引用格式　唐国旺,赵中军,周锴,等. 微生物与氧化镁协同作用胶结钻屑机理研究[J]. 工业建筑,2024,54(9):19-25. TANG G W, ZHAO Z J, ZHOU K. Mechanism Study on Synergistic Effect of Microorganisms and Magnesium Oxide on Cementing Drill Cuttings[J]. Industrial Construction,2024,54(9):19-25(in Chinese). DOI:10.3724/j.gyjzG23031311

微生物与氧化镁协同作用胶结钻屑机理研究

唐国旺[1]　赵中军[1]　周　锴[1]　李　晨[2]　杨　勇[3]　丁　宽[3]　于培志[4]　王贵和[4]

(1. 北京城建集团有限责任公司, 北京　100088; 2. 深圳市建研检测有限公司, 广东深圳　518116;
3. 建设综合勘察研究设计院有限公司, 北京　100010; 4. 中国地质大学(北京), 北京　100083)

摘　要　微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)是一种新型污染土加固修复方法,为钻屑的胶结处理提供了新思路。在分析高活性氧化镁凝胶材料胶结体的基础上,对微生物-氧化镁协同胶结钻屑进行了深入研究,提出了微生物与氧化镁协同胶结钻屑新方法。采用傅里叶变换红外吸收光谱仪、X 射线衍射仪和扫描电子显微镜对胶结体进行测试,结果表明:微生物-氧化镁协同作用产物为玫瑰花状水菱镁石($4MgCO_3\cdot Mg(OH)_2\cdot 4H_2O$)和针状三水碳镁石($MgCO_3\cdot 3H_2O$);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胶结体。对影响胶结体强度的因素分析表明:胶结体的强度发展趋势与微生物浓度、活性氧化镁浓度、养护时间成正相关,与含水量、尿素浓度呈负相关。

关键词　微生物;活性氧化镁;协同作用;胶结;钻屑

Mechanism Study on Synergistic Effect of Microorganisms and Magnesium Oxide on Cementing Drill Cuttings

TANG Guowang[1]　ZHAO Zhongjun[1]　ZHOU Kai[1]　LI Chen[2]　YANG Yong[3]　DING Kuan[3]
YU Peizhi[4]　WANG Guihe[4]

(1. *Beijing Urban Construction Group Co., Ltd., Beijing* 100088, *China*; 2. *Shenzhen Jianyan Testing Co., Ltd., Shenzhen* 518116, *China*; 3. *CIGIS (CHINA) LIMITED, Beijing* 100010, *China*;
4. *China University of Geosciences (Beijing), Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Microbial-induced calcium carbonate precipitation (MICP) is a new reinforcement and remediation method for contaminated soil, which also provides a new direction to cement drill cuttings. Based on the analysis of the cemented body of highly active magnesium oxide gel material, an in-depth study on synergistic cementation for drill cuttings by microorganisms and magnesium oxide was conducted, and a new treatment methods for drill cuttings was presented. The speciemens cemented by microorganisms combined with magenesium oxide were tested with FTIRs, XRDs and SEMs, and the results indicated that rosette hydro-magnesite ($4MgCO_3\cdot Mg(OH)_2\cdot 4H_2O$) and acicular nesquehonite ($MgCO_3\cdot 3H_2O$) were yielded in synergy of microorganism and magnesium oxide. The loose particles were cemented into the well-structured cemented body by the dense carbonate network which was the cementitious mechanism of the synergistic effect of microorganism and magnesium oxide. The analysis of the factors affecting the strength of the cured body showed that the development trend of the strength of the cured body was positively correlated with microbial concentrations, active magnesium oxide concentrations, and curing times, and negatively correlated with the water content and the urea concentration.

Keywords: microorganism; reactive magnesium oxide; synergy; cementation; drill cutting

第一作者:唐国旺,博士研究生,986732206@qq.com。

通信作者:王贵和,博士,教授,博士生导师,3002180015@cugb.edu.cn。

收稿日期:2023-03-13

© 2024 工业建筑

钻屑是在钻井或试井过程中从地层携带出来的岩屑或泥土,其有效安全合理的处置是油气勘探中的突出问题。传统钻屑胶结填埋处理方法占地面积大,所需费用高,存在较大的环境劣化风险。寻求钻屑的无害化处理新技术,实现钻屑的资源化利用,是油气勘探可持续发展的重要支撑。[1]

目前国内外钻屑的处理方法主要有热解法、物理化学法、生物降解法和胶结稳定法。热解法原理是钻屑经过固液分离后,将有机物在无氧高温环境中分解成小分子物质,最终实现钻屑的无害化处理。[2]物理化学法作为钻屑的一种处理方法,是将特定萃取剂和钻屑同时添加到搅拌器中,设定足够的搅拌时间,进行搅拌。搅拌结束后,使用离心机进行固、液分离,对分离的固体进行烘干处理,降低钻屑表面有机物和萃取剂含量,实现钻屑的无害化处理。[3]生物降解法是利用微生物和生物代谢活动对油基钻屑中的有机物进行降解,该过程可使固体废物中的有机物转化为腐殖质,并将其他组分转化为二氧化碳和水,从而实现油基钻屑的修复和无害化处理。[4]胶结稳定过程是通过将污染物转化成流动性、可溶性和毒性较小的形式,从而降低污染物的潜在危害,同时将固体废物封装在结构完整的胶结体中。这些转化是通过添加胶结剂(如水泥、粉煤灰和黏土等)来实现的,并通过化学方式胶结稳定固体废物。[5]其中胶结稳定是四种方法中最常用的,但水泥的生产会产生大量的二氧化碳,也不利于环境的保护。

微生物诱导碳酸盐沉淀(MICP)作为一种性能优异、环境友好的新方法,由于其良好的性能,在土木工程领域得到了广泛研究[6-10],其主要原理[11-12]是微生物脲酶分解尿素生成碳酸根离子,并与镁离子或钙离子反应,以微生物作为核点产生碳酸镁或钙沉淀,将松散的颗粒连接为整体。上述反应不会产生二氧化碳排放,将其应用到钻屑的胶结具有良好的前景。此外,油气勘探一般位于山岭地区,钻探前和完井后通常涉及土石方、基础处理等工程,其中基础处理一般使用砂砾等建材。将微生物与氧化镁协同胶结的钻屑用于井场的基础处理,变废为宝,在节约投资的同时,也可以保护环境。

因此,将以油气勘探开发过程中产生的钻屑作为研究对象,提出微生物与氧化镁协同胶结钻屑新方法。通过研究钻屑胶结体中产物种类及形貌,揭示微生物与氧化镁协同胶结钻屑作用机制。利用微生物与氧化镁协同胶结钻屑的力学性能,探析微生物与氧化镁协同胶结钻屑的影响因素及规律。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

1.1.1 微生物培养

研究用微生物是巴氏芽孢杆菌,其培养及其提取方式参考文献[13],采用电导率法测试了微生物脲酶活性,其原理是微生物分泌的脲酶将溶液中尿素水解成碳酸根离子和铵根离子,由于溶液中的离子浓度变化将改变溶液的导电性,进而得出微生物脲酶活性,依据上述原理测出的微生物脲酶活性如图 1 所示。

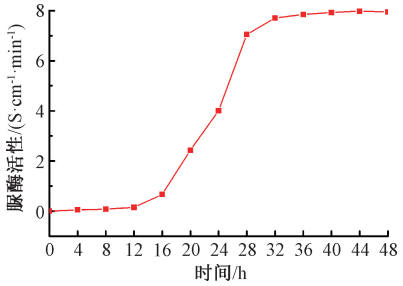


图 1 微生物脲酶活性值

Fig. 1 Activity values of microbial urease

1.1.2 活性氧化镁

研究用活性氧化镁主要由氧化物组成,其成分为 MgO、CaO、SiO_2、Fe_2O_3、Al_2O_3、MnO、SO_3,其中 MgO 质量百分比达到了 96.1%,纯度较高。

1.1.3 水基钻屑

研究用水基钻屑来源于河南省新乡市辉县市赵固二矿三盘区北部,地层为奥陶系灰岩。图 2 为水基钻屑的 X 射线衍射图谱(XRD),在 2θ 为 26.9°和 29.7°处观察到 SiO_2 和 $CaCO_3$ 的主衍射峰,说明其主要由 SiO_2 和 $CaCO_3$ 组成。

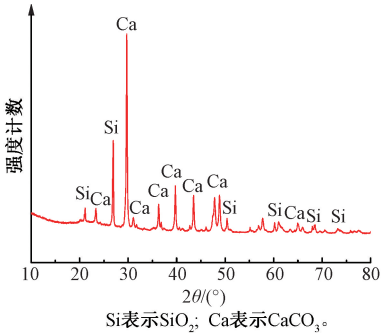


图 2 水基钻屑 XRD 谱线

Fig. 2 The XRD spectrum of water-based drilling cuttings

1.2　试验方法

1.2.1　胶结体制备

采用 20%、15%、10%和 5%的活性氧化镁浓度，30%、25%和 20%的含水量，6、3、0 mol/L 的尿素，菌液采用在 600 nm 波长处的吸光值（OD_{600}）为 0，0.5，1.0，1.5，2.0 的菌悬液，旨在明晰多个因素对钻屑胶结体强度的影响规律。活性氧化镁的浓度通过钻屑的质量为计算基数获取，含水量为液体（菌悬液或去离子水）与固体混合物的质量比，尿素浓度通过溶解到液体中的尿素质量比确定。

胶结体制备流程：首先，将称量好的钻屑、尿素和活性氧化镁同时倒入搅拌容器中，在 240 r/min 的速度下，将混合物搅拌 120 s。其次，将去离子水或者菌悬液（OD_{600}=0.5，1.0，1.5，2.0）倒入搅拌容器中，在 120 r/min 的速度下，将混合物搅拌 60 s。然后，将搅拌好的固、液混合物倒入立方体模具（50 mm×50 mm×50 mm）中。最后将胶结后的钻屑胶结体拆模，在（25±1.5）℃，（20±5）%的相对湿度条件下养护，养护时间分别为 28、14、7、3 d。

1.2.2　强度测试

胶结体强度是评价微生物-氧化镁协同胶结钻屑可行性的重要参数。研究采用微机控制电子万能试验机（深圳市瑞格尔仪器有限公司，型号 RGM-100）测定胶结体强度。为保证试验数据的准确性，每个样品重复测试三次，获取的数据采用描述性统计分析。

1.2.3　微观测试

电镜能谱（SEM-EDS）的主要作用是观察样品的微观结构及其分布特征，对其元素组成进行半定量分析。采用蔡司 EVO50 显微镜观察干燥并喷金后的样品微观形貌。利用能谱仪（EDS）对样品进行半定量分析，测试样品微观区域的主要物质组成。测试所用加速电压在 10~20 kV，具体电压根据图片清晰度和 EDS 测试需求确定。傅里叶变换红外吸收光谱仪（FTIR）的主要作用是测试样品化学键及其相对含量。XRD 的主要作用是观察曲线中衍射峰的位置和相对强度，分析样品中产物的类型及相对含量。处理后的样品直接使用 Bruker Advance D8 设备进行测试分析，扫描步长为 5°，范围为 5°到 80°。

2　结果和讨论

2.1　活性氧化镁凝胶材料作用机制

活性氧化镁凝胶材料是一种低碳、环保的胶结剂，其作用机理主要由两个步骤组成：1）MgO 与 H_2O 反应生成 $Mg(OH)_2$；2）$Mg(OH)_2$ 与 CO_2 反应生成水合碳酸镁（HMCs），化学反应式如（1）~（5）所示。其获取较高早期强度的条件是使用高压和高浓度 CO_2。碳化反应形成的 HMCs 主要包括：水碳镁石（$MgCO_3\cdot3H_2O$）、水菱镁石（$4MgCO_3\cdot Mg(OH)_2\cdot 4H_2O$）、球碳镁石（$4MgCO_3\cdot Mg(OH)_2\cdot 5H_2O$）和纤维水碳镁石（$MgCO_3\cdot Mg(OH)_2\cdot 3H_2O$），其作用机理如图 3 所示。

$$MgO + H_2O \rightarrow Mg(OH)_2 \quad (1)$$

$$Mg(OH)_2 + CO_2 + 2H_2O \rightarrow MgCO_3\cdot 3H_2O \quad (2)$$

$$5Mg(OH)_2 + 4CO_2 \rightarrow 4MgCO_3\cdot Mg(OH)_2\cdot 4H_2O \quad (3)$$

$$5Mg(OH)_2 + 4CO_2 + 2H_2O \rightarrow 4MgCO_3\cdot 5H_2O \quad (4)$$

$$2Mg(OH)_2 + CO_2 + 2H_2O \rightarrow MgCO_3\cdot Mg(OH)_2\cdot 3H_2O \quad (5)$$

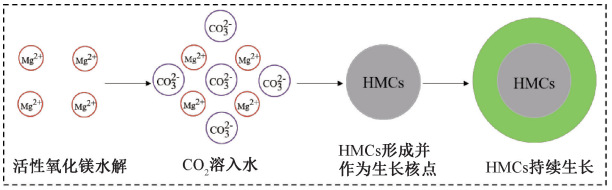


图 3　活性氧化镁凝胶材料反应过程示意

Fig. 3　Chemical reaction processes of active magnesium oxide gel materials

2.2　微生物与氧化镁协同作用机制

与传统活性氧化镁凝胶材料作用机制相比，微生物与氧化镁协同作用可以采用尿素替代气态 CO_2 作为碳源，避免了活性氧化镁凝胶材料碳化过程需要的高浓度和高压 CO_2。与传统的微生物与氯化钙协同作用相比，微生物与氧化镁协同作用使用活性氧化镁代替钙源形成 HMCs 沉淀，可以降低成本。此外，MgO 通过逐步水解获取 Mg^{2+}，不同于 $CaCl_2$ 一次性完全溶入水，避免了过高 Ca^{2+} 浓度对微生物脲酶活性的抑制作用，同时可提升胶结体强度。

图 4 是微生物与氧化镁协同作用机制示意。基于前期研究，推测其作用机理是微生物脲酶分解尿素生成 HCO_3^- 与活性氧化镁水解生成的 Mg^{2+} 反应，以微生物作为核点产生 HMCs 沉淀，进而形成连续的碳酸盐网络。

为验证微生物与氧化镁协同作用机制的合理性，利用扫描电镜（SEM）观察了反应过程中不同阶

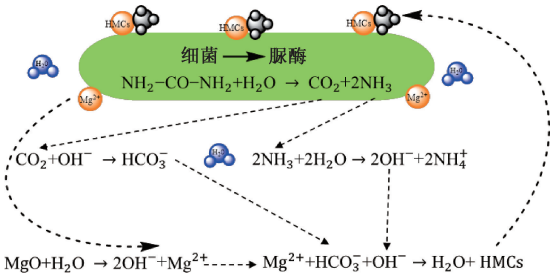


图 4 微生物与氧化镁协同作用示意

Fig. 4 A schematic diagram of synergistic effect of microorganisms and magnesium oxide

段的矿化产物微观形貌,如图 5 所示。当反应进行到 1 min 时,协同作用生成了无定形碳酸镁和水碳镁石,如图 5(a)所示。此外,水碳镁石上生长了大量的板状碳酸镁。当反应从 10 min 进行到 120 min 时,无定形碳酸镁和板状碳酸镁转变成了水菱镁石团聚体,如图 5(b)~(e)所示。当反应进行到 24 h,未观察到水碳镁石,主要原因可能是它们被水菱镁石完全包裹。图 5(f)中水菱镁石的形状逐渐转变成了规则的玫瑰花状,且形成了致密的碳酸盐网络。

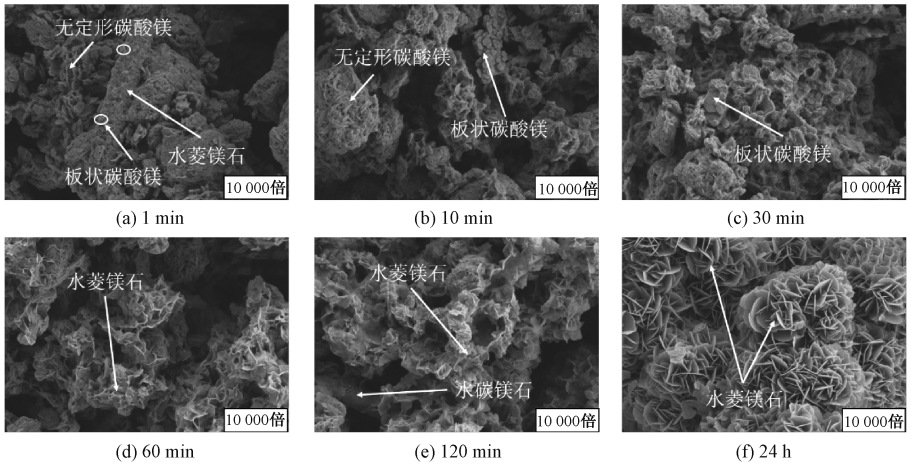
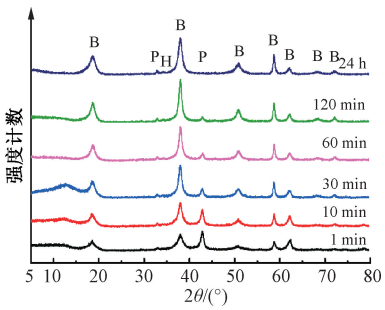


图 5 微生物与氧化镁协同作用过程中不同阶段矿化产物微观形貌

Fig. 5 Microscopic appearances of mineralization products at different stages during synergistic effect of microorganisms and magnesium oxide

图 6 所示为微生物与氧化镁协同作用过程中不同阶段矿化物的 XRD 曲线。当反应进行到 1 min 时,观察到了活性氧化镁、$Mg(OH)_2$ 和水菱镁石的衍射峰,说明活性氧化镁在水解过程中可以快速转化成 $Mg(OH)_2$,并形成 HMCs 沉淀。随着反应时间从 1 min 进行到 24 h,活性氧化镁峰的强度随反应时间的延长而显著下降,$Mg(OH)_2$ 峰的强度随反应时间延长而显著升高,说明未充分反应的活性氧化镁随着反应时间的延长可以进一步水解生成 $Mg(OH)_2$。此外,随着反应时间从 1 min 进行到 24 h,产物水菱镁石峰的强度逐步增强,证明微生物分解尿素形成的碳酸根与镁离子逐步反应形成的矿化产物水菱镁石越来越多。

图 7 给出了微生物与氧化镁协同作用过程中不同阶段的矿化物的能谱仪(EDS)数据。其中 C 元素的百分比含量随反应时间延长而增大,说明微生物与氧化镁协同作用随反应时间延长会不断产生 HMCs。综上可得:微生物与氧化镁协同作用机制是微生物与氧化镁协同反应产生以微生物为核点的



H 表示水菱镁石;P 表示活性氧化镁;B 表示 $Mg(OH)_2$。

图 6 微生物与氧化镁协同作用下不同时间段矿化产物的 XRD 曲线

Fig. 6 XRD curves of mineralization products at different stages during synergistic effect of microorganisms and magnesium oxide

HMCs 沉淀,产物以致密的碳酸盐网络状结构存在,结果与理论分析一致。

图 8 是微生物与氧化镁协同胶结钻屑示意。由上述试验数据可得微生物与氧化镁协同胶结钻屑作用机制是:微生物脲酶分解尿素生成 HCO_3^- 与活性氧化镁水解生成的 Mg^{2+} 反应,产生以微生物为核点的 HMCs 沉淀,进而形成连续的碳酸盐网络将松散

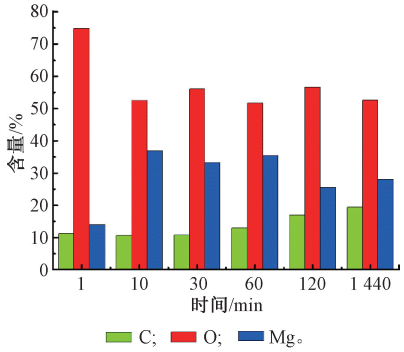


图 7　微生物与氧化镁协同作用过程中不同时间段矿化物的 EDS 数据

Fig. 7　EDS data of mineralization products at different stages during synergistic effect of microorganisms and magnesium oxide

的钻屑颗粒胶结起来，形成结构完整的胶结体。

图 9 为微生物与氧化镁协同胶结水基钻屑的实物，从左到右依次使用了 5%、10%、15%和 20%的活性氧化镁进行试验，证实了不同活性氧化镁浓度条件下，微生物与氧化镁协同作用可以将松散的钻屑颗粒胶结成结构完整的胶结体。当活性氧化镁浓度为 5%和 10%时，胶结体表面出现大量白色晶体，这是由于活性氧化镁浓度较低，溶液中依然有较高浓度尿素未参与反应，从而出现结晶。当活性氧化镁浓度为 15%、20%时，胶结体表面未见白色晶体，且表面更为密实，说明高浓度活性氧化镁条件下，更多的微生物、尿素和活性氧化镁参与反应。

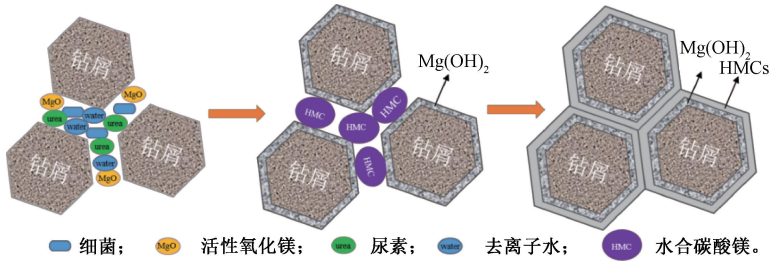


图 8　微生物与氧化镁协同胶结钻屑示意

Fig. 8　Schematic diagrams of synergistic effect of microorganisms and magnesium oxide on cementing drill cuttings



图 9　微生物与氧化镁协同胶结水基钻屑的实物

Fig. 9　Specimens of water-based drill cuttings cemented synergistically by microorganisms and magnesium oxide

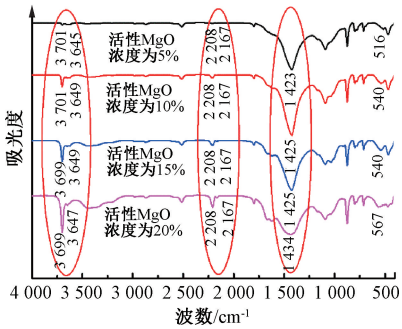


图 10　水基钻屑胶结体在不同活性氧化镁浓度条件下的 FTIR 谱线

Fig. 10　FTIR spectra of cemented water-based drill cuttings in different concentrations of active magnesium oxide

2.3　微生物-氧化镁协同作用效果

2.3.1　化学基团

图 10 是水基钻屑胶结体在不同活性氧化镁浓度条件下的 FTIR 曲线。表 1 为水基钻屑胶结体在不同活性氧化镁浓度条件下波数及对应的物相组成。由图 10、表 1 可知：当活性氧化镁浓度从 5%增大到 20%，胶结体中主要产物 $Mg(OH)_2$ 和 HMCs 对应的波数基本相同，说明活性氧化镁浓度未改变产物种类，主要产物为水碳镁石和水菱镁石。

表 1　水基钻屑胶结体在不同活性氧化镁浓度条件下的波数及对应的物相组成

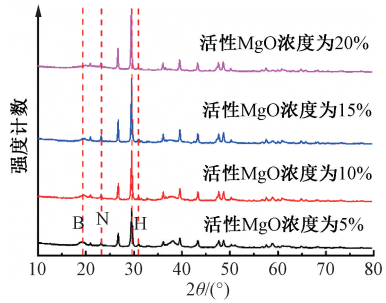
Table 1　Composition of cementitious water-based drill cuttings corresponding wavenumbers in different concentrations of magnesium oxide

活性氧化镁/%	物相组成及波数/cm^{-1}		
	$Mg(OH)_2$	水菱镁石	HMCs
5	3 699	3 647	2 208、2 167
10	3 699	3 649	2 208、2 167
15	3 701	3 649	2 208、2 167
20	3 701	3 645	2 208、2 167

2.3.2　物相组成

图 11 是水基钻屑胶结体在不同活性氧化镁浓度条件下的 XRD 曲线。活性氧化镁浓度从 5%增大到 20%时，胶结体中均发现了矿化产物水菱镁石、水碳镁石和水解产物 $Mg(OH)_2$，且产物衍射峰的位置基本相同，说明产物种类不受活性氧化镁浓度影

响。上述结果与 FTIR 数据一致,佐证了 FTIR 数据分析的准确性。



H 为水菱镁石;N 为水碳镁石;B 为 $Mg(OH)_2$。

图 11 水基钻屑胶结体在不同活性氧化镁浓度条件下的 XRD 谱线

Fig. 11 XRD spectra of cemented water-based drill cuttings in different concentrations of active magnesium oxide

2.4 微生物-氧化镁协同作用影响因素

2.4.1 微生物浓度

图 12 为不同微生物浓度下钻屑胶结体的强度变化情况。当微生物的 OD_{600} 为 0.0 时,随着养护时间的延长,胶结体强度没有明显的变化,强度变化范围为 0.8~1.1 MPa。当微生物浓度逐渐增大,钻屑胶结体强度呈上升趋势,然而微生物 OD_{600} 大于 1.5 时,强度升高不显著。当微生物 OD_{600} 为 2.0 时,随着养护时间的延长,胶结体强度出现了增大,强度变化范围为 3.4~5.5 MPa。未添加微生物时,胶结体形成了一定的强度,这是因为活性氧化镁水解形成 $Mg(OH)_2$,其本身是一种低强度凝胶材料。添加微生物后,胶结体强度提高了 7~8 倍,证明了微生物-氧化镁协同作用具有高效性。

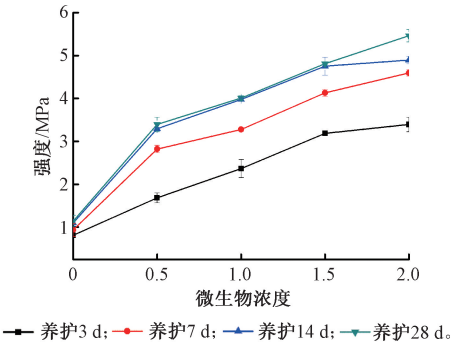


图 12 微生物浓度与胶结体强度的关系

Fig. 12 Relations between microorganism concentrations and cemented bodies

2.4.2 活性氧化镁、养护时间、含水量、尿素浓度

图 13(a)为活性氧化镁浓度与钻屑胶结体强度的关系。在 30%含水量、6 mol/L 尿素、养护 3 d 条件下,胶结体强度随活性氧化镁浓度增加呈上升趋势,增长率为 153.8%。强度升高的主要原因是在协同作用过程中,随着活性氧化镁浓度的增大,可以水解形成更多的 Mg^{2+} 与微生物脲酶分解尿素产生的 CO_3^{2-} 反应,产生大量的 HMCs,从而使胶结体强度进一步增大。

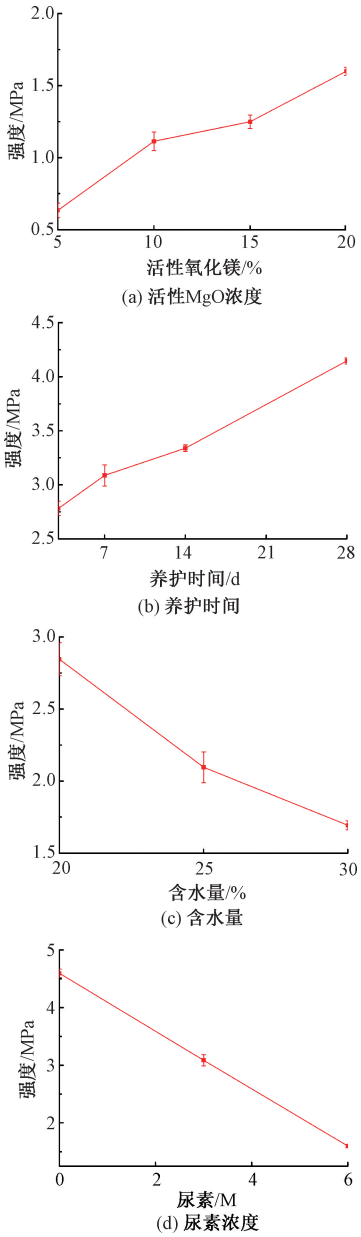


图 13 活性氧化镁、养护时间、含水量、尿素浓度与钻屑胶结体强度的关系

Fig. 13 Relations between concentrations of the active magnesium oxide, cured age, moisture content and urea and strength of drilling cuttings

图 13(b)为养护时间与钻屑胶结体强度的关系。在 20%活性氧化镁、30%含水量和 3 mol/L 尿素条件下,胶结体强度随养护时间的延长而增大,从 2.8 MPa 升高到 4.1 MPa。强度升高的主要原因是

微生物可快速将尿素转换为碳酸根离子,产生的碳酸根离子可快速扩散与镁离子反应形成 HMCs,从而在早期胶结钻屑。然而活性氧化镁因为溶解度较低,导致水化过程较慢,出现了早期碳酸根离子过剩;随着活性氧化镁进一步水解,形成的镁离子持续与碳酸根离子反应,产生了更多的 HMCs,实现了强度的进一步增长。[13]

图 13(c)为含水量与钻屑胶结体强度的关系。在 20%活性氧化镁、6 mol/L 尿素、养护 28 d 条件下,强度随含水量增大而显著降低,降低率为 39.6%。强度降低的主要原因是高含水量作用下,胶结体中饱和孔隙结构导致 HMCs 扩散较慢,从而阻碍产物的生成和相关强度的提升。此外,在较低的含水量(15%)下,菌液含量不足以满足胶结体强度发展所需的水解和生物碳化反应过程,因此没有试验数据。该结果与文献[14]一致,表明了含水量与强度发展之间关系的重要性。

图 13(d)为尿素浓度与钻屑胶结体强度的关系。在 20%活性氧化镁、30%含水量和养护 7 d 条件下,随着尿素浓度增大,强度从 4.6 MPa 降低到 1.6 MPa,结果表明:适量的尿素含量比较高的尿素含量更有效。与文献[15]研究结果显示的尿素浓度越高胶结体强度越大明显不同,试验中尿素浓度高,钻屑胶结体强度反而低。其主要原因是试验采用了含有尿素(20 g/L)的微生物培养基,过高的尿素浓度会抑制微生物的活性[16],导致微生物-氧化镁协同作用反应不充分,不利于产物的形成。因此优选合适的尿素用量,有利于胶结体强度的发展。

3　结束语

1)分析了活性氧化镁凝胶材料的作用机制,其主要是通过高压、高浓度 CO_2 形成 HMCs 沉淀,从而实现自身强度的发展。

2)钻屑颗粒的胶结,以微生物作为核点产生 HMCs 沉淀,并以致密的碳酸盐网络相互连接,将松散的钻屑颗粒胶结成结构完整的胶结体。

3)钻屑胶结体强度随着微生物浓度增大而增大。当微生物 OD_{600} 为 2.0,养护 28 d 时,其最高强度为 5.5 MPa。

4)钻屑胶结体强度发展趋势与活性氧化镁、养护时间成正相关,与含水量、尿素浓度呈负相关。

参　考　文　献

[1] 杨勇. 中海油自研 D+W 工具在南海东部的首次应用分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020,40(4):120-121.

[2] JÚNIOR I P, MARTINS A L, ATAÍDE C H, et al. Microwave drying remediation of petroleum-contaminated drill cuttings [J]. Journal of Environmental Management, 2017, 196: 659-665.

[3] YAO G, CHEN Z, CHEN Q, et al. Behaviors of organic and heavy metallic pollutants during supercritical water oxidation of oil-Based drill cuttings [J/OL]. Water Air and Soil Pollution, 2018, 229(102) [2023-03-13]. https://doi.org/10.1007/s11270-018-3751-z.

[4] ALAVI N, MESDAGHINIA A R, NADDAFI K, et al. Biodegradation of petroleum hydrocarbons in a soil polluted sample by oil-based drilling cuttings [J]. Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 2014, 23(5): 586-597.

[5] AL-ANSARY M S, AL-TABBAA A. Stabilization/solidification of synthetic petroleum drill cuttings [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 141(2): 410-421.

[6] MARTINEZ B C, DEJONG J T, GINN T R, et al. Experimental optimization of microbial-induced carbonate precipitation for soil improvement [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(4): 587-598.

[7] SOON N W, LEE L M, KHUN T C, et al. Improvements in engineering properties of soils through microbial-induced calcite precipitation [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2013, 17(4): 718-728.

[8] ATASHGAHI S, TABARSA A, SHAHRYARI A, et al. Effect of carbonate precipitating bacteria on strength and hydraulic characteristics of loess soil[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(9):4749-4763.

[9] TANG G W, JIA C Q, WANG G H, et al. Role of Na-montmorillonite on microbially induced calcium carbonate precipitation [J/OL]. Molecules, 2021, 26(20) [2023-03-13]. https://doi.org/10.3390/molecules26206211.

[10] TANG G W, HUANG F, WANG G H, et al. Valorization of water-based drill cuttings through the Bio-carbonation approach [J/OL]. Advances in Materials Science and Engineering, 2022[2023-03-13]. https://doi.org/10.1155/2022/3836863.

[11] RUAN S, QIU J, WENG Y, et al. The use of microbial induced carbonate precipitation in healing cracks within reactive magnesia cement-based blends [J]. Cement and Concrete Research, 2019, 115: 176-188.

[12] 黄涛, 方祥位, 张伟, 等. 活性氧化镁-微生物固化黄土试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(17): 3300-3316.

[13] YANG Y, RUAN S, WU S,et al. Biocarbonation of reactive magnesia for soil improvement[J/OL]. Acta Geodaetica, 2020[2023-03-13]. https://doi.org/10.1007/s11440-020-01093-6.

[14] KOLIAS S, GEORGIOU C. The effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27(2): 211-216.

[15] 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.

[16] GE C, XUE D, YAO H. Microbial biomass, community diversity, and enzyme activities in response to urea application in tea orchard soils [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2010, 41(7): 797-810.