

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

六价铬污染模拟含水层的注入型黄原胶凝胶阻截屏障试验研究

张 力,赵勇胜

Experimental research on the injectable xanthan gum gel intercepting barrier of simulated Cr(VI) contaminated aquifer ZHANG Li and ZHAO Yongsheng

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202112043

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地下水氮循环与砷迁移转化耦合的研究现状和趋势

Research status and trend of coupling between nitrogen cycle and arsenic migration and transformation in groundwater systems 郭华明, 高志鹏, 修伟 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 153-163

玛曲高原区潜水水化学和氢氧同位素特征

Hydrochemical and hydrogen and oxygen isotope characteristics of subsurface water in the Maqu Plateau 王振, 郭华明, 刘海燕, 赵威光, 刘帅, 王娇, 沈萌萌 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 18-26

基于FEFLOW的三维土壤-地下水耦合铬污染数值模拟研究

Numerical simulation of three-dimensional soil-groundwater coupled chromium contamination based on FEFLOW 刘玲, 陈坚, 牛浩博, 李璐, 殷乐宜, 魏亚强 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 164-174

基于广义径向流模型的非均质孔隙含水层井流试验分析

Pumping tests analyses of a heterogeneous pore aquifer based on the Generalized Radial Flow model 邓祺文,陈刚,郑可,施雯,胡成 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 17-23

地面沉降对含水层参数及给水能力的影响研究

A study of the influence of land subsidence on hydraulic parameters and water supply capacity 刘蓉,曹国亮,赵勇,陆垂裕,孙青言,严聆嘉,彭鹏 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 47-47

云应盆地东北部含水层结构特征及地下水转化模式

Characteristics of the aquifer structure and groundwater conversion model in the northeastern Yunying Basin 常威, 黄琨, 胡成, 王清, 王宁涛 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 9–15



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202112043

2023年3月

张力,赵勇胜.六价铬污染模拟含水层的注入型黄原胶凝胶阻截屏障试验研究 [J].水文地质工程地质, 2023, 50(2): 171-177. ZHANG Li, ZHAO Yongsheng. Experimental research on the injectable xanthan gum gel intercepting barrier of simulated Cr(VI) contaminated aquifer[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 171-177.

六价铬污染模拟含水层的注入型黄原胶凝胶 阻截屏障试验研究

张 力1,赵勇胜1,2

(1. 吉林大学新能源与环境学院,吉林长春 130021;2. 石油化工污染场地控制与修复技术国家地方 联合工程实验室(吉林大学),吉林长春 130021)

摘要:由于工业废物的不合理排放,大量的重金属污染物 Cr(VI)进入地下环境,严重威胁着人类健康和生态环境。 Cr(VI) 在地下水环境中高度易迁移的特性,造成其污染修复上的困难,亟待一种绿色、经济、有效的阻截方式提高地下水 对 Cr(VI) 的阻控能力。研究利用焦亚硫酸钠原位还原地下水中的 Cr(VI), 产生 Cr³⁺作为黄原胶交联剂, 形成凝胶阻截屏障, 探究了各类成分对凝胶时间、黏度变化的影响及凝胶屏障对含水层的阻截效果,得到如下结论:(1)在 Cr(VI)质量浓度达 到 200 mg/L 的体系中,质量分数 0.4% 的黄原胶溶液在 1.5 h 内即可形成具有一定机械强度的凝胶;(2)凝胶具有耐盐性,适 用于常见含水层,2.5~5g/L的Na*和K*对凝胶起促进作用:(3)注入型凝胶阻截屏障能够大幅降低中砂介质的渗透系数至 1×10⁻⁷ cm/s,满足地下水阻截需求。注入型凝胶屏障的形成无需引入有害物质,阻截结束后注入型屏障可经生物作用自然 降解,不会长期改变含水层水力条件。研究成果可为 Cr(VI) 污染地下水中凝胶阻截屏障的构筑提供理论基础。 关键词:凝胶;阻截屏障;黄原胶;含水层;六价铬

中图分类号: X523 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2023)02-0171-07

Experimental research on the injectable xanthan gum gel intercepting barrier of simulated Cr(VI) contaminated aquifer

ZHANG Li¹, ZHAO Yongsheng^{1,2}

(1. College of New Energy and Environment, Jilin University, Changchun, Jilin 130021, China; 2. National Local Joint Engineering Laboratory of Petrochemical Pollution Site Control and Remediation Technology (Jilin University), Changchun, Jilin 130021, China)

Abstract: Due to the unreasonable discharge of industrial waste, a large amount of heavy metal pollutant Cr(VI) enters the underground environment, which seriously threatens human health and ecological environment. The high mobility of Cr(VI) in groundwater environment makes it difficult to repair. A green, economic and effective interception method is urgently needed to improve the ability of groundwater Cr(VI) pollution control. In this paper, sodium metabisulfite is selected as a reducing agent, and Cr³⁺ generated from Cr(VI) in groundwater is used as an xanthan gum crosslinking agent to form a gel blocking barrier. The influences of various components on gel

收稿日期: 2021-12-21; 修订日期: 2022-03-05 投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目:国家自然科学基金项目(42072270)

第一作者: 张力(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事地下水污染阻截与修复技术研究。E-mail: cpslddzl@163.com

通讯作者:赵勇胜(1961-),男,教授,博士生导师,主要从事污染场地的模拟控制与修复研究。E-mail: zhaoyongsheng@jlu.edu.cn

time and viscosity changes and the blocking effect of gel barrier on aquifer are studied. The results indicate that (1) in the system with Cr(VI) concentration up to 200 mg/L, xanthan gum solution with 0.4% mass concentration can form gel with certain mechanical strength within 1.5 h. (2) The gel has salt resistance and is suitable for common aquifers. Na⁺ and K⁺ of 2.5–5 g/L can promote the gel. (3) The injected gel blocking barrier can significantly reduce the coefficient of permeability of medium sand media to 1×10^{-7} cm/s, which can meet the demand of groundwater blocking. Injection-type gel barriers are formed without the introduction of harmful substances. After the interception, injection-type gel barriers can be naturally degraded by biological action without long-term changes under the aquifer hydraulic conditions. This study provides a theoretical basis for the construction of gel barrier in chromium contaminated groundwater.

Keywords: gel; cutoff barrier; xanthan gum; aquifer; Cr(VI)

铬(Cr)是工业领域使用最广泛的重金属之一,其 用量也随工业生产规模不断扩大逐步增加。由于过 往环保管理粗放,导致大量的Cr进入土壤和地下水, 对环境安全和人类健康造成了严重威胁^[1-3]。自然环 境中的Cr主要以Cr(III)和Cr(VI)两种价态存在。其 中Cr(III)迁移性更弱、毒性更低,在环境中危害更小^[3], 而Cr(VI)则是已确认的高危致癌物,故在工程中常通 过将Cr(VI)转化为Cr(III)并固定以实现对Cr(VI)污 染的修复^[4-6]。

Cr(VI)污染的修复手段中,原位生物或化学修复 技术较为常用^[7],但由于 Cr(VI)在地下环境中一般以 阴离子形态存在,不易被介质颗粒吸附而具有很强的 迁移能力^[8],降低了其修复效率。对于高浓度的污染 场地,若在原位修复的基础上,通过阻截手段限制污 染物的迁移,则能进一步提高修复效果。

传统阻截技术,如泥浆阻截墙等,往往伴随着土体开挖工作,并会长期改变含水层的水力条件^[9]。相较而言,注入型凝胶屏障可以在地下形成临时性阻截 区域的同时,避免大规模的挖掘工作^[10]。一定浓度的 高分子溶液或溶胶,在适当条件下(如使用交联剂), 增大其黏度至失去流动性,可使整个体系变成一种外 观均匀,并保持一定形态的弹性半固体,这种弹性半 固体称为凝胶。通过技术手段使多聚物溶液在注入 地下环境后一段时间内完成凝胶化以封堵介质孔道, 即形成注入型凝胶屏障^[11-12]。根据现有研究,可能适 用于凝胶屏障技术的多聚物包括聚丙烯酰胺、海藻酸 钠、高葡聚糖、黄原胶、液体硅胶等^[13-18],其中黄原胶 因其环境友好的特性受到关注。

黄原胶是一种发酵产生的阴离子型多糖,其分子 的侧链上存在羧基,可以与 Cr³⁺发生交联反应^[19],这一 机理已被运用于采油工程驱油与油井堵水领域^[20],并 开发了一系列有机铬交联剂。但在地下直接使用 Cr(III) 药剂存在潜在的环境风险^[21]。Cr(VI)污染场地可以通 过注入还原剂产生 Cr³⁺,从而避免了额外引入 Cr³⁺,这 为注入型黄原胶凝胶屏障的使用提供了条件。

现有注入型凝胶屏障的研究主要侧重于凝胶的 流变学特征,对污染含水层凝胶屏障的阻截性能研究 尚不充分^[22-23]。基于此,本文以黄原胶结合还原剂作 为凝胶基液,对 Cr(VI)污染含水层进行原位阻截,研 究了"黄原胶-还原剂-Cr(VI)"凝胶体系相关影响因素 与凝胶的阻截性能,为黄原胶凝胶屏障用于 Cr(VI)污 染场地的修复提供理论支持。

1 材料和方法

1.1 试剂和材料

考虑到实际工程需要,选用食品级高黏黄原胶,购自河南万邦化工科技有限公司。研究采用焦亚硫酸钠(Na₂S₂O₅)作为Cr(VI)还原剂,Na₂S₂O₅及重铬酸钾(K₂Cr₂O₄)、氯化钠(NaCl)、氯化钾(KCl)和氯化钙(CaCl₂)等试剂均购自国药化学试剂有限公司,除特殊说明外,所有溶液均采用去离子水配置。

1.2 凝胶基液的配置与凝胶时间

凝胶基液溶质主要由三部分组成,包括黄原胶、 Cr(VI)和还原剂,以黄原胶质量分数为0.4%,Cr(VI) 质量浓度为200 mg/L的"黄原胶-还原剂-Cr(VI)"凝胶 体系配置为例,将240 mL超纯水中溶解0.3gNa₂S₂O₅, 使用机械搅拌器以500 rpm持续搅拌溶液,分别称取 1.2g黄原胶和3.0gKCl,将其干粉充分混合后,少量 多次加入搅拌中的溶液,搅拌30 min后在室温中静置 24 h。将所得混合溶液作为凝胶基液,向搅拌中的凝 胶基液中加入60 mL质量浓度为1000 mg/L的Cr(VI) 溶液,继续搅拌30 s至充分混合。由此得到所需配比 的"黄原胶-还原剂-Cr(VI)"凝胶体系,以相同的方法 配置黄原胶质量分数为0.6%,Cr(VI)质量浓度分别为 50, 100, 200, 400 mg/L 的凝胶体系, 同理, 配置黄原 胶质量分数为 0.2% 的体系组合。凝胶体系中还原剂 Na₂S₂O₅质量与 Cr(VI)质量比达到 3.78^[24-25], 该比例下 Na₂S₂O₅能够完全还原 Cr(VI)。

取各组"黄原胶-还原剂-Cr(VI)"凝胶体系混合液 20 mL 装入 40 mL 样品瓶中,室温下振荡,定时观察凝 胶化现象。根据 Mccool 等^[26]的判断标准,倒置样品 瓶时,其内容物不再呈现流动状态,而是维持一定的 结构整体下落,此时即为凝胶形成。从凝胶体系完全 混合开始计时,至凝胶形成定义为凝胶形成所需时 间,即凝胶时间。

以相同的配置与试验方法,在40mL样品瓶中加入20g河砂,研究在介质颗粒存在的情况下对体系凝胶化的影响。



1.3 黏度测定

凝胶基液配置方法与前文相同,选择凝胶形成所 需时间较短,凝胶结构稳定的凝胶体系,即黄原胶质 量分数为0.4%, Cr(VI)质量浓度为200 mg/L。为探究 不同阳离子对凝胶的影响,选择地下水中常见的Na⁺、 K⁺和 Ca²⁺进行试验研究,参考 Na⁺、K⁺、Ca²⁺在地下水 中的质量浓度确定了浓度梯度,针对 Na⁺和 K⁺试验分 别设置 5 组凝胶体系,其中 Na⁺或 K⁺质量浓度均为0, 2.5, 5, 7.5, 10 g/L; 针对 Ca²⁺试验设置 5 组凝胶体系, Ca²⁺质量浓度为0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 g/L。根据 Mccool 等^[26]的研究, Na⁺、K⁺的存在对黄原胶凝胶可能存在促 进作用,因此,在针对 Ca²⁺的试验中,每组都加入了质 量分数 1% 的 KCI 作为凝胶促进剂。黏度测定在室温 下进行,设备为旋转黏度计(CAS CL-1),测定时间间 隔为10 min。由于黏度测定会破坏溶液内部结构,因 此将混合液分装到 50 mL 离心管中, 每次测试取一份 新的试样, 以避免同一样品重复测试可能造成的误差。 1.4 渗透性测试

凝胶基液配置方法与前文相同,凝胶体系选择黄 原胶质量分数为0.4%, Cr(VI)质量浓度100 mg/L,将 不含Cr(VI)的凝胶体系,即质量分数0.4%的黄原胶 溶液,作为对照组,在溶液黏度明显增大之前将其注 入长6 cm,内径9 cm的小型砂柱中,砂柱中介质为中 砂,粒径0.25~0.50 mm,注入体积为1 PV(PV 指含水 层孔隙体积)。注满凝胶基液的砂柱在室温条件下静 置 24 h,接通马氏瓶,完整装置如图1所示。

根据达西定律,通过定水头法测试含水层的渗透 系数,试验在室温下进行,以自来水模拟未污染地下 水(pH=6.8),以自来水为溶剂的100 mg/L Cr(VI)溶液 (pH=5.1)模拟污染地下水,分别渗透砂柱。从砂柱产 生渗出液时刻开始记录,考察含水层渗透系数随时间 的变化情况。

2 试验结果与分析

2.1 凝胶时间

凝胶体系中 Na₂S₂O₅溶于水释放亚硫酸根离子, 作为 Cr(VI)的还原剂。不添加还原剂或不添加 Cr(VI) 的凝胶体系,溶液始终保持一定的流动性,只有在二 者同时存在的体系中能够形成凝胶。凝胶形成时,由 于 Cr(VI)已经转化为 Cr(III),颜色由混合液最初的黄 色转化为浅绿色。凝胶在常温环境下保存超过 3 个 月,始终保持浅绿色,表明凝胶中的 Cr(III)不会被再 次氧化,反应方程式如下:

 $Cr_2O_7^{2-} + 3SO_3^{2-} + 8H^+ \rightarrow 3SO_4^{2+} + 2Cr^{3+} + 4H_2O$

根据 Mccool 等^[26] 所定义的凝胶化状态,结合黏度 计测试,在黏度达到 10 000~12 000 cp 之后溶液基本 失去流动性。对于质量分数 0.4%、0.6% 的黄原胶, Cr(VI) 质量浓度越高,凝胶形成所需的时间越短, Cr(VI) 质 量浓度达到 200 mg/L 时,黄原胶质量分数为 0.4%、0.6% 的凝胶体系均可在 1.5 h 左右形成具有一定强度的凝 胶块(图 2), 而黄原胶质量分数为 0.2% 的凝胶体系形 成的凝胶强度较差, 不宜用作凝胶屏障使用。

值得注意的是,在含水层介质(河砂中砂)存在的 条件下,凝胶形成的时间没有明显差异。

2.2 地下水中常见阳离子对凝胶的影响

向凝胶体系中加入 Na⁺、K⁺、Ca²⁺,体系的凝胶性 能会受到一定的影响,其影响程度由所加入阳离子质



图 2 体系中 Cr(VI) 质量浓度对凝胶时间的影响



量浓度控制。

向体系中加入一定质量浓度的 K⁺, 随着交联反应 的进行, K⁺质量浓度为 2.5 g/L 和 5 g/L 时对凝胶形成 起到了促进作用(图 3),两种凝胶体系黏度在 50 min 时分别达到了 12 984.03 cp 和 11 104.60 cp, 已经初步 形成凝胶,相较于不含K⁺的体系,这一时间提前了约 $20 \min_{\circ}$





体系中 K⁺质量浓度达到 10 g/L 时,在 60 min 时黏 度为7017.66 cp, 完全凝胶化所需时间被延长。向体 系中加入质量浓度为 2.5 g/L 的 Na⁺有益于凝胶形成, 该凝胶体系的黏度在 40 min 即达到 11 082.9 cp, 更高 质量浓度的 Na⁺则表现为抑制作用(图 4), 且比同质 量浓度的 K⁺抑制作用更强,体系中 Na⁺质量浓度达到 10 g/L 时, 在 90 min 时黏度仅为 5 527.09 cp。

Ca²⁺的存在整体表现为对凝胶化的抑制作用(图 5), 对于 Ca²⁺质量浓度仅为 0.1 g/L 的体系, 其黏度达到 12 212.45 cp 也需要 80 min。



图 4 不同质量浓度 Na⁺影响下凝胶基液黏度随时间变化

Fig. 4 Changes in viscosity of gel-base solution with time under the influence of different concentrations of Na⁺





尽管高质量浓度的阳离子会抑制黄原胶凝胶,但 在该试验中,所有混合液在2~3h后都能实现凝胶 化。可见,凝胶在试验所选择的阳离子质量浓度范围 内具有一定的耐盐性。

2.3 凝胶在介质中的阻截性能

根据相关规范^[27],传统阻截墙渗透系数需达到1× 10⁻⁷ cm/s 以下,参考这一标准将 1×10⁻⁷ cm/s 设定为凝 胶屏障实现阻截需求的渗透系数上限。

用定水头法测试介质的渗透系数。试验所使用 的中砂介质的渗透系数为 2.5×10⁻² cm/s, 对照组中, 向 介质注入质量分数 0.4% 的黄原胶,由于黄原胶溶液 具有一定黏性,因此能够弱化介质的渗透性,以水为 渗透液时,渗透系数最低达到4.6×10⁻⁴ cm/s,若注入更 高质量浓度黄原胶溶液,降低渗透系数的效果更明 显,但依然无法满足阻截需求,同时随着水流渗透驱 替黄原胶,介质的渗透系数很快恢复到原始水平。而 向介质注入凝胶基液,基液能够在试验设置的时间内

顺利完成凝胶化,形成的凝胶会封堵介质孔道,使介质颗粒间结合更加紧密,因此能够大幅降低介质的渗透系数,相较于中砂介质的初始渗透系数 2.5×10⁻² cm/s,介质孔隙形成凝胶屏障后,含水层渗透系数可以降低到 1×10⁻⁷ cm/s 以下,最低达到 6.9×10⁻⁸ cm/s(图 6)。



Fig. 6 Changes in coefficient of permeability of gel barrier plugging medium with time

含有介质的凝胶屏障具备了一定的机械强度,抗 压、抗剪切能力更强。在常规的地下水水力条件下, 凝胶屏障可以在一定时间内维持该水平的渗透性。

渗透试验开始后约2d,砂柱开始产出渗透液,从 该时刻起记录渗透系数变化。在产出渗透液后约 9d,砂柱渗透系数激增,并在约15d内逐步恢复至约 1.7×10⁻³ cm/s,基本达到初始渗透水平,在多组重复试 验中砂柱渗透系数变化的时间稍有区别,但基本符合 这一规律。

在 Cr(VI)溶液渗透试验中,屏障渗透系数的恢复 过程相较于未污染地下水更平缓,在渗透进行 15 d 时 渗透系数约为 1.6×10⁻⁶ cm/s。

3 讨论

3.1 凝胶屏障形成时间的控制

对于"黄原胶-还原剂-Cr(VI)"凝胶体系,黄原胶 质量分数越大,溶液的初始黏度越大,但由于黄原胶 溶液是非牛顿流体,具有剪切稀化的特性,这对将凝 胶基液注入含水层中是有利的。因此凝胶所需时间 对凝胶体系发挥其功能起到关键作用。

黄原胶-Cr(VI)凝胶时间主要由凝胶体系中黄原 胶质量分数与Cr(VI)质量浓度控制,但体系中必须 存在还原剂,才能顺利凝胶化。这说明对于黄原胶起 到交联作用的是还原反应产生的Cr³⁺,Cr³⁺与黄原胶分 子侧链羧基上的离子发生离子交换,黄原胶分子在交 联作用下不断堆积,最终形成交联网状结构,宏观上 形成了稳定的凝胶体。

Cr(VI)质量浓度达到 200 mg/L 时,控制黄原胶质 量分数为 0.4%、0.6%,凝胶体系能够在理想的时间内 实现稳定的凝胶化。而质量分数 0.2% 的黄原胶体系 下凝胶强度不足,可能是体系中 Cr³⁺相对质量浓度过 大引起黄原胶过度交联导致的。

3.2 地下水中常见阳离子对凝胶屏障的影响

电解质离子可以使黄原胶分子链发生卷曲,并破 坏分子间的氢键作用,在体系中加入电解质会一定程 度地降低黄原胶溶液的初始黏度,电解质含量越高, 凝胶体系的初始黏度越低。

在黄原胶分子与 Cr³⁺交联反应进行过程中,质量浓度为 2.5 g/L 和 5 g/L 的 K⁺对凝胶化起到促进作用,这是由于在交联反应中 K⁺可以作用于黄原胶侧链的阴离子配体,使黄原胶分子形成具有一定刚性的双螺旋结构^[21],同时,阳离子所带正电荷可以压缩黄原胶分子的双电层结构,促进黄原胶与交联剂发生分子间交联,表现为体系的黏度上升更快,并更先形成凝胶。当 K⁺质量浓度过高时,压缩双电层作用过度挤压分子间结合水的空间,反而抑制了体系中的交联反应。但总体而言,质量浓度为 2.5 g/L 和 1.0 g/L 的 K⁺均可以促进交联反应,这表明凝胶对环境中的 K⁺具有一定的耐受性。另外,在黄原胶溶液配置过程中,将KCl与黄原胶粉末混合可以避免在凝胶基液制备过程中形成黄原胶胶团,添加 KCl 质量比越大,该作用越明显,故认为在体系中加入适量 KCl 是有益的。

Na⁺与 K⁺具有相似的结构,因此 Na⁺对凝胶的影响 也类似于 K⁺。而相同质量浓度下,Na⁺相较于 K⁺对凝 胶形成表现出更强的抑制作用,可能是因为 Na⁺的离 子半径更小,压缩双电层作用更弱^[28]。

Ca²⁺对凝胶形成的抑制性,除与 Na⁺、K⁺相似的压 缩双电层作用之外,研究显示 Ca²⁺能够交联多聚物分 子侧链的羧基,从而占据黄原胶的交联位点,使 Ca²⁺、 Cr³⁺同时交联黄原胶,这可能导致黄原胶分子链之间 的过度交联^[14],从而引起交联过程中凝胶脱水造成强 度降低。

3.3 凝胶屏障阻截性能分析

黄原胶作为一种生物多聚物,可以被生物降解。 随着时间推移,凝胶屏障被含水层中存在的土著微生 物降解破坏,并在局部形成了通道,造成渗透系数的 激增,而Cr(VI)的存在对微生物生命活动具有一定的 更平缓。

该试验在室温条件下进行,考虑到中高纬度地下 水较低的温度和场地中 Cr(VI)污染对微生物生命活 动的抑制,凝胶屏障对污染地下水的阻截可以维持更 长时间。

随着阻截屏障降解破坏,被阻截区域的水力条件 也得以逐步恢复,阻截屏障不会长期改变含水层的水 力条件,是一种绿色修复技术,具有应用前景。

4 结论与展望

(1)Cr(VI)浓度越高,"黄原胶-还原剂-Cr(VI)"凝 胶体系凝胶化更快,Cr(VI)质量浓度达到200 mg/L 时,黄原胶质量浓度为0.4%、0.6%的凝胶体系在1.5 h 即可形成凝胶。表明黄原胶凝胶屏障适用于Cr(VI) 污染地下水的应急阻截,考虑综合迁移性能与凝胶性 能,0.4%质量浓度的黄原胶更适合于工程运用。

(2)黄原胶凝胶对地下水中常见阳离子具有一定 的耐受性,在 Na⁺和 K⁺质量浓度 2.5~5.0 g/L 的体系 中,阳离子的存在能够促进凝胶形成。这表明其可以 适用于常见 Cr(VI)污染含水层。

(3)"黄原胶-还原剂-Cr(VI)"凝胶阻截屏障是一种环境友好型的阻截屏障,可以在开展 Cr(VI)污染修 复工作期间将含水层渗透系数降低到 1×10⁻⁷ cm/s 水 平,实现对地下水的临时阻截,之后凝胶可以被生物 降解,不会对地下环境产生不良影响。

对于凝胶体系应用于实际工程场景时,可能存在 的其他问题,如冻融交替环境下凝胶化与凝胶降解时 间,还需开展进一步研究。

参考文献(References):

- DHAL B, THATOI H N, DAS N N, et al. Chemical and microbial remediation of hexavalent chromium from contaminated soil and mining/metallurgical solid waste: A review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 250/251: 272 - 291.
- [2] ZHAO Fangjie, MA Yibing, ZHU Yongguan, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(2): 750 – 759.
- [3] 张进德,田磊,裴圣良.矿山水土污染与防治对策研究[J].水文地质工程地质,2021,48(2):157-163.
 [ZHANG Jinde, TIAN Lei, PEI Shengliang. A discussion of soil and water pollution and control

countermeasures in mining area of China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 157 – 163. (in Chinese with English abstract)]

- [4] 王晟, 冯翔, 李兵, 等. 多种铁改性和未改性生物炭对 模拟地下水中六价铬的去除[J]. 吉林大学学报(地球 科学版), 2021, 51(1): 247 - 255. [WANG Sheng, FENG Xiang, LI Bing, et al. Removal of hexavalent chromium from simulated groundwater by variety of ironmodified and unmodified biochars[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(1): 247 -255. (in Chinese with English abstract)]
- [5] WU Yihan, PANG Hongwei, LIU Yue, et al. Environmental remediation of heavy metal ions by novelnanomaterials: A review[J]. Environmental Pollution, 2019, 246: 608 - 620.
- [6] ZOU Yidong, WANG Xiangxue, KHAN A, et al. Environmental remediation and application of nanoscale zero-valent iron and its composites for the removal of heavy metal ions: A review[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(14): 7290 – 7304.
- [7] LIU Lianwen, LI Wei, SONG Weiping, et al. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability[J]. Science of the Total Environment, 2018, 633; 206 - 219.
- [8] ZHOU Rui, SUN He, HOU Zhimin, et al. Light transmission method to explore the migration and distribution of Cr(VI) in a sandy aquifer[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(6): 255.
- ZHANG Yu, TANG Qiang, SHI Peixin, et al. Influence of bio-clogging on permeability characteristics of soil[J].
 Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(3): 707 - 721.
- PENSINI E, ELSAYED A, MACIAS RODRIGUEZ B, et al. In situ trapping and treating of hexavalent chromium using scleroglucan-based fluids: A proof of concept[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2018, 559: 192 200.
- [11] KIM M, CORAPCIOGLU M Y. Gel barrier formation in unsaturated porous media[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2002, 56(1/2): 75 – 98.
- KIM M, CORAPCIOGLU M Y. Modeling of gel barrier formation by using colloidal silica in saturated media[J].
 Environmental Technology, 2003, 24(4): 517 – 529.
- [13] DEHGHAN H, TABARSA A, LATIFI N, et al. Use of xanthan and guar gums in soil strengthening[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2019, 21(1): 155 165.

- SIWIK A, PENSINI E, ELSAYED A, et al. Natural guar, xanthan and carboxymethyl-cellulose-based fluids: Potential use to trap and treat hexavalent chromium in the subsurface[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2019, 7(1): 102807.
- [15] KUMAR S A, SUJATHA E R, PUGAZHENDI A, et al. Guar gum-stabilized soil: A clean, sustainable and economic alternative liner material for landfills[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2021: 1 – 19.
- [16] ARMISTEAD S J, RAWLINGS A E, SMITH C C, et al. Biopolymer stabilization/solidification of soils: A rapid, micro-macro, cross-disciplinary approach[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(21): 13963 – 13972.
- [17] GIOIA F, CIRIELLO P P. The containment of oil spills in porous media using xanthan/aluminum solutions, gelled by gaseous CO₂ or by AlCl₃ solutions[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 138(3): 500 – 506.
- ZHANG Guicai, CHEN Lifeng, GE Jijiang, et al. Experimental research of syneresis mechanism of HPAM/Cr³⁺ gel[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2015, 483: 96 – 103.
- [19] REN Liming, WANG Ruoyu, QIN Bing, et al. Enhanced remediation efficiency of Cr(VI)-contaminated heterogeneous aquifers: Improved sweeping efficiency using shear-thinning fluids[J]. Chemosphere, 2021, 273: 129675.
- [20] 佟卉,苏程,毛绍祺,等.油田用铬交联聚合物凝胶研究进展综述[J].化学工程师,2021,35(2):43-47.
 [TONG Hui, SU Cheng, MAO Shaoqi, et al. Research progress of chromium cross-linked polymer gel used in oilfield[J]. Chemical Engineer, 2021, 35(2):43-47. (in Chinese with English abstract)]
- [21] GIOIA F, URCIUOLO M. The containment of oil spills in unconsolidated granular porous media using xanthan/ Cr(III) and xanthan/Al(III) gels[J]. Journal of Hazardous Materials, 2004, 116(1/2): 83 – 93.
- [22] PENSINI E, RODRIGUEZ B M, MARANGONI A G, et al. Shear rheological properties of composite fluids and

stability of particle suspensions: Potential implications for fracturing and environmental fluids[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2019, 97(9): 2395 – 2407.

- [23] TELEPANICH A, MARSHALL T, GREGORI S, et al. Graphene-alginate fluids as unconventional electrodes for the electrokinetic remediation of Cr(VI)[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2021, 232(8): 334.
- [24] 李红,孙辉,张冲,等. 焦亚硫酸钠-石灰法处理含铬废水的研究[J]. 辽宁化工, 2020, 49(6): 631-633. [LI Hong, SUN Hui, ZHANG Chong, et al. Study on treatment of chromium-containing wastewater by sodium metabisulfite-lime method[J]. Liaoning Chemical Industry, 2020, 49(6): 631 633. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 雷迅, 吴咚咚, 郑融融, 等. 焦亚硫酸钠对电镀废水 六价铬和化学需氧量浓度值影响效果的探讨[J]. 当代化工研究, 2020(4): 131 – 132. [LEI Xun, WU Dongdong, ZHENG Rongrong, et al. Discussion the effect of sodium pyrosulfite to Cr⁶⁺ and chemical oxygen demand in the electroplating wastewate[J]. Modern Chemical Research, 2020(4): 131 – 132. (in Chinese with English abstract)]
- [26] MCCOOL C S, GREEN D W, WILLHITE G P. Fluid/rock interactions between xanthan/chromium(III) gel systems and dolomite core material[J]. SPE Production & Facilities, 2000, 15(3): 159 – 167.
- [27] 李琴.地下水污染膨润土/水泥/粘土系原位阻截材料 防渗与兼容性能研究[D].长春:吉林大学,2020.[LI Qin. Study on containment performance and chemical compatibility of bentonite/cement/clay based in-situ barrier materials for groundwater pollution[D]. Changchun; Jilin University, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 韩慧慧.利用弱凝胶强化修复试剂在低渗透地层中的迁移研究[D].长春:吉林大学,2019.[HAN Huihui. Study on enhancing the migration of the remediation agents in low permeability formation by using weak gel[D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese with English abstract)]

编辑:宗 爽