar S R. Utilisation of magnesium phosphate cements to facilitate biodegradation within a stabilised/solidified contaminated soil [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2011, 216(1):411-427.
- [22] Benhelal E, Zahedi G, Shamsaei E, et al. Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 51(1):142-161.

(编辑 荐华)