

DOI: 10.12401/j.nwg.2023123

井中微地震逆时干涉震源定位在风城重油油田 SAGD 快速预热中的应用

李萌^{1,2}, 杨若姣³, 刘斌⁴, 魏晨华⁵

(1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 西安石油大学陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西 西安 710065; 3. 中国石油新疆油田公司, 新疆 克拉玛依 834000; 4. 长庆工程设计有限公司, 陕西 西安 710021; 5. 克拉玛依职业技术学院, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要: 蒸汽辅助重力泄油(SAGD)快速预热技术利用短时间的注入高压蒸汽在生产井和注入井之间形成一个高孔隙度和高渗透率的扩容蒸汽腔,其几何形态与扩展规律可由微地震技术进行监测和描述。笔者选取风城重油油田的一组 SAGD 快速预热注入与生产井组进行井下微地震监测,采用三维弹性波逆时干涉震源定位算法获取弱微地震事件的空间分布,定量计算高温蒸汽注入期间形成蒸汽腔体的长度、宽度、高度、方位和扩容体积,对蒸汽腔体几何形态和震级能量分布的动态变化进行分析,探讨蒸汽腔前缘在深度上针对非均质性夹层的延伸趋势与形态。研究结果表明,注入井与生产井之间已经联通,且扩容区域已部分延伸至油层底界面。此外,注入井上方储层产生了较多的微地震事件,表明本次施工已击破注入井上方的非均质物性夹层,完成了注入井上方储层改造的任务。

关键词: 井中微地震监测;逆时干涉震源定位;SAGD 快速预热;风城油田;蒸汽腔

中图分类号: P631.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)05-0111-09

Application of Time Reversed Imaging in Downhole Microseismic Monitoring for Fast SAGD Start-Up Enhancement of Heavy Oil Reservoir in Fengcheng Oil Field

LI Meng^{1,2}, YANG Ruojiao³, LIU Bin⁴, WEI Chenhua⁵

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Key Lab of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 3. PetroChina Xinjiang Oilfield Branch Company, Karamay 834000, Xinjiang, China; 4. Xi'an Changqing Technology Engineering Co., Ltd, Xi'an 710021, Shaanxi, China; 5. Karamay Vocational & Technical College, Karamay 834000, Xinjiang, China)

Abstract: Fast SAGD start-up enhancement technique injects the high-pressure steam in short time to build a high-temperature steam chamber with high porosity and permeability. In this study, downhole microseismic monitoring was performed in a fast SAGD start-up enhancement well group of heavy oil reservoir in Fengcheng oil field to delineate the geometric and dynamic propagation characteristics of formed steam chamber. Time reversed imaging method was applied to obtain the weak event locations with high accuracy. The quantitative estimation of length, width, height, azimuth and volume of the steam chamber was also estimated based on the event

收稿日期: 2023-04-11; 修回日期: 2023-06-28; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 陕西省自然科学基金面上资助项目(2023-JC-YB-220)资助。

作者简介: 李萌(1988-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为微地震与声波测井反演方法。E-mail: meli@xsyu.edu.cn。

locations. The variation of steam chamber geometric and energy distribution with dates were also analyzed. The propagation characteristics of steam chamber front in depth direction respect to heterogeneous interlayer was also studied. The microseismic monitoring results demonstrates that the injection well and production well has been connected and the expansion area has partially extended to the bottom of the oil layer interface. In addition, amount of microseismic events were found above the injection well which suggests the steam has break the heterogeneous interlayer. Therefore, the reservoir has been successfully stimulated. Finally, the fitting relationship between steam chamber geometry characteristics and injection dates has been obtained based on the microseismic monitoring results, which provides significantly theoretical and practical foundation for the design and optimization of fast SAGD start-up enhancement in the studied area.

Keywords: downhole microseismic monitoring; event location using time reversed imaging; fast SAGD start-up enhancement; Fengcheng oil field; steam chamber

蒸汽辅助重力泄油(SAGD)是重油油藏开发的一项关键技术。该技术通过在水平生产井上方部署注入井持续注入高温蒸汽,形成高温蒸汽腔,在改善地下油藏的流动性的同时其前缘以热传导的形式增加地下岩石局部的孔隙压力,导致岩石发生微破裂,其破裂能量以弹性波的形式进行传播,这种现象也被称为“热凯赛尔效应”(李彦平等,2003;董宏等,2017)。SAGD 快速预热技术利用短时间、人工精细调节的高压蒸汽注入,在 SAGD 的生产井和注汽井之间形成一个高孔隙度和高渗透率的扩容区域,从而提早建立生产井和注入井的均匀连通。这项技术能大大的缩短 SAGD 生产的预热周期,解决注汽量大、阶段能耗大、地面循环返出液处理压力大、建产慢等多种问题。

微地震监测技术可以连续监测热蒸汽注入过程中诱发地震事件在时间和空间域的动态变化,通过反演的震源空间与震级能量的分布,可描述高温蒸汽腔体的几何形态、均匀程度和形成过程,预测蒸汽腔前缘扩展速度与扩展规律,从而为重油油田的注采参数调整、开采方案的决策和优化提供理论依据(宋维琪,2014;杨瑞召,2017;李萌,2020)。震源定位是微地震监测的核心技术,其结果直接影响蒸汽腔体几何形态和扩展规律的预测精度。目前,常规的微地震震源定位方法需要拾取准确的初至,通过射线追踪最小化拾取与计算初至之差来获取震源的位置(Wang et al., 2016; Li et al., 2019a)。然而,实际采集的 SAGD 微地震数据普遍包含强噪声干扰,难以拾取准确可靠的初至,降低了基于初至信息定位方法的精度和可靠性。

微地震逆时干涉震源定位技术(TRI)基于逆时偏移原理,同时利用微地震波场的运动学和动力学特征,通过有限差分或相移法进行波场的逆时延拓并施加

一定的成像条件来获取震源的位置和起震时刻。该方法无需拾取震相走时,避免了人工拾取初至引入的定位误差,是一种适用于低信噪比微地震监测数据的震源定位方法(Gajewski, 2005; Artman et al., 2010; Maxwell, 2015; 李萌等, 2016)。近年来,优化改进逆时干涉定位成像条件以获取高精度震源定位结果成为了研究热点。Zhu(2014)在粘弹性介质中对逆时干涉定位法进行了介质固有衰减的校正,但忽略了散射衰减对定位的影响。Douma 等(2015)利用地震勘探反褶积思想提高了逆时干涉定位的空间和时间分辨率。Nakata 等(2016)对各接收器波场进行独立逆时传播并将这些子波场的乘积作为最终的干涉波场从而提高定位结果的聚焦性。Li 等(2019b)采用多尺度双树复小波变换将原始数据分解到多个时频域分别进行逆时干涉,选择有效尺度 TRI 的乘积压制了稀疏观测系统引起的成像假象。Li 等(2021)引入二维 VTI 介质波场解耦算法,采用解耦 qP 和 SV 波场的自相关和互相关压制了耦合波场互相干涉引起的定位成像假象,提高了逆时干涉震源定位的精度。大量研究表明,逆时干涉震源定位在速度模型合理的情况下,对低信噪比微地震监测数据具有较高的定位精度。

笔者优选风城油田八道湾组超稠油油藏的一组 SAGD 快速预热注入与生产井组进行为期 5 天的微地震井中监测,采用逆时干涉定位算法成功实现弱诱发地震事件的震源定位,以此估算不同注入时期的蒸汽腔体在空间的几何展布形态,得到其在水平方向和深度方向的扩展规律,分析岩性夹层和非均质性对蒸汽腔体延伸形态的影响,为该地区 SAGD 重油油田开发方案的布置与优化奠定基础。

1 观测系统布置方案

研究区块位于准噶尔盆地西部隆起乌夏断裂带、夏红北断裂上盘的风城油田重 58 井区, 其整体构造形态为被断裂切割的南倾单斜, 南部发育断裂, 走向近东西向, 倾向向北。区块目的层为受构造和岩性控制的单斜超稠油油藏, 岩性以砾砂岩为主, 油质稠, 原油粘度较高, 储层物性较差(何文军等, 2023)。研究区块优选 I 井作为高温蒸汽注入井, P 井为生产井, F 井为微地震监测井, 布置 8 级井下三分量检波器, 进行为期 5 天的井中监测, 实时记录高温蒸汽注入时的诱发地震信号。项目选取邻井 S 井布置射孔信号, 校正井下检波器水平分量的方位(图 1)。图 1a 中红色轨迹为选取的井中微地震监测的 SAGD 快速预热井组。图 1b 中红色三角为三分量检波器, 蓝色星形为射孔点。观测系统以监测井井口坐标为坐标原点, 检波器阵列中点距离 SAGD 井组小于 500 m, 满足井中微地震监测条件。

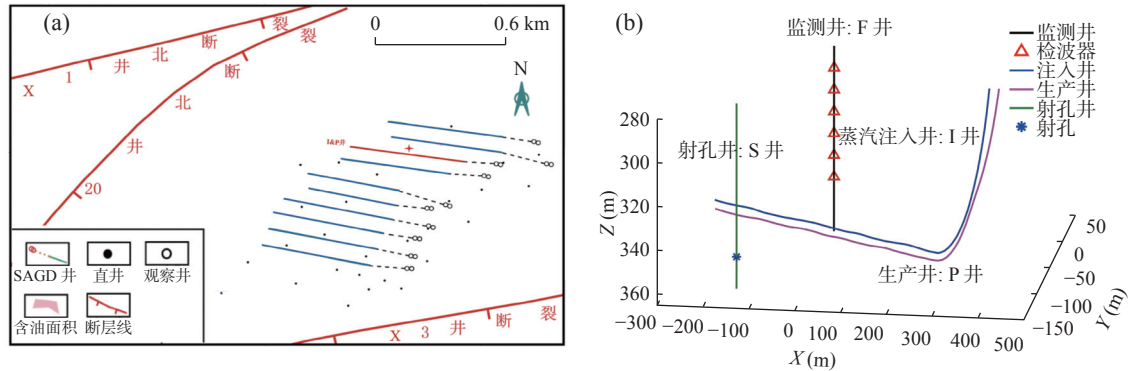


图 1 研究区域井位部署图(a)和井中微地震观测系统(b)

Fig. 1 (a) Well deployment of studied area and (b) downhole microseismic recording geometry

2 井中微地震逆时干涉震源定位方法

传统的微地震震源定位方法需要拾取准确的纵波和横波初至, 采用网格搜索法通过三维射线追踪最小化拾取初至与理论初至之差来推断震源的位置。这类方法的定位精度强烈依赖于拾取初至的准确性, 在 SAGD 快速预热中产生的低信噪比微地震监测中难以取得满意的震源定位结果。逆时干涉震源定位方法基于三维弹性波动方程, 能够同时利用微地震波场的运动学和动力学特征。这类方法通过在检波器位置逆时加载实际记录的原始波形, 当速度模型合理时, 各检波器逆时传播的微地震波场能量会在真实震源位置干涉叠加到达最大值, 该成像最大能量所对应的网格即为震源位置。这类方法无需拾取纵波与横波初至, 避免了人工拾取初至引入的定位误差, 适用于 SAGD 快速预热中产生的低信噪比微地震事件的定位。

微地震逆时干涉震源定位算法的基本假设为波场互易原理及弹性波动方程在非耗散介质中的时不

变性。该方法以检波器作为震源, 以实际接收的微地震原始数据作为震源子波, 采用时间域或频率域有限差分或有限元方法进行波场的逆时重构, 通过施加合适的成像条件获取逆时干涉震源定位成像, 拾取定位成像在空间分布的极大值即可估算震源的位置。以二维弹性波方程为例, 由下式估算每个时间步长逆时传播的波场:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} - (\lambda + 2\mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} + \mu \nabla \times \nabla \times \mathbf{u} = \mathbf{d}(x, z, T - t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{d}$ 为接收到的微地震波形数据; t 为时间步长; T 为逆时延拓的总时长; λ 和 μ 为拉梅系数; ρ 为介质密度; $\mathbf{u}$ 为重构的逆时波场。为了保证逆时传播的波场能量最终能够收敛, T 可设置为微地震主事件波形持续时间的 2 倍。目前, 常用的成像条件是通过选定时间窗口逆时延拓波场模的积分作为成像条件, 从而消除时间轴, 得到只与空间位置相关的逆时干涉定位成像:

$$I(x, z) = \int_{T_1}^{T_2} |\mathbf{u}| dt \quad (2)$$

式中: $|\mathbf{u}|$ 为逆时波场的模; T_1 和 T_2 为起始时刻和

终止时刻; I 为成像函数, 逆时干涉定位成像的最大值即为推断的震源位置 (x_0, z_0) 。震源的起震时刻为逆时延拓波场在震源位置最大能量所对应的时刻如公式(3)所示。

$$t_0 = \max[\mathbf{u}(x_0, z_0, t)] \quad (3)$$

微地震事件的震级采用公式(4)进行估算矩震级 M_w 。

$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10}(M_0) - 6.06 \quad (4)$$

式中: M_0 为地震矩, 可由地震波形的振幅谱进行估算, 如公式(5)所示。

$$M_0 = \frac{4\pi\rho v^3 r W_0}{U} \quad (5)$$

式中: v 为波形速度; r 为震源到接收器的距离; ρ 为密度; U 为震源辐射特性; W_0 为振幅谱的低频截止

值。对于以剪切应力为主的震源可近似取 $U_p = 0.52$ 和 $U_s = 0.63$ 。由于单垂直井的微地震监测系统缺乏水平方向上对震源位置的约束, 其逆时干涉震源定位成像在 $x-y$ 平面为以检波器为中心、以震源至检波器距离为半径的圆, 该圆上任何一点都是潜在的震源位置。因此, 为了避免方位不确定性, 采用微地震事件 P 波的偏振方向作为约束, 选择距离热蒸汽注入中心较近的震源为最终确定的震源位置。图 2 为井中微地震监测不同时刻逆时延拓的波场快照, 当波场传播至起震时刻时, 逆时传播的波场会在真实的震源位置处干涉叠加至最大值。由于观测系统仅能采集到来自震源一侧的信息, 因此震源逆时干涉定位成像为一个椭圆区域而非一个完美的点, 该区域的大小为评价定位不确定性提供了理论依据。

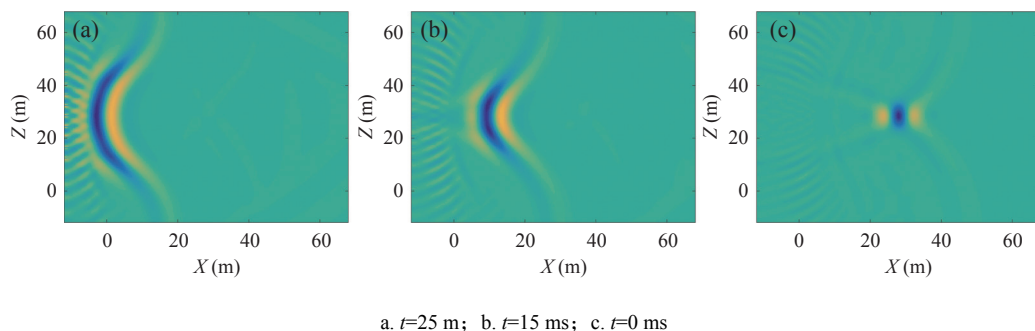


图 2 井中微地震逆时延拓的波场在不同时刻的波场图

Fig. 2 Snapshots of time reversed wavefield in various time for borehole microseismic

3 SAGD 快速预热微地震逆时干涉震源定位结果分析

3.1 SAGD 快速预热微地震事件空间分布分析

实际采集的 SAGD 快速预热期间产生的微地震典型波形显示(图 3), 蓝、红和黑实线分别为同一道检波器的 X、Y 和 Z 分量波形, 黑虚线与蓝虚线分别为拾取的纵波和横波初至。由于 SAGD 快速预热期间流体注入的压力较小, 因此产生的微地震有效事件波形幅度较弱且包含强噪声干扰。尤其是部分纵波初至被湮没在背景噪声之中, 难以准确地拾取, 使得基于初至信息的常规定位方法可靠性较低。因此, 笔者采用三维弹性波逆时干涉震源定位算法, 对 5 天的 SAGD 高温蒸汽快速预热井中微地震监测数据进行处理, 成功定位了 33 个有效的微地震事件。逆时干涉

震源定位采用监测井 F 井的声波测井曲线, 对监测目的层段进行速度分层, 建立一维 P 波层状速度模型(图 4a)。由于缺失横波测井信息, S 波速度模型由 P 波速度模型与研究区域的纵横波比经验值进行估算。

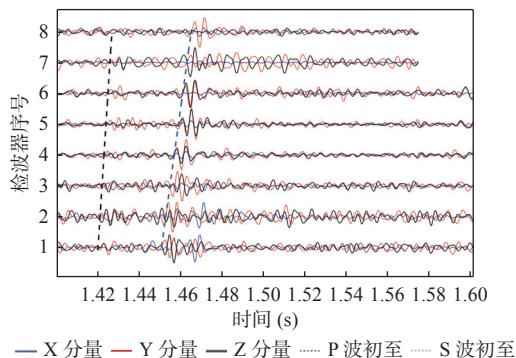


图 3 SAGD 快速预热期间记录的井中微地震波形图

Fig. 3 Measured microseismic waveforms of downhole array during fast SAGD start-up enhancement

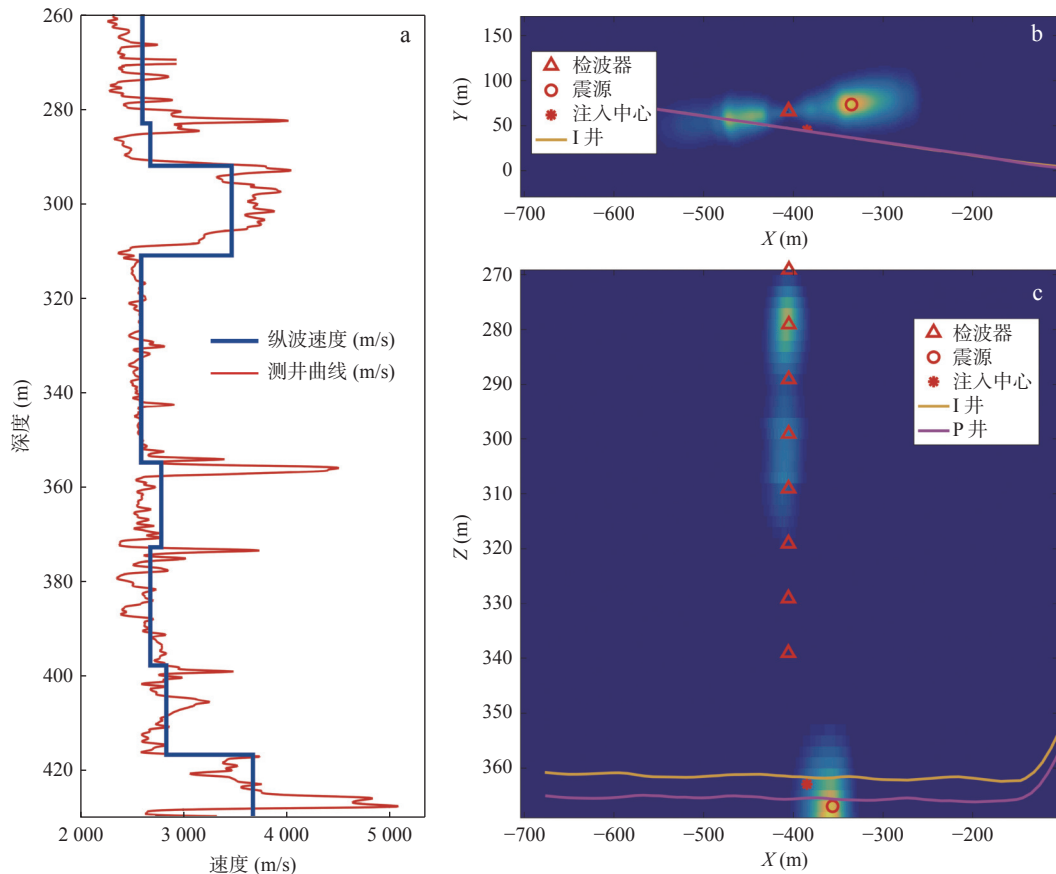


图4 速度模型(a)、逆时干涉震源定位成像俯视图(b)与侧视图(c)

Fig. 4 (a) Velocity model, (b) map view and (c) side view of time reversed image for event location

本次研究的检波器安置在近似垂直的监测井中, 缺乏在水平面上对震源位置的约束。因此, 笔者采用微地震有效事件 P 波的偏振方向作为震源的方向, 以该方向高斯射线束与逆时干涉定位成像 x - y 切片的乘积作为最终的成像结果(图 4b)。由于单垂直井监测观测系统的震源定位结果具有 180° 的不确定性, 来自真实震源位置和其关于检波器中心对称的位置都有可能是潜在的震源。为解决这个问题, 以 SAGD 注入井的注入中心(图 4b 中的红星)为基准, 近似认为与注入中心距离较近的成像椭圆的中心为真实的震源位置(图 4b 中的红圈)。图 4c 该事件三维弹性波逆时干涉震源定位结果在震源 y 坐标的 x - z 切片结果(图 4c)。受制于稀疏的检波器阵列, 逆时干涉成像在检波器阵列存在成像假象。由于 SAGD 井组的整体深度与检波器阵列存在一定的深度偏差, 因此该成像假象不足以干扰真实震源位置的识别。

拾取所有事件逆时干涉震源定位成像最大能量所对应的位置作为估算的震源空间坐标, 得到 SAGD 快速预热期间的微地震震源空间分布(图 5)。由此可

粗略估算此次注入预热产生的裂缝缝长为 570.19 m, 缝高为 10.56 m, 裂缝波及宽度为 127.85 m, 裂缝总体延伸方位为 NE 95.21° , 扩容蒸汽腔体的体积为 $7.7 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。根据震源位置的空间分布得到以下几点认识。

(1) I 井水平段垂深之上的事件有 10 个, 占总数的 30.3%, 即 I 井上方的非均质物性夹层(不均匀泥岩夹层)发育较多微地震事件, 说明 I 井上方储层产生了较多的微裂缝, 已经达到了储层预热改造的目的。

(2) I 井与 P 井水平段垂深之间的事件有 18 个, 占总数的 54.6%, 说明 I 井与 P 井之间已经连通。

(3) J_{1b} 油层顶界面之上的事件有 0 个, 说明扩容区域有部分未延伸至油层顶界面。

(4) J_{1b} 油层底界面之下的事件有 2 个, 说明扩容区域有小部分延伸至油层底界面。

(5) 以 I 井水平段在水平面的投影为界, I 井水平段以北有 19 个微地震事件, I 井水平段以南有 14 个微地震事件, 说明预热期间水平段以北更容易发生破裂、预热效果较好, 而水平段以南由于存在非均匀夹层, 使得微地震事件个数降低。

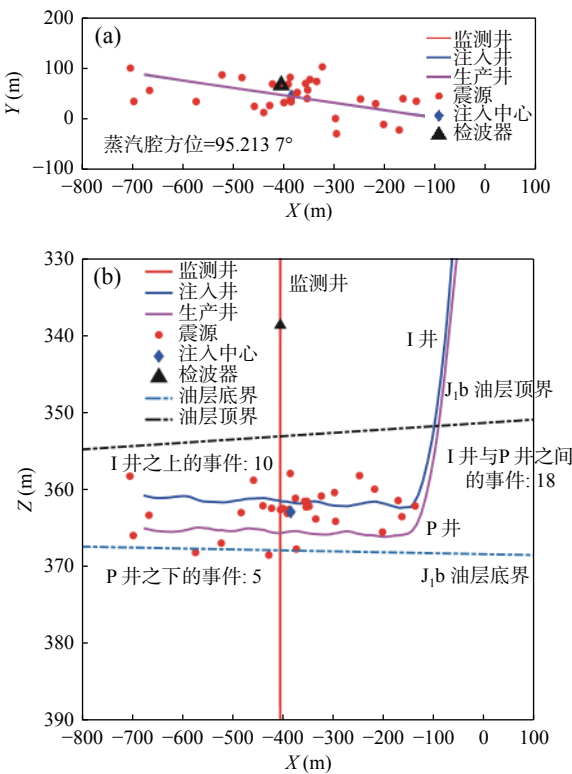


图5 SAGD井组微地震震源俯视图(a)与侧视图(b)
Fig. 5 (a) Map view and (b) side view of microseismic events for SAGD well

3.2 SAGD快速预热微地震空间分布动态分析

SAGD快速预热高温蒸汽注入每天所产生诱发微地震事件分布显示(图6,表1),扩容之前(9月25日)由于排量和压力较小,未能观测到有效的微地震事件;第一阶段扩容(9月25日~9月27日)期间,压力和排量增大,地层孔隙压力局部集中导致地层开始破裂,

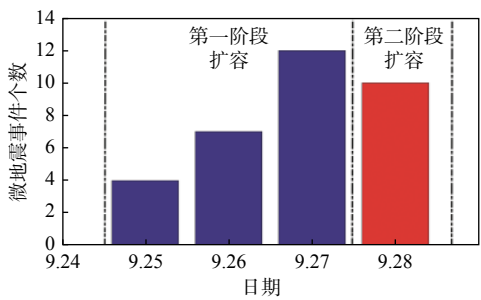


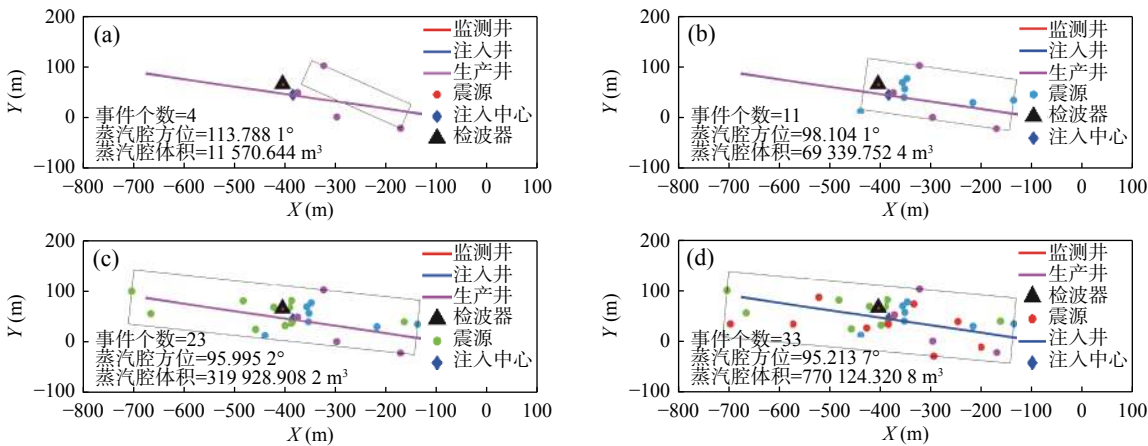
图6 高温蒸汽注入诱发的微地震事件个数日期分布图
Fig. 6 The variation of microseismic event number with date induced by high temperature steam injection

表1 SAGD蒸汽腔几何参数随时间变化表
Tab. 1 Geometric parameters of SAGD steam chamber with various date

日期	蒸汽腔网络长(m)	蒸汽腔网络宽(m)	蒸汽腔网络高(m)	蒸汽腔网络方位	累积事件个数	蒸汽腔体积(m ³)
9月25日	215.14	51.64	1.04	NE113.78°	4	0.11×10 ⁵
9月26日	296.26	100.91	2.31	NE98.10°	11	0.69×10 ⁵
9月27日	570.32	107.04	5.24	NE95.99°	23	3.20×10 ⁵
9月28日	570.19	127.85	10.56	NE95.21°	33	7.70×10 ⁵

其对应的微地震事件个数急剧增加,这段时间微地震事件个数为23,占总数的69.7%;第二阶段扩容(9月28日04点~9月28日18点)对应的微地震事件个数为10个,占总数的30.3%;9月28日18点停泵,再未观测到微地震事件。

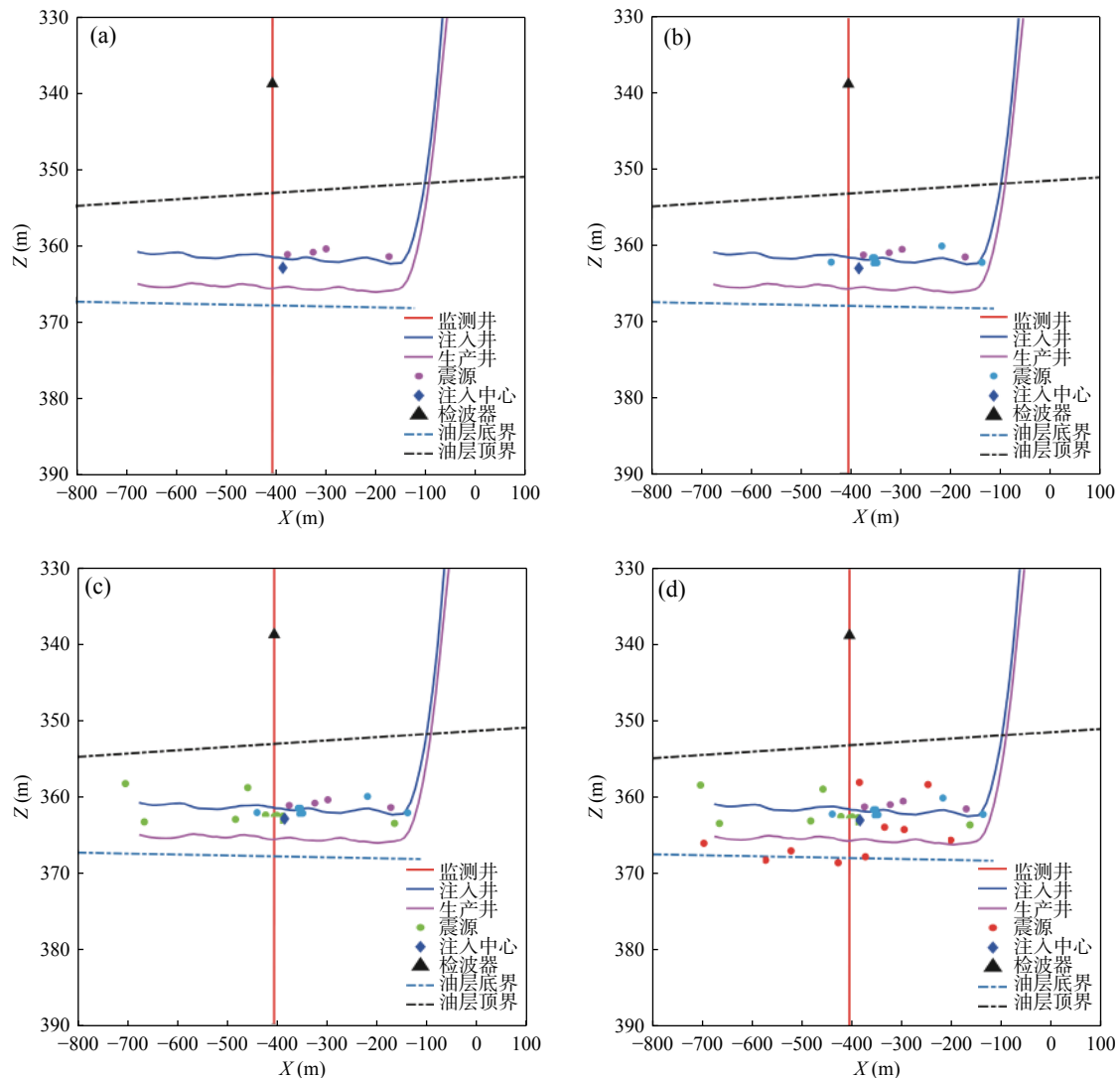
为进一步分析高温蒸汽注入期间形成蒸汽腔体的发育情况,分别展示9月25日至9月28日的累积微地震事件空间分布(图7、图8)。图中不同颜色的



a. 9月25日的微地震事件空间分布; b. 9月26日的微地震事件空间分布;
c. 9月27日的微地震事件空间分布; d. 9月28日的微地震事件空间分布

图7 高温蒸汽腔空间分布动态扩展过程俯视图

Fig. 7 The geometric extension of high temperature steam chamber (map view)



a. 9月25日的微地震事件空间分布; b. 9月26日的微地震事件空间分布;
c. 9月27日的微地震事件空间分布; d. 9月28日的微地震事件空间分布

图8 高温蒸汽腔空间分布动态扩展过程侧视图

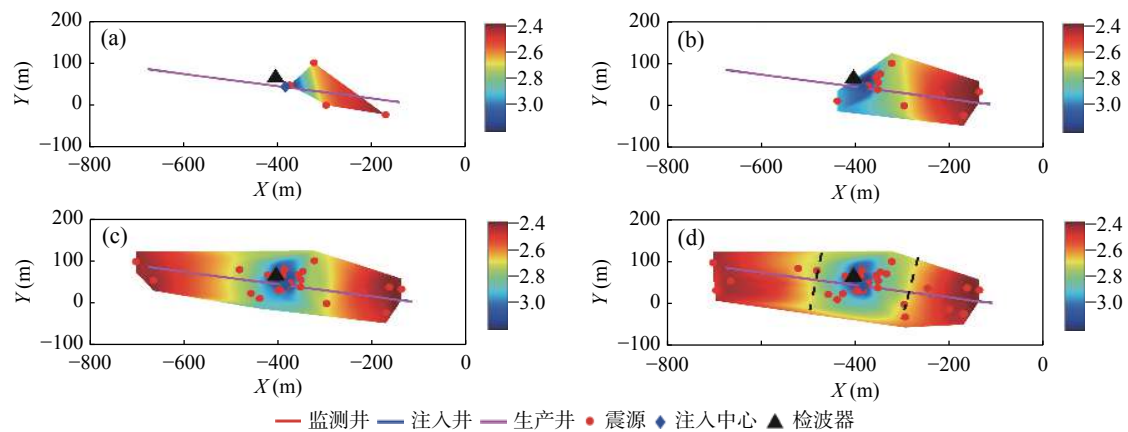
Fig. 8 The geometric extension of high temperature steam chamber (side view)

圆点代表不同日期新增的微地震事件。9月25日开始压力和排量增大,地层开始发生破裂,此时的微地震事件主要集中在I井的水平段中心附近;9月26日,扩容段进一步增加,扩容区域沿着I井水平段进行延伸,此时微地震事件已经向上延伸,但还未延伸至油层顶界面;9月27日,扩容区域在水平方向上已经趋于稳定,在垂直方向上进一步延伸,且I井和P井已经连通;9月28日,随着第二段扩容,P井之下开始出现微地震事件,扩容区域向下延伸至油层底界面。

3.3 SAGD 快速预热微地震能量分布动态分析

采用公式(4)和公式(5)计算已定位微地震有效事件的矩震级,对不同日期的震级能量进行三维

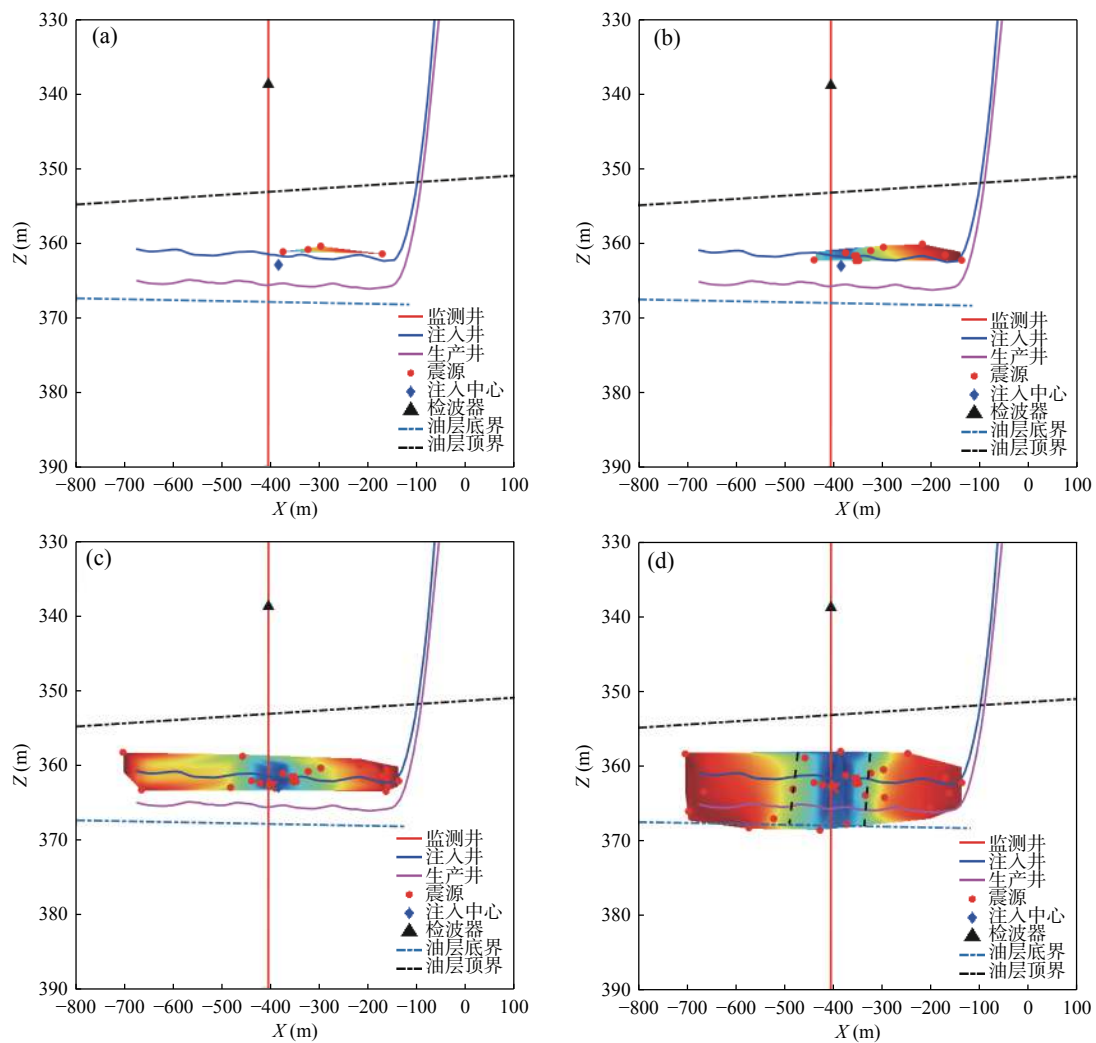
插值和平滑,得到注入期间蒸汽腔体震源能量的动态变化(图9、图10)。其中红色区域为震级较强的部分,蓝色为震级较弱的部分。由图可知,以I井水平段为界,微地震能量分布在I井南北方向分布并不对称,其中北部事件较多、能量较为集中,这与北部微地震事件多而南部微地震事件少有关。整体上看,扩容区域按照震级大小大致可分为2个部分,如图9和图10d的虚线所示。两根虚线中间的区域震级较小,而两边的区域震级能量较大,这与本次监测的观测系统有关,在距离检波器阵列较远的位置只有震级能量较大的事件才能被接收,而震级较小的微地震事件在高温蒸汽腔中快速衰减,难以被监测。



a. 9月25日的微地震事件能量分布; b. 9月26日的微地震事件能量分布;
c. 9月27日的微地震事件能量分布; d. 9月28日的微地震事件能量分布

图9 高温蒸汽腔能量分布动态扩展过程俯视图

Fig. 9 The energy extension of high temperature steam chamber (map view)



a. 9月25日的微地震事件能量分布; b. 9月26日的微地震事件能量分布;
c. 9月27日的微地震事件能量分布; d. 9月28日的微地震事件能量分布

图10 高温蒸汽腔能量分布动态扩展过程侧视图

Fig. 10 The energy extension of high temperature steam chamber (side view)

4 结论

(1)井中三维弹性波逆时干涉震源定位算法适用于SAGD快速预热产生的弱微地震有效事件震源定位,能够提供高精度的震源空间分布形态。高温蒸汽注入形成的蒸汽腔体长度为570.19 m,高度为10.56 m,宽度为127.85 m,长宽比为4.5,总体延伸方位为NE 95.21°,由此可粗略估算此次注入预热的扩容区域为 $7.7 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。

(2)监测结果表明,I井上方储层产生了较多的微裂缝,已击破I井上方的非均质物性夹层,达到I井上方储层改造的目的;I井与P井之间已经连通,且扩容区域已部分延伸至油层底界面,但是未延伸至油层顶界面。

(3)SAGD快速预热期间产生的微地震能量在I井南北方向分布并不对称,以I井水平段为界,北部的微地震能量较为集中且事件个数更多,表明蒸汽腔体在I井水平段北部延伸更广。

致谢:本次研究由陕西省自然科学基金研究计划面上资助项目(2023-JC-YB-220)资助,中石油新疆油田分公司提供了宝贵数据资料。

参考文献(References):

- 董宏,何万军,蒋雪峰,等.微地震监测在新疆稠油SAGD开发中的应用[J].*特种油气藏*,2017,24(3):114-118.
- DONG Hong, HE Wanjun, JIANG Xuefeng, et al. Application of microseismic monitoring in heav-oil SAGD development in Xinjiang[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2017, 24(3): 114-118.
- 何文军,吴和源,杨森,等.准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩油储层岩相划分与类型评价[J].*西北地质*,2023,56(1):217-231.
- HE Wenjun, WU Heyuan, YANG Sen, et al. Lithofacies Division and Type Evaluation of Shale Oil Reservoir in Fengcheng Formation of Mahu Sag, Junggar Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(1): 217-231.
- 李萌,诱发地震监测数值模拟与反演方法[M].北京:中国石化出版社,2020.
- LI Meng. Numerical simulation and inversion methods for induced seismic monitoring [M]. Beijing: Sinopec Press, 2020.
- 李萌,陶果,王华,等.微地震逆时聚焦定位算法的模拟实验研究[J].*中国石油大学学报(自然科学版)*,2016,40(5):59-71.
- LI Meng, TAO Guo, WANG Hua, et al. Parametric optimization on locating microseismic events with reverse time imaging[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2016, 40(5): 59-71.
- 李彦平,张平,揣金海,等.超稠油藏转小井距蒸汽驱条件及时机[J].*西北地质*,2003,36(4):74-78.
- LI Yanping, ZHANG Ping, CHUAI Jinhai, et al. The study on switching to steamflooding conditions and opportunity from steam stimulation in super heavy oil reservoirs[J]. *Northwestern Geology*, 2003, 36(4): 74-78.
- Maxwell S. 非常规储层水力压裂微地震成像[M].北京:石油工业出版社,2015.
- Maxwell S. Microseismic imaging of hydraulic fracturing: improved engineering of unconventional shale reservoirs [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015.
- 宋维琪.微地震监测新技术与新方法[M].青岛:中国石油大学出版社,2014.
- SONG Weiqi. The new technology and method for microseismic monitoring [M]. Qingdao: China University of Petroleum Press, 2014.
- 杨瑞召,李德伟,庞海玲,等.页岩气压裂微地震监测中的裂缝成像方法[J].*天然气工业*,2017,37(5):31-37.
- YANG Ruizhao, LI Dewei, PANG Hailin, et al. Fracture imaging of the surface based microseismic monitoring in shale gas fracking: Methods and application[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(5): 31-37.
- Artman B, Podladtchikov I, Witten B. Source location using time - reverse imaging[J]. *Geophysical Prospecting*, 2010, 58(5): 861-873.
- Douma J, Snieder R. Focusing of elastic waves for microseismic imaging[J]. *Geophysical Journal International*, 2015, 200(1): 390-401.
- Gajewski D, Tessmer E. Reverse modeling for seismic events characterization[J]. *Geophysical Journal International*, 2005, 163: 276-284.
- Li L, Tan J, Wood D A, et al. A review of the current status of induced seismicity monitoring for hydraulic fracturing in unconventional tight oil and gas reservoirs[J]. *Fuel*, 2019a, 242: 195-210.
- Li M, Li H, Tao G, et al. Microseismic event location using multi-scale time reversed imaging[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019b, 174: 144-160.
- Li M, Shen H, Guo Y, et al. Locating microseismic events using multiplicative time reversal imaging based on decoupled wavefields in 2D VTI media: Theoretical and synthetic cases studies[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 202(4): 108547.
- Nakata N, Beroza G C. Reverse time migration for microseismic sources using the geometric mean as an imaging condition[J]. *Geophysics*, 2016, 81(2): KS51-KS60.
- Wang H, Li M, Shang X. Current developments on micro-seismic data processing[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016.
- Zhu T. Time-reverse modeling of acoustic wave propagation in attenuating media[J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 197(1): 483-494.