引用格式：肖海帆，武凝雨，高桂云，等，2025. 基于线性化拟合的水压致裂特征压力参数判定方法[J]. 地质力学学报，31（6）：1282−1295. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025091

Citation: XIAO H F，WU N Y，GAO G Y，et al.，2025. A method for determining characteristic pressure parameters during hydraulic fracturing based on linearized fitting[J]. Journal of Geomechanics，31（6）：1282−1295. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025091

基于线性化拟合的水压致裂特征压力参数判定方法

肖海帆[1]，武凝雨[1]，高桂云[1]，刘冀昆[2]，杨鑫帅[2]，黄晓盼[1]

XIAO Haifan[1]，WU Ningyu[1]，GAO Guiyun[1]，LIU Jikun[2]，YANG Xinshuai[2]，HUANG Xiaopan[1]

1. 应急管理部国家自然灾害防治研究院，北京 100085；
2. 中国地质大学（北京）工程技术学院，北京 100083

1. *National Institute of Natural Hazards*, *Ministry of Emergency Management*, *Beijing* 100085, *China*;
2. *School of Engineering and Technology*, *China University of Geosciences* (Beijing), *Beijing* 100083, *China*

A method for determining characteristic pressure parameters during hydraulic fracturing based on linearized fitting

Abstract: ［**Objective**］Hydraulic fracturing is a fundamental technique for in-situ stress measurement, yet conventional methods of interpreting the instantaneous shut-in pressure (p_s) and reopening pressure (p_r) are often sensitive to noise, strongly subjective, and inadequate for facing nonlinear pressure–time responses. To address the lack of objective, robust, and high-accuracy identification methods, this study proposes a linearized curve-fitting approach capable of automatically determining key characteristic pressures from complex fracturing curves. ［**Methods**］The method transforms a nonlinear pressure–time curve into multiple locally linear segments through polynomial smoothing, adaptive sliding-window regression, and statistical slope-change detection. Significant slope mutations are used to automatically identify p_s during the shut-in decay stage and p_r during the re-pressurization stage. The method is validated using true-triaxial hydraulic fracturing laboratory tests on granite and field tests at the Jizhou pumped-storage power station (75–277 m depth). ［**Results**］Across six granite specimens (HF2–HF9), the proposed method consistently produced p_r values between those obtained by the single-tangent and shifted-p_b methods, avoiding the low–high systematic bias of the two techniques. For p_s, the method yielded similar or more conservative results than traditional methods, with most absolute deviations <0.40 MPa. The method demonstrated strong consistency across varying stress states and significantly reduced subjective scatter. The principal stresses calculated from p_s and p_r showed physically reasonable trends. The σ_1 errors were <30% in most cases and the behavior was stable without random jumps, indicating improved objectivity of the automated identification. In the four tested depth intervals of the LFZK02 borehole, p_r and p_s determined by traditional methods exhibited large spreads (e.g., p_r deviations >1.5 MPa and p_s deviations up to 0.74 MPa). In contrast, the linearized method consistently produced values close to the multi-method averages and with much smaller dispersion. For p_s, deviations relative to Muskat and derivative methods were typically <0.20 MPa. Using the automatically identified p_s and p_r, the derived principal stresses showed a clear horizontally compressive regime (S_H=6.55–9.85 MPa; S_h=3.54–6.21 MPa), matching regional stress data and confirming the reliability of the method in actual field conditions. ［**Conclusion**］The linearized curve-fitting method effectively overcomes the subjectivity, noise sensitivity, and model-dependence of conventional hydraulic-fracturing interpretation approaches. This method provides stable, accurate, and repeatable identification of p_s and p_r in both

基金项目：国家自然科学基金项目（42174118）

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42174118).

第一作者：肖海帆（2001—），男，在读硕士，主要研究方向为岩石力学实验以及地应力测量等方面。Email：2505430200@qq.com

通信作者：高桂云（1984—），女，研究员，主要从事实验岩石力学、灾害地质力学与地应力测量等研究工作。

Email: guiyungao@ninhm.ac.cn

收稿日期：2025−07−27；**修回日期**：2025−10−13；**录用日期**：2025−10−22；**网络出版日期**：2025−12−02；**责任编辑**：范二平

laboratory and field environments and maintains good performance under nonlinear responses, data disturbance, and multi-cycle loading–unloading conditions. [**Significance**] This study offers a robust, automated, and universally applicable tool for interpreting hydraulic-fracturing pressure curves, significantly enhancing the reliability of in-situ stress measurements and supporting the development of intelligent, standardized stress-testing systems for underground engineering.

Keywords: linearized curve fitting method; reopening pressure (p_r); instantaneous shut-in pressure (p_s); hydraulic fracturing; in-situ stress measurement

摘　要：为了提高水压致裂试验中瞬时闭合压力（p_s）与重张压力（p_r）等关键参数的识别精度，解决传统方法（如单切线法、平移 p_b 法以及马斯卡特法等）在处理非线性压力–时间曲线中易受噪声干扰、判定主观性强、识别精度不足的问题，提出了一种基于线性化拟合的参数识别方法，通过多项式平滑与分段线性回归将非线性压力–时间曲线转化为若干局部线性段，利用相邻段之间的斜率突变点自动识别 p_s 与 p_r。该方法分别在室内真三轴水压致裂试验（花岗岩试样）与天津蓟州抽水蓄能电站野外实测（深度范围为 75～277 m）中进行了验证。结果表明，线性化拟合方法在 p_s 与 p_r 识别方面具有较高的准确性与稳定性，相较于单切线法、平移 p_b 法和马斯卡特法，平均偏差明显降低，且在存在数据扰动、非线性响应较强的条件下仍表现出良好的鲁棒性。该方法有效提升了参数识别的客观性、一致性和抗干扰能力，适用于硬脆性岩体地应力测量，为水压致裂试验的数据智能识别与解释提供了实用工具，具有良好的工程实用价值和推广前景。

关键词：线性化拟合；重张压力；瞬时闭合压力；水压致裂；地应力测量

中图分类号：P31; P642.3　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2025)06−1282−14

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025091

0　引言

水力压裂不仅在非常规油气与地热资源开发中是提升产能的核心手段，也在地应力测量、围岩稳定性分析及深部地下工程安全评价中发挥着日益关键的作用(苏宏刚和罗黎明, 2023)。在地质构造复杂或深埋环境下，水压致裂过程中岩体对注入流体压力的响应，可以直观反映其应力状态与力学特征(朱明德等, 2023)。因此，压裂试验在识别主应力方向、评估储层断裂行为及地应力场反演中具备不可替代的科学价值(李剑伟和何勇, 2021)。

在压裂过程中，破裂压力(p_b)、瞬时闭合压力(p_s)和重张压力(p_r)等关键参数，是实现地应力精确反演与裂缝扩展机制解析的基础(郭文雕等, 2018; Wu et al., 2020; 程智余等, 2023)。McClure et al.(2016)指出，p_b与岩石抗拉强度高度相关，p_s常用于推算最小主应力(σ_h)，而 p_r 则定义了裂缝再次开启的阈值，对多阶段压裂导流能力评估至关重要。然而，这些参数的准确识别对实验稳定性与反演可靠性影响深远。

传统识别方法如单切线法、双切线法与导数分析法通过识别曲线上拐点或一阶导数极值判定 p_s 与 p_r(丰成君等, 2012)。这类方法操作简便，适用于现场快速分析，但对数据质量极为敏感。国际岩石力学学会试验方法委员会建议至少选用 2 种及以上的方法确定瞬时闭合压力(Haimson and Cornet, 2003)。丰成君等(2012)指出对于不同形态的压裂曲线，p_s 的常用判读方法给出结果存在一定的差异，不具有普遍的适用性。Gabry et al.(2024)基于对DFIT(诊断性压裂注入试验)数据的研究指出，裂缝闭合期间常出现非线性泄流行为，导致传统切线法在识别 p_s 和 p_r 时存在偏差，尤其误判可能达到双位数范围。此外，当压裂形成复杂分支裂缝或存在多次停泵–再注液干扰时，压力衰减偏离线性假设，导致传统判定闭合阈值的方法失效风险显著上升(Nadimi et al., 2020)。

近年来，针对传统参数判定方法的局限性，学者们在计算机辅助处理、理论模型优化与现场实测技术方面取得了显著进展。例如，为解决特征值人工判读中的主观误差与手动数据处理的重复性问题，王成虎等(2016)开发了一套地应力测量曲线特征值交互式处理软件，显著提升了测试数据处理的效率与精度。与此同时，杨跃辉等(2024)提出基于 Khristianovic-Geertsma-De Klerk 理论模型的柔度干扰修正方法，有效提高了深孔地应力反演结果的稳定性与可信度。在参数判定算法层面，安贺强等

(2013)针对重张压力与瞬时闭合压力的非线性关系，提出了基于流体流速动态监测的迭代修正模型，并通过三维有限元耦合准三维流体分析验证了算法的鲁棒性(汪华君，2003)。Zhang et al.(2025)提出，将水压致裂压力测试与微震事件定位相结合，可在裂缝初始张开与闭合阶段同步捕捉声发射信号，进而校正压力–时间曲线判点，提高 p_s 与 p_r 的判读鲁棒性。

尽管上述的地应力特征值判读方法在实际判读特征压力的工作中得到不同程度的应用，但由于水压致裂地应力测量受岩石完整性、岩性、渗透性、原生裂隙以及试验设备条件等多种因素的影响(刘允芳，1998)，导致水压致裂压裂曲线的多样性，无法采用统一的方法进行判读。同时，多循环压裂过程中压力曲线的平滑化现象(即由于岩石与流体的耦合效应及测试系统响应特性，使压裂曲线中的特征拐点变得不明显)仍对 p_s 和 p_r 的识别构成挑战。特别是在现代压裂技术趋于智能化、多物理场耦合分析与数据驱动优化的背景下，对参数识别方法的简单化、自动化、鲁棒性与高精度提出了更高要求。

基于上述问题，文章提出一种“线性化拟合”方法，旨在解决传统方法在复杂压裂曲线识别中的适应性问题。该方法基于压力–时间曲线的多项式光滑与分段线性重构，通过识别斜率突变点，自动提取 p_s 与 p_r 等关键参数，具有适应非线性变化、噪声干扰及泵停–再注等复杂工况的能力；同时进一步在室内真三轴压裂试验与野外工程中开展方法验证，并通过与传统方法的对比分析，评估其在实验与工程背景下的识别精度与应用潜力。

1 方法综述与改进思路

1.1 常用参数判定方法比较

在水压致裂试验中，破裂压力(p_b)、瞬时闭合压力(p_s)和重张压力(p_r)是反映岩体应力状态与裂缝扩展行为的关键特征参数，具有直接的工程应用价值(McClure et al., 2016)。p_b 与岩石抗拉强度高度相关，如图 1 所示；p_s 常用于推算最小主应力(σ_h)，而 p_r 则定义了裂缝再次开启的阈值。基于国际岩石力学学会试验方法委员会的建议(Haimson and Cornet, 2003)，常用的 p_s 识别方法包括单切线法、导数分析法、马斯卡特法等；常用的 p_r 识别方法主要有单切线法和平移 p_b 法等(丰成君等，2012)，各方法在实际应用中各有优劣，亟需在实验和工程实践中进一步对比与优化。

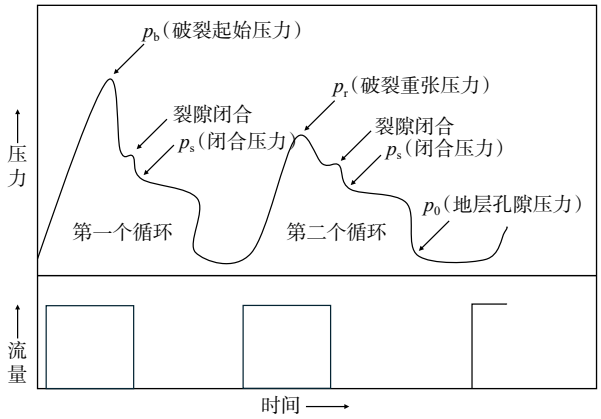


图 1 水压致裂过程中典型压力–时间曲线及关键参数(p_b、p_s、p_r)示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a typical pressure–time curve and key parameters (p_b, p_s, p_r) during hydraulic fracturing

1.1.1 单切线法求瞬时闭合压力 p_s 和重张压力 p_r

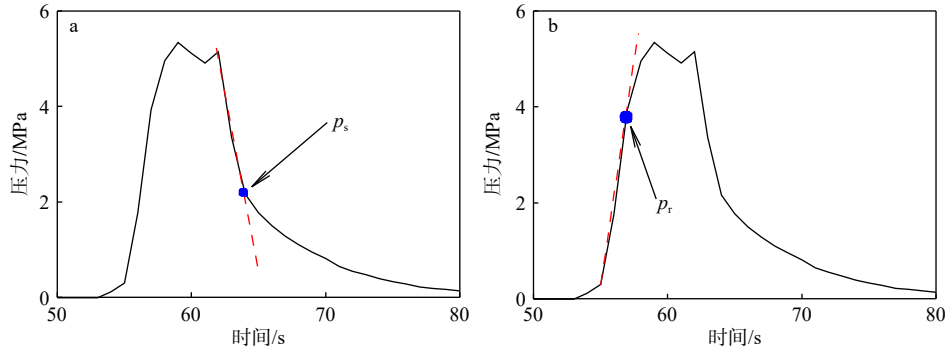
单切线法是一种广泛应用于水压致裂试验中关键参数识别的图解方法，主要用于判定 p_s 和重 p_r(徐斌等，2020；陈东升等，2023)。该方法最早由 Gronseth 提出，其基本原理是从关泵时刻起，在压力–时间曲线上拟合一条与压力衰减趋势相切的直线，当实际曲线开始偏离该切线时，对应的压力即被认为是裂缝闭合点，即 p_s，如图 2a 所示。

类似地，在升压过程中，裂缝在尚未完全张开前，压力–时间曲线呈近似线性增长。通过拟合升压曲线的直线段并观察其偏离点，可确定裂缝重新张开的临界压力，即 p_r(丰成君等，2012；邢博瑞，2014)，如图 2b 所示。

该方法操作简便，适合快速识别和现场分析，尤其在实验室条件较为理想、曲线过度清晰时具有良好适用性。然而，对于曲线变化较为复杂或变化平缓的情况，切点位置难以准确判断，可能导致识别误差。同时，该方法未考虑系统柔性与噪声干扰等因素，易造成临界点识别不稳定。

1.1.2 马斯卡特法求瞬时闭合压力(p_s)

马斯卡特法是一种非线性回归方法，专门用于处理复杂的水压致裂曲线。该方法通过建立非线性模型来拟合压力数据，从而提取 p_s(陈群策等，2001；丰成君等，2012)。其理论基础是：假设裂缝闭合后其本身不渗漏，流体将通过钻孔孔壁渗流到多孔岩石中，压力衰减服从如下指数函数：



a—降压阶段识别瞬时闭合压力(p_s)；b—升压阶段识别重张压力(p_r)

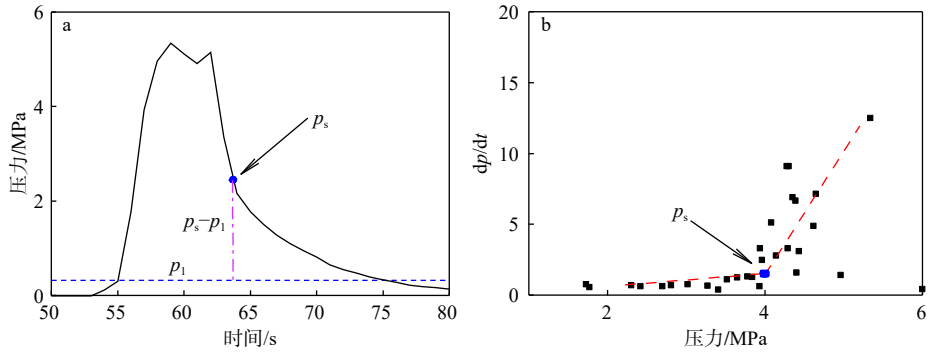
图 2　单切线法识别特征压力的原理示意图

Fig. 2　Schematic diagrams illustrating the principle of identifying characteristic pressures using the single tangent methode

(a) Identification of the instantaneous shut-in pressure p_s during the pressure decline stage; (b) Identification of the reopening pressure p_r during the pressurization stage

$$p = \exp(a_1 t + b_1) + p_1 \quad (t \geqslant t_c) \tag{1}$$

式中，p—钻孔内瞬时压力；a_1—指数衰减速率系数(a_1 <0)，决定压力下降的快慢；b_1—指数项的截距常数，用于调节曲线在初始时刻的水平；p_1—压力衰减趋近的稳定值或残余压力；t—关泵后的时间，表示从停止注水瞬间开始压力随时间衰减的过程；t_c—关泵以后至水压裂缝完全闭合的时间。从关泵那一点开始进行非线性回归，在进行回归的过程中，参与拟合的初始压力点逐次向下递推，最后在指定的区间内得到最佳的指数衰减拟合曲线。将该拟合曲线推回到开始关泵的那一点，这点的压力就为 p_s，如图 3a 所示。



p_1—压力衰减趋近的稳定值或残余压力

a—马斯卡特法的非线性回归拟合；b—导数分析法的 dp/dt–压力曲线

图 3　基于不同方法识别瞬时闭合压力（p_s）的原理示意图

Fig. 3　Schematic diagrams illustrating the principle of identifying the instantaneous shut-in pressure using different methods

(a) Nonlinear regression fitting based on the Muskat method; (b) The dp/dt–p curve based on the derivative analysis method

p_1 – the stabilized or residual pressure that the pressure drawdown tends toward

马斯卡特法的优点在于能够较好地处理非线性数据，提供更为精确的结果；但其计算复杂度较高，并且对模型的准确性有较高的要求。

1.1.3　导数分析法求瞬时闭合压力（p_s）

Lee and Haimson（1989）根据马斯卡特应力衰减理论，提出在关泵至裂隙完全闭合期间，钻孔内压力衰减仍满足指数函数形式（邢博瑞，2014），即

$$p = \mathrm{e}^{bt+c} + p_{a1} \quad (p < p_s) \tag{2}$$

$$p = \mathrm{e}^{ft+g} + p_{a2} \quad (p \geqslant p_s) \tag{3}$$

式中，p—钻孔内瞬时压力；t—关泵后的时间，表示从停止注水瞬间开始压力随时间衰减的过程；p_s—瞬时闭合压力；b、f—压力衰减指数，反映压力下降速率(b、f< 0)；c、g—指数项常数，与初始压力条件相关；p_{a1}、p_{a2}—两阶段压力衰减的渐近值，对应

裂缝闭合前后不同的压力基准水平。公式(2)和(3)对 t 求导可得:

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t} = be^{bt+c} \quad (p < p_s) \tag{4}$$

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t} = fe^{ft+g} \quad (p \geqslant p_s) \tag{5}$$

将公式(4)和(5)代入(2)和(3)可得:

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t} = b(p - p_{a1}) \quad (p < p_s) \tag{6}$$

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t} = f(p - p_{a2}) \quad (p \geqslant p_s) \tag{7}$$

由公式(6)和(7)可知,$\mathrm{d}p/\mathrm{d}t$–p 曲线可近似看成 2 条直线,其交点即为瞬时闭合点。由此选取关泵后应力衰减数据,求取其 $\mathrm{d}p/\mathrm{d}t$ 并任意分为 2 组,分别对 p 进行线性拟合,选取其中总残差最小的 2 条直线,这 2 条直线交点的应力值,即为瞬时闭合压力,如图 3b 所示。

该方法便于实现程序化处理,近年来在自动化数据分析中应用较多。但由于其对数据采样频率、曲线平滑性及噪声水平高度敏感,尤其在现场测试中容易受到仪器分辨率和施工扰动的影响,识别结果往往波动较大。

1.1.4 平移 p_b 法求重张压力 p_r

平移 p_b 法的基本原理是通过比较初压循环与重张循环的加载曲线差异来确定重张压力(p_r)。根据经典水压致裂理论,两者满足如下关系:

$$p_b = p_r + T \tag{8}$$

式中,p_b—破裂压力;T—岩石抗拉强度。

当裂隙重新开启前,初压曲线与重张曲线在升压初期均呈现近似线性增长趋势。由于初压阶段岩石发生破裂,其抗拉强度(T)趋于 0,在随后的重张过程中,裂缝受外部应力作用快速开启,表现为裂缝体积变化速率大于 0,导致重张曲线斜率下降并逐渐偏离初压直线。当重张曲线偏离初压直线时,对应的压力即被判定为 p_r(邢博瑞, 2014),如图 4 所示。这一方法操作简单,能够快速得到 p_r 值,适用于现场数据的初步分析。同时,相较于其他复杂方法,平移 p_b 法在数据处理和计算上具有较高的效率。但需要注意的是,裂缝闭合过程常伴随非弹性变形和粗糙面啮合效应,使得再次加载曲线难以与初始加载曲线完全重合,以此判别 p_r 误差太大;此外,p_b 的识别误差也会直接传递至 p_r 的判定。因此,平移 p_b 法虽能提供一种直观简便的判别途径,但其可靠性与普适性受到限制。

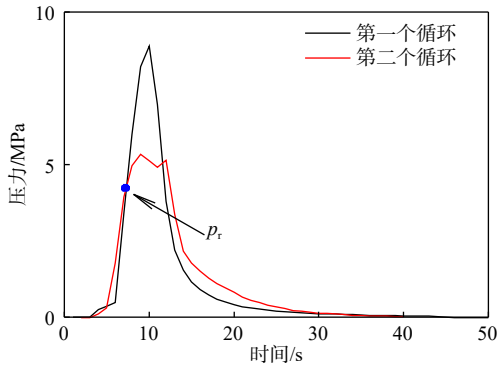


图 4 平移 p_b 法识别重张压力(p_r)的原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram illustrating the principle of identifying the reopening pressure p_r using the shifted p_b method

综上所述,现有方法在标准条件下均能实现对 p_s 或 p_r 的有效识别,但在非线性曲线响应、数据含噪或裂缝演化过程复杂等现实工程背景下,普遍存在操作复杂、识别误差大和重复性差的问题。因此,亟需一种具备高鲁棒性与适应性的参数识别方法,以提升关键参数的识别精度并扩展其适用范围。

1.2 线性化拟合法

正如上述,在水压致裂地应力测量中,准确判定 p_s 和 p_r 至关重要,传统方法常依赖人工判读,受主观因素影响较大。为提高计算精度并减少人为误差,文中提出了一种基于“化曲为直”思想的线性化拟合方法,融合了多项式拟合、插值处理与分段线性回归等数学工具,旨在将非线性特征显著的压力–时间曲线进行局部线性分段处理,通过“预处理–自适应滑动窗口–稳健斜率估计–统计突变检验–物理约束”的四步策略,实现关键点的自动识别。

该方法首先对原始压力–时间数据进行去噪与平滑(如三点移动平均或 Savitzky-Golay),剔除显著离群点。采样频率不足时采用线性插值到统一时间步长,以避免窗口内样本数不足。随后采用自适应滑动窗口,以初始时间窗(Δt_0)(建议 0.5～1.0 s)或压力窗(Δp_0)(建议 0.05～0.10 MPa)起步,步长取窗口长度的 20%～50%。对每个窗口做线性回归并计算决定系数(R^2):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \tag{9}$$

式中,y_i—观测值;$\hat{y}_i$—线性回归预测值;$\bar{y}$—观测值平均值;i—数据点索引($i = 1,2,\ldots,n$)。若 R^2 小于 0.985,则自动扩窗;若 R^2 大于等于 0.985,则尝试缩窗知道满足最小样本数,以实现“噪声区间大窗稳健拟合、平稳区间小窗细节保留”。

在每个窗口内，采用最小二乘估计斜率（a_i）与截距（b_i）：

$$a_i = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \tag{10}$$

$$b_i = \bar{y} - a_i \bar{x} \tag{11}$$

式中，x_i—自变量（此方法中为时间 t 或压力 p，取决于所分析的曲线类型）；$\bar{x}$—自变量平均值；a_i—第 i 个窗口的局部斜率；b_i—第 i 个窗口的截距；其余变量含义同上。

其标准误差为：

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^{n} \left[y_i - (a_i x_i + b_i) \right]^2 \tag{12}$$

$$SE(a_i) = \sqrt{\frac{\sigma^2}{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}} \tag{13}$$

式中，σ^2—回归残差的方差估计；σ—残差标准差；$SE(a_i)$—斜率估计值的标准误差，用于衡量斜率估计的精确性；n—窗口内的数据点数；其余变量含义同上。相邻窗口斜率差（Δa_i）定义为：

$$\Delta a_i = |a_{i+1} - a_i| \tag{14}$$

并引入标准化统计量（Z_i）：

$$Z_i = \frac{\Delta a_i}{\sqrt{SE(a_{i+1})^2 + SE(a_i)^2}} \tag{15}$$

同时设鲁棒阈值：

$$\tau = 3 \cdot MAD(\Delta a_i) \tag{16}$$

式中，τ—动态阈值（类似于“3σ法则”），MAD—中位数绝对偏差。若 Z_i 大于 2.58 或 Δa_i 大于 τ，则判定点为显著斜率突变点。结合裂缝闭合与重张的物理过程，可以将其对应压力分别识别为 p_s 或 p_r，线性化拟合的整体实现流程如图 5 所示。

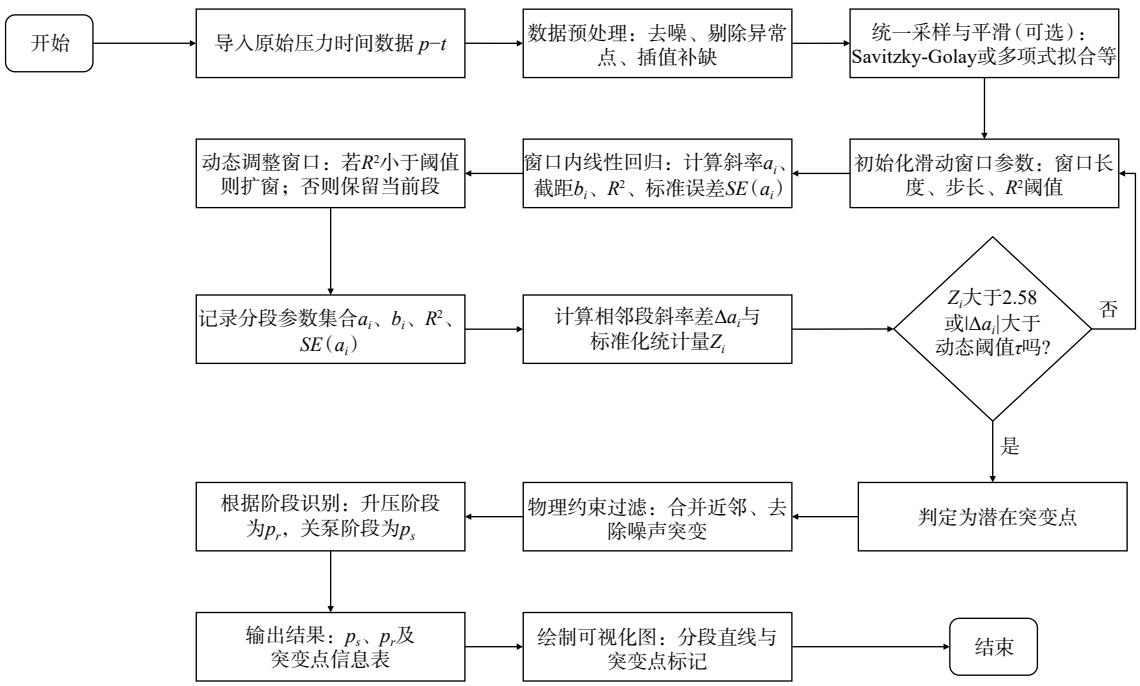


图 5　线性化拟合的整体实现流程图

Fig. 5　Flowchart of the overall implementation of the linearized curve-fitting method

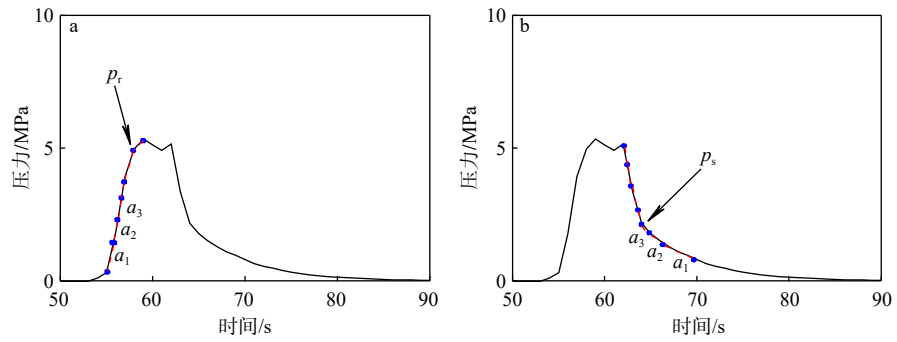
在升压阶段，斜率显著变化点，即斜率变化率（Δa_i）达到最大值的点对应裂缝重张，可确定 p_r 的结果，如图 6a 所示；在降压阶段，对应于关井后的压力衰减曲线上，识别斜率突变点反映裂缝闭合，可确定 p_s 结果，如图 6b 所示。

该方法通过将复杂的非线性曲线转换为一系列易于分析的线性段，不仅简化了数据结构，也为斜率突变识别提供了明确依据。与传统依赖人工切线判断的方法相比，线性化拟合方法具有更强的客观性和自动化能力，显著提升了关键参数识别的准确性与重复性。

2　适用性研究验证

2.1　室内实验验证

为验证线性化拟合方法在实验室环境下的适



a_i 表示第 i 个数据窗口的斜率，如 a_1、a_2、a_3 分别表示第 1、2、3 个数据窗口的斜率

a—重张压力 p_r; b—瞬时闭合压力 p_s

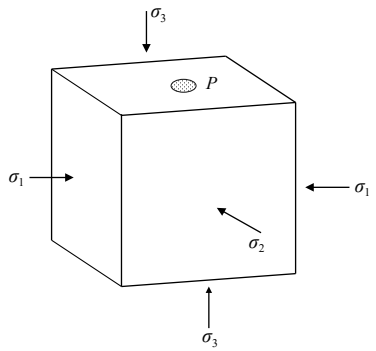
图 6 基于线性化拟合识别特征压力的原理示意图

Fig. 6 Schematic diagrams illustrating the principle of identifying characteristic pressures based on the linearized fitting method

(a) The reopening pressure p_r; (b) The instantaneous shut-in pressure p_s

a_i denotes the slope of the i-th data window, i.e., a_1, a_2, and a_3 correspond to the slopes of the first, second, and third data windows, respectively.

用性，研究在真三轴加载条件下开展了花岗岩水压致裂试验。试样采自江西星子县，密度约为 2.65 g/cm^3，弹性模量约为 50 GPa，泊松比为 0.18，单轴饱和抗压强度约为 100 MPa，抗拉强度约为 10 MPa。如图 7 所示，试样制备为 100 mm×100 mm×100 mm 立方体，并在中心预制直径 8～9 mm 的通孔以模拟钻孔结构。



σ_1—最大主应力；σ_2—最小主应力；σ_3—中间主应力；P—注水孔位置，用于施加孔隙压力

图 7 室内水压致裂试验试样结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the specimen structure used in the hydraulic fracturing laboratory test

σ_1—maximum principal stress; σ_2—minimum principal stress; σ_3—intermediate principal stress; P—location of the injection hole for applying pore pressure

试验在真三轴试验机中进行，该设备可独立加载 3 个主应力方向，轴向与横向加载能力分别为 10～1000 kN 和 4～400 kN，能够较好地模拟深部三维应力场。加载过程中，首先按预定地应力条件施加横向应力最小主应力（σ_2）和中间主应力（σ_3），随后加载最大主应力 σ_1，并保持三向恒定应力。在此基础上，通过高压泵以恒定速率向试样中心孔注水，实时记录压力–时间曲线。裂缝起裂表现为压力突降与注水体积突增；停泵后曲线逐渐平稳，裂缝闭合；随后重复 3～5 个循环，以模拟野外多次致裂过程。

为确保试验结果的可比性，研究在 6 组花岗岩试样（编号分别为 HF2、HF3、HF5、HF7、HF8、HF9）上开展了压裂实验，其三向应力加载条件与注水速率如表 1 所示。

表 1 花岗岩试样室内水压致裂试验加载与注水速率条件

Table 1 Loading conditions and injection rate of granite specimens in hydraulic fracturing laboratory tests

试样编号	σ_1/MPa	σ_2/MPa	σ_3/MPa	注水速率/(mL/min)
HF2	2.40	0.90	1.80	2.20
HF3	3.60	2.00	1.20	2.25
HF5	2.40	1.50	0.90	2.30
HF7	4.80	1.80	2.40	2.00
HF8	3.60	1.20	1.80	2.40
HF9	4.80	3.60	2.40	2.10

注：σ_1—最大主应力；σ_2—最小主应力；σ_3—中间主应力

实验结束后卸除应力并取出试样，对裂缝形态进行观测，如图 8 所示。裂缝多以中心孔为起裂源，沿最大主应力方向扩展。部分试样（如 HF7、HF9）形成了贯通裂缝，而 HF2、HF3 试样主要为局部劈裂面。整个过程中同步记录了压力–时间变化曲线，如图 9 所示。

应用包括传统方法（单切法、平移 p_b 法、马斯

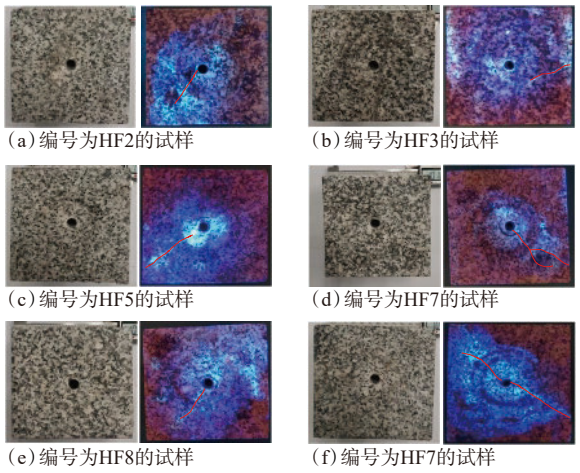


图 8　花岗岩试样压裂前后状态对比

Fig. 8　Comparison of granite specimens before and after hydraulic fracturing

(a) HF2; (b) HF3; (c) HF5; (d) HF7; (e) HF8; (f) HF9

卡特法、导数分析法）与文中提出的新方法在内的多种方式对 p_r 与 p_s 进行判读，结果见表 2。

从表 2 的判读结果可见，传统方法在识别瞬时闭合压力（p_s）和重张压力（p_r）时表现出明显的系统性偏差：单切法对 p_r 普遍低估，平移 p_b 法则显著高估；而在 p_s 识别中，马斯卡特法和导数分析法多数情况下给出偏高结果。相比之下，线性化拟合法在 p_r 判读中始终介于单切法与平移 p_b 法之间（仅 HF5 试样例外），表现出良好的折中性和稳定性；在 p_s 判读中，除 HF8 试样外，其余均低于或接近传统方法的最低值，整体趋势更趋保守。这表明线性化拟合法在多数情况下能有效缓解传统方法因主观选点或模型假设带来的极端偏差，其结果在不同试样间具有更强的一致性与数据自洽性。

进一步通过线性化拟合法识别结果与传统方法平均值之间的绝对偏差数据表明，如图 10 所示，线性化拟合法在多数试样中能较好地与传统方法的判读共识保持一致：在重张压力（p_r）识别中，除 HF5 试样因显著高估导致偏差达 0.600 MPa 外，其余 5 组试样的绝对偏差均不超过 0.370 MPa，且 HF9 试样的偏差最小（仅 0.035 MPa）；在瞬时闭合压力（p_s）识别中，偏差整体略大但分布均匀，最大偏差为 HF9 试样的 0.393 MPa。总体来看，该方法在 6 组不同应力条件下均能基本收敛于传统判读区间内，体现出较强的区间一致性和对多数压裂曲线的适应能力，仅在个别试样中表现出对局部响应特征的敏感性。

基于 p_r 和 p_s 值计算的地应力结果与试验设定值对比见表 3。总体来看，线性化拟合法反演的主应力与设定值较为接近，其中 σ_1 的相对误差总体多在 30% 以内，σ_2 的误差波动较大，部分样本超过 60%，这可能与实验操作和设备精度限制，以及或裂缝闭合阶段曲线微扰有关。与传统方法相比，该方法自动识别特征点，显著降低了人为主观性，使反

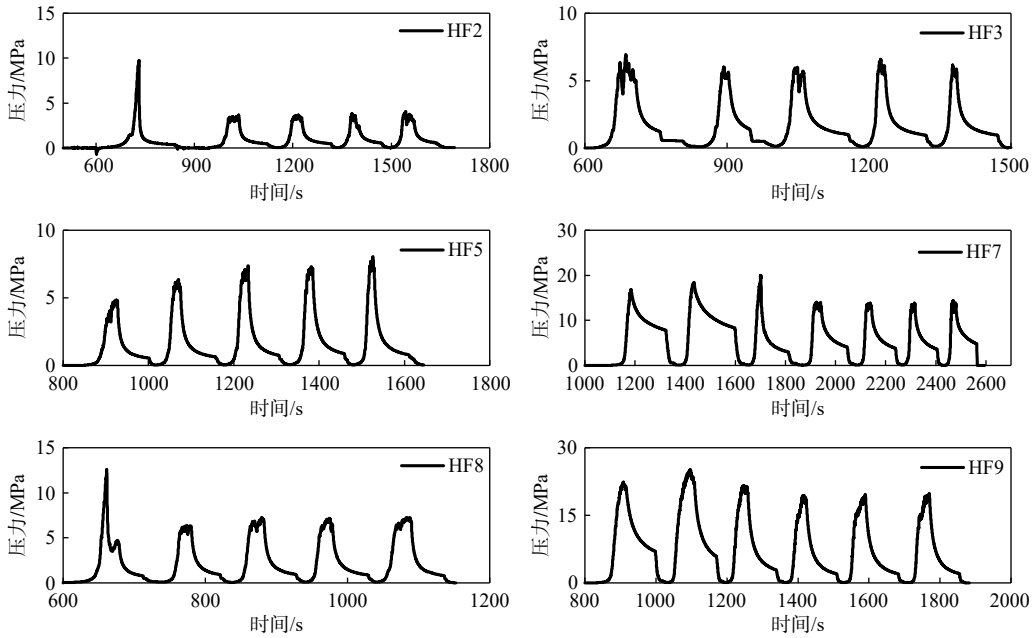


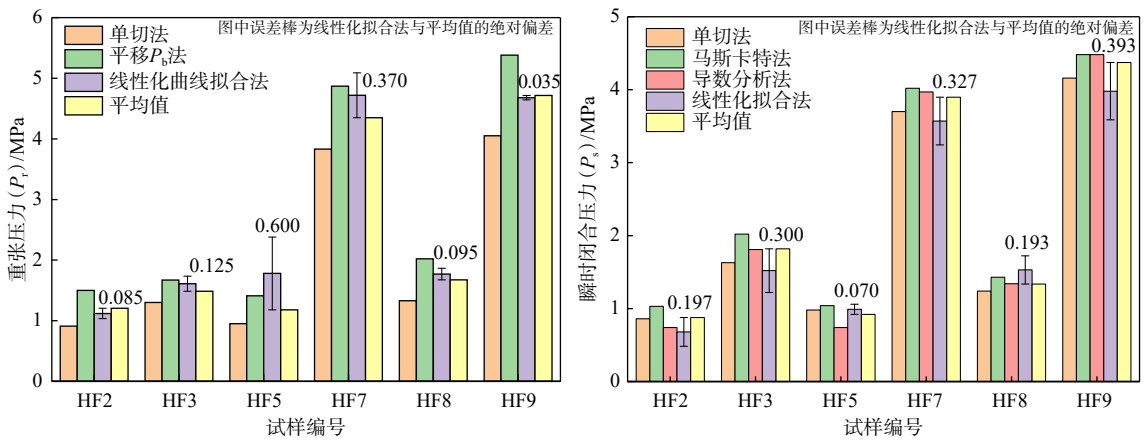
图 9　水压致裂全过程的压力–时间曲线

Fig. 9　Pressure–time curve of the entire hydraulic fracturing process

表 2 各方法判读重张压力（p_r）与瞬时闭合压力（p_s）的结果

Table 2 Reopening pressure (p_r) and instantaneous shut-in pressure (p_s) determined by various methods

试样编号	p_r识别结果/MPa			p_s识别结果/MPa			
	单切法	平移p_b法	线性化拟合法	单切法	马斯卡特法	导数分析法	线性化拟合法
HF2	0.91	1.50	1.12	0.86	1.03	0.74	0.68
HF3	1.30	1.67	1.61	1.63	2.02	1.81	1.52
HF5	0.95	1.41	1.78	0.98	1.04	0.74	0.99
HF7	3.83	4.87	4.72	3.70	4.02	3.97	3.57
HF8	1.33	2.02	1.77	1.24	1.43	1.34	1.53
HF9	4.05	5.38	4.68	4.16	4.48	4.48	3.98



a—重张压力 p_r; b—瞬时闭合压力 p_s

图 10 线性化拟合法与传统方法平均值之间的绝对偏差对比图

Fig. 10 Comparison of absolute deviations between the linearized fitting method and the averaged values of the traditional methods

(a) Reopening pressure p_r; (b) Instantaneous shut-in pressure p_s

演结果规律性更强、无随机跳变。σ_1 随设定应力水平变化呈系统性偏差(低应力略低估、高应力略高估),σ_2 虽在高应力段误差增大,但中低应力段(如HF2、HF3、HF5 试样)仍合理。整体上,该方法主应力反演结果稳定、误差分布可解释,具有良好的物理一致性与可靠性。

表 3 基于线性化拟合法计算的最大主应力（σ_1）和最小主应力（σ_2）与试验设定值的对比及误差分析

Table 3 Comparison and error analysis for the maximum principal stress σ_1 and the minimum principal stress σ_2 calculated with the linearized fitting method using the experimental preset values

试样编号	σ_1计算结果/MPa	σ_1试验设定值/MPa	σ_1相对误差	σ_2计算结果/MPa	σ_2试验设定值/MPa	σ_2相对误差
HF2	2.33	2.40	3.00%	0.68	0.90	24.44%
HF3	2.71	3.60	24.72%	1.52	1.20	26.67%
HF5	1.69	2.40	29.58%	0.99	0.90	10.00%
HF7	6.48	4.80	35.00%	3.57	1.80	98.33%
HF8	3.64	3.60	1.11%	1.53	1.20	27.50%
HF9	5.62	4.80	17.08%	3.98	2.40	65.83%

综上,线性化拟合方法采用自动分段线性拟合与拐点识别算法,通过将非线性压力–时间曲线响应转化为线性分段结构,避免了传统人工判读过程中存在的主观偏差,提高了参数识别的客观性与重复性,有效提升了压裂参数判读精度,克服了传统方法中的主观性和适用性局限,验证了其在室内实

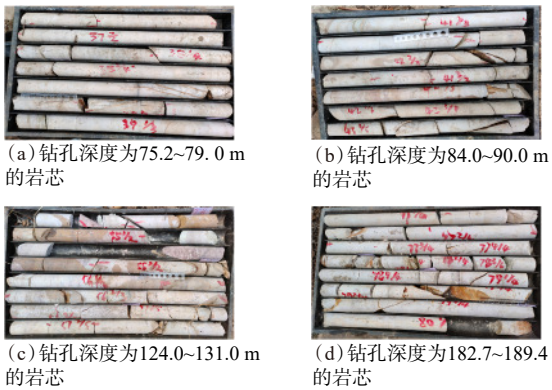
验条件下的良好适用性与应用潜力。

2.2　野外应用验证

为进一步验证线性化拟合方法在复杂地应力环境中的工程适应性与判读有效性，选取天津市蓟州龙潭沟抽水蓄能电站工程区的 LFZK02 钻孔开展现场水压致裂试验。该区域位于蓟州区北部山区，距市中心约 120 km，属典型中低山构造背景，岩体完整，地应力条件复杂。LFZK02 钻孔为倾斜钻孔，设计孔深 290 m，孔径 76 mm，斜度 73°，方位角 NE18°，地下水位约为 47.5 m。试验深度范围为 75.2～277.6 m，共选取其中 4 个代表性段落作为验证样本，岩芯照片如图 11 所示。

测试段岩芯整体保存较为完整，岩性主要为石英砂岩，矿物颗粒分布均匀，结构致密。整体新鲜度较高，风化程度轻微。岩芯中存在一定数量的天然裂隙、节理及断裂面，裂隙多为不规则形态，部分已充填或沿裂面有少量褐色氧化物沉淀。局部岩段相对完整，而部分岩段则存在较为密集的裂隙，导致岩芯局部出现碎裂。总体而言，岩芯完整性较好，适合作为水压致裂地应力测试的样品。各测段中典型深度处的压力–时间曲线如图 12 所示。

通过标准压裂测试流程获取各段压裂数据后，



(a) 钻孔深度为75.2~79. 0 m 的岩芯　(b) 钻孔深度为84.0~90.0 m 的岩芯

(c) 钻孔深度为124.0~131.0 m 的岩芯　(d) 钻孔深度为182.7~189.4 m 的岩芯

图 11　天津蓟州抽水蓄能电站水压致裂测试段岩芯照片

Fig. 11　Core samples from hydraulic-fracturing test intervals at the Jizhou Pumped-Storage Power Station, Tianjin

(a) 75.2–79.0 m; (b) 84.0–90.0 m; (c) 124.0–131.0 m; (d) 182.7–189.4 m

分别采用传统方法（单切线法、平移 p_b 法、马斯卡特法与导数分析法）与文中提出的线性化拟合法对关键压力参数——p_r 与 p_s 进行识别，结果见表 4。

分析结果表明（表 4），传统方法在不同深度下存在较明显的波动与偏差。例如，平移 p_b 法在多个测段中存在对 p_r 的系统性高估（如 87.2 m 测段深度判读为 4.33 MPa），而单切法则在测段 75.2 m 中出

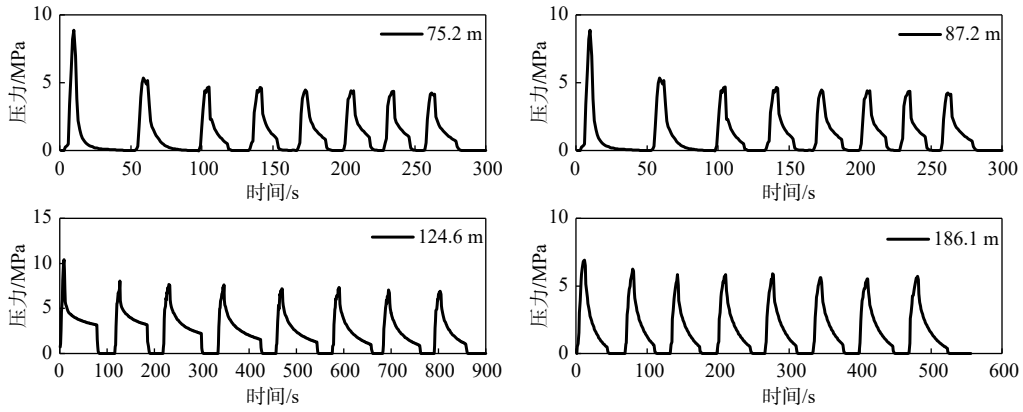


图 12　天津蓟州龙潭沟 LFZK02 钻孔现场水压致裂试验压力–时间曲线

Fig. 12　Pressure–time curve of the hydraulic fracturing test in the LFZK02 borehole at Longtangou, Jizhou, Tianjin field site

表 4　现场水压致裂试验中不同方法识别重张压力（p_r）与瞬时闭合压力（p_s）的结果

Table 4　Reopening pressure (p_r) and instantaneous shut-in pressure (p_s) identified by different methods in the hydraulic fracturing field test

深度/m	p_r判读数据/MPa				p_s判读数据/MPa				
	单切法	平移p_b法	平均值	线性化拟合法	单切法	马斯卡特法	导数分析法	平均值	线性化拟合法
75.2	1.48	3.16	2.32	2.61	1.07	1.11	0.96	1.05	1.09
87.2	2.47	4.33	3.40	3.72	2.28	2.39	2.06	2.24	2.12
124.6	3.52	4.92	4.22	4.44	3.82	4.22	3.75	3.93	4.33
186.1	3.80	3.51	3.66	3.29	3.80	3.18	3.20	3.39	3.06

现低估倾向。在p_s的判读中，导数分析法和马斯卡特法在部分测段结果偏高，且波动性较强。相较而言，线性化拟合方法所得结果在各测段中均接近各方法平均值，且波动幅度明显减小。例如在87.2 m深度段，线性化拟合方法的p_s判读为2.12 MPa，与平均值（3.24 MPa）差距较小，而传统方法结果都比较分散。整体而言，线性化拟合方法不仅减少了不同方法间的差异，而且与多方法平均结果更为接近，体现出较高的一致性和稳定性，避免了其他方法因曲线噪声或人工判断引起的过度偏差。

常用判读方法在不同深度段对p_r与p_s的识别结果及其与线性化拟合法的偏差如表5所示。由表5可以清晰观察到，线性化拟合法在4个测段中表现出较高的稳定性。具体而言，在重张压力p_r的判读中，线性化拟合法与平移p_b法的平均偏差和标准差较低（分别为0.465 MPa和0.148 MPa），明显优于单切法；在p_s的判读中，该方法与马斯卡特法的差异最小（平均偏差0.130 MPa、标准差0.090 MPa），且误差波动最小。整体来看，线性化拟合法在多个测段中均能稳定输出较低偏差结果，体现出其在复杂地应力环境下的工程适应性和判读可靠性，验证了其作为关键参数识别工具的有效性。

表5 线性化拟合法与各判读方法的重张压力（p_r）与瞬时闭合压力（p_s）偏差比较

Table 5 Comparison of the deviations in reopening pressure (p_r) and instantaneous shut-in pressure (p_s), as determined by various interpretation methods relative to the linearized fitting method

参数	对比方法	平均偏差/MPa	标准差/MPa	最大偏差/MPa
重张压力(p_r)	单切法	0.953	0.282	1.25
	平移p_b法	0.465	0.148	0.61
瞬时闭合压力(p_s)	单切法	0.356	0.284	0.740
	马斯卡特法	0.130	0.090	0.270
	导数分析法	0.228	0.206	0.580

在线性化拟合法判读p_r和p_s的基础上，进一步计算得到了各深度段的最大水平主应力（S_H）、最小水平主应力（S_h）以及垂直主应力（S_v）（表6）。由表6可知，沿深度方向的主应力分布具有明显的水平主应力主导特征。最大、最小水平主应力量值范围分别为6.55～9.85 MPa和3.54～6.21 MPa。整体来看，随着深度增加，垂直主应力呈递增趋势，而水平方向主应力则表现出波动性变化，说明该区域具有典型的“水平压应力主控”的地应力状态。

研究收集了《中国大陆地壳应力环境数据库》（谢富仁等，2007）中天津蓟州地区及附近的应力数据，共收集到有应力数据283条，利用上述的283组应力数据点与文中测得数据进行对比，如图13所示，结果显示两者基本一致。这一结果不仅与岩体自重理论趋势相符，也与高桂云等（2024）所揭示的该区域“水平主应力主导”的地应力特征相一致，进

表6 基于线性化拟合法计算的各深度段主应力（S_H、S_h和S_v）

Table 6 Principal stress values S_H, S_h, and S_v at various depth intervals calculated based on the linearized curve fitting method

深度/m	最大水平主应力 S_H/MPa	最小水平主应力 S_h/MPa	垂直主应力 S_v/MPa
75.2	6.55	3.54	5.76
87.2	9.85	6.21	6.62
124.6	8.03	6.19	6.53
186.1	8.93	5.56	5.97

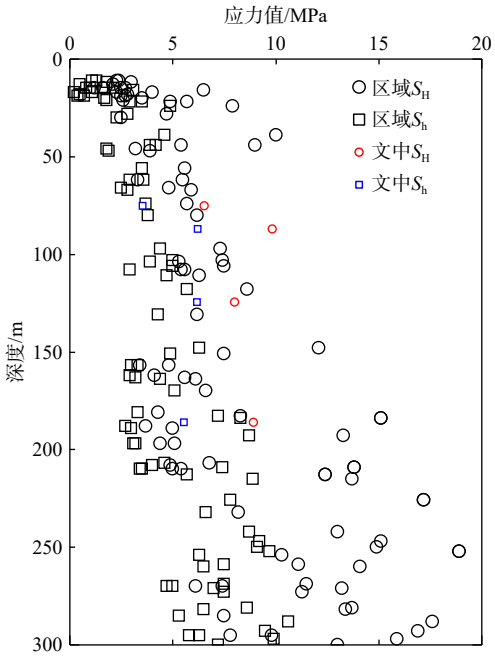


图13 区域应力与实测应力对比图

Fig. 13 Comparison of regional and measured stresses

一步印证了线性化拟合方法在不同埋深条件下的有效性。

综上所述，线性化拟合方法在 p_r 和 p_s 判读方面较传统方法具有更低的误差、更高的一致性和更强的抗干扰能力。配合现场多段数据的应力计算与理论比对，验证了该方法在不同深度、不同地应力背景下的良好适应性与准确性。

3　讨论

文中提出的线性化拟合方法，基于“化非线性为局部线性”的数学思想，结合多项式拟合与分段斜率分析，实现了对水压–时间曲线中关键转折点的定量识别，从而自动判定裂缝的 p_s 与 p_r。该方法完全基于数据本身的斜率突变特征，避免了传统方法中依赖主观选点或复杂流体泄流模型假设的不足，表现出更强的鲁棒性、通用性与自动化能力。从裂缝力学角度看，裂缝张闭行为本质上是应力控制下的力学突变，其在 p-t 曲线上的响应表现为明显的斜率变化，这一现象恰好与本方法的识别原理相吻合，具备清晰的物理机制解释基础（王知深，2019）。

从室内实验与野外实测的对比结果来看，线性化拟合方法在 p_s 和 p_r 的识别精度上明显优于单切线法、马斯卡特法及导数分析法，表现出偏差小、波动低的优点。例如，在某些野外测段中，p_s 的偏差最低可达 0.13 MPa，远低于传统方法在复杂裂缝条件下的典型误差水平。此外，该方法不依赖于裂缝形态、泄流边界或数据理想程度，尤其适用于裂缝扩展路径不明确、压力曲线受扰动严重的工程环境。由于该方法可通过程序实现全自动判读，具有良好的可集成性，特别适用于大规模数据处理、在线监测与智能化地应力测试系统的构建，在地下工程实际应用中展现出较高的工程效率与推广潜力。

然而，该方法的实际应用效果仍受到若干因素影响，识别精度存在一定不确定性。首先，当数据采样频率过低时，p_r 阶段的快速响应过程易被平滑处理，从而掩盖斜率突变特征；其次，施工过程中如出现泵压不稳、设备关断或裂缝异常扩展等扰动因素，可能在数据中引入非物理的“假突变点”（陈兴强，2020），若不经滤波预处理易导致误判（Gabry et al., 2024）；此外，该方法对分段数量、拟合策略与突变判断阈值存在一定依赖性，在不同地层、不同加载路径下需结合实际条件灵活设定。为此，将在今后研究可引入自适应滑动窗口机制及机器学习优化算法（Nande, 2018；何玉荣等，2021），以增强方法的鲁棒性与普适性。

就适用边界而言，线性化拟合法最适用于具备完整升压–衰减过程、曲线形态较清晰的常规压裂数据，尤其适合于硬脆性岩石（如花岗岩、板岩、页岩）等典型工程场景。若曲线存在剧烈震荡、关键数据缺失或张闭循环不明显的情况，其识别能力可能下降，需辅以如 G 函数法等补充手段进行联合判读（McClure et al., 2016；Ye et al., 2025）。

为进一步扩大该方法的应用广度和工程适应性，未来将在以下几个方向开展深入研究：①将该方法与实时裂缝监测技术（如声发射 AE、微震 MS 等）耦合（Lou et al., 2017；Li et al., 2023），结合裂缝时空演化行为提升识别可靠性；②在多井段、多岩性、多构造背景下进行系统验证，构建不同工况下的适用性图谱，明确其边界条件与优势工况；③推动算法模块化、标准化开发，构建可集成于地应力测试系统的软件工具（王成虎等，2014），服务于地热勘探、页岩气开发、水库边坡稳定性等高风险地下工程领域，进一步提升其实用性与工程价值。

4　结论

（1）研究针对水压致裂试验中关键参数瞬时闭合压力（p_s）与重张压力（p_r）识别过程中存在的非线性响应显著、噪声干扰强、主观性高等问题，提出了一种基于线性化拟合的自动识别方法。该方法以“化曲为直”的数学策略为核心，结合多项式拟合、分段线性回归与斜率突变识别，实现了对压裂压力–时间曲线中关键转折点的自动提取与定量判读，突破了传统方法对人工选点与先验模型的依赖。

（2）通过在室内真三轴压裂实验与天津蓟州龙潭沟抽水蓄能电站野外水压致裂实测数据中的应用验证，结果表明线性化拟合法在 p_r 与 p_s 的识别上具有较高的准确性与重复性，误差波动小，整体偏差优于传统的单切线法、马斯卡特法与导数分析法。并进一步讨论指出，该方法适用于具备典型升压–衰减曲线特征的硬脆性岩体压裂测试，在数据完整性较高的工程背景下可有效推广。同时，针对采样频率、曲线扰动与参数设定等潜在影响因素，提出了引入自适应识别机制、融合声发射或微震监测数据以及算法标准化开发的优化方向。

References

AN H Q, SUN D X, ZHANG C T, 2013. Study on several issues in in-situ stress measurement by hydraulic fracturing method[J]. Journal of Oil and Gas Technology (Journal of Jianghan Petroleum Institute), 35(8): 270-273. (in Chinese with English abstract)

CHEN D S, JI H G, YUAN Y Z, et al., 2023. Influence of rock inhomogeneity degree on the crustal stress results measured by hydraulic fracturing method[J]. Journal of Geomechanics, 29(3): 365-374. (in Chinese with English abstract)

CHEN Q C, LI F Q, MAO J Z, 2001. Application study of three dimensional geo-stress measurements by use of hydraulic fracturing method[J]. Journal of Geomechanics, 7(1): 69-78. (in Chinese with English abstract)

CHEN X Q, 2020. Common errors and its correction of ground stress measurement by hydraulic fracturing method[J]. Railway Engineering, 60(3): 158-161. (in Chinese with English abstract)

CHENG Z Y, LIU R, ZHANG J F, et al., 2023. Study on Seepage Mechanism Characteristics of A Single Fracture Based on Fracture Deformation Under Different ConfiningPressures[J]. Geoscience, 37(4): 972-976. (in Chinese with English abstract)

FENG C J, CHEN Q C, WU M L, et al., 2012. Analysis of hydraulic fracturing stress measurement data: discussion of methods frequently used to determine instantaneous shut-in pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 33(7): 2149-2159. (in Chinese with English abstract)

GABRY M A, ELTALEB I, RAMADAN A, et al., 2024. Hydraulic fracture closure detection techniques: a comprehensive review[J]. Energies, 17(17): 4470.

GAO G Y, WANG C H, LIU J K, et al., 2024. Determination of the three-dimensional in situ stress tensor in inclined boreholes and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 43(S2): 3700-3709. (in Chinese with English abstract)

GUO W D, WANG X J, YANG S X, 2018. Discussion on the development status of hydraulic fracturing method for in-situ stress measurement[J]. Policy Research & Exploration(11): 34-36. (in Chinese with English abstract)

HAIMSON B C, CORNET F H, 2003. ISRM suggested methods for rock stress estimation: part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF)[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(7-8): 1011-1020.

HE Y R, SONG Z C, ZHANG Y M, et al., 2021. Review on application of machine learning in hydraulic fracturing[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 45(6): 127-135. (in Chinese with English abstract)

LI J W, HE Y, 2021. Analysis and research on in-situ stress measurement based on hydraulic fracturing method[J]. Shanxi Architecture, 47(7): 1-5. (in Chinese with English abstract)

LI X Y, LEI X L, LI Q, 2023. Laboratory hydraulic fracturing in layered tight sandstones using acoustic emission monitoring[J]. Geoenergy Science and Engineering, 223: 211510.

LIU Y F, 1998. Check and modification for geostress measurement by hydraulic fracturing technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 17(3): 297-304. (in Chinese with English abstract)

LOU Y, ZHANG G Q, WANG X X, 2017. Study on fracture mechanism of hydraulic fracturing in sandstone by acoustic emission parameters[J]. Procedia Engineering, 191: 291-298.

LEE M Y, HAIMSON B C, 1989. Statistical evaluation of hydraulic fracturing stress measurement parameters[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 26(6): 447-456.

MCCLURE M W, JUNG H, CRAMER D D, et al., 2016. The fracture-compliance method for picking closure pressure from diagnostic fracture-injection tests[J]. SPE Journal, 21(4): 1321-1339.

NADIMI S, FORBES B, MOORE J, et al., 2020. Effect of natural fractures on determining closure pressure[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 10(2): 711-728.

NANDE S, 2018. Application of machine learning for closure pressure determination[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dallas, Texas: SPE.

SU H G, LUO L M, 2023. Research status of ground stress test technology[J]. Shaanxi Coal, 42(1): 59-62. (in Chinese with English abstract)

WANG C H, WANG X J, BAO L H, et al. , 2014-01-22. System for collecting in-situ stress measurement data by using hydraulic fracturing: CN, CN103527180A[P]. (in Chinese with English abstract)

WANG C H, XING B R, JIANG Y H, et al. , 2016. Development and application of interactive software for determination of hydraulic fracturinc stress measurement parameters[C]//Proceedings of the 2016 National Symposium on Engineering Geology. Chengdu: Engineering Geology Professional Committee of the Geological Society of China: 1364-1371. (in Chinese with English abstract)

WANG H J, 2003. Study of simulating stress determination technique by hydraulic fracturing method[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology. (in Chinese with English abstract)

WANG Z S, 2019. Study on mechanism and discontinuous deformation analysis of hydraulic fracturing of rock[D]. Ji'nan: Shandong University. (in Chinese with English abstract)

WU F P, LI D, FAN X Z, et al., 2020. Analytical interpretation of hydraulic fracturing initiation pressure and breakdown pressure[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 76: 103185.

XING B R, 2014. Study on three—dimensional geostress determining method with hydraulic fracturing technique in single borehole[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)

XU B, LIU R M, CHEN Z Y, et al., 2020. Application of pressure transient analysis method in mini-frac test[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 37(2): 81-86. (in Chinese with English abstract)

XIE F R, CHEN Q C, CUI X F, et al., 2007. Fundamental Database of Crustal Stress Environment in the Chinese Mainland[J]. Progress in Geophysics, 01(2007): 131-136. (in Chinese with English abstract)

YANG Y H, SUN D S, QIN X H, et al., 2024. Error analysis and discussion of determining the maximum horizontal principal stress by hydraulic fracturing based on the compliance analysis of testing system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 43(S1): 3385-3396. (in Chinese with English abstract)

YE Z, GHASSEMI A, 2025. Laboratory insights on hydraulic fracture closure and stress measurement[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 130(7): e2024JB029854.

ZHANG Y L, TIAN Y, SUN L N, et al., 2025. Research and application of rock fracturing pressure prediction method for deep oil reservoirs[J]. Scientific Reports, 15(1): 10182.

ZHU M D, WANG Z Y, ZHANG Y Z, et al., 2023. In-situ stress measurement and inversion analysis of the deep shaft project area in Sanshan Island based on hydraulic fracturing method[J]. Journal of Geomechanics, 29(3): 430-441. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

安贺强，孙德新，张春涛，2013. 水压致裂法地应力测量的几个问题研究[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报)，35(8)：270-273.

陈东升，纪洪广，袁永忠，等，2023. 岩石非均质程度对水压致裂地应力测试方法影响的分析与讨论[J]. 地质力学学报，29(3)：365-374.

陈群策，李方全，毛吉震，2001. 水压致裂法三维地应力测量的实用性研究[J]. 地质力学学报，7(1)：69-78.

陈兴强，2020. 水压致裂法地应力测量常见误差与修正[J]. 铁道建筑，60(3)：158-161.

程智余，刘瑞，张金锋，等，2023. 围压变化作用下基于水力开度变化的单裂隙渗流特性研究[J]. 现代地质，37(4)：972-976.

丰成君，陈群策，吴满路，等，2012. 水压致裂应力测量数据分析：对瞬时关闭压力 P_s 的常用判读方法讨论[J]. 岩土力学，33(7)：2149-2159.

高桂云，王成虎，刘冀昆，等，2024. 倾斜钻孔三维地应力张量反演方法及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报，43(S2)：3700-3709.

郭文雕，王显军，杨树新，2018. 论述原地应力测量水压致裂法发展状况[J]. 决策探索(中)(11)：34-36.

何玉荣，宋志超，张燕明，等，2021. 机器学习在水力压裂作业中的应用综述[J]. 中国石油大学学报(自然科学版)，45(6)：127-135.

李剑伟，何勇，2021. 基于水压致裂法的原地应力测试分析与研究[J]. 山西建筑，47(7)：1-5.

刘允芳，1998. 水压致裂法地应力测量的校核和修正[J]. 岩石力学与工程学报，17(3)：297-304.

苏宏刚，罗黎明，2023. 地应力测试技术研究现状[J]. 陕西煤炭，42(1)：59-62.

王成虎，王显军，包林海，等，2014-01-22. 水压致裂法原地应力测量数据采集系统：中国，CN103527180A[P].

王成虎，邢博瑞，江英豪，等，2016. 水压致裂原位应力测量的特征值参数的计算机辅助确定[C]//2016 年全国工程地质学术年会论文集. 成都：中国地质学会工程地质专业委员会：1364-1371.

汪华君，2003. 水压致裂法测量地应力模拟方法研究[D]. 青岛：山东科技大学.

王知深，2019. 岩石水压致裂的机理研究及非连续变形分析计算[D]. 济南：山东大学.

邢博瑞，2014. 单孔三维水压致裂原位地应力测量应用研究[D]. 北京：中国地质大学(北京).

徐斌，刘汝明，陈子扬，等，2020. 瞬态压力分析方法在小型压裂地应力测试中的应用[J]. 长江科学院院报，37(2)：81-86.

谢富仁，陈群策，崔效锋，等，2007. 中国大陆地壳应力环境基础数据库[J]. 地球物理学进展，01(2007)：131-136.

杨跃辉，孙东生，秦向辉，等，2024. 基于测试系统柔度分析的水压致裂法确定最大水平主应力误差分析与讨论[J]. 岩石力学与工程学报，43(S1)：3385-3396.

朱明德，王照亚，张月征，等，2023. 基于水压致裂法的三山岛深竖井工程区地应力测量与反演分析[J]. 地质力学学报，29(3)：430-441.