

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.2020096

河北博野某地热井结垢位置预测及影响因素分析

梁海军^{1,2}, 郭啸峰^{1,2}, 高 涛^{1,2}, 卜宪标^{3,4,5}, 李华山^{3,4,5}, 王令宝^{3,4,5}

(1. 中石化新星(北京)新能源研究院有限公司, 北京 100083; 2. 国家地热能源开发利用研究及应用技术推广中心, 北京 100083; 3. 中国科学院广州能源研究所, 广东广州 510640; 4. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广东广州 510640; 5. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广东广州 510640)

摘 要: 地热井开发过程中的碳酸钙结垢严重制约了地热能的可持续开发利用, 为了给地热井阻垢技术的应用提供理论依据, 对河北博野地热井 X 井结垢位置进行了数值模拟研究。基于地热井井身结构, 利用 WELLSIM 软件, 进行了结垢位置预测和结垢影响因素分析研究。研究表明: 根据出口流体成分反推得到的井底流体温度为 128.0 ℃; 地热流体沿井筒上升过程中压力迅速降低, 在井下 56.10 m 处发生闪蒸, 其干度、CO₂ 分压随之发生突变; 地热井内流体闪蒸位置随 CO₂ 质量分数、NaCl 质量分数和地热流体流量增大而下移, 其中 CO₂ 质量分数对地热水闪蒸位置的影响最大。现场防垢时, 潜水泵的下入深度或阻垢剂的加注深度均应在闪蒸点 56.10 m 以下。研究表明, 控制井口压力和流量可以调节闪蒸位置, 实现地热开采与防垢技术的协同优化。

关键词: 地热井; 碳酸钙; 结垢; 闪蒸位置; 防垢; 二氧化碳

中图分类号: TK52 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2020)05-0105-06

Scaling Spot Prediction and Analysis of Influencing Factors for a Geothermal Well in Boye County, Hebei Province

LIANG Haijun^{1,2}, GUO Xiaofeng^{1,2}, GAO Tao^{1,2}, BU Xianbiao^{3,4,5}, LI Huashan^{3,4,5}, WANG Lingbao^{3,4,5}

(1. New Energy Research Institute, Sinopec Star Petroleum Co., Ltd., Beijing, 100083, China; 2. China National Research and Technology Center of Geothermal Energy, Beijing, 100083, China; 3. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong, 510640, China; 4. Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong, 510640, China; 5. Guangdong Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou, Guangdong, 510640, China)

Abstract: Calcium carbonate scaling in geothermal wells seriously hinders the sustainable development and utilization of geothermal energy. In order to provide a theoretical basis for the implementation of scale inhibition technology in geothermal wells, the scaling spots of a geothermal well in Boye County of Hebei Province were numerically simulated. Based on the casing program of geothermal wells, the influencing factors and scaling spot depth prediction were studied by using WELLSIM. The results showed that fluid temperature at the bottomhole calculated from the composition of outlet fluids was 128.0 ℃. The geothermal fluid pressure drops rapidly as it rose along the wellbore. A flash occurred at the depth of 56.10 m, the dryness and CO₂ partial pressure sharply changed accordingly. The flash depth of geothermal fluids migrated downwards with the increase of CO₂ mass fraction, NaCl mass fraction and geothermal fluid flow rate, in which CO₂ mass fraction played the decisive role. In field scale prevention practice, the setting depth of the submersible pump and the injection depth of the scale inhibitor should be below the flash depth of 56.1 m. The research shows that the flash depth can be adjusted by controlling the wellhead pressure and flow rate to accomplish the collaborative optimization of geothermal exploitation and scale prevention.

Key words: geothermal well; calcium carbonate; scaling; flashing depth; antiscale; carbon dioxide

地热能是一种可持续的清洁能源, 可用于发电、供暖、制冷和干燥等^[1-4]。深埋于地下的地热水矿化度较高, 从热储层向地面运移过程中存在结垢问题, 严重制约了地热能的可持续开发利用^[5]。Los Humeros 地热井由于井筒内碳酸钙结垢, 蒸汽产量由 38 t/h 降至 4 t/h^[6]; 新星公司在甘孜的 DZK02 地

收稿日期: 2020-02-19; 改回日期: 2020-07-06。

作者简介: 梁海军 (1972—), 男, 山东滨州人, 1995 年毕业于石油大学 (华东) 石油工程专业, 高级工程师, 主要从事地热、干热岩等新能源技术的研发、咨询及规划工作。E-mail: lianghaijun.xxy@sinopec.com。

基金项目: 国家重点研发计划项目“井储防垢除垢关键技术及工艺”(编号: 2019YFB1504104)和中国石化集团科技攻关项目“中高温地热水防垢除垢技术研究”(编号: JP18063-2)部分研究内容。

热井也存在严重的碳酸钙结垢问题^[7-8];结垢问题也是西藏那曲地热电站关闭的主要原因之一^[9];建立于1982年的3 MW 台湾清水地热电站因井筒结垢问题于1993年停止使用^[10]。

我国地热资源以中低温为主,结垢类型多为碳酸盐垢,国内外很多学者针对地热井结垢问题,进行了闪蒸趋势及结垢位置预测研究,并取得了较好的防垢效果。M. J. Reed^[11]基于重建的热储流体,研究了内华达州迪克西谷地热井的碳酸钙结垢行为;G. Patzay 等人^[12]分析了匈牙利南部高温地热井结垢的影响因素;Lee Bo-Heng 等人^[13]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^[13];M. Ramos-Candelaria 等人^[14]模拟了不同井口压力、井口质量流量下的闪蒸位置,并设计了阻垢系统;S. M. Zhao 等人^[15]研究了西藏朗久地热井不同温度和CO₂分压下的结垢趋势和闪蒸位置;Song Junchao 等人^[16]利用拉格朗日指数和拉伸指数,分析了地热水结垢趋势;Li Yiman 等人^[17]对康定地热井的碳酸钙结垢趋势进行了定量评估;韦梅华^[18]对汾渭裂谷带地热井结垢趋势进行了预测,并进行了热储矿物平衡分析;张恒等人^[19]采用水化学指标,分析了甘孜某地热井的结垢物种类和结垢趋势。可以看出,地热流体闪蒸特性及结垢位置预测是地热防垢的关键环节。

河北博野县城以东的地热井X井在放喷过程中出现了结垢问题,SEM和XRD分析结果表明,垢样中CaCO₃含量大于96%。文献调研表明,地热结垢研究以结垢趋势预测为主,定量研究及影响因素分析较少。为了实现地热资源的可持续开发利用,本文基于井口流体成分测试数据与地热井物理模型,利用WELLSIM软件进行了结垢位置预测及影响因素分析,研究结果为化学阻垢剂加注深度和物理增压潜水泵下入深度提供了理论依据。

1 地热井基本概况

河北博野县地热区位于渤海湾盆地冀中拗陷高阳低凸起边缘,为高阳低凸起与饶阳凹陷的交界部位。该地区地热X井的井身结构如图1所示:一开,采用 $\phi 444.5$ mm钻头钻至井深450.00 m,壁厚9.65 mm、钢级J55的 $\phi 339.7$ mm套管下至井深449.00 m;二开,采用 $\phi 311.1$ mm钻头钻至井深2 205.00 m,壁厚8.94 mm、钢级J55的 $\phi 244.5$ mm套管下至井深409.00~2 204.00 m;三开,采用 $\phi 215.9$ mm

钻头钻至井深3 165.00 m,壁厚9.19 mm、钢级J55的 $\phi 177.8$ mm套管下至井深2 164.00~3 164.00 m;四开,采用 $\phi 155.5$ mm钻头钻至井深3 758.17 m,裸眼完钻。一开、二开及三开都采用注水泥固井,以保护套管和隔绝低水温层。

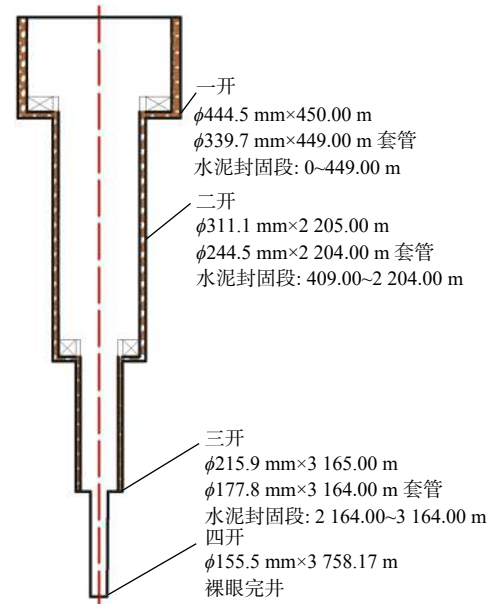


图1 地热X井井身结构

Fig.1 Casing program of a geothermal well

对该井井口地热流体进行采样并进行化验分析,流体温度110℃,干度0.0189,出水量70.59 m³/h,气体流量385.75 m³/h,被冷凝水蒸气246.61 m³/h,未被冷凝气体139.61 m³/h,伴生气工况流量36.95 m³/h,CO₂体积分数39.15%;K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, NO₃⁻, HCO₃⁻和SO₄²⁻的质量浓度分别为154.30, 1 565.00, 66.66, 16.97, 251.57, 6.57, 670.50和90.17 mg/L。

2 结垢位置预测研究

2.1 数学模型

采用WELLSIM软件模拟地热井井筒,分析井筒内流体流动过程。考虑摩擦、加速度和重力等因素造成的压降,基于单相(液体或蒸汽)或两相均质流体,建立地热流体的质量、动量和能量守恒方程。

质量守恒方程为:

$$\frac{dm}{dz} = 0 \quad (1)$$

地热流体压降计算公式为:

$$\frac{dp}{dz} = -\left(\frac{dp}{dz}\right)_F - \left(\frac{dp}{dz}\right)_A - \left(\frac{dp}{dz}\right)_G \quad (2)$$

能量守恒方程为:

$$\frac{dq}{dz} = m \frac{d}{dz} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (3)$$

式中: m 为地热流体的质量流率, kg/s; z 为地热井井深, m; p 为井筒方向的地热流体压力, kPa; q 为地热流体与井筒之间的热量交换, J; h 为地热流体的比焓, J/kg; v 为地热流体的速度, m/s; 下标 F、A、G 分别表示摩擦、加速度和重力。

2.2 结垢位置预测

根据 X 井的井口地热流体参数, 计算可得 CO_2 质量分数为 0.118%, 基于井口地热流体测试参数, 利用 WELLSIM 软件的 TOP-DOWN 算法, 模拟得到地热流体压力、温度沿井筒方向的变化曲线 (见图 2)。从图 2 可以看出, 压力沿井筒自下而上基本呈线性减小的趋势; 温度先线性减小, 井深 20.00 m 以浅, 温度呈现快速降低的趋势。利用 WELLSIM 软件反演得到井底地热流体温度为 128.0 °C。

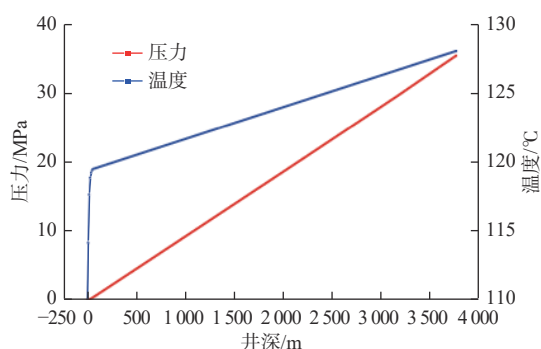


图 2 全井段温度和压力的变化趋势

Fig.2 Variation trends of temperature and pressure along the wellbore

基于井口地热流体测试参数, 利用 WELLSIM 软件的 TOP-DOWN 算法, 模拟得到地热流体干度和 CO_2 分压沿井筒方向的变化曲线 (见图 3)。

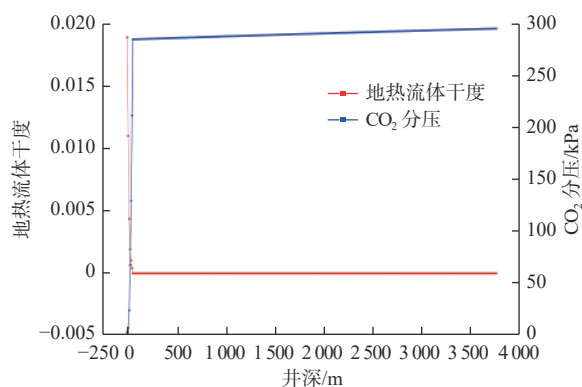
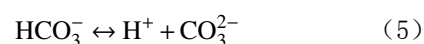
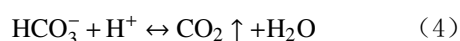


图 3 全井段地热流体干度和 CO_2 分压的变化规律

Fig.3 Variations laws of dryness and CO_2 partial pressure along the wellbore

从图 3 可以看出, 井深 56.10 m 以深, 地热流体的干度为 0; 井深 56.10 m 以浅, 地热流体的干度开始快速增大, CO_2 分压快速降低。地热流体上升过程中, 压力不断降低, 当其液相水的分压低于该温度下对应的饱和压力时, 发生闪蒸 (沸腾) 现象。闪蒸发生后, 地热流体从单相状态变成两相状态, 气相中水蒸气的质量迅速增加, 稀释了气相中的 CO_2 , 导致气相中的 CO_2 分压快速降低, 造成液相地热流体中溶解的 CO_2 快速释放到气相中 (使式 (4) 向右进行), 导致地热流体 pH 值增大; pH 值控制着 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 的分配 (pH 值增大使式 (5) 向右进行), 使碳酸钙析出, 发生结垢现象 (式 (6) 向右进行)。



由于发生了闪蒸, 井筒中地热流体存在单相流和两相流, 基于井口地热流体测试参数, 利用 WELLSIM 软件的 TOP-DOWN 算法, 模拟得到地热流体流型 (见图 4)。由图 4 可以看出, 地热流体在井深 56.10 m 处发生闪蒸。

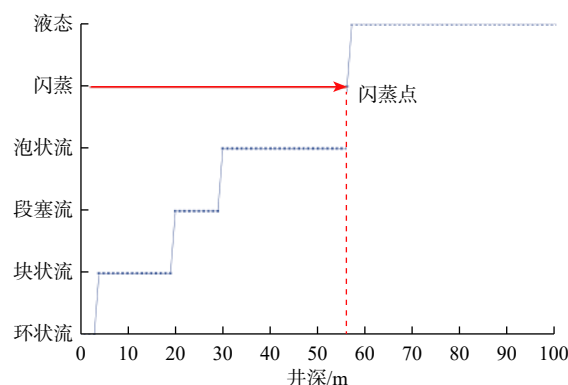


图 4 地热流体流型的变化规律

Fig.4 Variation law of geothermal fluids flow pattern

由于闪蒸发生在井深 56.10 m 处, 为了直观地描述闪蒸过程, 重点研究了井深 100.00 m 以浅地热流体压力和温度的变化情况, 结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 井深 25.00 m 左右处温度开始快速降低, 从井深 25.00 m 到井口这段距离内温度大约降低了 9.0 °C。地热流体发生闪蒸, 部分液相气化为水蒸气, 气化是吸热过程, 导致液相温度快速下降。地热流体的压力梯度主要由摩擦、加速度和重力等因素造成的。地热流体在闪蒸点以下是液态, 压力梯度主要是由重力造成的, 考虑地热流体温度、密度的变化, 地热流体由重力原因造成的压

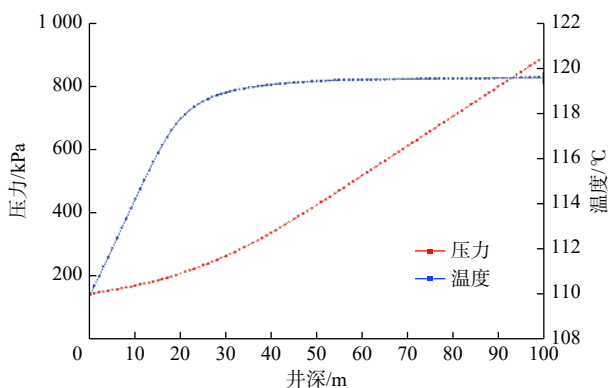


图5 井深100.00 m以浅地热流体温度和压力的变化规律
Fig. 5 Variation laws of temperature and pressure of geothermal fluids within 100 m below the wellhead

力梯度约为 9.32 MPa/km; 在闪蒸点以上, 地热流体发生闪蒸, 加之地热流体中不断有 CO_2 溢出进入气相, 造成单位井筒高度的地热流体质量降低, 也就是重力原因造成的地热流体压力梯度减小(见图6)。由图6可以看出, 由重力原因造成的压力梯度沿井筒自下而上基本呈线性减小的趋势, 由摩擦和加速度造成的压力梯度呈增大趋势, 但是相对于重力原因造成的压力梯度可以忽略不计。

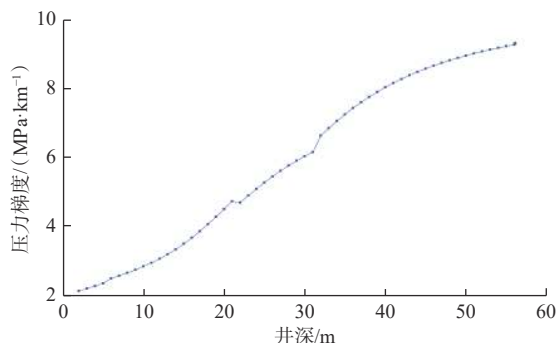


图6 闪蒸位置以上重力原因造成的压力梯度变化趋势
Fig. 6 Variation trend of pressure drop caused by gravity above flashing depth

井深 100.00 m 以浅地热流体干度及 CO_2 分压的变化趋势如图7所示。从图7可以看出, 从闪蒸位置开始, 地热流体中 CO_2 分压先快速降低、后缓慢降低, 直至基本保持不变; 地热流体干度先缓慢增大、后快速增大, 说明地热流体干度的响应速度小于地热流体中的 CO_2 分压。

3 地热井结垢影响因素分析

3.1 CO_2 质量分数

CO_2 是地热流体中不凝性气体的主要成分^[20],

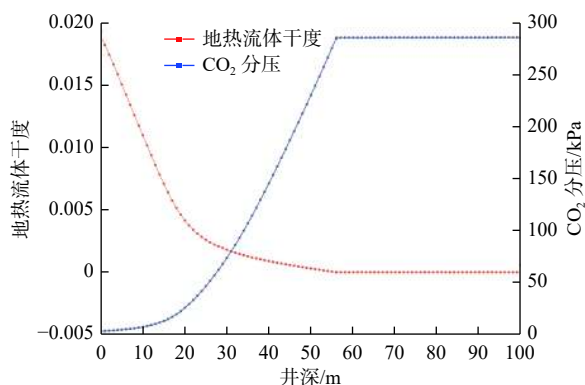


图7 井深100.00 m以浅地热流体干度和 CO_2 分压的变化
Fig. 7 Variations of dryness and CO_2 partial pressure of geothermal fluids within 100 m below the wellhead

在其他参数不变的前提下, 研究井口 CO_2 质量分数对闪蒸位置、闪蒸压力的影响, 结果如图8所示。

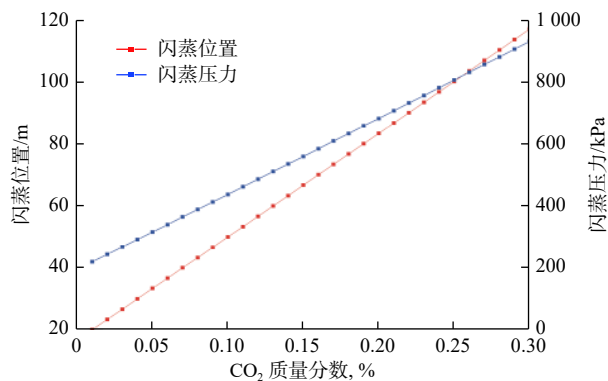


图8 井口 CO_2 质量分数对闪蒸位置和闪蒸压力的影响规律

Fig. 8 Influence of CO_2 mass fraction at wellhead on flashing depth and flashing pressure

从图8可以看出, 闪蒸位置随着井口 CO_2 质量分数增大呈线性下移的趋势, 井口地热水中 CO_2 质量分数每增加 0.01 百分点, 闪蒸位置下移约 3.30 m。地热流体中溶解的 CO_2 取决于与其平衡的 CO_2 分压, 基于亨利定律, 地热流体中 CO_2 质量分数越大, 其分压越大。在较小的 CO_2 质量分数范围内, CO_2 质量分数对地热流体闪蒸温度的影响较小, 也就是对闪蒸位置水蒸气分压影响较小, 闪蒸压力可以粗略计算为水蒸气分压和 CO_2 分压的和(忽略其他不凝性气体), 导致闪蒸压力随着地热流体中 CO_2 质量分数增大而增大, 进而使闪蒸位置更靠近井底, J. R. Haizlip 等人^[21]也得到了类似结论。

3.2 NaCl 质量分数

地热流体中溶解的固体主要是 NaCl, WELLSIM 软件用当量 NaCl 质量分数来表示溶解固体的量, 在其他参数不变的条件下, 分析了井口地热流体中

NaCl 质量分数对闪蒸位置的影响, 结果如图 9 所示。

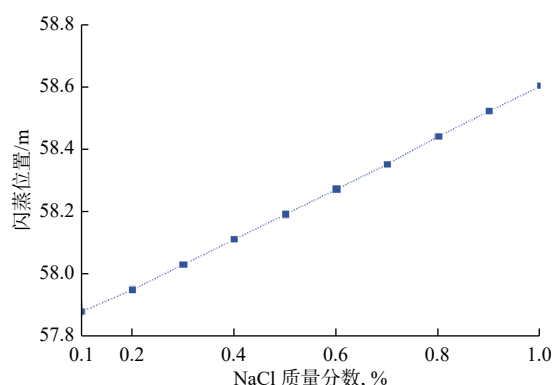


图 9 井口 NaCl 质量分数对闪蒸位置的影响规律

Fig.9 Influence of NaCl mass fraction at wellhead on flashing depth

与 CaCO_3 平衡的 Ca^{2+} 浓度的变化可以用溶度积表示:

$$K_{\text{cal}} = [\gamma(\text{Ca}^{2+})c(\text{Ca}^{2+})][\gamma(\text{CO}_3^{2-})c(\text{CO}_3^{2-})] \quad (7)$$

式中: K_{cal} 为溶度积, mol^2/L^2 ; $c(\text{Ca}^{2+})$ 为 Ca^{2+} 浓度, mol/L ; $c(\text{CO}_3^{2-})$ 为 CO_3^{2-} 浓度, mol/L ; γ 为离子的活度系数。

从图 9 可以看出, 闪蒸位置随着井口地热流体中 NaCl 质量分数增大而呈线性缓慢地向井底方向移动。NaCl 质量分数增大, 使地热流体的离子浓度增大, 而 Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} 的活度系数则随着地热流体离子浓度增大而减小。因此, 在 K_{cal} 保持不变的情况下, NaCl 质量分数增大, 将使与 CaCO_3 平衡的 Ca^{2+} 浓度增大, 从而使 CaCO_3 的溶解度升高, 地热流体中 CO_3^{2-} 的含量也将增大; 根据亨利定律, 地热流体中 CO_2 分压也是增大的, 造成闪蒸位置随着 NaCl 质量分数增大下移, 但是离子浓度效应对闪蒸位置的影响较小。

3.3 地热流体流量

在地热流体其他参数不变的前提下, 模拟研究了井口地热流体流量对闪蒸位置的影响, 结果如图 10 所示。从图 10 可以看出, 随着地热流体流量增大, 闪蒸位置向井底方向移动。

在井口压力不变的条件下, 模拟结果发现井底地热流体压力随着其流量增大而增大。为了使不同流量下的井口压力相同, 大流量地热流体工况下两相地热流体迁移高度要增大, 所以造成了闪蒸位置随着地热流体流量增大而下移, T. Akin 等人在 Kizildere 地热田的模拟研究中也获得了类似的结

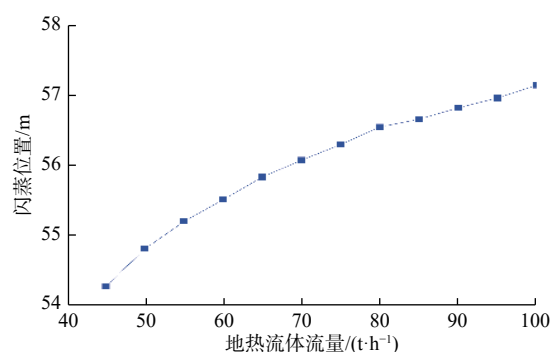


图 10 井口地热流体流量对闪蒸位置的影响规律

Fig.10 Influence law of geothermal fluids flow rate at wellhead on flashing depth

论^[22]。实际生产过程中, 井底地热流体压力一定, 增大地热流体流量, 井口压力降低, 导致井筒中两相混合物的高度变大, 即发生闪蒸的位置下移, 增大了碳酸钙结垢间隔, 也有利于降低碳酸钙结垢程度^[23]。WELLSIM 软件的 TOP-DOWN 反演计算方法, 相当于把井口压力的降低等价于井底压力的增大, 而不同流量下井底地热流体温度不变, 因此对闪蒸位置变化趋势的计算结果没有影响。

以上研究表明, 井口地热流体 CO_2 质量分数通过地热流体气液两相的分压变化影响地热井结垢位置, 井口地热流体中 NaCl 质量分数对结垢位置的影响体现在离子效应方面, 井口地热流体的质量和地热流体的井口总压有一定的关系。综合对比 3 种因素对地热水闪蒸位置的影响, 可以看出井口地热水中 CO_2 质量分数对地热水闪蒸位置的影响最大。

4 结论与建议

1) 结垢是地热能可持续开发利用面临的主要难题之一, 其形成、演化受地热流体的水文化学特性控制, 且与井口地热流体的压力和流量密切相关。

2) 针对博野地热 X 井存在的结垢问题, 利用 WELLSIM 软件开展了地热结垢影响因素及结垢位置预测研究。研究表明: 地热流体压力沿地热井筒自下而上呈线性减小的趋势, 地热流体温度先线性减小、后快速降低; 反演得到的井底地热流体温度为 $128.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3) 模拟得到地热流体在井深 56.10 m 处发生闪蒸, 进行阻垢作业时的阻垢剂加注深度和潜水泵下入深度均应在闪蒸位置以下, 为制定阻垢措施提供了理论依据。

4) 研究表明, 井口地热流体中 CO_2 质量分数对

闪蒸位置的影响最大,所以测试井口地热流体组分含量时,CO₂质量分数的测试要求精度更高一些。通过调控井口压力和流量,可以调节闪蒸位置,优化流量和防垢成本之间的关系。

参考文献

References

- [1] 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.
QIN Xiangxi, ZHANG Meng, YE Jia, et al. ORC power generation and integrated cascade utilization of medium-low temperature geothermal resources in Cangxian Bulge Region, Hebei Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2019, 40(2): 307-313.
- [2] 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.
CHEN Zuo, XU Guoqing, JIANG Manqi. The current status and development recommendations for dry hot rock fracturing technologies at home and abroad[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(6): 1-8.
- [3] 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.
ZENG Yijin. Technical progress and thinking for development of hot dry rock(HDR) geothermal resources[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(2): 1-7.
- [4] 付亚荣, 李明磊, 王树义, 等. 干热岩勘探发现现状及前景 [J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(4): 526-540.
FU Yarong, LI Minglei, WANG Shuyi, et al. Present situation and prospect of hot dry rock exploration and development[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2018, 40(4): 526-540.
- [5] 史猛, 张杰, 殷焱, 等. 胶东半岛中低温对流型地热资源水化学特征分析 [J]. 地质学报, 2019, 93(增刊 1): 138-148.
SHI Meng, ZHANG Jie, YIN Tao, et al. Hydrochemistry characteristic analysis of low-medium temperature convective geothermal resources in Jiaodong Peninsula[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(supplement 1): 138-148.
- [6] ARMENTA M F, MONTES M R, ALCALA L M. Wellbore modeling of production well H-1D using WellSim, Los Humeros geothermal field Mexico[C]//Proceedings of the World Geothermal Congress, April, 2015, Melbourne, Australia.
- [7] 譙开聪. 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.
QIAO Kaicong. Cause analysis and solution discussion of scaling in DZK02 geothermal well[J]. *Inner Mongolia Science Technology & Economy*, 2017(8): 99, 110.
- [8] 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.
WANG Yanxin, LIU Shiliang, BIAN Qingyu, et al. Scaling analysis of geothermal well from Ganzi and countermeasures for anti-scale [J]. *Advances in New & Renewable Energy*, 2015, 3(3): 202-206.
- [9] 李义曼, 庞忠和. 地热系统碳酸盐垢形成原因及定量评价 [J]. 新能源进展, 2018, 6(4): 274-281.
LI Yiman, PANG Zhonghe. Carbonate calcium scale formation and quantitative assessment in geothermal system[J]. *Advances in New & Renewable Energy*, 2018, 6(4): 274-281.
- [10] 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.
- [11] REED M J. Thermodynamic calculations of calcium carbonate scaling in geothermal wells, dixie valley geothermal field, U.S.A.[J]. *Geothermics*, 1989, 18(1/2): 269-277.
- [12] 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.
- [13] LEE Bo-Heng, LIN Cheng-Kuo, CHUANG Chung-Wei, et al. A test of calcium carbonate scale inhibition in Chingshui Geothermal Field, Taiwan[C]//Proceedings World Geothermal Congress, April, 2015, Melbourne, Australia.
- [14] 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.
- [15] ZHAO S M, ZHAO K. Formation mechanism and control techniques of calcium carbonate scale in the Langjiu geothermal field Tibet[C]//Proceeding World Geothermal Congress, April, 2015, Melbourne, Australia.
- [16] SONG Junchao, LIU Mingyan, SUN Xiuxiu. Model analysis and experimental study on scaling and corrosion tendencies of aerated geothermal water[J]. *Geothermics*, 2020, 85: 101766.
- [17] LI Yiman, PANG Zhonghe, 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: 101844.
- [18] 韦梅华. 山西省汾渭裂谷带地热热水结垢趋势分析 [J]. 华北国土资源, 2018(2): 59-62, 68.
WEI Meihua. Analysis of scaling tendency of geothermal water in Fenwei Rift Zone of Shanxi Province[J]. *Huabei Land and Resources*, 2018(2): 59-62, 68.
- [19] 张恒, 胡亚召, 云智汉, 等. 水文地球化学模拟技术在康定某高温地热井结垢研究中的应用 [J]. 新能源进展, 2016, 4(2): 111-117.
ZHANG Heng, HU Yazhao, YUN Zhihan, et al. Applying hydrogeochemistry simulating technology to study scaling of the high-temperature geothermal well in Kangding County[J]. *Advances in New & Renewable Energy*, 2016, 4(2): 111-117.
- [20] 史杰, 乃尉华, 李明, 等. 新疆曲曼高温地热田水文地球化学特征研究 [J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(3): 165-172.
SHI Jie, NAI Weihua, LI Ming, et al. Hydrogeochemical characteristics of high temperature geothermal field of the Quman geothermal field in Xinjiang[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2018, 45(3): 165-172.
- [21] HAIZIP J R, HAKLIDIR F S T. High noncondensable gas liquid dominated geothermal reservoir, Kizildere, Turkey[R]. *Geothermal Resources Council Transactions*, 2011.
- [22] AKIN T, GUNAY A, KARGI H. Modeling of calcite scaling and estimation of gas breakout depth in a geothermal well by using PHREEQC[C]//Proceedings of the 40th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, January 26-28, 2015, Stanford University, California.
- [23] ARNORSSON S. Precipitation of calcite from flashed geothermal waters in Iceland[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1978, 66(1): 21-28.