

## 河北博野某地热系统现场阻垢试验及阻垢效果评价

刘肖<sup>1,2</sup>, 谭现锋<sup>1,2\*</sup>, 张丰<sup>1,2</sup>, 张茜<sup>1,2</sup>, 卜宪标<sup>3</sup>, 郑慧铭<sup>1,2</sup>

(1. 山东省鲁南地质工程勘察院(山东省地质矿产勘查开发局第二地质大队), 山东 济宁 272100; 2. 山东省地热清洁能源勘查开发工程研究中心, 山东 济宁 272100; 3. 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640)

**摘要:** 为了了解地热系统中结垢情况及优选绿色高效阻垢剂, 选定河北博野某结垢地热井, 针对现场地热供暖系统情况, 分析了结垢类型, 研发设计了阻垢剂加注装置, 现场开展了多种工况条件下阻垢剂的加注试验, 计算评价了阻垢率。结果表明: 该地热井结垢成分为文石和方解石; 所选择的四种阻垢剂其阻垢率均在80%以上, 效果最好的一种阻垢剂在加注浓度35.95 mg/L时, 阻垢率达到94.49%。一个采暖季的阻垢效果表明, 在井下加注化学阻垢剂可有效解决井筒和地表设备的碳酸钙结垢。

**关键词:** 碳酸钙垢; 阻垢剂; 阻垢率; 阻垢试验

中图分类号: P64

文献标识码: A

## Field Scale Inhibition Test and Evaluation of Scale Inhibition Effect of a Geothermal System in Boye, Hebei

LIU Xiao<sup>1,2</sup>, TAN Xianfeng<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Feng<sup>1,2</sup>, ZHANG Xi<sup>1,2</sup>, BU Xianbiao<sup>3</sup>, ZHENG Huiming<sup>1,2</sup>

(1. Shandong Provincial Lunan Geo-engineering Exploration Institute (The Second Geological Brigade of Shandong Provincial Geology and Mineral Resources Bureau), Jining, Shandong 272100, China; 2. Shandong Geothermal Clean Energy Exploration and Development Engineering Research Center, Jining, Shandong 272100, China; 3. Guangzhou Institute of Energy Conversion, CAS, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

**Abstract:** Fouling in geothermal systems reduces the efficient exploitation of geothermal fluids. In this paper, a scaled geothermal well in Bono, Hebei is selected. The type of scaling is analyzed while the scale inhibitor filling device is developed and designed and the scale inhibitor filling test is carried out in the field under various working conditions, with which the scale inhibition rate is calculated and evaluated. The results showed that the scale components of the geothermal well were aragonite and calcite, and that the scale inhibition rates of the four selected scale inhibitors were all above 80%, among which the best one scale inhibitor reached 94.49% at a spiking concentration of 35.95 mg/L. The scale inhibition effect in one heating season shows that the chemical scale inhibitor can effectively solve the calcium carbonate scaling in wellbore and surface equipment.

**Key words:** calcium carbonate scale; scale inhibitor; scale inhibition efficiency; scale inhibition test

随着国家碳排放目标的提出, 地热资源作为一种绿色高效能源有助于“双碳”目标实现, 它主要源于地球内部物质中放射性同位素衰变和地球形成演化过程中能量的积累<sup>[1-2]</sup>, 可用于发电、供暖、制冷和干燥等<sup>[3-8]</sup>。在地热资源开发利用过程

中, 当地热流体从热储层向井口运移过程中, 由于温度和压力发生变化, 导致矿物溶解度发生变化, 使得部分矿物达到过饱和状态而沉淀, 堵塞井孔或管道, 严重制约了地热能的可持续高效开发利用<sup>[9-10]</sup>。沉淀物的主要类型为钙垢、硅垢等, 钙垢

收稿日期: 2022-03-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB1504104); 山东省地质矿产勘查开发局地质勘查与科技创新项目(鲁地字[2021]6号)

作者简介: 刘肖(1990-), 女, 山东枣庄人, 硕士研究生, 工程师, 从事深部地热资源开发、水文地质方面研究。

\* 通讯作者: 谭现锋(1977-), 男, 山东鱼台人, 博士研究生, 研究员, 从事深部地热资源勘探与开发、采煤沉陷区综合治理与生态修复方面研究。

一般发生在闪蒸点附近,对地热井而言结垢现象在井筒、井上管道设备中均有可能出现,使地热能的利用效率大大降低<sup>[10-11]</sup>。钙垢在中低温系统中比较常见,也是影响地热系统正常高效运行的主要问题之一。羊八井地热电站<sup>[12]</sup>、西藏那曲地热电站<sup>[8,10]</sup>、甘孜 DZK02 地热井<sup>[8,10,13]</sup>、台湾 3 MW 清水地热电站<sup>[14]</sup>、Los Humeros 地热井<sup>[15]</sup>、Mahanagdong 地热井<sup>[16]</sup>均因碳酸钙结垢问题影响了地热田产能以及被迫关闭。

为了提高地热资源的开发利用效益,避免或者抑制钙垢,国内外学者在钙垢形成过程及其碳酸钙溶解沉淀规律、钙垢发生的深度和范围、闪蒸趋势及结垢位置预测、地热水阻垢室内试验及机理分析等方面均进行了大量研究。Rahmani<sup>[17]</sup>采用 WATCH 软件对伊朗两口地热井进行绝热沸腾计算,结果表明当温度为 180 ℃时,CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>突增,流体中方解石过饱和程度最大,基于结垢速率,建议采取周期性机械除垢或者注入抑制剂的方法来除垢;Wangyal<sup>[18]</sup>采用井筒模拟程序 HOLA 评价沸腾是否发生及发生的深度,结果表明该深度与井口压力关系密切;Patzay<sup>[19]</sup>对匈牙利南部高温地热井结垢的影响因素进行了分析;Lee<sup>[20]</sup>对台湾清水地热井的闪蒸位置进行了模拟研究,并基于此进行了阻垢试验;Ramos-Candelaria<sup>[21]</sup>模拟了在不同井口压力、井口质量流量下的闪蒸位置,并设计了阻垢系统;郑尚基<sup>[22]</sup>以丰顺地热电站的地热水为研究对象,采用地热水动态结垢趋势分析系统和多功能岩心驱替装置,开展了地热电厂管线和地下储层的结垢、阻垢模拟实验,研究了其结垢趋势和阻垢防垢效果。Li<sup>[23]</sup>以川西高原康定地热田为例,对地热田方解石结垢和腐蚀进行了定量评估。由此可以看出针对地热系统碳酸钙结垢情况,如何对结垢情况进行抑制及避免十分必要。

尽管针对地热系统结垢问题已有理论研究和阻垢试验研究,但是多集中在阻垢的某一个环节进行研究分析,缺少对阻垢过程的全流程研究。因此本文以河北博野县结垢地热系统为例,在现场考察、结垢样品取样测试、阻垢工艺设计及现场加注装置研发加工、阻垢现场试验、阻垢效率评价等全过程基础上,开展不同工况下阻垢剂的阻垢性能试验,对阻垢效果进行定量评价,分析阻垢机理,为实现地热资源可持续高效开发利用,减少钙垢的产生提供了理论依据。

## 1 试验场地基本情况

### 1.1 地热井基本概况

河北省博野县地热区位于渤海湾盆地冀中拗陷高阳低凸起边缘,构造位置处于华北板块(1级)、渤海湾盆地(2级)、冀中拗陷(3级)、高阳低凸起(4级构造单元)的中东部边缘,高阳低凸起与饶阳凹陷交界处(图1)。本次现场阻垢试验选定地热井于2019年11月成井,成井深度3860 m。井管结构如图2所示,0.00~550.00 m套管直径406 mm,513.66~1950.00 m套管直径273 mm,1909.86~3275.00 m套管直径177.80 mm,3275.00~3860.00 m裸眼直径152.00 mm。本井自上而下揭露地层为第四系平原组,新近系明华镇组,上第三系馆陶组,古近系东营组,下第三系沙河街组、孔店组,蓟县系雾迷山组。地热井的取水层位为雾迷山组白云岩含水层,利用井段3275.00~3860.00 m。含水层总厚度38.10 m,共11层,其中二类裂隙缝层2层,总厚度9.10 m,三类裂隙缝层9层,总厚度29.00 m,二类、三类裂缝含水层为本井主要产水层。

### 1.2 供暖系统运行情况

2019—2020年采暖季该井作为回灌井使用,2020—2021年采暖季作为开采井使用。该井泵室管直径406 mm,深度513.66 m,电潜泵下深230 m,泵管直径159 mm,供暖系统如图3所示。井口的地热水直接进入敞口水箱,然后流进热水罐。热水罐内的地热水为常压,其内部的地热水经地热水泵加压后进入板换,在板换内地热水和建筑供暖的二次水换热。板换内换完热后的地热水分为两路,一路流入回灌井完成回灌;另一路通过旁侧管进入生产井重复利用。旁侧管的直径140 mm,深度400 m,见图3。地热井出水温度95 ℃左右,流量约100 m<sup>3</sup>/h,供暖面积约18×10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>。该地热井所用电潜泵的耐温不超过100 ℃,而井下温度近116 ℃,因此通过设置旁侧管的方式,将部分38.5 ℃的回水掺入开采流体中,降低泵前流体温度,以防止电潜泵被高温烧坏。井口地热水的化学成分见表1。溶解性总固体5122 mg/L,水化学类型为HCO<sub>3</sub>·Cl-Na型。

### 1.3 结垢情况分析

2020—2021年采暖季供暖期间,地热供暖系统结垢现象严重,在井口管道、敞口水箱、热水罐、

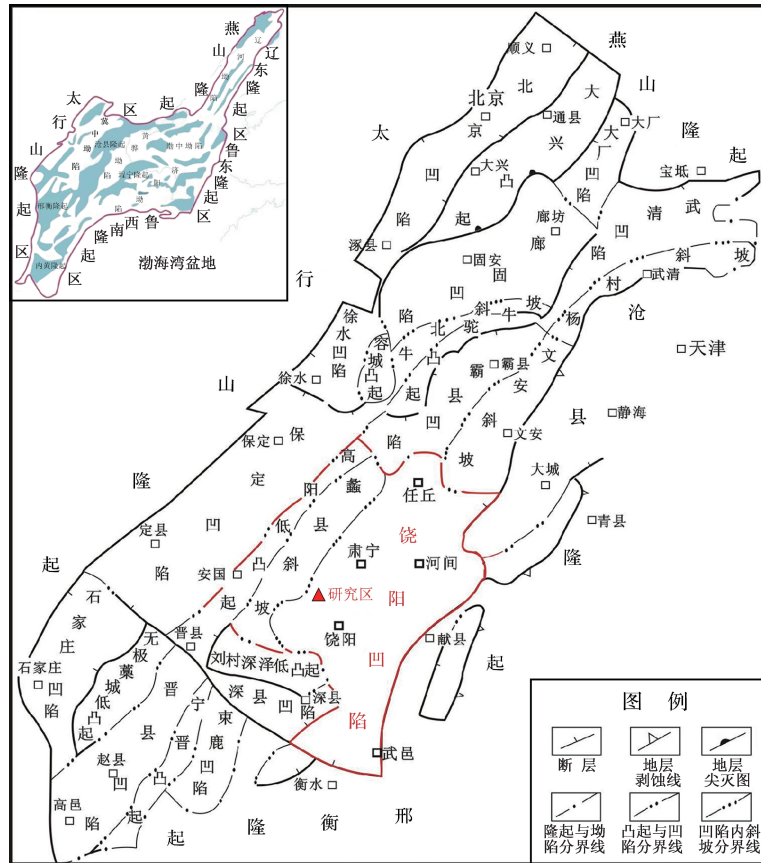


图 1 冀中坳陷及饶阳凹陷构造位置图<sup>[24]</sup>

Fig. 1 Structural location map of Jizhong depression and Raoyang depression<sup>[24]</sup>

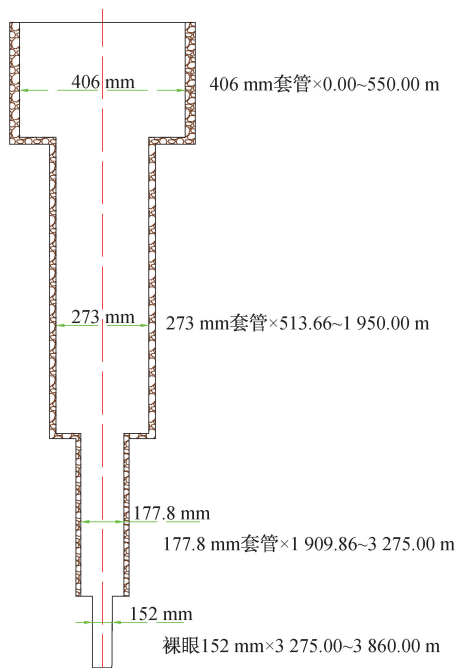
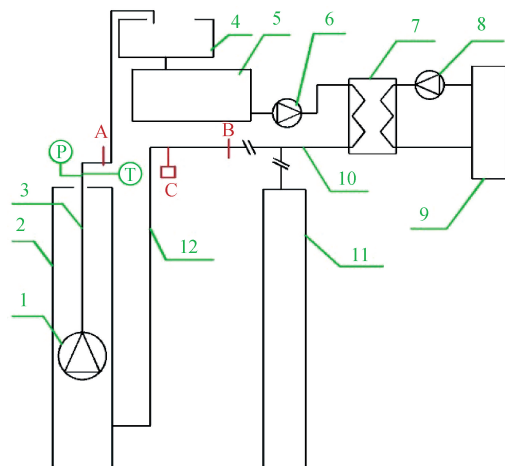


图 2 井管结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of well casing structure

阀门、地热水泵、地热水输运管线和板换位置均有垢生成,结垢最为严重的是热水罐,地热水泵以及



注:1—电潜泵,2—井管,3—泵管,4—敞口水箱,5—热水罐,6—地热水泵,7—板式换热器,8—供暖循环泵,9—建筑,10—回灌管线,11—回灌井,12—旁侧管,A—取样口 1, B—取样口 2,C—阻垢剂加注装置。

图 3 地热供暖系统图

Fig. 3 Geothermal heating system diagram

两者之间的管道和阀门,导致地热水泵半个月就需要清垢一次。图 4 是管道和阀门结垢情况,图 4(a)中结垢位置位于图 3 中的 A 点,为地热井出井口后的水平运输管道上,图 4(b)是热水罐和地

水泵之间管道上的阀门。在井口处安装了压力和温度监测点以及取样口。

对图中的垢样进行晶型结构分析,分析仪器为 D8 Advance 衍射仪。XRD 谱图显示两处结垢样品为同一晶型结构,未检测到其他晶型结构(图 5),垢质主要成分为方解石和文石,质量比为 45:55,为碳酸钙结垢,敞口水箱和热水罐的生锈导致了图 4 结垢颜色的不同。

对图 4(a)管道结垢样品中选定的区域进行二次电子样品形貌及能谱分析,分析仪器为扫描电子显微镜/Merlin Compact,加速电压 EHT=10.00 kV,工作距离 WD=9.4 mm, Mag=500X(即放大倍数 500 倍),检测器为 SE2 探测器(Signal A=SE2)。图 6(c)~(f)为 Ca、O、C、Mg 在区域上分布图,图中亮点为元素含量高的地方,阴影部位为元素含量较低区域。结合能谱分析结果(表 2),管道内结垢样品主要元素为 Ca、O、C、Mg,Ca 含量 41.95%、O 含量 45.18%、C 含量 8.75%、Mg 含量 1.55%。

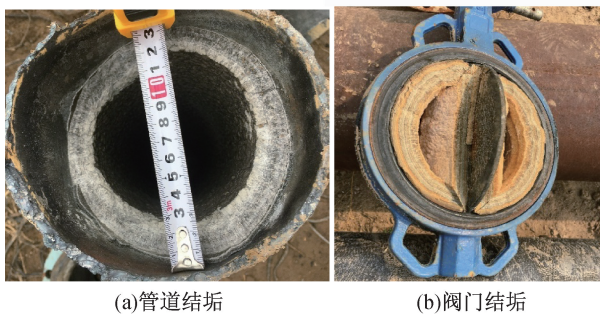


图 4 结垢情况<sup>[25]</sup>

Fig. 4 Scaling situation<sup>[25]</sup>

对图 4(b)阀门结垢样品中选定的区域进行二次电子样品形貌分析,分析仪器为扫描电子显微镜/Merlin Compact,加速电压 EHT=15.00 kV,工作距离 WD=7.9 mm, Mag=100X(即放大倍数 100 倍),检测器为 SE2 探测器(Signal A=SE2)。图 7(c)~(f)为 Ca、O、Mg、Fe 在区域上分布图,图中亮点为元素含量高的地方,阴影部分为元素含量

表 1 井口地热水的离子浓度

Tab. 1 Ion concentration of geothermal water

离子名称	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	149.30	1 691.00	88.56	20.08	2 387.00	104.90	838.20	0.00

表 2 区域元素含量百分比一览表

Tab. 2 List of regional element content percentages

元素	C	O	Mg	Ca	Sc	Fe	Sr
管道结垢 Wt/%	8.75	45.18	1.55	41.95	0.39	1.69	0.49
阀门结垢 Wt/%	10.82	48.09	1.75	37.90	—	0.37	0.90

较低区域。结合能谱分析结果(表 2),管道内结垢样品主要元素为 Ca、O、C、Mg,Ca 含量 37.90%、O 含量 48.09%、C 含量 10.82%、Mg 含量 1.75%。

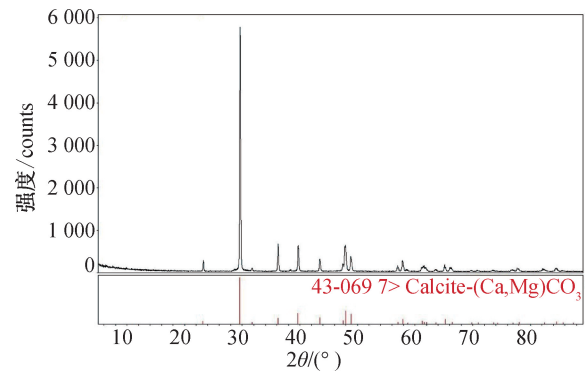


图 5 结垢样品 XRD 图谱

Fig. 5 XRD pattern of scaling samples

## 2 现场阻垢试验及分析

### 2.1 阻垢剂加注设备研发

根据现场实地考察,结合试验场地供暖管网及地热井情况,为解决阻垢剂流量计量、加注深度计量及调节控制绞盘、测量仪表设计安装等问题,自主研发了一套阻垢剂地面加注装置(图 8)。其中隔膜式计量泵两台,一备一用,功率 90 W,流量 150 L;加注管线直径 6 mm,316 L 材质;阻垢剂加注箱为直径 20 cm、高 1.0 m 的亚克力材质管;阀门和管线均耐腐蚀性。图 3 中的 C 位置即为阻垢剂加注装置。

### 2.2 阻垢剂选择

针对地热系统碳酸钙结垢及相应阻垢剂注入情况,不同地热系统采用不同阻垢剂进行处理,减少碳酸钙结垢形成主要是减少碳酸钙形成的量或抑制碳酸钙晶体的生长,添加的化学抑制剂主要包括有机磷酸盐<sup>[26]</sup>、腐植酸<sup>[27]</sup>、氨基三亚甲基膦酸(ATMP)、多胺聚醚亚甲基膦酸酯(PAPEMP)<sup>[28]</sup>、乙二胺四乙酸(EDTA)<sup>[29]</sup>、金属离子<sup>[30]</sup>、聚丙烯酸

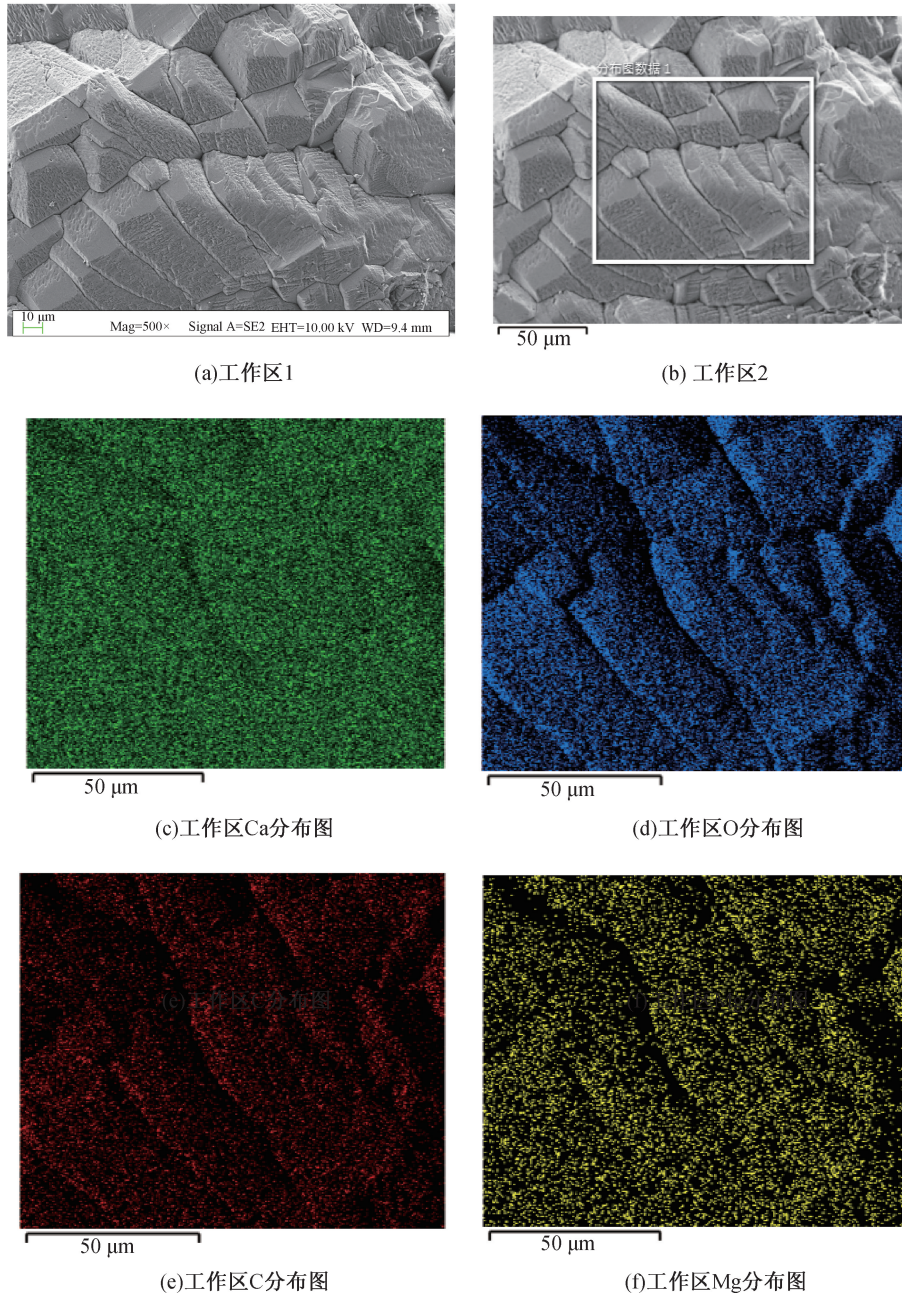


图 6 管道结垢样品二次电子样品形貌图

Fig. 6 Morphology of secondary electronic sample of pipeline scaling sample

(PAA)<sup>[28,31]</sup>、聚马来酸(PMA)<sup>[32]</sup>和聚甲基丙烯酸(PMAA)、聚丙烯酸-2-丙烯酰胺-2-甲基丙烷磺酸(PAA-PAMPS)<sup>[33]</sup>。这些抑制剂吸附在生长的碳酸钙晶体上并与生长部位结合,抑制晶体生长并破坏方解石晶体的规则形状,导致晶体稳定性减弱。目前纳米气泡技术应用于酸性地热流体中也取得了显著效果<sup>[34-35]</sup>。根据对国内外阻垢剂市场的调研,本次选择了四种阻垢剂进行现场试验,分别为阻垢剂 1126、1131、4200、ZC WT-1100,前三种为进口阻垢剂,主要成分分别为丙烯酸共聚物,磺化离子聚合物和聚丙烯酸钠,第四种为国产阻垢

剂羧酸均聚物。阻垢剂 1126 在含有二价阳离子的水中,比如钙和铁的水中,具有很好的防垢性能,在广泛的 pH 条件下具有优异的热稳定性和配方能力。阻垢剂 1131 是一种水性压克力助剂,能有效地抑制方解石(CaCO<sub>3</sub>),重晶石(BaSO<sub>4</sub>)以及硫酸钙(CaSO<sub>4</sub>)等矿物质结垢问题,表现出极好的二价离子兼容性、极好的高温稳定性、极好的与防冻剂兼容稳定性等。阻垢剂 4200 对硫酸钡、硫酸钙、碳酸钙和其他低溶解度盐类有高效的阻垢效果。阻垢剂 ZC WT-1100 对碳酸钙、硫酸钡、硫酸钙结垢具有较好阻垢效果。

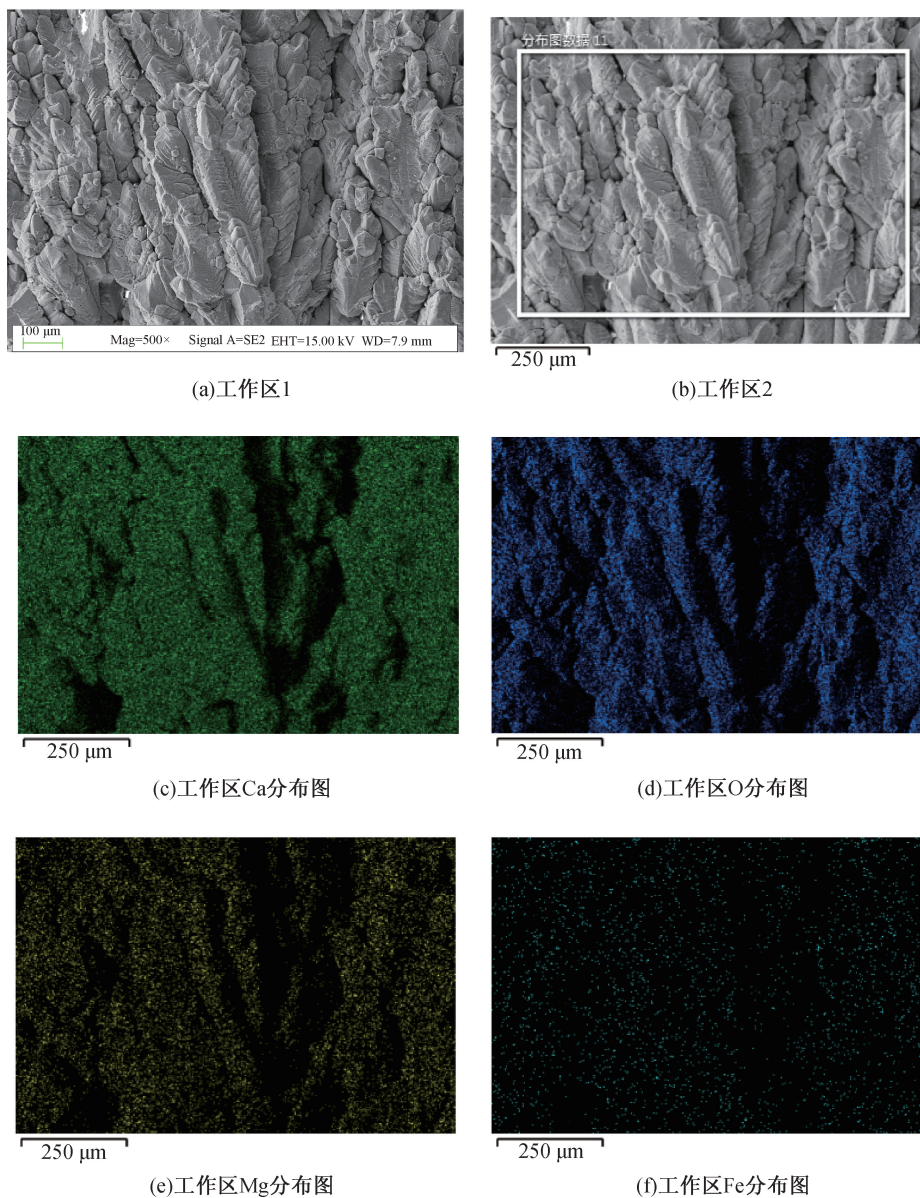


图7 阀门结垢样品二次电子样品形貌图

Fig. 7 Morphology of secondary electronic sample of valve scaling sample

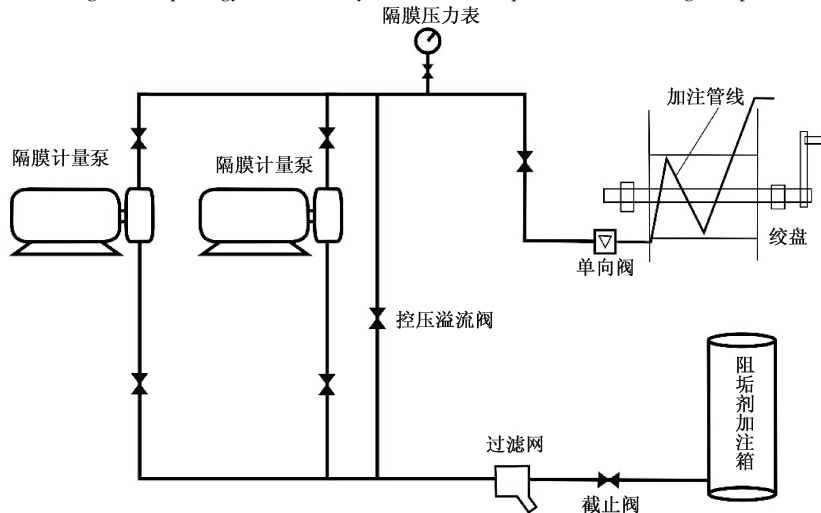


图8 阻垢剂加注装置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of scale inhibitor filling device

表 3 不同阻垢剂在不同工况下阻垢效果一览表

**Tab. 3 List of scale inhibition effect of different scale inhibitors under different working conditions**

1 126		1 131		4 200		ZC WT-1100	
阻垢剂浓度 /(mg · L <sup>-1</sup> )	阻垢率 /%	阻垢剂浓度 /(mg · L <sup>-1</sup> )	阻垢率 /%	阻垢剂浓度 /(mg · L <sup>-1</sup> )	阻垢率 /%	阻垢剂浓度 /(mg · L <sup>-1</sup> )	阻垢率 /%
11.30	66.50	15.81	69.61	19.23	75.66	19.28	71.97
21.74	71.25	25.61	89.37	29.72	79.47	28.25	75.91
30.43	80.37	35.95	94.49	38.74	80.24	38.56	80.41
—	—	—	—	48.82	85.04	—	—

2.3 现场试验方案

本次试验通过泵房内旁侧管阀门(图 3 中 C 点)加入阻垢剂,在抽水井井口(图 3 中 A 点)和回水回灌后管道(图 3 中 B 点)进行取样。四种阻垢剂分别开展了不同工况下的试验来研究阻垢剂最佳浓度、最佳阻垢效果。结合已有研究成果,土耳其 Germencik 地热田采用膦酸酯和聚丙烯酸酯阻垢剂,阻垢剂用量 6 mg/L 可以达到阻垢效果;菲律宾 BacMan 地热田采用膦基羧酸共聚物,用量 8 mg/L<sup>[11,16,20]</sup>。通过对比研究博野场地水质情况,结垢情况等,选定本次试验最低浓度 10 mg/L。试验开始前,按照 1 : 3 稀释阻垢剂置于阻垢剂箱,通过调节计量泵的阀门达到调节阻垢剂浓度的目的。试验开始前分别在取样口 1、2 取样,作为试验开始时的初始值。试验开始后,每 30 min 同时在取样口 1、2 进行取样,现场采用 EDTA 滴定法测试样品中的钙离子浓度。试验结束后,选取关键节点数据送往实验室进行检测。

本次试验通过分析加入阻垢剂前后 Ca<sup>2+</sup> 浓度变化差异来计算阻垢率,见式(1):

$$IE = \frac{C_{i1} - C_{i0}}{C_{wb} - C_{i0}} \times 100\% \quad (1)$$

其中,IE 是阻垢剂阻垢率(%);C<sub>i0</sub> 和 C<sub>i1</sub> 为注入阻垢剂前后取样点 B 的 Ca<sup>2+</sup> 浓度(mg/L);C<sub>wb</sub> 为井底 Ca<sup>2+</sup> 浓度(mg/L)。

在井底、井口和旁侧管中的总水量和钙离子浓度是保持守恒的,因为井底的钙离子浓度可以通过公式(2)、公式(3)计算获得:

$$M_{W,wh} = M_{W,st} + M_{W,wb} \quad (2)$$

$$C_{wh1}M_{W,wh} = C_{i1}M_{W,t} + C_{wb}M_{W,wb} \quad (3)$$

其中,M<sub>W,wh</sub>、M<sub>W,t</sub> 和 M<sub>W,wb</sub> 分别为井口、旁侧管和井底流量,(kg/s);C<sub>wh1</sub> 为取样点 A Ca<sup>2+</sup> 浓度(mg/L)。M<sub>W,wh</sub>、M<sub>W,t</sub> 和 M<sub>W,wb</sub> 是通过超声波流量计测量得到。

2.4 试验结果分析

在 2020—2021 年供暖季开展了现场阻垢试

验,开采井抽水量在 110 m<sup>3</sup>/h 左右、旁侧管流量 26~30 m<sup>3</sup>/h,出水温度 95 °C 左右,图 9 为不同阻垢剂的阻垢率变化曲线图,从图中可以看出阻垢率随着阻垢剂浓度增大而增大,阻垢剂浓度越高,阻垢率越大,阻垢效果越好。通过现场试验发现,4 种阻垢剂的阻垢率均能达到 80%;达到 85% 的有 2 种阻垢剂,为阻垢剂 1131 在阻垢剂加入量 25.61 mg/L 和阻垢剂 4200 在阻垢剂加入量 48.82 mg/L 时;达到 92% 的有 1 种阻垢剂(表 3)。在同等阻垢剂浓度情况下,阻垢剂 1131 的阻垢效果最好,阻垢剂 1131 在浓度 35.95 mg/L 时,阻垢率为 94.49%,四种阻垢剂中 ZC WT-1100 阻垢剂相比于其他三种阻垢剂阻垢效果较差。

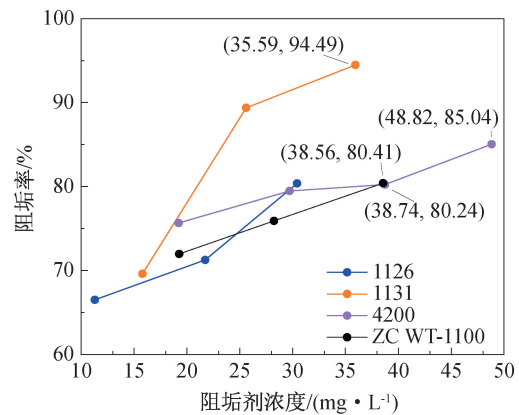


图 9 不同阻垢剂阻垢率曲线图

Fig. 9 Graph of scale inhibition rate of different scale inhibitors

阻垢剂通常是分散剂,可防止水垢紧紧粘附在管道和设备表面<sup>[35]</sup>。在碳酸钙垢生成过程中,添加到地热水中的阻垢剂主要通过与水中共离子的络合增溶、晶格畸变、凝聚与分散等机理(图 10)来达到抑制垢和消除垢的目的<sup>[22]</sup>。针对现场阻垢试验,筛选出的高效阻垢剂通过吸附水中的钙离子于结垢晶体表面后抑制地热水结垢的正常生长,从而使其发生畸变。并且阻垢剂还可与碳酸钙垢发生反应,破坏碳酸钙的晶格结构,产生不规则的非晶格颗粒,使得垢质变松软,从而达到除垢的效果。

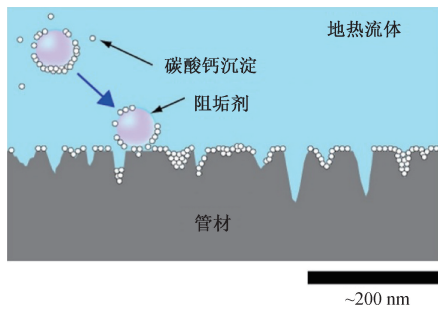


图 10 阻垢机理示意图<sup>[34]</sup>

Fig. 10 Schematic diagram of scale inhibition mechanism<sup>[34]</sup>

实验开始前均进行了本底值测试,待整个工况稳定后开始加入阻垢剂。对 4 种阻垢剂在不同取样口处  $\text{Ca}^{2+}$  浓度进行分析(图 11),实验过程中各种阻垢剂浓度由小到大进行调整,随着阻垢剂的加入取样口处  $\text{Ca}^{2+}$  浓度整体均表现出上升趋势。对于每个浓度的阻垢剂,A、B 两个取样口的  $\text{Ca}^{2+}$  浓度在 3 h 后可以达到稳定,因此每种阻垢剂在每个工况下需要 4~5 h 的测试时间才能达到稳

定的  $\text{Ca}^{2+}$  浓度。阻垢剂 1126 在阻垢剂浓度 11.30 mg/L 情况下,井口  $\text{Ca}^{2+}$  浓度达到稳定需 3 h,稳定在 93.27 mg/L,此时取样口 B  $\text{Ca}^{2+}$  浓度稳定在 81.10 mg/L,加大阻垢剂浓度到 30.43 mg/L 时,取样口 A  $\text{Ca}^{2+}$  浓度为 101.38 mg/L,此时取样口 B  $\text{Ca}^{2+}$  浓度达到 93.27 mg/L,此后稳定在该浓度直到试验结束。阻垢剂 4200 在阻垢剂浓度 48.82 mg/L 情况下,取样口 A  $\text{Ca}^{2+}$  浓度为 99.35 mg/L,取样口 B  $\text{Ca}^{2+}$  浓度稳定在 93.27 mg/L,阻垢剂 ZCWT-1100 在阻垢剂浓度 38.56 mg/L 情况下,取样口 A  $\text{Ca}^{2+}$  浓度为 101.38 mg/L,此时取样口 B  $\text{Ca}^{2+}$  浓度稳定在 93.27 mg/L,三种阻垢剂最后稳定浓度一致,这与图 9 中的阻垢率曲线图相一致,三种阻垢剂最大阻垢率均在 80% 左右。而阻垢剂 1131,在相同阻垢剂浓度情况下,取样口  $\text{Ca}^{2+}$  浓度稳定值较高,在阻垢剂浓度 35.95 mg/L 情况下,取样口 B  $\text{Ca}^{2+}$  浓度达到 95.30 mg/L,此时阻垢率为 94.49%,阻垢效果最好。

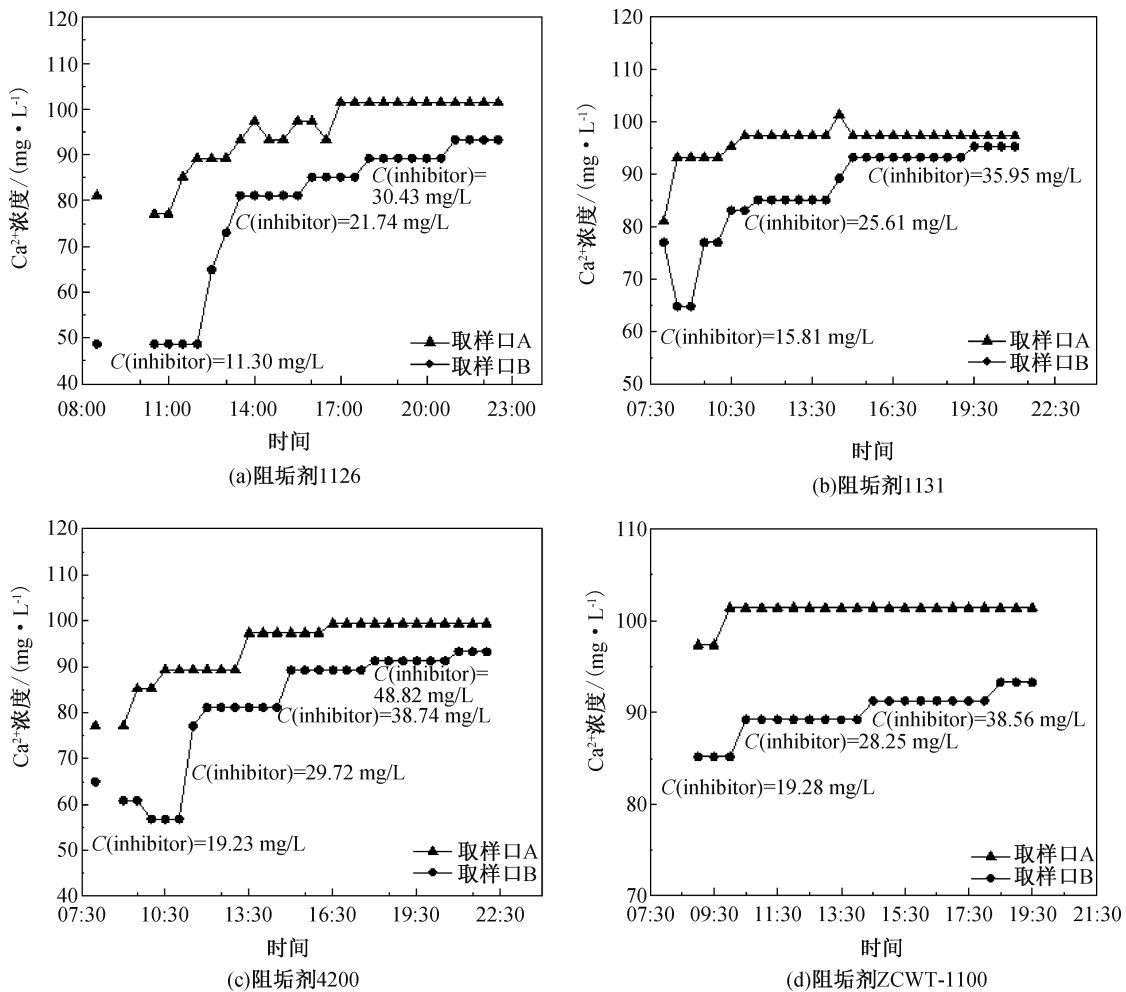


图 11 不同阻垢剂不同取样口钙离子浓度变化曲线

Fig. 11 Variation curve of calcium ion concentration in sampling port of different scale inhibitors

表4 现场测试与实验室测试数据比对

Tab. 4 Comparison of field test and laboratory test data

野外编号	实验室编号	Ca <sup>2+</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )		误差/%
		现场测试	实验室测试	
11-BY1 原水	20201216055001	77.05	75.43	-2.10
1-3	20210315010003	93.27	89.22	-4.34
1-5	20210315010005	97.32	97.31	-0.01
2-1	20210315010011	48.66	49.06	0.81
2-4	20210315010014	83.13	80.80	-2.80
2-5	20210315010015	85.16	85.61	0.53
2-6	20210315010016	89.21	86.33	-3.23
2-7	20210315010017	93.27	88.66	-4.95

为了验证现场测试数据的准确性,将现场样品送至实验室进行检测。通过对比,测试数据误差控制在5%以内(表4),现场试验测试数据真实可靠且准确。

### 3 结论

1)对地热井结垢样品采集测试,该地热井结垢为碳酸钙,垢质主要成分为方解石和文石,质量比为45:55。

2)针对博野县地热结垢系统,不同阻垢剂在每种工况下A、B两个取样口的Ca<sup>2+</sup>浓度在3h后可以达到稳定,因此每种阻垢剂在每个工况下需要4~5h的测试时间才能达到稳定的Ca<sup>2+</sup>浓度。阻垢剂阻垢效果越好,取样口Ca<sup>2+</sup>浓度稳定在较高值。

3)自主研发了阻垢剂加注装置,现场阻垢试验显示所选择的四种阻垢剂的阻垢率均在80%以上,阻垢效果最好的一种阻垢剂在加注浓度35.95 mg/L时,阻垢率达到94.49%。一个采暖季的阻垢效果表明,在井下加注化学阻垢剂可有效解决井筒和地表设备的碳酸钙结垢。

### 参考文献:

- [1]HUANG S P. Commentary: Geothermal Energy in China [J]. Nature Climate Change, 2012, 2(8): 557-560.
- [2]柯婷婷,黄少鹏,许威,等.关中盆地沔西地区地热对井采灌开发模式的数值模拟[J].第四纪研究, 2019, 39(5): 1252-1263.
- [3]许天福,胡子旭,李胜涛,等.增强型地热系统:国际研究进展与我国研究现状[J].地质学报, 2018, 92(9): 1936-1947.
- [4]秦祥熙,张萌,叶佳,等.河北沧县台拱带中、低温地热资源ORC发电与综合梯级利用[J].地球学报, 2019, 40(2): 307-313.
- [5]陈作,许国庆,蒋漫旗.国内外干热岩压裂技术现状及发展建议[J].石油钻探技术, 2019, 47(6): 1-8.
- [6]曾义金.干热岩热能开发技术进展与思考[J].石油钻探技术, 2015, 43(2): 1-7.
- [7]付亚荣,李明磊,王树义,等.干热岩勘探开发现状及前景[J].石油钻采工艺, 2018, 40(4): 526-540.
- [8]梁海军,郭啸峰,高涛,等.河北博野某地热井结垢位置预测及影响因素分析[J].石油钻探技术, 2020, 48(5): 105-110.
- [9]ATKINSON G, RAJU K, HOWELL R O. The Thermodynamics of Scale Prediction[C]//SPE International Symposium on Oilfield Chemistry. Anaheim, California: SPE, 1991: 209-215.
- [10]李义曼,庞忠和.地热系统碳酸钙垢形成原因及定量化评价[J].新能源进展, 2018, 6(4): 274-281.
- [11]CHRISTOPH W, FLORIAN E, THOMAS J, et al. Causes of Abundant Calcite Scaling in Geothermal Wells in the Bavarian Molasse Basin, Southern Germany[J]. Geothermics, 2017, 70: 324-338.
- [12]王延欣,刘世良,边庆玉,等.甘孜地热井结垢分析及防垢对策[J].新能源进展, 2015, 3(3): 202-206.
- [13]谯开聪. DZK02 地热井结垢原因分析及解决方案探讨[J].内蒙古科技与经济, 2017, (8): 99, 110.
- [14]LIN C, KUO T, FAN K, et al. Characterization of Well Skin Using Buildup Test and Radon as a Tracer[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011, 78(2): 201-207.
- [15]ARMENTA M F, MONTES M R, ALCALA L M. Wellbore Modeling of Production Well H-1D Using WellSim, Los Hornos Geothermal Field Mexico[C]//Proceedings of the World Geothermal Congress, April, 2015, Melbourne, Australia.
- [16]SIEGA F L, HERRAS E B, BUING B C. Calcite Scale Inhibition: The Case of Mahanagdong Wells in Leyte Geothermal Production Field, Philippines [C]//Proceedings World Geothermal Congress. 2005, 6.
- [17]RAHMANI M R. Assessment of Calcite Scaling Potential

- in the Geothermal Wells of the NW-Sabalan Geothermal Prospect[R]. NW-Iran. Report 19,2007;447-460.
- [18] WANGYAL P. Calcite Deposition Related to Temperature and Boiling in Some Icelandic Geothermal Wells [R]. UNU-GTP, Iceland, report 11,1992;33.
- [19] PATZAY G, KARMAN F H, POTA G. Preliminary Investigations of Scaling and Corrosion in High Enthalpy Geothermal Wells in Hungary[J]. *Geothermics*,2003,32(4/5/6):627-638.
- [20] LEE Bobeng, LIN Chengkuo, CHUANG Chungwei, et al. A Test of Calcium Carbonate Scale Inhibition in Chingshui Geothermal Field, Taiwan [C]//Proceedings World Geothermal Congress, April, 2015, Melbourne, Australia.
- [21] RAMOS-CANDELARIA M, CABEL A C Jr, BUNING B C, et al. Calcite Inhibition Field Trials at the Mindanao Geothermal Production Field (MGPF), Philippines [C]//Proceedings World Geothermal Congress, May, 2000, Kyushu Tohoku, Japan.
- [22] 郑尚基. 地热水阻垢实验研究及机理分析[D]. 青岛: 青岛科技大学,2018.
- [23] LI Y, PANG Z, GALECZKA I M. Quantitative Assessment of Calcite Scaling of a High Temperature Geothermal Well in the Kangding Geothermal Field of Eastern Himalayan Syntax[J]. *Geothermics*,2020,87(C).
- [24] 宋永东. 饶阳凹陷中北部构造特征及有利勘探方向研究[D]. 青岛:中国石油大学,2010.
- [25] 何雨江,刘肖,邢林啸,等. 河北保定岩溶地热结垢过程模拟及防垢对策[J]. *地学前缘*,2022,29(4):430-437.
- [26] HARTLEY A M, HOUSE W A, CALLOW M E, et al. Coprecipitation of Phosphate with Calcite in the Presence of Photosynthesizing Green Algae[J]. *Water Research*, 1997,31(9):2261-2268.
- [27] HOCH A R, REDDY M M, AIKEN G R. Calcite Crystal Growth Inhibition by Humic Substances with Emphasis on Hydrophobic Acids from the Florida Everglades[J]. *Geochem Cosmochim Acta*,2000,64(1):61-72.
- [28] TANG Y, YANG W, YIN X, et al. Investigation of CaCO<sub>3</sub> Scale Inhibition by PAA, ATMP and PAPEMP[J]. *Desalination*,2008,228:55-60.
- [29] GOOPI S P, SUBRAMANIAN V K. Polymorphism in CaCO<sub>3</sub> - Effect of Temperature Under the Influence of EDTA (di sodium salt)[J]. *Desalination*,2012,297:38-47.
- [30] KIAEI Z, HAGHTALAB A. Experimental Study of Using Ca-DTPMP Nanoparticles in Inhibition of CaCO<sub>3</sub> Scaling in a Bulk Water Process [J]. *Desalination*,2014,338:84-92.
- [31] MACADAM J, PARSONS S A. Calcium Carbonate Scale Formation and Control[J]. *Rev Environ Sci Biotechnol*, 2004,3:159-169.
- [32] MARTINOD A, EUVRARD M, FOISSY A, et al. Progressing the Understanding of Chemical Inhibition of Mineral Scale by Green Inhibitors[J]. *Desalination*,2008,220:345-352.
- [33] DIETZSCH M, BARZ M, SCHÜLER T, et al. PAA-PAMPS Copolymers as an Efficient Tool to Control CaCO<sub>3</sub> Scale Formation[J]. *Langmuir*,2013,29:3080-3088.
- [34] AIKAWA A, KIOKA A, NAKAGAWA M, et al. Nanobubbles as Corrosion Inhibitor in Acidic Geothermal Fluid[J]. *Geothermics*,2021,89:101962.
- [35] KIOKA A, NAKAGAWA M. Theoretical and Experimental Perspectives in Utilizing Nanobubbles as Inhibitors of Corrosion and Scale in Geothermal Power Plant[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021,149:111373.

(责任编辑 王利君)