2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):2152-2160
地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn
ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

谢兴隆,王丽娟,李秋辰,等. 2026. 干热岩水力压裂微地震震源机制计算方法研究. 地球物理学进展,41(5):2152-2160,doi:10.6038/pg2026JJ0340.

XIE XingLong, WANG LiJuan, LI QiuChen, *et al*. 2026. Study on calculation methods of microseismic focal mechanism in hot dry rock hydraulic fracturing. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):2152-2160,doi:10.6038/pg2026JJ0340.

干热岩水力压裂微地震震源机制计算方法研究

Study on calculation methods of microseismic focal mechanism in hot dry rock hydraulic fracturing

谢兴隆[1],王丽娟[2],李秋辰[1*],易善鑫[2],陈俊[2],许文豪[1],金显鹏[1]

XIE XingLong[1], WANG LiJuan[2], LI QiuChen[1*], YI ShanXin[2], CHEN Jun[2], XU WenHao[1], JIN XianPeng[1]

1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心,天津 300309
2. 江苏省地质调查研究院,南京 210008

1. *Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, CGS, Tianjin* 300309, *China*
2. *Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing* 210008, *China*

摘 要 干热岩水力压裂微地震震源机制解是揭示裂缝扩展机理的关键参数,但传统方法难以适应其能量小、数量多、成因复杂的特点.本文在大量干热岩水力压裂微地震数据计算的基础上,总结提出适用于干热岩水力压裂微地震震源机制反演方法.通过联合 P 波初动极性、纵横波振幅比与全波形信息,构建多约束目标函数,从而计算得到震源矩张量参数,最后结合地应力场迭代反演,自动确定最佳断层面,规避了人为不确定性.本文以东部某碳酸盐岩干热岩为例,对 145 个微地震事件($M_W > -0.5$)进行震源机制计算,实际应用结果表明,本方法实现了微地震震源机制的高效批量解算,为干热岩储层裂缝表征及压裂优化提供了可靠技术支撑.

关键词 干热岩;微地震;震源机制;矩张量反演;水力压裂;裂缝表征

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi:10.6038/pg2026JJ0340

CSTR:32085.14.pg2026JJ0340

Abstract Focal mechanism solutions of microseismic events during Hot Dry Rock (HDR) hydraulic fracturing are critical parameters for revealing fracture propagation mechanisms. However, conventional methods struggle to address their characteristics of low energy, high event density, and complex genesis. Based on extensive microseismic data from HDR fracturing, this study develops a focal mechanism inversion method specifically for HDR microseismic events. By combining P-wave first-motion polarity, P/S amplitude ratios, and full-waveform information, a multi-constraint objective function is constructed to calculate the source moment tensor parameters. Finally, combined with iterative inversion of the in-situ stress field, the optimal fault plane is automatically determined, thus avoiding human-induced uncertainty. Applied to a carbonate-type HDR reservoir in eastern China, the method successfully calculated focal mechanisms for 145 microseismic events ($M_W > -0.5$). Practical application demonstrates that this framework enables efficient batch processing of microseismic focal mechanisms, providing reliable technical support for fracture characterization and fracturing optimization in HDR reservoirs.

Keywords Hot dry rock; Microseismic monitoring; Focal mechanism; Moment tensor inversion; Hydraulic fracturing; Fracture characterization

收稿日期 2025-12-28; **修回日期** 2026-06-05. **投稿网址** http://www.progeophys.cn

基金项目 中国地质调查局地质调查项目(DD20251176,DD202605202302)和江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目(BE2022859)联合资助.

第一作者简介 谢兴隆,男,1989 年生,高级工程师,从事地球物理勘探与方法研究工作. E-mail:xxl0306@126.com

***通讯作者** 李秋辰,男,1988 年生,高级工程师,从事地球物理领域研究工作. E-mail:874033010@qq.com

0　引　言

地热资源是当前各国重点研究开发的可再生清洁能源,具有零排放、稳定性强的显著优势.在各类地热资源中,干热岩以其巨大的储量及广泛的分布,被视作最具开发潜力的地热类型(王贵玲和陆川,2023;许天福等,2024).干热岩开发通常采用水力压裂技术建造人工热储,即通过向地下注入高压流体诱发裂缝网络、实现井间连通,由此形成的压裂缝网即为人工热储的核心组成部分.

微地震监测是水力压裂过程的核心地球物理监测手段,也是国际高温岩体开发计划的关键研究内容(甘浩男等,2020).随着该领域研究的深入,技术重心正从基础处理流程(如事件识别与定位)向更先进的分析技术(如震源机制反演与地质力学分析)转移(Li *et al.*,2019).分析微地震震源机制,能够定性或定量揭示岩层破裂机理与裂缝特征(陈筱青等,2019),为优化干热岩压裂方案及储层改造设计提供依据,进而提升人工热储建造效率.

震源机制解蕴含了发震断层的结构特征和破裂时的应力状态,是理解区域地质构造、构造运动及地震活动性的重要依据.作为地震学领域的热点问题,震源机制理论和方法一直受到国内外专家学者的关注.目前,震源机制求解方法较多,常用的方法包括P波初动极性法、纵横波振幅比法和全波形方法.P波初动极性法和纵横波振幅比法可简单快速求取断层平面解,全波形方法多用于求取震源矩张量,如目前应用较广的gCAP全波形反演法(许英才和郭祥云,2023;陈俊磊等,2020;胡晓辉等,2020).鉴于单一约束反演因信息有限可能导致理论与实际数据拟合欠佳,融合多种约束的震源机制反演逐渐成为研究前沿(李晗和常旭,2021;崔喆等,2023),此类反演方法从初至极性、振幅、全波形等信息中选择两个及以上作为约束条件构建目标函数.由于水力压裂微地震能量普遍较小,为了获得拟合度较高的震源机制解,本文采用混合约束方式.

震源机制有两个节面,天然地震震源机制一般根据地质与构造背景选择最为合理的断层面.水力压裂微地震震源机制的理论、计算方法及表达形式,均充分借鉴了天然地震震源机制的相关成果.与天然地震相比,干热岩水力压裂的微地震事件具有如下特征:能量普遍较小、数量较多、成因类型复杂.基于以上特征,干热岩水力压裂微地震震源机制很难借鉴天然地震的方法选择断层面.Liang等(2016)发展了微地震定位与震源机制联合反演算法(Joint Source Scanning Algorithm,简称JSSA),该算法无需清晰波形与准确到时信息便可获得震源的断层面信息,并在页岩气压裂中得到了验证(余洋洋等,2021).页岩气地面微地震监测中,观测系统常采用上千道的星形排列方式,JSSA算法在此种大规模数据条件下可获得较好稳定性.干热岩工程开发周期长,地面监测一般采用长久式的稀疏台站,数据量有限,难以直接应用JSSA算法.

目前,针对非常规油气(包括页岩油气、致密油气和煤层气等)水力压裂微地震震源机制研究较多,研究重点围绕如何更精准地反演获得震源机制的矩张量信息(崔喆等,2023;文山师等,2023;唐杰等,2022).因非常规油气开采的目的层段范围较小、压裂层段数量较多,微地震事件的空间分布已能较好展示裂缝发展方向及范围,对震源机制类型、断层面及相关裂缝的分析需求,迫切度相对较低.干热岩压裂目的层段厚度大,压裂层段少且经常重复压裂,同一压裂层段的微地震事件垂向跨度大,仅依靠微地震事件空间分布得到的裂缝信息难以有效支撑干热岩后续开发,因此需要快速明确微地震震源机制信息并统计裂缝特征.我国干热岩勘查开发尚处于起步阶段,现有文献缺乏干热岩微地震震源机制计算的相关内容.

为了快速合理地反演干热岩水力压裂震源机制并进行裂缝特征分析,本文在大量干热岩微地震数据计算的基础上,总结并提出了适用于干热岩水力压裂微地震震源机制反演的计算流程,最后以某碳酸盐岩型干热岩为例进行说明.本文所总结的计算流程对其他类型水力压裂微地震震源机制反演亦有一定的借鉴意义.

1　震源机制计算流程及原理

干热岩水力压裂微地震事件具有"能量小、数量多、成因复杂"等特点,本文形成了适用于干热岩水力压裂微地震震源机制计算方法,具体计算流程见图1.首先优选出可进行震源机制计算的微地震事件集,选用矩张量模型进行正演;然后利用P波初动极性和纵横波振幅比等信息作为约束条件,进行波形匹配迭代反演,获得震源矩张量;最后通过应力迭代反演确定应力参数,从而确定最佳断层面,输出明确的震源机制参数.本文所总结的干热岩水力压裂微地震震源机制方法可快速计算大量微地震震源机制,自动确定合理的断层面,避免了人为认知带来

的不确定性,非常适用于成因复杂且数量较多的微地震.

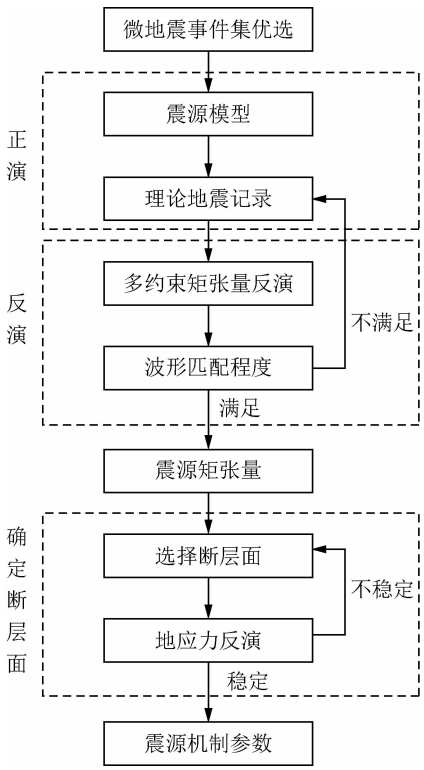


图 1 微地震震源机制计算流程图

Fig. 1 Calculation flow chart of microseismic focal mechanism

在地面微地震监测中,当观测距离显著超过震源特征尺度时,震源可视为点源. 此时,其震源机制可由矩张量完整表征(Aki and Richards,1980;吴顺川等,2016):

$$\boldsymbol{M}_{ij}=\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}, \tag{1}$$

其中,$\boldsymbol{M}_{ij}$为二阶矩张量,m_{ij}为分量,描述了三维空间中的 9 种力偶形式. 因张量 $\boldsymbol{M}$ 是对称的,所以可以用 6 个独立参数表达. 为揭示震源物理本质,可将其分解为 DC(双力偶)、ISO(各向同性)、CLVD(补偿矢量偶极)三部分,进而量化它们的贡献比例(Vavryčuk,2015):

$$\boldsymbol{M}=\boldsymbol{M}_{\mathrm{ISO}}+\boldsymbol{M}_{\mathrm{CLVD}}+\boldsymbol{M}_{\mathrm{DC}}, \tag{2}$$

其中,DC 是代表无体积变化的纯剪切破裂分量,也是水力压裂中最常见的震源分量;ISO 是描述震源体积膨胀或压缩的分量,无剪切作用,仅反映“体积型”破裂过程;CLVD 是介于 DC 和 ISO 之间的“过渡型”分量,可理解为“非对称剪切”或“局部拉伸—压缩耦合”过程. 对应的矩张量可以表示为:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{M}_{\mathrm{ISO}} &= \frac{1}{3}tr(M_{ij})\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ \boldsymbol{M}_{\mathrm{DC}} &= (1-2|\varepsilon|)m^{*}_{|\max|}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \\ \boldsymbol{M}_{\mathrm{CLVD}} &= |\varepsilon|m^{*}_{|\max|}\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}, \end{aligned} \tag{3}$$

其中,ε 为相对参数,用来衡量 CLVD 成分相对于 DC 成分的大小(Sipkin,1986):

$$\varepsilon=-\frac{m^{*}_{|\min|}}{|m^{*}_{|\max|}|}. \tag{4}$$

对于纯 DC 源,$\varepsilon=0$;对于膨胀源 ε 是正的;对于收缩源 ε 是负的. 相应断层面解(走向、倾角、滑动角)可由 DC 成分求得(唐杰等,2019).

采用全波形匹配的方法反演震源机制,需要正演生成理论地震记录,地震记录与矩张量呈线性关系,具体表现为:

$$v_i^n=\sum_{k=1}^{6}m_k G_{i,k}^n * s, \tag{5}$$

其中 $v_i^n(i=1,2,3;n=1,2,\cdots,N)$ 表示理论地震记录,i 代表地震分量,最大值为 3,n 代表所对应的地震监测点,共有 N 个地震监测点. m_k 表示矩张量的独立元素(共 6 个),$G_{i,k}^n$ 为格林函数,s 为震源时间函数.

将理论地震记录与实际地震记录的 L2 范数作为目标函数:

$$F=\sum_{n=1}^{N}\sum_{i=1}^{Nc}\|V_i^n-v_i^n\|_2, \tag{6}$$

其中 N 为地震记录的数量,Nc 为反演中使用的波形分量数量,V_i^n 为实际地震记录,v_i^n 为理论地震记录. 目前,微地震监测普遍使用三分量检波器,Nc 大多数情况可以默认为 3.

为最大化利用波形信息,引入实际观测的 P 波初动极性和 P/S 波振幅比等信息作为约束(谭玉阳等,2019),据此构建改进的目标函数:

$$\begin{aligned} F=\sum_{n=1}^{N}\sum_{i=1}^{Nc}\{&\alpha_1\|V_i^n-v_i^n\|_2-\alpha_2(V_i^n\otimes v_i^n)_{\max}+ \\ &\alpha_3 f[P(V_i^n),P(v_i^n)]+\alpha_4 h[R(V_i^n),R(v_i^n)]\}, \end{aligned} \tag{7}$$

其中符号 P 代表求取 P 波初动极性,R 代表求取纵横波振幅比,$f[P(V_i^n),P(v_i^n)]$表示实际和理论地震

记录 P 波初动极性的拟合差,$h[R(V_i^n),R(v_i^n)]$ 表示实际和理论地震记录纵横波振幅比的拟合差,$\otimes$ 表示互相关运算,$\alpha_1 \sim \alpha_4$ 为对应项的权值系数. 根据目标函数,采用全局优化算法进行迭代反演,最终获得矩张量及断层面解.

随机选择一组震源机制开展地应力反演,为求取应力张量,假设断层面的剪切应力与滑动方向差值最小,采用 Michael 线性反演(Vavryčuk *et al.*, 2013;Vavryčuk,2014),用矩阵形式表达为:

$$\boldsymbol{GT} = s \ , \tag{8}$$

其中,$\boldsymbol{G}$ 是根据每个震源机制的断层法向向量求取的矩阵,$\boldsymbol{T}$ 为断层面待求取的应力张量,s 为断层面的滑动方向. 采用 L2 范数的广义线性反演求取应力张量 $\boldsymbol{T}$.

应力张量 $\boldsymbol{T}$ 可以由对称二阶张量表征,引入三个互相垂直的主应力 σ_1、σ_2、σ_3(特征值),简化应力场的表述为:

$$\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} . \tag{9}$$

采用参数 I 量化断层的不稳定性,公式如下:

$$I = \frac{\tau - \mu(\sigma - \sigma_1)}{\tau_c - \mu(\sigma_c - \sigma_1)} \ , \tag{10}$$

式中,μ 为摩擦系数,τ_c 和 σ_c 为最优断层面剪切应力与有效正应力,τ 和 σ 为待分析断面相应值. 选取 I 值较大的作为真实断层面,使用公式(8)、(10)迭代反演,获得应力参数,根据应力参数自动输出微地震事件的唯一震源机制解,继而根据多个震源机制解对裂缝特征进行统计分析.

需要注意的是在进行微地震事件选择时,需要选择同一压裂层段或相近压裂层段事件,确保地应力没有明显差异. 对于不同井或者压裂目的层距离过大的情况,应分别选择各自的事件集,然后按照此计算流程分别计算震源机制.

2　应用实例

本文以东部某碳酸盐岩型干热岩水力压裂微地震震源机制计算为例. 碳酸盐岩目标热储层深度在 4400 ~5200 m,灰岩段岩石相对致密,白云岩段裂隙较为发育.

微地震监测采用地面监测方式,以压裂井 A1 为中心 5 km 范围内布设 46 个监测台站,组成放射性观测系统,具体布设见图 2. 监测台站配备主频 4.5 Hz 的三分量检波器,采用"太阳能 + 蓄电池"双

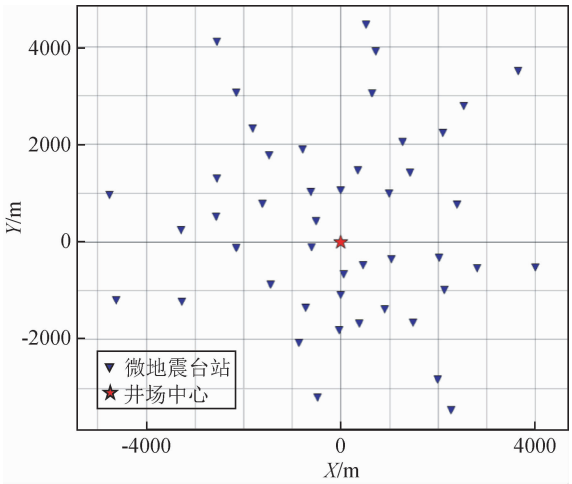


图 2　微地震观测系统图

Fig. 2　Diagram of microseismic observation system

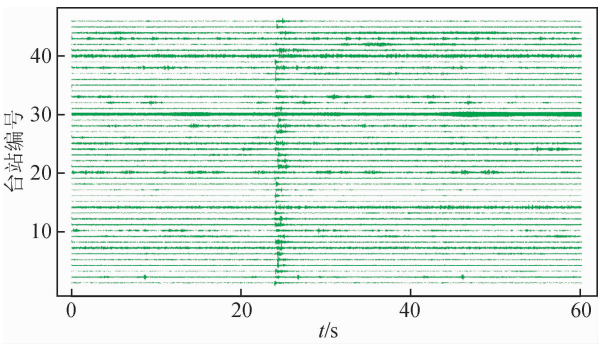


图 3　微地震事件波形图

Fig. 3　Waveform diagram of microseismic events

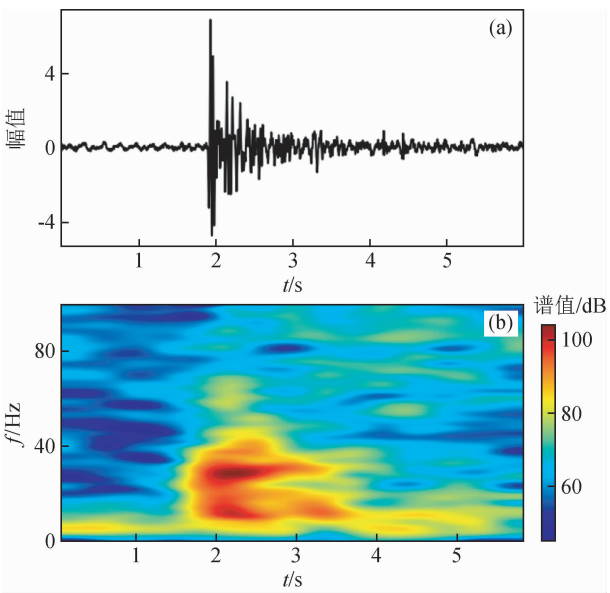


图 4　微地震频谱分析

(a)微地震波形;(b)频谱分析.

Fig. 4　Microseismic spectrum analysis

(a) Microseismic waveform; (b) Spectrum analysis.

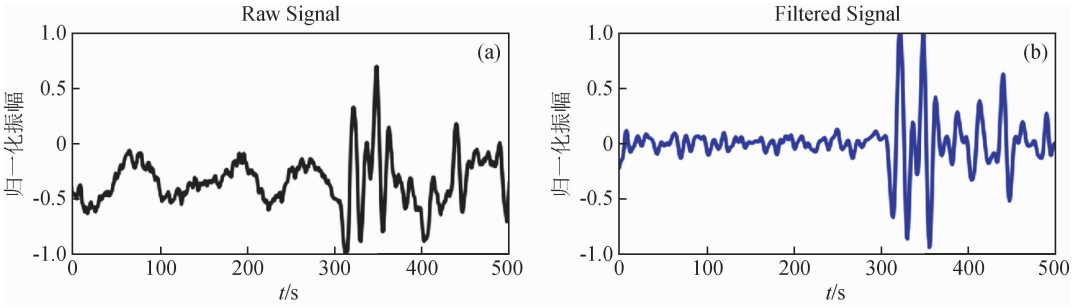


图 5 微地震波形对比

(a)原始数据;(b)滤波数据.

Fig. 5 Comparison of microseismic waveforms

(a) Raw signal; (b) Filtered signal.

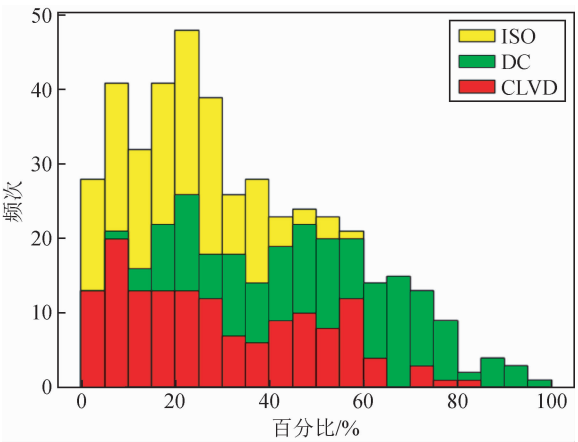


图 6 震源机制成分统计直方图

Fig. 6 Statistical histogram of focal mechanism components

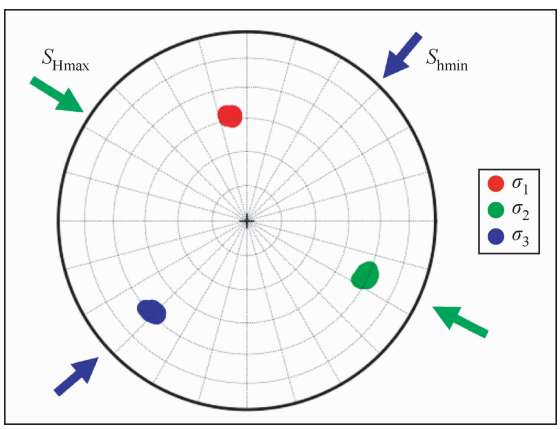


图 7 应力轴置信度分布图

Fig. 7 Confidence of principal stress axes

供电模式,保证 24 h 连续监测,并具备 4G 数据实时传输功能.

本次选用某一段水力压裂过程中的 145 个微地震事件,压裂目标层深度 4500 ~ 4575 m,压裂液量 3000 方. 微地震波形记录见图 3 所示,台站之间到时差较小. 微地震波形频谱分析见图 4 所示,有效信号频率主要集中在 15 ~ 45 Hz,远高于天然地震主频. 本次使用带通滤波进行噪声压制,通道选择为 10 ~ 80 Hz,可以有效压制低频干扰,且对有效信号损伤较小(图 5).

震源机制计算对于微地震信噪比有一定要求,当信噪比较低时,难以获得准确的震源机制,本次选择了矩震级大于 -0.5(M_W > -0.5)的 145 个微地震事件进行震源机制计算. 为了便于展现计算过程,选择其中 9 个微地震事件作为示例,微地震事件信息见表 1,其中 X、Y、Z 为微地震空间坐标,单位为米.

表 1 微地震事件信息表

Table 1 Information table of microseismic events

编号	X	Y	Z	M_W
1	-156.7	292.7	-4558	-0.07904
2	-285.4	300.3	-4641.3	0.241115
3	-3.8	317.1	-4562.3	0.119081
4	-44.2	-145.5	-4714.5	-0.16732
5	216.6	-207.4	-4480.6	-0.16186
6	1.7	131.7	-4672.8	0.663468
7	242.8	-92.6	-4525.2	-0.06859
8	-88.3	216.1	-4400.2	-0.01209
9	168.1	-366.3	-4425.5	0.776555

采用多约束矩张量反演,获得矩张量参数,进而根据公式(3)获得 DC(双力偶)、ISO(各向同性)、CLVD(补偿矢量偶极)三者成分. 具体信息见表 2,其中 m11 ~ m23 为矩张量的 6 个独立参数.

表 2　矩张量参数表

Table 2　Parameter table of moment tensor

编号	iso	clvd	dc	m11	m22	m33	m12	m13	m23
1	5.02	23.70	71.28	-1.14E+09	6.50E+09	-3.81E+09	5.30E+09	-5.14E+09	-1.70E+09
2	-24.88	0.61	74.51	-3.79E+09	-3.00E+09	-9.86E+09	6.94E+09	-1.46E+10	-1.89E+09
3	-15.87	4.57	79.56	-4.78E+09	-1.62E+08	-2.04E+09	1.16E+10	-2.26E+09	-1.77E+09
4	-24.94	-46.70	28.36	-3.66E+09	-1.31E+09	4.28E+08	3.29E+09	1.60E+08	-1.13E+09
5	-37.36	-20.73	41.91	-3.12E+09	-6.01E+08	-1.55E+09	1.77E+09	1.64E+09	9.84E+07
6	-48.91	11.67	39.42	-3.74E+10	-6.27E+10	1.18E+09	-3.74E+09	-1.04E+09	4.00E+09
7	-28.13	-3.45	68.42	-3.02E+08	-1.75E+09	-8.54E+09	5.42E+09	-5.39E+09	1.34E+09
8	-50.32	-14.51	35.17	-3.77E+09	-1.63E+09	-8.63E+08	8.08E+08	7.66E+08	4.58E+08
9	-10.66	-57.48	31.86	-3.20E+10	7.33E+10	-1.14E+11	2.71E+10	-1.48E+11	-2.37E+10

对所有微地震事件的矩张量成分进行统计分析,震源机制成分统计直方图见图 6. 震源机制成分表明,微地震裂缝以张性缝和剪切缝为主,部分裂缝为纯剪切缝.

震源机制相应断层面解(走向、倾角、滑动角)有两组,具体见表 3,其中 strike、dip、rake 分别代表走向、倾角、滑动角,单位均为度;数字 1、2 分别代表第一组、第二组. 此时,每个震源机制沙滩球均有两个断层面解.

表 3　震源机制断层面解

Table 3　Fault plane solutions of focal mechanisms

编号	strike1	dip1	rake1	strike2	dip2	rake2
1	119.643	71.306	-130.777	9.25642	44.1672	-27.3878
2	100.906	81.7939	-113.447	352.689	24.7643	-19.9224
3	274.923	82.9052	168.554	6.35525	78.6426	7.23726
4	17.1254	70.3719	32.5974	275.002	59.5073	157.056
5	286.135	89.6625	-143.62	195.886	53.6203	-0.41915
6	174.225	48.4242	93.1696	349.454	41.6745	86.4334
7	99.2572	67.6596	-127.043	342.526	42.4152	-34.3011
8	99.3549	62.7998	126.447	221.109	44.3201	40.8627
9	119.612	75.9745	-114.371	1.46562	27.9033	-31.1894

利用 145 个微地震的震源机制按照流程进行反演,经过 6 次迭代,获得稳定的地应力参数信息,地应力场分布如图 7 所示,具体参数见表 4. 最大水平主应力 S_{Hmax} 方向为北西-南东向,方位为 115.8°(NW64.2°),储层应力相对大小为 $S_v > S_{Hmax} > S_{hmin}$,在此种地应力的背景中,水力裂缝破裂机制以正断层和走滑断层为主. 对应的最佳断层产状有两组,一组走向、倾角、滑移角分别为 302.79°、78.76°、122.17°;另一组为 339.36°、41.62°、-38.17°.

表 4　地应力参数

Table 4　In-situ stress parameters

应力轴	方位/(°)	俯角/(°)	形状因子
$\sigma_1(S_v)$	351.28	42.77	
$\sigma_2(S_{Hmax})$	115.80	31.48	0.74
$\sigma_3(S_{hmin})$	227.43	31.05	

最终确定最佳震源机制断层面解,具体如表 5 所示,表中 NF 代表正断层、SS 代表走滑断层、TF 代表逆断层. 9 个微地震事件的最终震源机制分布如图 8 所示,所有震源机制均已明确类型及断层面.

表 5　最终震源机制参数

Table 5　Final focal mechanism parameters

编号	strike	dip	rake	类型
1	9.25642	44.1672	-27.3878	NF
2	352.689	24.7643	-19.9224	NF
3	6.35525	78.6426	7.23726	SS
4	275.002	59.5073	157.056	SS
5	286.135	89.6625	-143.62	SS
6	349.454	41.6745	86.4334	TF
7	342.526	42.4152	-34.3011	NF
8	221.109	44.3201	40.8627	TF
9	1.46562	27.9033	-31.1894	NF

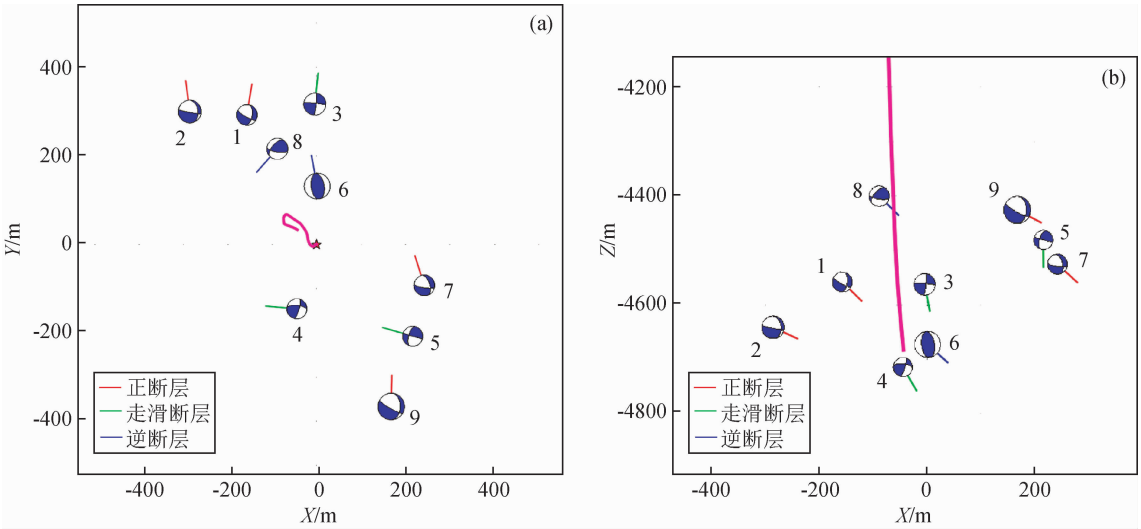


图 8 微地震震源机制展示图

(a)*XY* 俯视图;(b)*XZ* 侧视图.

Fig. 8 Display diagram of microseismic focal mechanisms

(a) *XY* top view; (b) *XZ* side view.

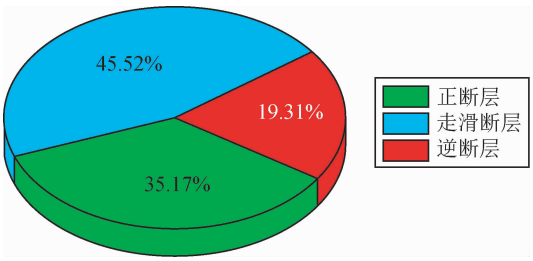


图 9 微地震事件性质占比图

Fig. 9 Proportion diagram of microseismic event properties

所有微地震事件的性质占比统计如图 9 所示.裂缝破裂性质以正断层、走滑断层为主,分别占比 35.2%、45.5%,两者共计占比 80.7%,得到统计规律与震源机制成分统计结果、地应力场分布情况相吻合.

将所有微地震的最终震源机制信息进行统计分析,可以获得此段水力裂缝的性质特征,如图 10 所示,结果表明:震源机制解给出的裂缝倾角-方位玫瑰图揭示裂缝优势走向北西向(300°~340°),压裂井东南区域以高角度裂缝为主,西北区域以中高角度裂缝为主.

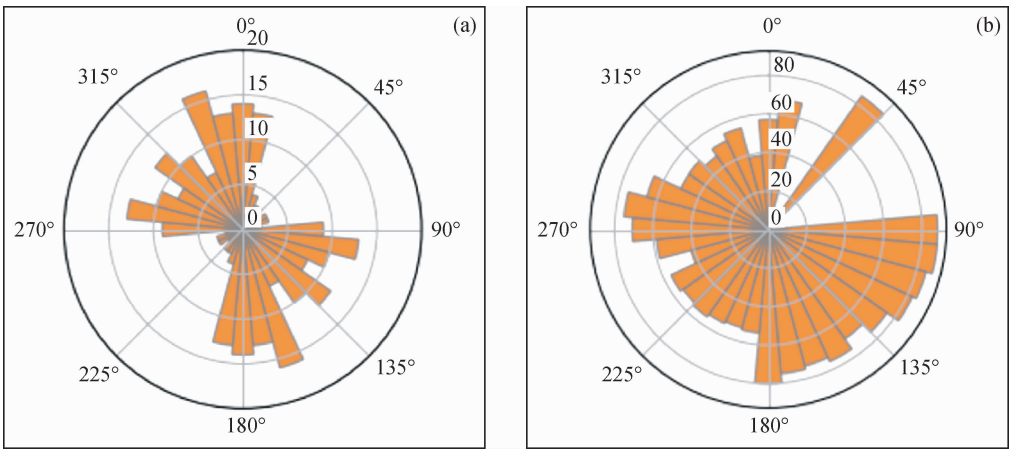


图 10 基于震源机制解的破裂面统计

(a)方位角玫瑰图;(b)倾角-方位角玫瑰图.

Fig. 10 Statistics of rupture planes based on focal mechanism solutions

(a) Rose diagram of azimuths; (b) Rose diagram of dip-azimuths.

3 结　论

针对干热岩水力压裂微地震能量弱、事件密集、成因复杂的特点,本文总结提出适用于干热岩水力压裂微地震震源机制反演方法,通过融合 P 波初动极性、纵横波振幅比与全波形信息构建多约束目标函数,并引入应力场迭代反演自动确定最佳断层面,有效规避了人为选择的不确定性.

以东部某碳酸盐岩干热岩为例,对 145 个微地震事件($M_W > -0.5$)进行震源机制计算,震源机制成分统计结果表明,微地震裂缝以张性缝和剪切缝为主,部分裂缝为纯剪切缝;基于震源机制解的裂缝倾角-方位玫瑰图揭示裂缝优势走向北西向(300°~340°),压裂井东南区域以高角度裂缝为主,西北区域以中高角度裂缝为主.

本文所提出的干热岩水力压裂微地震震源机制反演方法可实现微地震震源机制的高效批量解算,获得微地震裂缝性质及扩展规律,为干热岩压裂优化指明方向.

致　谢　感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Aki K, Richards P G. 1980. Quantitative Seismology, Vol. 1: Theory and Methods. New York: W H Freeman & Co.

Chen J L, Zheng Y, Zhang L, *et al*. 2020. Focal mechanism solutions of the 2014 Ludian M_S6.5 earthquake sequence derived from multiple-bandwidth waveform fitting. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 63(4): 1472-1483, doi: 10.6038/cjg2020N0386.

Chen X Q, Wang R Q, Jiang Y Y, *et al*. 2019. Sensitivity of stress inversion to complexity of the stress field in micro-seismic monitoring of hydrofracturing. Petroleum Science Bulletin (in Chinese), 4(1): 27-40, doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2019.01.003.

Cui Z, Li H Y, Zheng L J, *et al*. 2023. Review of microseismic inversion methods for hydraulic fracturing. Journal of Jilin University (Information Science Edition) (in Chinese), 41(4): 653-666, doi: 10.19292/j.cnki.jdxxp.20230515.005.

Gan H N, Wang G L, Lin W J, *et al*. 2020. Research on the status quo of environmental geology impact of enhanced geothermal system and countermeasures. Journal of Geomechanics (in Chinese), 26(2): 211-220, doi: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.02.020.

Hu X H, Sheng S Z, Wan Y G, *et al*. 2020. Study on focal mechanism and post-seismic tectonic stress field of the Changning, Sichuan, earthquake sequence on June 17th 2019. Progress in Geophysics (in Chinese), 35(5): 1675-1681, doi: 10.6038/pg2020DD0378.

Li H, Chang X. 2021. A review of the microseismic focal mechanism research. Science China Earth Sciences, 64(3): 351-363, doi: 10.1007/s11430-020-9658-7.

Li L, Tan J Q, Wood D A, *et al*. 2019. A review of the current status of induced seismicity monitoring for hydraulic fracturing in unconventional tight oil and gas reservoirs. Fuel, 242: 195-210, doi: 10.1016/j.fuel.2019.01.026.

Liang C T, Yu Y Y, Yang Y H, *et al*. 2016. Joint inversion of source location and focal mechanism of microseismicity. Geophysics, 81(2): KS41-KS49, doi: 10.1190/geo2015-0272.1.

Sipkin S A. 1986. Interpretation of non-double-couple earthquake mechanisms derived from moment tensor inversion. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 91(B1): 531-547, doi: 10.1029/JB091iB01p00531.

Tan Y Y, Hu J, Zhang H J, *et al*. 2019. Source mechanism determination for hydraulic fracturing induced seismicity using full-waveform matching. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 62(11): 4417-4436, doi: 10.6038/cjg2019M0516.

Tang J, Wen L, Li C, *et al*. 2019. Hydraulic-fracturing shear-tensile microseismic focal mechanism moment tensor inversion. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 54(4): 826-835, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2019.04.013.

Tang J, Liu Y C, Han S Y, *et al*. 2022. Microseimic forward modeling and full-waveform inversion of focal mechanisms for viscoelastic vertically transverse isotropic media. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 65(1): 301-319, doi: 10.6038/cjg2022P0046.

Vavryčuk V, Bouchaala F, Fischer T. 2013. High-resolution fault image from accurate locations and focal mechanisms of the 2008 swarm earthquakes in West Bohemia, Czech Republic. Tectonophysics, 590: 189-195, doi: 10.1016/j.tecto.2013.01.025.

Vavryčuk V. 2014. Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms. Geophysical Journal International, 199(1): 69-77, doi: 10.1093/gji/ggu224.

Vavryčuk V. 2015. Moment tensor decompositions revisited. Journal of Seismology, 19(1): 231-252, doi: 10.1007/s10950-014-9463-y.

Wang G L, Lu C. 2023. Stimulation technology development of hot dry rock and enhanced geothermal system driven by carbon neutrality target. Geology and Resources (in Chinese), 32(1): 85-95, 126, doi: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2023.01.011.

Wen S S, Yin C, Shi X W, *et al*. 2023. Multi-scale rupture characteristics dominated by pre-existing fractures of Longmaxi shale during hydraulic fracturing in Luzhou block. Progress in Geophysics (in Chinese), 38(5): 2172-2181, doi: 10.6038/pg2023HH0004.

Wu S C, Huang X Q, Chen F, *et al*. 2016. Moment tensor inversion of rock failure and its application. Rock and Soil Mechanics (in Chinese), 37(S1): 1-18, doi: 10.16285/j.rsm.2016.S1.001.

Xu T F, Wen D G, Yuan Y L. 2024. Technical challenges and strategy of geothermal energy development from hot dry rock. Earth Science (in Chinese), 49(6): 2131-2147, doi: 10.3799/dqkx.2023.047.

Xu Y C, Guo X Y. 2023. Source parameters of the M_S6.1 Lushan earthquake on June 1, 2022 in Sichuan Province and its tectonic implications. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 66(8): 3202-3217, doi: 10.6038/cjg2022Q0454.

Yu Y Y, Liang C T, Du Y, *et al*. 2021. Analysis of shale gas hydraulic fracturing effect and stress state based on joint inversion algorithm (JSSA) of microseismic location and focal mechanism. Earthquake Research in China (in Chinese), 37(2): 273-284, doi: 10.3969/j.issn.1001-4683.2021.02.003.

附中文参考文献

陈俊磊, 郑勇, 张路, 等. 2020. 基于分频波形拟合方法的鲁甸 M_S6.5 地震序列震源机制解研究. 地球物理学报, 63(4): 1472-1483, doi: 10.6038/cjg2020N0386.

陈筱青, 王润秋, 江勇勇, 等. 2019. 水力压裂微地震监测中应力场的复杂性对应力反演的影响. 石油科学通报, 4(1): 27-40, doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2019.01.003.

崔喆, 李含阳, 郑路佳, 等. 2023. 水力压裂微地震反演方法综述. 吉林大学学报(信息科学版), 41(4): 653-666, doi: 10.19292/j.cnki.jdxxp.20230515.005.

甘浩男, 王贵玲, 蔺文静, 等. 2020. 增强型地热系统环境地质影响

现状研究与对策建议. 地质力学学报, 26(2): 211-220, doi: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.02.020.

胡晓辉, 盛书中, 万永革, 等. 2020. 2019 年 6 月 17 日四川长宁地震序列震源机制与震源区震后构造应力场研究. 地球物理学进展, 35(5): 1675-1681, doi: 10.6038/pg2020DD0378.

李晗, 常旭. 2021. 微地震震源机制研究进展. 中国科学: 地球科学, 51(3): 325-338, doi: 10.1360/SSTe-2020-0081.

谭玉阳, 胡雄, 张海江, 等. 2019. 利用全波形匹配方法确定水力压裂诱发地震震源机制. 地球物理学报, 62(11): 4417-4436, doi: 10.6038/cjg2019M0516.

唐杰, 温雷, 李聪, 等. 2019. 水力压裂诱发的剪张型微地震震源机制矩张量反演方法. 石油地球物理勘探, 54(4): 826-835, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2019.04.013.

唐杰, 刘英昌, 韩盛元, 等. 2022. 黏弹性 VTI 介质微地震正演模拟与震源机制全波形反演. 地球物理学报, 65(1): 301-319, doi: 10.6038/cjg2022P0046.

王贵玲, 陆川. 2023. 碳中和目标驱动下干热岩和增强型地热系统增产技术发展. 地质与资源, 32(1): 85-95, 126, doi: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2023.01.011.

文山师, 尹陈, 石学文, 等. 2023. 天然裂缝主导模式下泸州龙马溪组页岩水力压裂多尺度破裂特征. 地球物理学进展, 38(5): 2172-2181, doi: 10.6038/pg2023HH0004.

吴顺川, 黄小庆, 陈钒, 等. 2016. 岩体破裂矩张量反演方法及其应用. 岩土力学, 37(S1): 1-18, doi: 10.16285/j.rsm.2016.S1.001.

许天福, 文冬光, 袁益龙. 2024. 干热岩地热能开发技术挑战与发展战略. 地球科学, 49(6): 2131-2147, doi: 10.3799/dqkx.2023.047.

许英才, 郭祥云. 2023. 2022 年 6 月 1 日四川芦山 M_S6.1 地震的震源参数及其构造启示. 地球物理学报, 66(8): 3202-3217, doi: 10.6038/cjg2022Q0454.

余洋洋, 梁春涛, 杜瑶, 等. 2021. 基于微地震定位与震源机制联合反演算法(JSSA)分析页岩气水力压裂效果及应力状态. 中国地震, 37(2): 273-284, doi: 10.3969/j.issn.1001-4683.2021.02.003.