

地热储层类型划分与损害机理研究

卢 玮^{1,2}, 王金亮², 尚路光³, 张 晗^{2*}

(1. 河南省地质研究院, 河南 郑州 450016; 2. 河南省深部探矿工程技术研究中心, 河南 郑州 450053; 3. 中电建地热开发有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 常规油气和非常规油气储层损害机理研究比较成熟, 而地热储层类型划分与损害机理研究至今尚未引起人们的关注和重视。目前, 在地热资源勘查开发中仅出现砂岩热储和岩溶热储2种类型的概念。由于储层概念和类型的含糊不清, 从而造成了钻井方法、钻井液选择不当和资源评价失真现象。在热储层损害机理和损害程度评估方面, 更是没有规范要求, 使地热完井工序缺失, 最终导致水量小、温度低, 甚至报废等问题。本文在大量地热资源勘查工程基础上, 针对目前存在的突出问题, 借鉴常规油气储层研究成果, 着重从地热储层类型划分和热储层损害机理2方面进行了分析研究。研究表明: 地热储层按照孔隙型、裂隙型、溶洞型和复合型4种模式划分, 可以使钻井方法、钻井液选择和资源评价更加合理和精准。热储层损害表现方式主要是孔隙堵塞或储层结构破坏。其中, 钻井液侵入和井内压力液柱静、动压力是热储层损害的主要因素, 也是不可避免普遍存在的问题。热储层损害类型可划分为应力损害、流速损害、水敏损害、碱敏损害和酸敏损害5大类。

关键词: 地热储层; 热储层类型; 钻井液侵入; 井内压力; 损害机理

中图分类号: TE249:P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)03-0096-07

Research on geothermal reservoir types classification and formation damage mechanism

LU Wei^{1,2}, WANG Jinliang², SHANG Luguang³, ZHANG Han^{2*}

(1. Henan Academy of Geology, Zhengzhou Henan 450016, China; 2. Henan Engineering Research Center of Deep Exploration, Zhengzhou Henan 450053, China; 3. POWERCHINA Geothermal Development Company Limited, Zhengzhou Henan 450000, China)

Abstract: The research on the formation damage mechanism of conventional and unconventional oil and gas reservoirs is relatively well-established, but there has been a lack of attention towards the type classification and formation damage mechanism of geothermal reservoirs. Currently, only two types of geothermal reservoirs are recognized in the exploration and development of geothermal resources, namely, sandstone and karst. Because of the unclear concept and type of reservoir, the incorrect drilling method, drilling fluid selection and wrong resource assessment are caused. Furthermore, there is no formation damage mechanism and damage assessment criteria, so that the geothermal well completion process is missing, and leads to small water volume, low temperature, and even abandonment. On the basis of a large number of geothermal engineering, this paper focuses on the research of geothermal reservoir types and formation damage mechanism, aiming at the outstanding problems and referring to the conventional petroleum reservoirs research results. Researches show that geothermal reservoirs can be categorized into four types, which are

收稿日期: 2024-08-26 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.03.012

基金项目: 河南省重点研发专项“河南省中深层地热清洁能源开发利用关键技术研究与示范”(编号: 231111320800); 河南省地质研究院2025年度科技攻关项目“中高温地热发电可行性研究”(编号: 2025-904-XM07)

第一作者: 卢玮, 女, 汉族, 1987年生, 高级工程师, 水工环地质专业, 硕士, 主要从事地热资源勘查技术研究及管理工作, 河南省郑州市金水路16号, 109328968@qq.com。

通信作者: 张晗, 女, 1981年生, 教授级高级工程师, 地质工程专业, 硕士, 主要从事地热勘查开发利用技术研究工作, 河南省郑州市金水路16号, zhanghan1117@163.com。

引用格式: 卢玮, 王金亮, 尚路光, 等. 地热储层类型划分与损害机理研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(3): 96-102.

LU Wei, WANG Jinliang, SHANG Luguang, et al. Research on geothermal reservoir types classification and formation damage mechanism[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(3): 96-102.

porous, fissure, karst, and compound type. This categorization allows for more accurate drilling methods, selection of drilling fluids, and resource assessment. The main modes of thermal reservoir damage are porosity blockage or failure in the structure; The damage caused by intrusion from drilling fluid as well as static and dynamic pressure from liquid column within wells are the primary factors and inevitable common problems. The formation damage types of geothermal reservoirs can be divided into five categories: stress damage, flow rate damage, water sensitivity damage, alkali sensitivity damage and acid sensitivity damage.

Key words: geothermal reservoir; thermal reservoir type; drilling fluid invasion; drilling pressure; mechanism of formation damage

0 引言

地热具有“热、矿、水、气”四位一体特征和“分布广泛、持续稳定、安全可靠、开发简便、直接利用、减排显著”等优势^[1-2],是可再生的清洁能源,是目前能源转型和高质量发展的重要能源。

随着地热资源勘查开发深度的增加,由以往1000~1500 m新近系孔隙型为主的地热储层,增加至1500~4000 m碳酸盐岩溶和其它岩性裂隙型热储。钻遇地层主要有新生界、中生界、古生界、元古界及太古界地层等^[3-4],钻井深度的增加不仅使钻井工艺、钻井液选择、井内事故处理、洗井方法等工程技术难度增加,更重要的是在钻井过程中,由于人为工程的扰动,诱发热储层原始地质环境(应力、温度、水化学成分)的改变^[5],对热储层造成不同程度的损害,使地热井水量下降。近年来河南省深部地热资源的勘查结果显示:1200~3800 m的地热井70%以上因为热储层损害,造成水量小,再因修复方法问题,导致报废的地热井数量较多^[6-14]。

目前,在常规油气和非常规油气储层类型划分和储层损害机理研究方面成果较多。而在地热储层类型划分和储层损害机理研究方面几乎空白。所以,加大地热储层类型、储层损害机理基础理论研究,对地热资源的增储增产、高效利用和降低钻井工程风险具有重要意义。

1 地热储层分类及特征

现阶段对油气储层的研究程度较高,并有详细的分类。地热储层在工程实践中普遍按砂岩热储和岩溶热储2大类进行评价。存在的问题是:(1)砂岩热储层已成岩,具有较高力学性质和低的孔隙度和渗透性。而我国华北地区新近系主要热储层为明化镇组和馆陶组,这2个热储层(深度 ≤ 2000 m)多数未成岩,呈松散状态,具有较高的孔隙度和渗透性,把这类热储层称为砂岩储层,势必会造成钻

探方法和钻井液选择误区;(2)岩溶热储普遍认为是碳酸盐类地层,地热资源的形成和储集与常规油气和非常规油气尽管有相似的地方,但其形成机制和储集空间有很大区别。对于地热来说,深部岩性的破碎构造带、风化溶蚀面等都有可能形成地热富集空间。如我国广泛分布着大量的岩浆岩(花岗岩、安山岩)、变质岩(片麻岩、大理岩),并且在深部3000~7000 m中均有碎屑岩分布^[15-19],这些岩性具有较好的热传导作用,只要裂隙发育则可形成丰富的地热资源。所以,仅按砂岩热储和岩溶热储2种类型进行地热资源勘查评价显然不够,存在着全面性和精准性问题。同时,对地热钻井设计和热储层的损害评价造成误导和偏差。

地热可赋存于任何岩层中,只是在不同的岩层中其导热率和热通量存在差异。当岩层没有孔隙、裂隙或溶洞时,则可能有热无水,形成不了地热资源。只要具备了“水源(浅部补给)、气源(深部动力)、通道(深浅构造)、储层(集水空间)、盖层(阻隔散热)”地质环境,就可能形成地热资源^[20]。所以,地热储层分类应该按照地热流体储集空间(岩层孔隙发育程度)划分较为合理。根据地热资源的储存空间和分布特征,其储层类型可划分为孔隙型、裂隙型、溶洞型和复合型(孔隙-溶洞型、裂隙-溶洞型、孔隙-裂隙型),见表1。

2 地热储层损害类型与机理

地热储层损害机理主要是热储层中的孔隙、裂隙或溶洞发生固体物堵塞、物理化学反应沉淀、生物沉淀、热储层结构破坏和井内腐蚀结垢等因素造成的孔隙率、渗透率下降和流体通道堵塞封闭。其中,井内腐蚀结垢导致的流体通道堵塞封闭多发生在使用几年后的旧井中^[21]。其主要表现是地热流体抽采和回灌量小,甚至接近于零。

通过工程实践和理论分析研究,认为造成地热

表1 地热储层类型划分及储集空间特征

Table 1 Geothermal reservoir types and reservoir space characteristics

储层类型	主要地层及矿物成分	储集空间形式	储层特征
孔隙型	新近系明化镇组、馆陶组。主要矿物成分:石英、长石和黏土矿(高岭石、蒙脱石、伊利石)	粒间、晶间、生物腔体孔隙	孔隙分布相对均匀,孔隙度渗透率较高,区域地层相对稳定
裂隙型	砾岩、细-中-粗砂岩等碎屑岩及岩浆岩、变质岩。主要矿物成分:黏土矿(高岭石、蒙脱石、伊利石等)、绢云母、绿泥石、石英、长石、方解石、白云石、赤铁矿、黄铁矿、石膏等	裂缝、构造带、破碎带、风化壳(带),古近系砂岩裂隙	裂缝的数量、形状和分布不均匀,区域地层孔隙度、渗透率有变化
溶洞型	震旦、寒武及奥陶系碳酸盐岩等。主要矿物成分:方解石(CaCO_3)、白云石($\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$)和黏土矿物	溶蚀形成的孔穴、溶洞	溶蚀作用产生的洞穴,其大小形状不一,分布不均匀,区域地层孔隙度、渗透率有变化
复合型	碳酸盐岩、碎屑岩、大理岩。主要矿物成分:方解石(CaCO_3)、白云石($\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$)、石英、长石、云母和黏土矿物	孔隙-溶洞型、裂隙-溶洞型、孔隙-裂隙型	储集空间形式不同,区域地层孔隙度和渗透率变化较大,其中孔隙-溶洞型最为常见

水量小、资源无法利用的原因有3个方面:一是赋存地质环境条件问题(客观因素),区域地热地质条件差、储层岩石矿物敏感、热储层孔隙、裂隙和岩溶发育程度低;二是钻井工程技术问题(人为因素),地热钻井、事故处理和完井过程中,由于井内压力和钻井液侵入而导致热储层损害;三是地热井采灌过程过量开采(降深过大)产生压力波动使热储层原有应力和结构平衡破坏。当地热井停滞时,容易形成井内金属井管腐蚀结垢,在套管或储层中形成胶结物。后2种场景都是因人为开采干预造成的热储层损害,其中,钻井液的静压和压力波动、钻井液侵入造成的热储层损害最大。

2.1 井内压力因素

地热钻井过程中,钻井液液柱产生的静压力和钻具(套管)起下产生的波动压力会导致热储层原来的压力(应力)和物理化学平衡破坏,储层空间、结构、性质在外力作用下发生变化。特别是在不稳定敏感地层中,不仅造成储层严重损害,而且还极易出现坍塌、掉块、井漏、井喷等事故。

2.1.1 液柱静压力

目前,地热钻井方法主要是正循环泥浆(水基钻井液体系)和气举反循环空气钻井2种方式,无论哪种方式井内都存在着液柱静压力。泥浆钻进时,井内液柱压力大于储层(地层)压力,空气钻进时,井内压力小于储层(地层)压力。2种工况都会使储层原始状态发生改变,只是泥浆钻进危害更大。理想状态下井内某一深度的液柱静压力用式(1)表示,压力与钻井液密度成正相关,井内压力通过调

整密度来控制。当井深较大时,井内垂向各段液体中的固体颗粒不均性,沉降速度不同,各段密度分布不同,井内液柱静压力可按式(2)计算,当井内出现气体侵入或采用空气钻井时,则按式(3)计算:

$$P=0.00981\rho H \quad (1)$$

$$P=0.00981\sum_{i=1}^n\rho_i(H_i-H_{i-1}) \quad (2)$$

$$P=0.00981\rho H-\frac{0.0023(1-\alpha)P_s}{\alpha}\lg\left(\frac{P_s+9.81\rho H}{P_s}\right) \quad (3)$$

$$\alpha=\rho_s/\rho$$

式中: P ——井内液柱静压力,MPa; ρ ——钻井液密度, g/cm^3 ; H ——液柱垂直高度,m; ρ_s ——返至井口气侵钻井液密度, g/cm^3 ; P_s ——井口环形空间压力,MPa。

从公式(1)、(2)和(3)可以看出:无论哪种工况条件,井内液柱静压力的主要影响因素是钻井液密度,密度的大小与液体中固体颗粒(岩屑)密切相关。钻井过程中压力波动会引起钻井液侵入量加大,储层损害程度更加严重。压力波动速度越快,压力波动幅度越大,储层损害程度越严重。

2.1.2 波动压力

钻井、完井、井内事故处理等过程中,存在着频繁起下钻杆或事故处理工具。由于起下速度的不均匀性和钻井液黏滞性等因素,造成井内压力瞬时波动。管柱上下移动将带动管柱周围的黏附流体同向运动,而在环空里面,流体则向相反的方向流动,因为钻井液存在黏滞阻力,环空流体的运动会

引起压力波动^[22]。当钻柱或套管垂向下移时,井内压力增加;当起钻或套管时,井内出现抽吸作用,使井内压力减小。式(4)和(5)为钻具或套管起下时井内压力常用的计算公式^[23]。

宾汉流变模式波动压力计算:

$$P_s = \frac{f_B \rho}{D_o - D_i} \left(-\frac{v_p}{2 \ln K} \right)^2 L \quad (4)$$

式中: P_s ——波动压力,Pa; f_B ——摩擦系数; D_o ——井筒内径,m; D_i ——钻柱(套管)外径,m; ρ ——钻井液密度, kg/m^3 ; v_p ——环空平均流速,m/s; K ——钻井液黏附常数,无量纲; L ——钻柱(套管)长度,m;

基于四参数流变模式的稳态波动压力模型计算:

$$P_s = \frac{2\tau_w L}{R_o - R_i} \quad (5)$$

式中: P_s ——波动压力,Pa; τ_w ——管壁切应力,Pa; R_o ——井眼半径,m; R_i ——管柱半径,m; L ——钻柱(套管)长度,m;

从式(4)和式(5)中可以看出:起下钻具或套管时的波动压力与起下钻速度、钻井液性能(密度、剪切力、黏度)、钻井直径等密切相关。起下钻速度越快,环空流速越大,井内压力波动越大。钻井液黏度越大,其剪切力越大,引起的井内波动压力就越大。当环空内外径比率较小时,井内波动压力较小;环空内外径比率增大时,波动压力呈指数型增长^[24]。随着钻井深度的增加,井内波动压力也将增大,对储层的危害也越大。钻井过程中泥浆泵关闭和启动时同样会产生较大的压力波动。压力波动速度越快,压力波动幅度越大,钻井液侵入储层速度越快,对原有储层结构和物理化学平衡破坏程度越高。

损害形式主要表现为:储层结构在应力作用下遭受破坏,储层空间坍塌充填,导致孔隙率和渗透率降低。

2.2 钻井液侵入

钻井液侵入对热储层的损害基本机理是在液柱静压或动压作用下,钻井液入侵储层后形成固体充填堵塞和物理化学、生物平衡的破坏,出现颗粒运移或沉淀,从而导致储层孔隙率和渗透率减小。其中,钻井液中的固体颗粒和岩屑充填储层是常见和危害最大的因素。

2.2.1 固体颗粒因素

钻井液在液动压力作用下侵入到储层,随着时间的增加,外来的固体颗粒和水增加了储层通道的堵塞程度和距离,公式(6)是钻井液侵入储层深度(距离)与时间、压力、地层孔隙度和钻井液参数的关系^[23]。

$$L = \sqrt{r_c^2 + \frac{2}{\varphi_e} \sqrt{\frac{r_c t \Delta p K_{mc}}{\pi \eta k}}} - r_c \quad (6)$$

式中: L ——钻井液侵入深度(距离); r_c ——井半径; φ_e ——地层有效孔隙度; t ——侵入时间(钻开地层裸露时间); Δp ——井内液柱与地层孔隙之间的压差; K_{mc} ——泥饼渗透率; η ——钻井液黏度。

式(6)说明钻井液侵入储层距离随时间、泥饼渗透率、液柱压力和储层压力差增加而增加,随地层有效孔隙度和钻井液黏度增加而减小。也就是说:当钻井液参数相对稳定时,储层裸露时间越长、孔隙度越小,外来固体颗粒在储层中运移充填的距离越长,储层损害越严重,修复周期和难度也随之增加。

钻井液侵入充填堵塞储层的同时,还会改变原储层的电阻率,式(7)是地层径向电阻率与地层水电阻率、水饱和度和地层孔隙度关系^[23]。地层电阻率的改变,会造成测井数据的失真,从而误导地热完井和资源评价。

$$R_t(r,t) = \frac{\alpha R_w(r,t)}{S_w^n(r,t) \varphi^m} \quad (7)$$

式中: R_t ——地层径向电阻率; R_w ——地层水电阻率; S_w ——地层水饱和度; φ ——地层孔隙度; r ——侵入半径; t ——时间; α ——为岩性常数; m 、 n ——为孔隙度和饱和度指数。

通过上述的分析可知:热储层被外来钻井液侵入危害最大,损害程度最高,修复难度较大。

河南郑州某区井深3600 m和3800 m的2口地热井的报废及其它地热井实例说明了热储层损害的严重程度,具体情况如下:

LHR-1地热井热储层为寒武系白云质灰岩,钻井液密度1.24~1.27 g/cm^3 ,黏度100~108 s。钻井过程中在3283、3285、3292、3319 m时分别出现井漏现象,其中3292 m处掉钻2 m,漏失量最大4~20 m^3/h ,说明热储层岩溶发育良好。但是,测井数据中有多点孔隙度为0,渗透率为0.01 mD。最终以

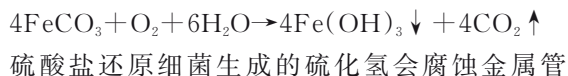
3600 m裸眼完井,井底温度106℃,出水温度46℃,采用空压机气举洗井,最终水量2~3 m³/h。因不能满足需求,重新设计施工了另外一口3800 m的LHR-1-1井。地层、钻井方法和钻井液类型同上(聚磺钻井液),钻井液密度1.25~1.30 g/cm³,黏度75~100 s。尽管井深增加200 m,但是最后水量还不及LHR-1井。

LHR-1和LHR-1-1井周边已有3口建成的地热井,井深分别为2861、3500、2204 m,同属一个地质单元和热储层。其水量和水温分别为44 m³/h、83℃,80.8 m³/h、78℃,90 m³/h、72℃。出现这种情况的原因是:LHR-1地热井从3283~3319 m共计36 m的漏失段钻进时间高达17 d,钻井液密度和黏度过高导致井内压力波动增大、钻井液侵入损害严重。当钻井液密度为1.27 g/cm³,储层深度3319 m时,静态压力就高达41.35 MPa。在此场景下,钻井液中的固体颗粒和岩屑极易充填堵塞储层通道,并且时间越长堵塞的距离越远,储层中的充填物越密实,最终使整个储层的渗透率大大降低。

近年来,郑州航空港区(尉氏)地热资源勘查、通许隆起地热资源预可行性勘查、通许县岩溶热储地热资源调查、河南省汝州地区地热资源调查、河南省新郑城区岩溶热储地热资源调查等地勘基金项目,井深均在1900~2500 m,热储目的层都是裂隙型和溶洞型,最终地热井水量极小,其根本原因之一是热储层严重堵塞损害而造成。

2.2.2 物理化学和生物堵塞

在钻井液(工作液)侵入后,热储层将会出现黏土矿物的自吸膨胀,钻井液中有有机物高分子被不规则裂缝表面吸附而减小渗透性,孔隙和裂隙越小造成储层的损害程度越严重;对于比较小的裂缝性储层,可能发生水锁损害^[25]。碱性钻井液或处理事故时碱性工作液与地层水或硅酸盐矿物、微晶长石、微晶石英相互作用产生硅酸盐沉淀。地层和水中大量的Ca²⁺、Mg²⁺离子与碱溶液中的OH⁻离子结合产生沉淀等。地下≤60℃环境中还会存在大量的铁细菌、硫酸盐还原菌等,在储层中同样形成新沉淀。其中,铁细菌在含铁的地下水中分布广泛,好气,嗜中性环境。它能氧化溶解地层中FeCO₃形成Fe(OH)₃沉淀物。



材,同时,形成硫化亚铁的沉积物导致堵塞和形成新的垢下电池腐蚀、溶解氧浓差腐蚀等。

上述储层的损害均属于物理化学和生物损害类型,普遍存在于钻井、事故处理、完井过程中。其中,生物损害主要出现在地热井抽采与回灌、地热井停滞过程中,主要以腐蚀结垢、产生微生物黏泥方式出现。当地层孔隙或裂隙较小,空隙发育程度不高时,造成储层损害的机理和类型主要是自吸膨胀、水锁效应、高分子聚合物吸附;当地层空隙发育程度较高时,其储层损害的机理和类型主要是钻井液固相颗粒和岩屑侵入堵塞。

2.3 地热储层损害类型划分

综上所述,地热储层损害的类型和机理复杂、影响因素诸多,对储层的损害往往是多种方式和类型的复合重叠,基本没有单一类型的损害。热储层的损害在不同工况下有主次之分,最终问题就是导致热储层物理化学和生物结构平衡破坏、孔隙堵塞充填、储层孔隙率和渗透率降低,从而影响地热产能。

根据地热钻井工程特点,可以将热储层损害类型划分为应力损害、流速损害、水敏损害、碱敏损害和酸敏损害5大类。其中,钻井过程中以应力、流速、水敏、碱敏损害为主;吸附卡钻事故处理过程中以水敏或碱敏、酸敏为主;完井时以应力、流速损害为主。表2为地热储层常见损害类型与机理。

3 结论

(1)以孔隙型、裂隙型、溶洞型和复合型热储分类,能够充分表明地热资源的储集和分布特征。同时,为钻井工程设计和资源评价提供科学依据。

(2)目前的钻井方式和钻井液使用,必将造成热储层损害,也是一个普遍存在而不可避免的问题。井越深、钻井周期越长,热储层损害程度越高,修复难度越大。

(3)热储层损害的主要因素是钻井液侵入和液柱静、动压力的变化。损害方式为储层流体通道(裂隙)堵塞、储层原有结构破坏、储层渗透率降低。损害类型划分为应力损害、流速损害、水敏损害、碱敏损害和酸敏损害5大类。

(4)加大热储损害机理研究,增加地热钻井工程中热储损害评估内容,对地热井工程风险降低和资源高效开发利用具有重要意义。

表 2 地热储层损害类型与机理

Table 2 Formation damage types and mechanisms of geothermal reservoir

损害类型	损害机理	损害因素	损害程度评价
应力损害	储层原始应力平衡破坏造成上覆岩石压力与地层孔隙压力差增大,使储层孔(裂)隙空间减小,甚至坍塌封闭,导致储层孔隙率和渗透率降低	(1)起下钻具(套管)引发的井内压力波动;(2)突然漏失或井喷引发的井内压力骤降;(3)钻井液液柱压力过大	损害程度较为严重,修复难度大,甚至不可修复
流速损害	钻井、洗井和抽采过程中,井内波动压力和降深过大(CO ₂ 洗井)时,造成储层中流体速度过大,储层中的矿物颗粒或岩石碎屑将失去其原来的平衡,发生颗粒运移和堵塞,导致储层渗透率降低	(1)起下钻具(套管)引发的井内压力波动;(2)井内突然漏失或井喷引发的井内压力骤降;(3)CO ₂ 洗井和大降深抽水时,井内瞬间形成负压	损害程度一般,空隙越小损害程度越高。修复难度较大
水敏损害	在钻井和回灌过程中,钻井液失水量过大和回灌尾水与热储层水化学类型差别较大时,造成储层中敏感性矿物伊利石、绿泥石、水化云母、石膏等发生水化膨胀,并在这些矿物表面,因电荷作用形成一定厚度水膜效应。从而使储层通道有效半径减小,最终导致储层孔隙率和渗透率降低。	(1)钻井液失水量过大;(2)钻井液体系中的水矿化度低于储层水矿化度;(3)回灌尾水与储层水化学类型差异较大。如采用地表水或其它中水替代地热尾水进行回灌	损害程度较为严重,空隙越小损害程度越高。易预防、难控制,修复难度一般
碱敏损害	钻井、井内事故处理、储层改造过程中,碱性工作液进入储层后,破坏了地层中各微粒原有平衡,导致微粒失稳,同时,碱性工作液又可与储层中的硅酸盐矿物、微晶长石、微晶石英,等形成硅酸盐沉淀,硅胶沉淀。与储层水中的Ca ²⁺ 、Mg ²⁺ 形成Ca(OH) ₂ 和Mg(OH) ₂ 沉淀,使储层孔隙率和渗透率降低	(1)钻井液常用Na ₂ CO ₃ (碱性)和NaOH(强碱)作为泥浆处理剂;(2)吸附卡钻事故处理及储层改造时,使用大量的含碱工作液;(3)物理化学作用,形成新的沉淀物	损害程度较为一般,空隙越小损害程度越高。易预防和控制,修复难度一般
酸敏损害	井内事故处理、储层改造过程中,酸性工作液进入储层后,一方面酸液对储层中蒙脱石、伊利石等矿物结构进行破坏,使这些矿物微粒膨胀、剥落运移。另一方面,酸液与储层中相关矿物反应形成Fe(OH) ₃ 、CaF ₂ 、Na ₂ SiF ₆ 和K ₃ AlF ₆ 等沉淀,最终使储层孔隙率和渗透率降低	(1)吸附卡钻事故处理及储层改造时,使用大量的HCl和HF工作液;(2)CO ₂ 洗井或储层改造中大量使用;(3)构造破碎带CO ₂ 逸出;(4)物理化学作用,形成新的沉淀物	损害程度较为一般,空隙越小损害程度越高。易预防和控制,修复难度一般

参考文献(References):

[1] 卢予北,李艺,卢玮,等.新时代地热资源勘查开发问题研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(3):1-8.
LU Yubei, LI Yi, LU Wei, et al. Research on the exploration and development of geothermal resources in the new era[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(3):1-8.

[2] 吴烨,王建华,卢予北.“钻探+”在民生地质工作中的作用与地位[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(11):1-5.
WU Ye, WANG Jianhua, LU Yubei. Role and position of “drilling+” in livelihood geology[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(11):1-5.

[3] 张晗,卢玮,黄烜,等.河南省水热型地热成因模式及钻探方法[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(9):8-14, 20.
ZHANG Han, LU Wei, HUANG Xuan, et al. Generation model and drilling method of hydrothermal geothermal resources in Henan Province [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(9):8-14, 20.

[4] 余晨.对流型地热区地热资源评价及数值模拟研究——以济源市五龙口地热区为例[D].郑州:华北水利水电大学,2016.
YU Chen. Geothermal resource evaluation and numerical simulation research of convective type geothermal area: The Jiyuan Wulongkou geothermal field for example[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2016.

[5] 李庆辉,陈勉,金衍,等.页岩气储层岩石力学特性及脆性评价[J].石油钻探技术,2012,40(4):17-22.
LI Qinghui, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Rock mechanical properties and brittleness evaluation of shale gas reservoir [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012,40(4):17-22.

[6] 河南省地质矿产勘查开发局第一水文地质工程地质队.郑东新区地热能源资源勘查报告[R].郑州,2008.
1st Hydrogeology and Engineering Geology Team Under Henan Geology and Resources Survey Bureau. Exploration report on geothermal energy resources in new district of Zhengzhou [R]. Zhengzhou, 2008.

[7] 河南省地质矿产勘查开发局第一地质工程院.河南省洛阳市洛南新区地热资源普(预可行性勘查)报告[R].驻马店,2011.
1st Geological Engineering Institute Under Henan Geology, Resources Survey Bureau. Survey report on geothermal resources in luonan new area[R]. Zhumadian, 2011.

[8] 河南省地质矿产勘查开发局第二水文地质工程地质队.河南省郑州市西南郊地热资源预可行性勘查(普查)报告[R].郑州,

- 2011.
- 2nd Hydrogeology, Engineering Geology Team Under Henan Geology, Resources Survey Bureau. Report of prefeasibility exploration in geothermal resources in the southwest suburb of Zhengzhou City, Henan Province[R]. Zhengzhou, 2011.
- [9] 河南省地质矿产勘查开发局第二地质环境调查院. 河南省通许县岩溶热储地热资源调查报告[R]. 郑州, 2021.
- No.2 Institute of Geo-Environment Survey of Henan. Report on geothermal resources investigation in karstic reservoir in Tongxu, Henan Province[R]. Zhengzhou, 2021.
- [10] 河南省自然资源科学研究院. 河南省地热资源地质工作成果集成与综合评价[R]. 郑州, 2021.
- Henan Academy of Natural Sciences. Integration and comprehensive evaluation of achievements in geothermal resources geological work of Henan Province[R]. Zhengzhou, 2021.
- [11] 河南省地质矿产勘查开发局第二地质环境调查院. 河南省地热开发产业化关键技术研究及成果集成报告[R]. 郑州, 2021.
- No.2 Institute of Geo-Environment Survey of Henan. The report of key technology research and achievement integration on industrialization of geothermal development in Henan Province [R]. Zhengzhou, 2021.
- [12] 河南省国土空间调查规划院. 河南省南阳市城区东南部地热资源预可行性勘察报告[R]. 郑州, 2022.
- Henan Institute of Land and Space Planning. Report on prefeasibility survey of geothermal resources in the southeast of Nanyang City, Henan Province[R]. Zhengzhou, 2022.
- [13] 河南省资源环境调查一院. 河南省新郑城区岩溶热储地热资源调查[R]. 郑州, 2023.
- No.1 Institute of Henan Provincial Resources and Environment Survey. Investigation of karstic reservoir geothermal resources in Xinzheng, Henan Province[R]. Zhengzhou, 2023.
- [14] 河南省地质研究院. 河南省汝州地区地热资源调查[R]. 郑州, 2024.
- Henan Academy of Geology. Investigation of geothermal resources in Ruzhou area, Henan province [R]. Zhengzhou, 2024.
- [15] 赵文智, 汪泽成, 张水昌, 等. 中国叠合盆地深层海相油气成藏条件与富集区带[J]. 科学通报, 2007, 52(S1): 9-18.
- ZHAO Wenzhi, WANG Zecheng, ZHANG Shuichang, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and enrichment zones of deep marine strata in the superimposed basins of China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(S1): 9-18.
- [16] 朱如凯, 郭宏莉, 高志勇, 等. 中国海相储层分布特征与形成主控因素[J]. 科学通报, 2007, 52(S1): 40-45.
- ZHU Rukai, GUO Hongli, GAO Zhiyong, et al. Distribution characteristics and main controlling factors of marine reservoir in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(S1): 40-45.
- [17] 朱如凯, 邹才能, 白斌, 等. 全球油气勘探研究进展及对沉积储层研究的需求[J]. 地球科学进展, 2011, 26(11): 1150-1161.
- ZHU Rukai, ZOU Caineng, BAI Bin, et al. Progresses in the global petroleum exploration and its demand in reservoir research[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(11): 1150-1161.
- [18] 孙龙德, 方朝亮, 李峰, 等. 中国沉积盆地油气勘探开发实践与沉积学研究进展[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(4): 385-396.
- SUN Longde, FANG Chaoliang, LI Feng, et al. Petroleum exploration and development practices of sedimentary basins in China and research progress of sedimentology [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(4): 385-396.
- [19] 肖建新, 林畅松, 刘景彦. 塔里木盆地北部库车坳陷白垩系沉积古地理[J]. 现代地质, 2005, 19(2): 253-260.
- XIAO Jianxin, LIN Changsong, LIU Jingyan. Depositional paleogeography of Cretaceous of Kuqa Depression in Northern Tarim Basin[J]. Geoscience, 2005, 19(2): 253-260.
- [20] 卢予北. 地球气体运移与地热资源形成机制研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(2): 1-7.
- LU Yubei. Study on migration of the earth interior gases and the formation mechanism of geothermal resources [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(2): 1-7.
- [21] 卢予北, 吴烨, 张古彬, 等. 旧井处理工程技术研究与开发[J]. 探矿工程, 2000(2): 32-36.
- LU Yubei, WU Ye, ZHANG Gubin, et al. Research and development on old well treating engineering and technology [J]. Exploration Engineering, 2000(2): 32-36.
- [22] 韩付鑫. 井筒波动压力计算方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
- HAN Fuxin. Study on calculation method of surge pressure in wellbore [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.
- [23] 张松扬, 陈玉魁. 钻井液侵入机理特征及影响因素研究[J]. 勘探地球物理进展, 2002, 25(6): 28-31.
- ZHANG Songyang, CHEN Yukui. Responses to drilling-fluid [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2002, 25(6): 28-31.
- [24] 唐贵, 许朝阳, 左星, 等. 控压钻井起下钻波动压力影响因素研究[J]. 石油和化工设备, 2023, 26(8): 117-120.
- TANG Gui, XU Chaoyang, ZUO Xing, et al. Study on the factors influencing the fluctuation pressure of tripping in managed pressure drilling [J]. Petro-Chemical Equipment, 2023, 26(8): 117-120.
- [25] 路萍. 复杂地质条件下储层损害机理与评价技术研究[D]. 荆州: 长江大学, 2013.
- LU Ping. Damage mechanism and evaluation under complex geological conditions [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2013.

(编辑 王文)