

# 地热储层损害修复与增产技术研究

卢玮<sup>1,3</sup>, 张晗<sup>2\*</sup>, 申云飞<sup>1,3</sup>, 王金亮<sup>2</sup>, 顾超<sup>2</sup>, 白晨<sup>2</sup>

(1. 河南省深部探矿工程技术研究中心, 河南 郑州 450053; 2. 河南省地质研究院, 河南 郑州 450016;  
3. 河南省地质局生态环境地质服务中心, 河南 郑州 450053)

**摘要:**随着深部地热资源勘查开发规模化实施,深部钻井工艺和热储层保护与修复面临着新的挑战和问题。目前的深部地热钻井工程,几乎都是采用正循环水基钻井液钻进工艺。由此带来不可避免的主要问题就是热储层损害。在热储层损害修复方面,国内还没有形成强制性的标准和规范。从而出现了许多地热完井后,未进行合理规范的修复改造就进入降压或抽水试验,造成地热资源评价失真和合同纠纷等问题。本文在大量地热钻井工程实例基础上,并结合油气储层改造文献资料,从地热储层损害形式、热储层岩性和堵塞充填物主要矿物组分、修复与增产机理等方面进行了分析研究。试验和工程实践证明:盐酸(HCl)、土酸(HCl+HF)和超临界CO<sub>2</sub>对热储层中的堵塞物或裂隙,具有溶解、溶蚀、驱逐、置换和扩充作用,是热储层损害修复和储层渗透率提高的基本方法。在实际工程中,单一修复方法效果甚微,应结合热储层损害机理和程度,采用“二合一”或“三合一”方法最佳。针对目前普遍问题,提出了不同类型热储层修复增产的基本方法和热储层修复改造应作为地热钻井工程重要组成部分(工序)。

**关键词:**地热储层;盐酸;土酸;临界CO<sub>2</sub>;损害修复;增产

**中图分类号:**TE249:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)S1-0117-07

## Research on restoration and stimulation technology for damaged geothermal formations

LU Wei<sup>1,3</sup>, ZHANG Han<sup>2\*</sup>, SHEN Yunfei<sup>1,3</sup>, WANG Jinliang<sup>2</sup>, GU Chao<sup>2</sup>, BAI Chen<sup>2</sup>

(1. Henan Engineering Research Center of Deep Exploration, Zhengzhou Henan 450053, China;

2. Henan Academy of Geology, Zhengzhou Henan 450016, China;

3. Ecological Environment Geo-service Center of Henan Geological Bureau, Zhengzhou Henan 450053, China)

**Abstract:** With the large-scale implementation of deep geothermal resources exploration and development, deep drilling technology and geothermal reservoir protection and restoration are facing new challenges and problems. At present, almost all deep geothermal drilling projects are using circulation boring method of water-based drilling fluid, which caused the damage of geothermal reservoir. In terms of geothermal reservoir restoration there are no compulsory standard in China. As a result, after the completion of geothermal Wells, many of them enter into the depressurization or pumping test without standardized geothermal reservoir restoration, resulting in the wrong evaluation of geothermal resources and contract disputes. This paper is based on a large number of geothermal drilling engineering examples, combined with oil and gas reservoir reconstruction literature. The damage type, lithology, mineral composition of plugging and filling, restoration and stimulation mechanism of geothermal formation are studied. The test and

收稿日期:2024-06-24; 修回日期:2024-07-09 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.S1.017

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示范”(编号:231111320800);河南省地质研究院2024年度院管财政科研类项目“地球气体动力与地热煤系气资源形成机理研究”(编号:2024-331-XM026-KT03)、“地热储层损害机理与修复技术研究”(编号:2023-902-XM005-KT01)

第一作者:卢玮,女,汉族,1987年生,高级工程师,水工环地质专业,主要从事地热资源勘查技术研究及管理工作,河南省郑州市南阳路56号,109328968@qq.com。

通信作者:张晗,女,汉族,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,张晗,申云飞,等.地热储层损害修复与增产技术研究[J].钻探工程,2024,51(S1):117-123.

LU Wei, ZHANG Han, SHEN Yunfei, et al. Research on restoration and stimulation technology for damaged geothermal formations [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 117-123.

engineering practice show that hydrochloric acid (HCl), mud acid (HCl+HF) and supercritical carbon dioxide can dissolve, expel, displace and expand the blockage or fracture in geothermal reservoir, which is the basic method to restore geothermal reservoir and improve the reservoir permeability. The single restoration method is not effective in practical application, and the "two-in-one" or "three-in-one" method should be adopted in combination with the mechanism and degree of formation damage. In view of the common problems at present, the basic methods of restoration and stimulation technology for different types of geothermal reservoirs are put forward, in addition, the restoration and reconstruction of geothermal reservoirs should be an important part (working procedure) for geothermal drilling engineering.

**Key words:** geothermal reservoir; hydrochloric acid; mud acid; supercritical carbon dioxide; restoration for damaged formations; stimulation

## 0 引言

在常规油气钻井工程中,油气开采前都进行储层修复改造<sup>[1-2]</sup>;当开采一定年限后还要进行改造,以达到持续增产目的。地热属于液体和能源双属性的特种矿产资源,其储集方式和储层损害方式与油气有很多相似之处。但是,在地热资源勘查开发只注重了前期靶区选址、温度和水量要求,而忽略了热储层损害修复机理研究和储层的改造。在钻井控制方面远远不及油气钻井工程,从而造成地热井开发参数不准或报废率过高等问题。

随着地热资源勘查开发深度的增加,热储层损害的问题也愈加突出。所有地热钻井、利用过程中,都存在不同程度的热储层损害问题,井越深储层损害类型越复杂、损害程度越高、修复改造难度越大。目前,地热完井后,多数情况下是采用潜水泵直接洗井抽水;水量满足不了要求时,基本沿用水文水井空压机震荡洗井、酸洗(偏磷酸和盐酸)、CO<sub>2</sub>洗井等进行处理<sup>[3-4]</sup>。对于≤1200 m的水井或地热井,效果或许明显;但是,对于≥1600 m的地热井,实际效果不明显或无效。主要原因是:井越深,钻井液侵入和井内压力对储层的伤害程度越高,在未彻底了解热储层损害类型和伤害机理情况下,盲目采用简单处理方式,可能造成热储层空隙未彻底疏通或者是造成二次伤害。为此,进行热储层损害修复与增产技术研究,完善和规范地热钻井工序,对地热资源高效利用具有一定的现实意义。

## 1 热储层损害主要形式

在钻井液静、动压力作用下,热储层的原有物理化学结构将发生改变。主要表现:一是钻井液侵入造成固体颗粒(岩屑)向储层空隙中运移,形成储层内流体置换和充填,同时,钻井液中的外来水与

储层原始矿物和流体发生物理化学反应,出现黏土矿物自吸膨胀、水锁效应、高分子聚合物吸附等<sup>[5]</sup>。当钻井液呈碱性时,OH<sup>-</sup>极易和地层中Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>结合形成沉淀;二是当钻具(套管)反复起降时,井内压力出现正负压交替,储层原有应力结构和平衡被破坏,可能造成大量的固体颗粒移动,出现坍塌、掉块现象,严重时会导致井内卡钻或埋钻事故。当井内有地球气体侵入时<sup>[6]</sup>,常常发生井喷,此时井内处于持续负压状态,极易造成储层和井壁坍塌。三是地热井在开采过程中,强力开采(井内降深过大),同样产生井内压力波动。如河南濮阳几口1600 m岩溶热储地热井开采不到一年就出现水量逐渐减小,甚至断流不出水现象。其原因是:处理井内漏失时加入大量黏土进行堵漏,完井后仅用潜水泵洗井。原井中渗透较远的黏土堵塞物未经过处理或处理不彻底的情况下交井使用,储层中原有堵塞物在长时间的浸泡和压力变化过大时,重新运移形成二次伤害堵塞。

上述3方面因素是热储层损害的主要表现形式,导致热储层空隙堵塞和结构破坏,使储层孔隙率和渗透率降低。

## 2 热储层损害修复方法

目前,地热储层损害修复方法还没有规范强制要求。随着深部地热钻井问题的频发,有些地热项目开始引用油气储层的改造方法,如水力、注酸压裂,超临界CO<sub>2</sub>压裂<sup>[7-9]</sup>,但油气压裂工艺成本较高,限制了其在地热储层修复的应用。

### 2.1 主要堵塞物组分研究

地热储层的主要类型有孔隙型、裂隙型和溶洞型,涉及的岩性有沉积岩、岩浆岩和变质岩。其中,沉积岩中的主要矿物有石英、碳酸盐、云母、黏土矿

和氧化铁;岩浆岩中主要矿物有长石、石英、辉石和云母等;变质岩矿物成分复杂,在原来变质前矿物基础上,还形成新的矿物,如大理岩(方解石和白云石组成)、偏硅酸盐等。其主要化学组分有 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 等。

钻井钻遇这些岩层后,钻井液将携带不同矿物的岩屑侵入热储层,形成外来固体颗粒的堵塞。同时,热储层自身的敏感矿物(如碳酸盐储层和黏土矿物含量高的储层)在外来流体侵入后,将会发生物理化学作用形成新的沉淀物或储层结构变化,降低储层渗透率。图1是河南原阳县1200 m地热井拔出的事故过滤管,由于钻井液侵入,导致过滤管孔隙严重堵塞,形成的堵塞物胶结强度较高,需用铁制锐器才能撬动。



图1 河南原阳县1200 m地热井事故过滤管钻井液堵塞情况

## 2.2 增产机理与方法

热储层损害修复增产目的就是利用物理化学方法,把热储层中的堵塞物溶解、置换带出井外,尽可能维持和增大储层孔隙率和渗透率,减小储层流体阻力,增加热水通量。目前,多数情况下采用36%工业盐酸进行浸泡溶解,然后采用高压泵将井底和储层中溶解物排出井外。该方法对于碳酸

盐热储层和井壁表面的泥皮起到一定的化学溶解作用,实际效果并不明显。其原因:一是HCl与碳酸盐类矿物虽然能够产生快速激烈反应,但是,由于反应速度过快,只对表层一些矿物进行了溶解,对于运移过远的储层堵塞物起不到化学作用。二是HCl与黏土矿物基本没有化学反应。

实际工程中,几乎没有单一的热储层损害类型,多数情况下是多种损害类型的叠加。所以,单一使用HCl来进行处理不能彻底解决问题。近年来,国外油气储层改造中,土酸溶蚀和压裂的方法效果显著。如:印度尼西亚、墨西哥、菲律宾等高温地热田,采用土酸压裂方法使地热资源增产2~10倍<sup>[10-12]</sup>。国内碳酸盐地区地热井采用HCl酸化处理效果明显<sup>[13-16]</sup>。由此可见,采用HCl和土酸(HCl+HF)基本可以解决热储层损害问题,也是最简单、有效和实用的方法。

### 2.2.1 土酸增产机理与方法

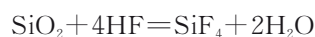
#### 2.2.1.1 土酸解堵机理

盐酸(HCl)和氢氟酸(HF)2种混合液称土酸。其中,盐酸主要用于溶解储层中方解石、白云石、菱铁矿等矿物和空隙充填物中的碳酸盐矿物;氢氟酸则主要用于溶解黏土、石英和长石类矿物的堵塞。其化学作用过程如下<sup>[17]</sup>:

盐酸作用过程:



氢氟酸作用过程:



#### 2.2.1.2 使用方法

当热储层堵塞物充填成分主要为碳酸盐矿物时,根据堵塞情况单独使用10%~15%的工业盐酸(HCl)作为工作液,通过钻井现场泥浆泵分别注入1~3次即可解堵;当热储层堵塞物以黏土、长石、石英等矿物充填时,需要用土酸(HCl+HF)解堵。因为Si、Al与F具有强烈的吸附性,极易形成 $\text{SiF}_6^{2-}$ 、 $\text{AlF}_6^{3-}$ 、 $\text{AlF}_4^-$ 等结合物而堵塞储层,所以,在实际修复改造工程中,常常把HCl和HF混合使用。一般情况下,土酸混合液中盐酸的浓度为5%~10%,氢氟酸的浓度为3%~8%,以便维持工作液较低的pH值,避免热储层二次伤害<sup>[18-19]</sup>。常见堵塞充填矿物对HCl和HCl+HF溶液的溶解度见表1<sup>[20]</sup>。

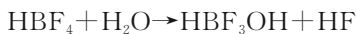
表1 部分矿物对HCl溶液和HCl+HF溶液的溶解性

矿物名称	矿物属性	赋存主要热储层类型	HCl工作液敏感性	HCl+HF混合工作液敏感性
石英	氧化物	孔隙型、裂隙型	无	很低
斜长石	硅酸盐	孔隙型、裂隙型	无	低—中等
云母	铝硅酸盐	孔隙型、裂隙型	无	低—中等
高岭石	粘土	裂隙型、裂隙-溶洞型	无	高
伊利石	粘土	裂隙型、裂隙-溶洞型	无	高
蒙脱石	粘土	裂隙型、裂隙-溶洞型	无	高
绿泥石	粘土	裂隙型、裂隙-溶洞型	低—中等	高
方解石	碳酸盐	裂隙型、裂隙-溶洞型	高	高(形成CaF <sub>2</sub> 沉淀)
白云石	碳酸盐	裂隙型、裂隙-溶洞型	高	高
铁白云石	碳酸盐	裂隙型、裂隙-溶洞型	高	高
菱铁矿	碳酸盐	裂隙型、裂隙-溶洞型	高	高

### 2.2.1.3 主要添加剂

在热储层修复过程中,为了避免工作液与矿物反应过快,工作液渗入储层深度不足问题,需要加入缓蚀剂或螯合剂。

常用缓蚀剂: HBF<sub>4</sub>(氟硼酸)、HEDP(磷酸络合物)和OCA(C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub>、HF、HBF<sub>4</sub>和NH<sub>4</sub>Cl多种化学组分的混合物)。其中,OCA缓蚀剂主要用于>180℃的高温热储层;HBF<sub>4</sub>和HEDP缓蚀剂用于中低温地热储层,HBF<sub>4</sub>遇水后会直接形成HF<sup>[20]</sup>。反应式如下:



HEDP水解后同样可以形成磷酸铵盐和HF<sup>[21]</sup>。

这2种缓蚀剂的化学特征,不仅可以延缓溶蚀速度,而且自身还可以形成HF,对热储层裂隙扩充和堵塞物溶解十分有利。

常用螯合剂:在油气储层改造中,多数情况下选择乙二胺四乙酸(EDTA)和次氨基三乙酸(NTA)2种螯合剂。其优点:一是对金属腐蚀性较弱,对设备和管材具有良好的保护作用。二是储层中Ca<sup>2+</sup>与螯合剂反应可以达到延缓和溶解双重作用。

实验表明:螯合剂与储层矿物的反应速率与常规的HCl和HF相比更小,反应时间更长。所以,螯合剂的主要作用是使工作液在储层中渗透的距离更远,化学反应的时间更长。

现阶段的地热储层修复多采用HCl洗井和压酸处理,只注重了酸的溶解能力,未考虑缓蚀剂和

螯合剂的作用,在地热储层修复增产改造时,工作液加入缓蚀剂和螯合剂,增加化学反应时间,达到更好的修复效果。

### 2.2.2 CO<sub>2</sub>增产机理与方法

CO<sub>2</sub>洗井增产最早应用在水文水井处理中,把储存在高压气瓶中的液态CO<sub>2</sub>通过钻杆进入井内,在压力+温度达到临界值时,液体变为气态,体积急剧膨胀并产生大量气、水、固混合物喷出井外。同时,井内形成负压,含水层中的堵塞沉积物运移到井内,经多次CO<sub>2</sub>放喷,可达到清淤排渣和疏通含水层的目的<sup>[22-26]</sup>。

#### 2.2.2.1 CO<sub>2</sub>主要参数

CO<sub>2</sub>在温度>31.1℃,压力>7.38 MPa时<sup>[27-28]</sup>,成超临界状态,扩散系数为液体的100倍;

CO<sub>2</sub>密度:不同压力下CO<sub>2</sub>密度随温度增加而降低,在一定温度后降低幅度减缓。CO<sub>2</sub>随压力或温度的微小变化都会引发密度显著变化,从而使溶质在流体中的溶解度也产生显著的变化;

CO<sub>2</sub>粘度:在不同压力条件下,CO<sub>2</sub>粘度随温度的增加而降低,温度越高降低幅度越小,呈平缓趋势,当压力趋于临界状态时,CO<sub>2</sub>粘度随着温度的变化趋近于线性变化;

CO<sub>2</sub>表面张力:温度越低,CO<sub>2</sub>表面张力越大,随着温度达到临界温度CO<sub>2</sub>表面张力趋于零<sup>[29]</sup>;

CO<sub>2</sub>自扩散系数:如图2和图3所示<sup>[29]</sup>,不同压力条件下,CO<sub>2</sub>的自扩散系数随温度的升高而增大,随压力的增大而减小。在CO<sub>2</sub>临界点附近,自扩散系数对温度和压力敏感<sup>[30]</sup>。

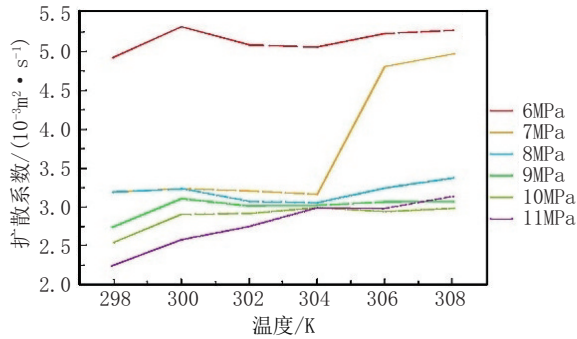


图 2 临界点附近 CO<sub>2</sub> 自扩散系数与温度关系

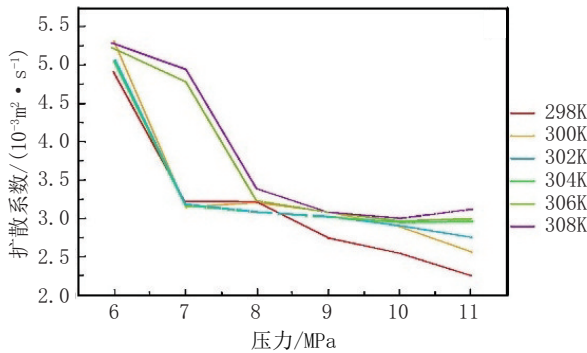


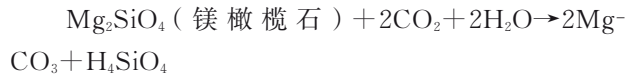
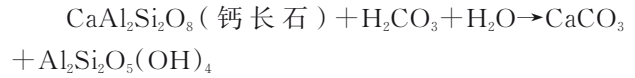
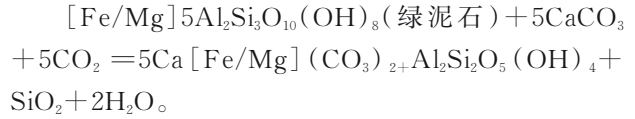
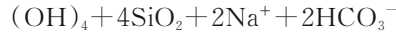
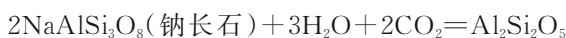
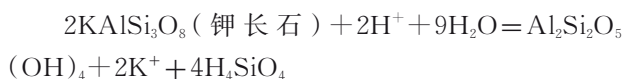
图 3 临界点附近 CO<sub>2</sub> 自扩散系数与压力关系

综上所述:CO<sub>2</sub>具有良好的物性,其密度和自扩散系数对温度和压力有极强的敏感性,CO<sub>2</sub>粘度随温度的增加而降低,在临界或超临界状态下CO<sub>2</sub>不会液化,临界温度CO<sub>2</sub>表面张力趋于零。是地热储层损害修复改造的良好工作介质。

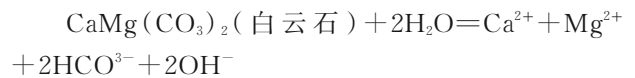
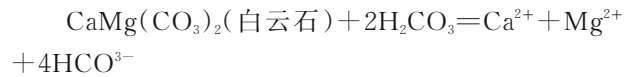
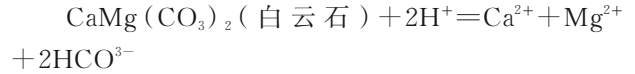
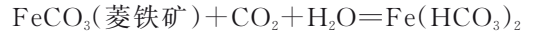
2.2.2.2 CO<sub>2</sub>作用机理

CO<sub>2</sub>注入热储层后将会起到裂隙扩展和化学溶蚀 2 个作用。通过地面增压设备,使井内压力增大,当达到储层(岩石)破裂压力时,CO<sub>2</sub>渗入储层。由于超临界CO<sub>2</sub>低粘度、高扩散性的特点,可以使热储层孔隙应力和热应力降低,从而诱发裂缝剪切破坏,同时,超临界CO<sub>2</sub>进入微裂纹尖端,降低了裂缝扩展所需的应力,极易造成裂缝表面岩体失稳。与此同时,一部分CO<sub>2</sub>与水溶解形成弱酸性流体,同时释放出一定量的H<sup>+</sup>,储层中的酸敏矿物在酸性介质中容易发生系列物理化学反应,形成化学溶蚀,使储层空隙增大、渗透率提高。

孔隙型和裂隙型热储层中主要由石英、长石和粘土类矿物组成,其化学溶蚀反应式<sup>[31-34]</sup>:



溶洞型热储层中主要矿物是方解石、白云石等,CO<sub>2</sub>与碳酸盐相互作用化学式<sup>[35]</sup>:



CO<sub>2</sub>进入碳酸盐储层后,其胶结物的溶蚀最为显著,因此可以提高整个储层的渗透率<sup>[36]</sup>。

2.2.3 压裂增产技术与工程实例

压裂是通过高压液体泵、钻杆和封隔器将流体注入到需要处理的井段,工作流体主要有清水、酸液和CO<sub>2</sub>。主要作用是扩展或联通储层裂隙、孔洞;同时,在高压作用下把工作液输送到热储层深部,形成化学溶蚀作用。

在岩性相对稳定的地层,采用空气钻井工艺,井内处于负压状态,基本不存在钻井液侵入和压力因素造成的热储层堵塞,增产方法主要采用水力压裂即可。如河南栾川九龙山 1200 m 地热井,全孔为安山岩,属于裂隙型热储层。上部采用空气潜孔锤钻进,下部采用清水气举反循环钻进,裸眼完井,出水量 9 m<sup>3</sup>/h,水温 40 °C。在现场利用泥浆泵和 89 mm 钻杆及封隔器分别对有裂隙的三段进行水力压裂,最终稳定水量达 30 m<sup>3</sup>/h,水温 45 °C。

采用正循环钻井液钻进时,无论那种类型的热储层都会存在固体颗粒堵塞和储层结构破坏现象。这种场景下采用单一的水力压裂方法,如果储层裂隙或孔洞发育程度低,不但没有增产效果,反而造成热储层二次伤害,堵塞更加严重。所以,必须采用 HCl、CO<sub>2</sub> 或 HCl+HF 作为工作液体进行压裂才

可能有效解堵。如河南栾川县2000 m地热井,热储层为大理岩,全孔采用水基钻井液钻进,裸眼完井,水量3 m<sup>3</sup>/h。采用酸压裂后水量达32 m<sup>3</sup>/h。

### 3 不同类型热储层损害修复增产方法

实际工程中,针对热储层损害程度和机理类型,本着“方便、可行、安全、低耗、环保”原则,结合设备能力和现场条件组合不同的修复改造方法,如表2所示。

表2 不同类型热储层损害修复增产方法

储层类型	主要损害方式	修复改造方法
孔隙型	主要发生在新近系砂岩热储层中。由于地层松散、胶结程度低,主要损害方式为钻井液入侵颗粒充填、应力变化坍塌造成储层堵塞 损害类型相对简单,主要是钻井液污染堵塞,易修复	热储层孔隙度渗透率相对较高且稳定,地层水基本处于饱和状态。所以,采用空压机逐层洗井排渣,把储层中的粘土和细小颗粒排出,使大颗粒稳定砂粒重新排列形成新的储层通道。堵塞严重时可以用土酸溶蚀+空压机洗井排渣方法
裂隙型	主要发生在古近系,碎屑岩、岩浆岩、变质岩裂隙热储层中。主要损害方式为水敏、物理化学、生物形成的储层中粘土膨胀、颗粒运移、沉淀堵塞。热储层损害类型及机理复杂,空隙越小损害越大,修复改造难度较大	构成热储层基体岩石稳定,裂隙充填物成分复杂,一般为粘土矿物和硅酸盐、长石、石英等充填或沉淀堵塞。所以,采用土酸或CO <sub>2</sub> 溶蚀+空压机排渣即可解堵。热储层损害严重时,可采用土酸或CO <sub>2</sub> 压裂+空压机洗井排渣方法
溶洞型	主要发生在震旦、寒武及奥陶系碳酸盐岩等热储层中。主要损害方式为钻井液入侵颗粒充填和溶洞内粘土矿物膨胀堵塞。有时采用水泥浆或粘土堵漏造成的储层损害。损害类型相对简单,易修复(水泥封堵除外)	热储层基体为碳酸盐,其主要成分为方解石和白云石,充填堵塞物主要为粘土矿物或岩屑。所以,采用土酸溶蚀+空压机排渣即可解堵。热储层损害严重时,可采用土酸或CO <sub>2</sub> 压裂+空压机洗井排渣方法
复合型	主要发生在碳酸盐岩、碎屑岩、大理岩热储层中。主要损害方式为颗粒向孔隙或裂隙运移、粘土矿物膨胀和物理化学、生物作用形成的沉淀物堵塞	热储层基体岩石强度较大,除碳酸盐酸敏外,其它岩石稳定,主要目的是清理空隙中的充填堵塞物。所以,采用土酸或CO <sub>2</sub> 压裂+空压机洗井排渣方法

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

(1)采用空气钻进可以减小热储层损害,是热储层保护的佳方式之一。

(2)正循环钻井液钻进工艺可引发热储层损害。井越深、钻井周期越长,热储层伤害越大,修复难度越大。

(3)减小钻井液密度和粘度,控制净化循环体系固相颗粒(岩屑)和钻具(套管)起降速度,可以减少热储层损害。

(4)HCl、HCl+HF和超临界CO<sub>2</sub>对热储层中的堵塞物或裂隙,具有溶解、溶蚀、驱逐、置换和扩充作用,是热储层损害修复的基本方法。

(5)实际工程中,单一修复方法效果甚微,应结合热储层损害机理和程度,采用“二合一”或“三合一”方法最佳。

### 4.2 建议

(1)无论是新钻完的地热井,还是开采一定年限后的采灌井,都应该进行热储层的修复和改造,最大可能增加地热资源量和开采的稳定性和持续性。

(2)在地热井工程设计中增加热储层损害修复和改造内容。把热储层损害修复作为钻井工程的一项重要组成部分,使地热钻井工程体系更完善。

(3)加大地热储层损害机理与修复方法研究;结合地热钻井和开发特点,研发专门修复和测试设备仪器,达到“轻便、低廉、实用、高效、安全”目的。

### 参考文献:

- [1] 王欣,才博,李帅,等.中国石油油气藏储层改造技术历程与展望[J].石油钻采工艺,2023,45(1):67-75.
- [2] 吴奇,胥云,张守良,等.非常规油气藏体积改造技术核心理论与优化设计关键[J].石油学报,2014,35(4):706-714.
- [3] 卢予北,吴焯,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.
- [4] 卢予北,李艺,陈莹,等.国家地下水监测井建设关键问题研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(6):1-6.
- [5] 路萍.复杂地质条件下储层损害机理与评价技术研究[D].武汉:长江大学,2013.
- [6] 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.
- [7] 孙宝江,王金堂,孙义超,等.非常规天然气储层超临界CO<sub>2</sub>压裂技术基础研究进展[J].中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(5):82-91.
- [8] 周大伟,张广清.超临界CO<sub>2</sub>压裂诱导裂缝机理研究综述.石油科学通报,2020(2):239-253.
- [9] 李曜轩,张艳,王兴义,等.超临界二氧化碳压裂作用下页岩的力学特征与孔隙度变化规律研究[J].当代化工,2020,49(4):572-576.
- [10] Kalfayan L J. Fracture acidizing: History, present state, and future [C]//SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference. Richardson: SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference held in College Station, 2007: SPE-106371-MS.
- [11] Pasikki R G, Libert F, Yoshioka K, et al. Well stimulation techniques applied at the Salak Geothermal Field [C]//Proceedings of the World Geothermal Congress 2010. Bali Indonesia: International Geothermal Association, 2010:1-11.
- [12] Akin S, Yildirim N, Yazman M, et al. Coiled tubing acid stimulation of Alaehir Geothermal Field, Turkey [C]//Proceedings of World Geothermal Congress 2015. Melbourne: International Geothermal Association, 2015:1-6.
- [13] 马忠平,杜槟,鲍卫和,等.酸化压裂工艺在地热井中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007(2):45-47.
- [14] 何铁柱,孙振添.酸化压裂工艺在浙江桐乡地热井增产中的应用[J].城市地质,2019,14(4):49-54.
- [15] 朱咸涛.酸压技术在碳酸盐岩低效地热井中的应用[J].石化技术,2021,28(6):107-108.
- [16] 李文,孔祥军,袁利娟,等.北京通州地区地热井酸化压裂增灌试验研究[J].城市地质,2019,14(4):43-48.
- [17] 潘永强.大庆裂缝性储层损害机理及评价技术研究[D].大庆:大庆石油学院,2005.
- [18] 刘明亮,庄亚芹,周超,等.化学刺激技术在增强型地热系统中的应用:理论、实践与展望[J].地球科学与环境报,2016,38(2):267-276.
- [19] Mcleodh O. Matrix acidizing [J]. Journal of Petroleum Technology, 1984,36(12):2055-2069.
- [20] Alsh M P W, Lake L W, Schechter R S. A description of chemical precipitation mechanisms and their role in formation damage during stimulation by hydrofluoric acid [J]. Journal of Petroleum Technology, 1982,34(9):2097-2112.
- [21] Portier S, Andre L, Vuataz F D. Review on chemical stimulation techniques in oil industry and applications to geothermal systems [R]. Orleans: ENGINE, 2007.
- [22] Crow E C, Masmonteil J, Thomas R. Trends in matrix acidizing [J]. Oilfield Review, 1992,4(4):24-40.
- [23] Schechters. Oil Well Stimulation [M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1992.
- [24] 王香增,吴金桥,张军涛.陆相页岩气层的CO<sub>2</sub>压裂技术应用探讨[J].天然气工业,2014,34(1):64-67.
- [25] Meng S, Liu H, Xu J, et al. The evolution and control of fluid phasedur ing liquid CO<sub>2</sub> fracturing [C]. SPE Asia Pacific Hydraulic Fracturing Conference, Beijing, China, 2016, SPE-181790-MS.
- [26] 杨发,汪小宇,李勇.二氧化碳压裂液研究及应用现状[J].石油化工应用,2014(12):15-18.
- [27] 周大伟,张广清.超临界CO<sub>2</sub>压裂诱导裂缝机理研究综述.石油科学通报.2020(2):239-253.
- [28] 庄正杰,李明,张立清,等.超临界二氧化碳物性参数综述[J].低温与特气,2023,41(5):8-15.
- [29] Ryoji S, Thomas L D. Experimental study on water-rock in teractions during CO<sub>2</sub> flooding in the Tensleep Formation Wyoming USA [J]. Applied Geochemistry, 2000,15(3):265-279.
- [30] 李淑芬,张敏华.超临界流体技术及应用[M].北京:化学工业出版社,2014.
- [31] Richmond P. Supercritical fluid extraction—principles and practice [J]. Fuel, 1987,66(4):582.
- [32] Ryzhenko B N. Genesis of dawsonite mineralization: Thermodynamic analysis and alternative [J]. Geochemistry International, 2006,44(8):835-840.
- [33] Robert R J, Koksalan T, Palandri J L. Experimental investigation of CO<sub>2</sub>-brine-rock interactions at elevated temperature and pressure: Implications for CO<sub>2</sub> sequestration in deep-saline aquifer [C]//Symposium on Carbon Dioxide Capture and Sequestration held at 227th National Meeting of the American-Chemical-Society, Anaheim, CA, 2004.
- [34] Daniel E G, Robert G B, Catherine A P. Forsterite dissolution and magnesite precipitation at conditions relevant for deep saline aquifer storage and sequestration of carbon dioxide [J]. Chemical Geology, 2005,217(3-4):257-276.
- [35] Abdulrazag Y Z, Shedid A S, Reyadh A A. Investigation of supercritical carbon dioxide asphaltenic crude oil and formation brine interactions in carbonate formations [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2009,69(1-2):63-70.
- [36] 朱子涵,李明远,林梅钦,等.储层中CO<sub>2</sub>-水-岩石相互作用研究进展[J].矿物岩石地球化学通报,2021,30(1):104-111.

(编辑 王文)