引用格式： 杨跃辉，孙东生，吴邦宸，等，2025. 总系统刚度法在水力裂缝闭合压力测定中的应用[J]. 地质力学学报，31（6）：1168−1176. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025099

Citation: YANG Y H，SUN D S，WU B C，et al.，2025. Determination of hydraulic fracture closure pressure based on total system stiffness method: Case studies[J]. Journal of Geomechanics，31（6）：1168−1176. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025099

总系统刚度法在水力裂缝闭合压力测定中的应用

杨跃辉[1,2]，孙东生[1,2]，吴邦宸[1,2]，李阿伟[1,2]，李　冉[1,2]，秦向辉[1,2]，孙炜锋[1,2]，孟　文[1,2]，陈群策[1,2]

YANG Yuehui[1,2]，SUN Dongsheng[1,2]，WU Bangchen[1,2]，LI Awei[1,2]，LI Ran[1,2]，QIN Xianghui[1,2]，SUN Weifeng[1,2]，MENG Wen[1,2]，CHEN Qunce[1,2]

1. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；
2. 自然资源部地应力工程技术创新中心，北京 100081

1. *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Science*, *Beijing* 100081, *China*;
2. *Technology Innovation Center for In-situ Stress*, *Ministry of Natural Resources*, *Beijing* 100081, *China*

Determination of hydraulic fracture closure pressure based on total system stiffness method: Case studies

Abstract: ［**Objective**］Hydraulic fracturing is one of the most widely used and ISRM-recommended techniques for in-situ stress measurement in rock masses, where a key step is determining closure pressure from the pressure-decay curve as a proxy for the minimum horizontal principal stress. Conventional interpretation methods mainly rely on tangents or best-fit lines to analyze the pressure-decay rate, making the result highly sensitive to the selected time window and lacking clear physical representation of fracture closure, which introduces uncertainties in closure pressure and stress evaluation. ［**Methods**］This study proposes a method based on the evolution of Total System Stiffness (TSS), in which the pressure-decay curve after shut-in is transformed into a TSS curve to better capture fracture-closure behavior, and the method is applied to hydraulic-fracturing datasets from different boreholes, lithologies and depths. ［**Results**］The evolution of TSS after shut-in can be divided into three main stages whose features can be used to identify upper and lower bounds of closure pressure and to evaluate whether the pressure curve is suitable for in-situ stress interpretation; closure pressures obtained in this way show reduced sensitivity to the choice of time window compared with conventional approaches. ［**Conclusion**］The TSS method provides clear physical meanings for the beginning and end of fracture closure and determines closure pressure directly from pressure data, without fitting or extrapolation. ［**Significance**］The method offers a practical tool for improving closure-pressure interpretation and is expected to be widely applicable in hydraulic-fracturing-based in-situ stress analysis.

Keywords: in-situ stress; hydraulic fracturing; pressure transient analysis; closure pressure; total system stiffness

---

基金项目： 深地国家科技重大专项（2024ZD1000701）；国家自然科学基金项目（42174122）；中国地质科学院地质力学研究所基本科研业务费项目（DZLXJK202407）；中国地质调查局地质调查项目（DD20230100401）

This research is financially supported by the Deep Earth Probe and Mineral Resources Exploration−National Science and Technology Major Project (Grant No. 2024ZD1000701), the General Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42174122), the Fundamental Research Fund of the Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences(Grant No. DZLXJK202407), and the Geological Survey Project of the China Geological Survey (Grant No. DD20230100401).

第一作者： 杨跃辉（1995—），男，博士，助理研究员，主要从事地应力测量技术研发及应用研究工作。Email：yangyuehui@mail.cgs.gov.cn

通信作者： 孙东生（1980—），男，博士，正高级工程师，主要从事地应力测量技术研发及应用研究工作。Email：dongshengsun@cags.ac.cn

收稿日期： 2025−07−31；**修回日期：** 2025−09−18；**录用日期：** 2025−10−11；**网络出版日期：** 2025−12−09；**责任编辑：** 王婧

摘　要：水压致裂法是应用最为广泛的岩体原位应力测量方法之一，也是国际岩石力学学会推荐的地应力测试方法。基于压降曲线解释裂缝闭合压力以确定最小（水平）主应力是该技术的重要研究内容。然而，传统解释方法主要依赖于利用切线或最优拟合的方式分析压力衰减率，导致分析结果高度依赖数据时间窗口的范围，且无法识别出具有明确物理意义的压裂缝闭合过程，给闭合压力分析以及地应力测量结果带来一定不确定性。文章介绍了一种基于总系统刚度（TSS）演化特征确定闭合压力的新方法。该方法可将压力衰减曲线有效转换为总系统刚度曲线，从而更好地考虑压裂缝闭合的响应特征。利用 TSS 方法对多个来自不同钻孔、不同岩性和不同深度的水压致裂实测曲线进行严格分析，结果表明该方法具有较好的适用性。关泵后总系统刚度的演化可分为 3 个主要阶段，其特征可用于识别闭合压力的上下限，并评估压力曲线是否适用于获取原位应力信息。TSS 方法的主要优势在于，其为裂缝闭合过程的开始和结束提供了明确的物理定义，因此与传统方法相比，该方法确定的闭合压力对时间窗口选择的敏感性降低。此外，TSS 方法仅依赖于压力数据，无需任何拟合或外推。预期该方法在与水力压裂相关的原位应力分析中具有广阔的应用前景。

关键词：地应力；水压致裂；压力瞬态分析；闭合压力；总系统刚度

中图分类号：P31; P55　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2025)06−1168−09

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025099

0　引言

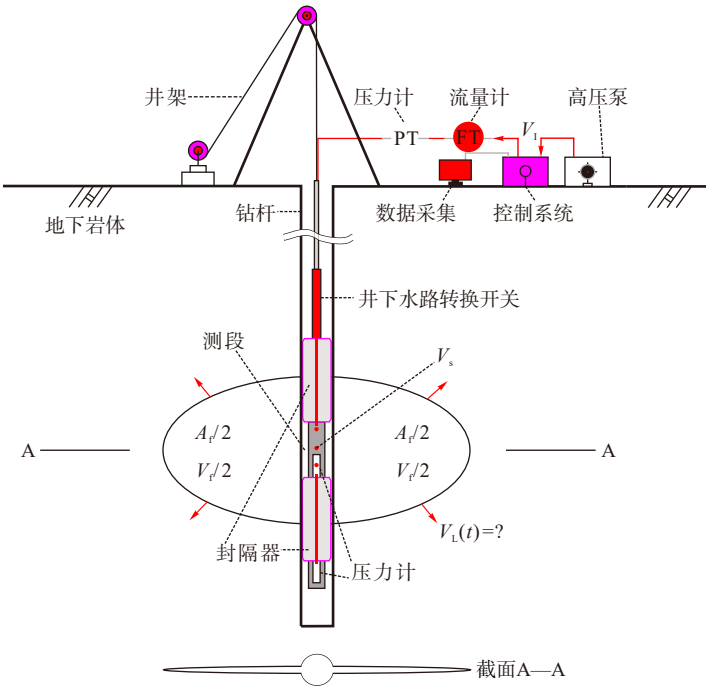
地应力是固体地壳最重要的物理性质之一，地壳表面和内部发生的各种地质构造现象及其伴生的各种物理化学过程都与地壳应力的作用密不可分，对于深入理解地震等内动力地质灾害孕育机理、能源资源精准勘探和安全高效开发、深埋地下空间安全利用和风险防控研究等方面具有重要的意义和价值（Raleigh et al., 1976; Brudy et al., 1997; 董树文等, 2010; 秦向辉等, 2013; 孙东生等, 2015; 陈群策等, 2019; 杨跃辉等, 2022; 程智余等, 2023; 范桃园等, 2024; 胡彩云等, 2024）。

水压致裂法（Hydraulic Fracturing, 简称 HF）是目前确定岩体应力最为直接且有效的方法之一，具有测量深度大、操作简便、可实现大尺度测量和无需岩石力学参数参与计算等独特技术优势（Amadei and Stephansson, 1997; Haimson and Cornet, 2003）。根据水压致裂地应力测量理论，基于实测压力−时间曲线分析得到的闭合压力，即可确定最小水平主应力。同时，闭合压力也是计算最大水平主应力的关键参数，因此闭合压力的确定对于提高地应力测量结果的可靠性至关重要。经过半个多世纪的发展，岩石力学领域的专家已提出了数十种闭合压力分析方法，其中以国际岩石力学学会推荐的拐点法、dP/dt 法和 dt/dP 法应用最为广泛（Guo et al., 1993; Amadei and Stephansson, 1997; Haimson and Cornet, 2003; 丰成君等, 2012; Schmitt and Haimson, 2017; Trinh et al., 2023; Yang et al., 2025）。然而，在实践应用中发现，这些依赖于压降曲线绘制切线或最优拟合线的方法，分析结果高度依赖数据时间窗口的范围，且无法识别出具有明确物理意义的压裂缝闭合过程，给压裂缝的闭合压力分析以及地应力测量结果带来一定不确定性。

在系统梳理压裂缝闭合压力分析方法基础上，杨跃辉等提出了一种基于总系统刚度（Total System Stiffness, 简称 TSS）演化特征识别闭合压力的新方法，可用于确定压裂缝的闭合历程，且为闭合过程的开始和结束提供了明确的物理定义（Yang et al., 2025）。总系统刚度反映了压裂缝和测试系统的整体可压缩性，TSS 方法可将压力衰减曲线有效转换为总系统刚度曲线，从而更好地识别裂缝闭合的响应特征。文章概述了总系统刚度法的基本原理和分析流程，并将该方法应用于多个来自不同地区、不同岩性、不同深度的水压致裂实测曲线，进一步验证了 TSS 方法的适用性。文章最后针对水压致裂地应力测量中闭合压力的确定问题进行了简要讨论。预期该方法在与水力压裂相关的原位应力分析中具有广阔的应用前景。

1　基本原理

水压致裂法通过水力诱发裂缝的方式来获取原位地应力信息，其基本原理和测试程序详见文献（Haimson and Cornet, 2003; Schmitt and Haimson, 2017）。水压致裂（HF）测试设备及钻孔/压裂缝/地层系统的简化示意图如图 1 所示。理想化的 HF 测试压力−



V_I—累积注入流体体积; V_s—压裂段及钻杆的体积; A_f—压裂缝的面积; V_f—压裂缝的体积; $V_L(t)$—累积流体泄漏体积

图 1 水压致裂测试设备及钻孔–压裂缝–地层系统的简化示意图

Fig. 1 A simplified sketch of HF test equipment setup and the borehole–fracture–formation system

V_I—cumulative injected fluid volume; V_s—volume of the fracturing interval and drill string; A_f—area of the hydraulic fracture; V_f—volume of the hydraulic fracture; $V_L(t)$—cumulative fluid leakoff volume

流量–时间曲线(图 2),包含一个压裂回次和多个重张回次;实际测试中遇到的曲线特征往往因测点而异,并非仅此一种。实验过程中,测段流体压力 P 的变化与测试系统及裂缝中存在的流体体积 V 的变化直接相关,而非时间 t。因此,压力衰减率 $\mathrm{d}P/\mathrm{d}t$ 可依据链式法则进行如下分解(Yang et al., 2025):

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}V}\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}=\left\{\begin{array}{l} S_t\dfrac{\mathrm{d}V_I-\mathrm{d}V_L}{\mathrm{d}t} \\ -S_t\dfrac{\mathrm{d}V_L}{\mathrm{d}t}\end{array}\right\}=\left\{\begin{array}{l} S_t(Q_I-Q_L) \\ -S_tQ_L\end{array}\right\}$$
$$\approx\left\{\begin{array}{ll} S_tQ_I & \text{注入阶段} \\ -S_tQ_L & \text{压力衰减阶段}\end{array}\right\} \quad (1)$$

式中,V 为测试系统及裂缝内存在的总流体体

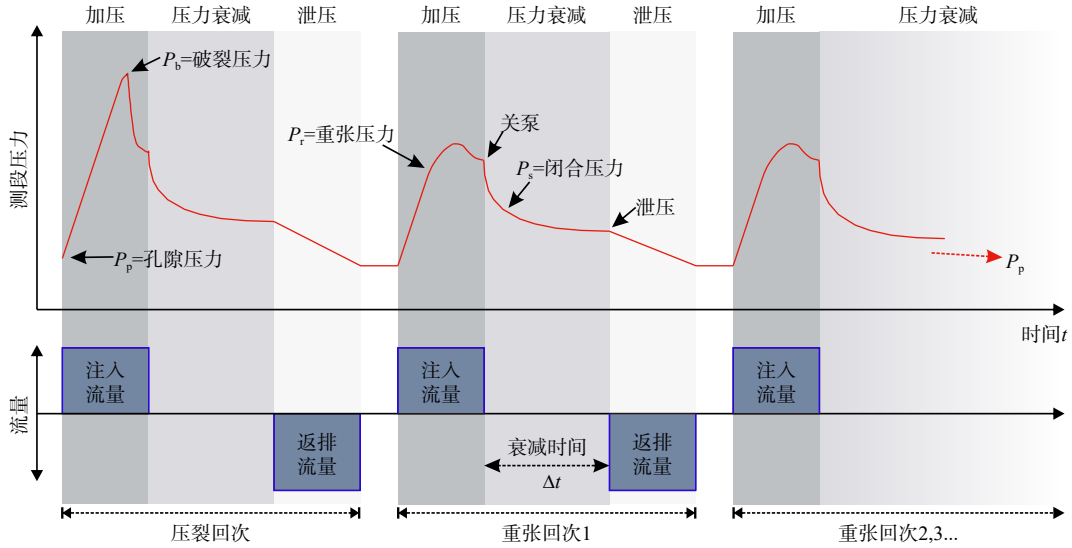


图 2 理想化的水压致裂测试曲线

Fig. 2 The idealized curve in hydraulic fracturing measurements

积；$\mathrm{d}P/\mathrm{d}V$ 为总系统刚度 S_t；$\mathrm{d}V/\mathrm{d}t$ 为流体的瞬时流量；V_I 和 V_L 分别为测段的累积注入流体体积和累积流体泄漏体积（图 1）；$Q_I(=V_I/t)$ 为瞬时注入流量，实验过程中可视为定值；Q_L 为瞬时泄漏流量，由于一般情况下 $Q_I>>Q_L$，故在注入阶段将其省略。

由公式（1）可知，实验测段压力−时间曲线的演化由不同时间下总系统刚度 S_t 和流体的瞬时流量 $\mathrm{d}V/\mathrm{d}t$ 共同控制。在注入阶段，$\mathrm{d}V/\mathrm{d}t$ 可近似等于 Q_I，为定值；而在压力衰减阶段，$\mathrm{d}V/\mathrm{d}t$ 完全由 Q_L 决定，并随着压力 P 的减小而持续单调减小，进而导致 $\mathrm{d}P/\mathrm{d}t$ 持续下降（压降曲线）。因此，$\mathrm{d}V/\mathrm{d}t$ 无法有效指示裂缝的张开和闭合状态，这也正是传统方法识别裂缝闭合存在模糊性的根本原因。为此，必须聚焦于分析与其相耦合存在的第一个关键分量——总系统刚度 S_t。理论上，S_t 也可以利用柔度形式叠加表示为：

$$S_t=\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}V}=\frac{1}{C_t}=\frac{1}{\frac{1}{S_f}+\frac{1}{S_s}}\approx\frac{1}{\frac{\mathrm{d}V_f}{\mathrm{d}P}+V_sc_w}=\frac{1}{\frac{A_f\mathrm{d}w_{fm}}{\mathrm{d}P}+V_sc_w} \tag{2}$$

式中，C_t 为总系统柔度（刚度与柔度互为倒数）；A_f 和 V_f 分别为压裂缝的总面积和体积；V_s 为压裂段及钻杆的体积，可根据实际工况计算获得；S_f 为裂缝刚度，其受控于裂缝的尺寸以及岩石的弹性模量和泊松比，也可由 $\mathrm{d}V_f/\mathrm{d}P$ 确定；S_s 为测试系统刚度，可由 V_sc_w 的倒数确定，也可由压裂回次升压阶段内压力与累积注入体积的斜率确定；c_w 为流体的可压缩系数；w_{fm} 为压裂缝平均缝宽。上式中没有考虑钻杆和封隔器等变形问题，因为其相较于水体柔度而言基本可忽略（Ito et al., 1999; Raaen et al., 2001; 王成虎等, 2012; McClure et al., 2016; Wang and Sharma, 2017）；同时，也没有考虑裂缝内流体的可压缩性，因为通常情况下 $V_fc_w<<V_sc_w$。

由公式（2）可知，随着流体压力的下降，裂缝的尺寸必然会减小，导致 S_f 持续增大，进而引起 S_t 上升。当裂缝开始尖端闭合时，缝壁的接触将导致 $\mathrm{d}w_{fm}$ 显著减小，从而使 S_t 快速增加；待裂缝趋于完全闭合后，S_f 将趋于无穷大，即 dw_{fm} 趋于零，此时 S_t 将完全由 V_sc_w 主导，近似趋于稳定值。根据以上分析可知，S_t 的演化与压裂缝的闭合历程密切相关，且存在直接的对应关系。压力衰减阶段总系统刚度与测段压力的理想化关系曲线（图 3）显示，总系统刚度曲线的斜率随裂缝闭合状态而变化，关泵后曲线上的两个拐点分别对应裂缝尖端闭合和完全闭合。需要说明的是，裂缝完全闭合的拐点并不意味着裂缝宽度理想化地等于零，其残余缝宽由相对裂缝壁上的粗糙度支撑（McClure et al., 2016; Vogler et al., 2018）。

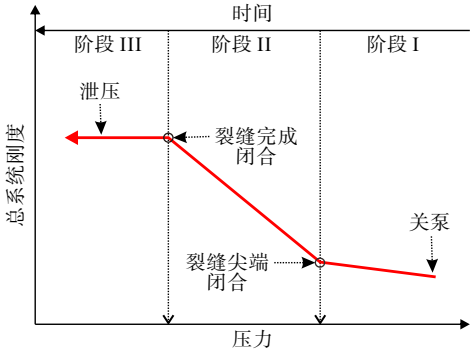


图 3　压力衰减阶段总系统刚度与测段压力的理想化关系曲线

Fig. 3　Idealized curve for the total system stiffness versus the pressure during the shut-in stage

在压力衰减阶段，流体注入已停止，测试系统保持密封状态。随着流体向地层岩体持续漏失，流体压力逐渐降低，裂缝壁在地应力作用下逐渐闭合并接近残余缝宽。在此阶段，P 或 V 的变化完全由流体泄漏体积 V_L 主导。基于必要的假设，Yang et al.（2025）详细推导了从压力衰减阶段（Δt；图 2）的压力−时间曲线上获取总系统刚度变化信息的理论公式，其表达式如下：

$$S_t(2\leqslant i\leqslant n)=\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}V}\approx\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}V_L}\propto\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}C}=\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}\left[\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{P(i)-P_p}{\sqrt{i}}\right)\right]}$$
$$=\frac{\sqrt{i}[P(i)-P(i-1)]}{P(i)-P_p}=S_t' \tag{3}$$

式中，整数 n 表示压力衰减期间恒定频率下采集的压力点总数；整数 i 为采集压力数据的序号，取值范围从 2 到 n；函数 C 被定义为与流体泄漏体积 V_L 成线性比例关系，可用于描述压力衰减阶段 V_L 的相对变化趋势，若已知单位裂缝面积上累积流体泄漏体积，也可用于估计渗透率等地层相关参数，反之亦然（Yang et al., 2025）；S_t' 为无量纲总系统刚度；P_p 为测段岩体孔隙压力，可视为常数。在注入量较小的 HF 测试中，因流体漏失引起的孔隙压力扰动微弱，特别是对于低渗透性岩石，其影响通常可忽略不计。

综上所述，基于压力衰减阶段的实测曲线，利用公式(3)可直接转换获取总系统刚度的演化曲线，并进一步用于识别裂缝闭合历程以及确定闭合压力的上下限。计算过程简单且直接，仅需压力数据，无需任何拟合或外推。在 S_t' 与 P 的关系曲线上(图 3)，预期可观察到 2 个明显的拐点，分别对应于裂缝尖端闭合(刚度开始显著增加)和完全闭合(刚度趋于稳定)。需要说明的是，S_t' 与真实刚度 S_t 之间呈恒定比例关系，因此也可称其为折算刚度。在不影响刚度曲线演化趋势的前提下，也可通过某个系数或一些标准化算法对其进行缩放。

2 应用实例

为验证 TSS 方法的适用性，选取 8 个来自不同地区、不同岩性、不同深度的水压致裂地应力测试曲线为例，利用 TSS 方法分析了各个测段水力裂缝的闭合历程并识别了闭合压力。各测段的基本信息如表 1 所示，原始测试曲线如图 4 所示。每个测段都进行了 3～4 次重张实验，各回次曲线一致性较好。流量计和压力计位置布设于孔口，对于测深大于 100 m 的钻孔，在测段处额外安装了井下压力计。数据采集频率统一为 20 Hz。

图 4 中各测段实测压力曲线最后一个重张回次的 TSS 法分析结果如图 5 所示，对应压裂缝闭合过程的三阶段特征已在图 5a 中予以标注。TSS 方法计算的时间区间统一取自各回次关泵时刻至泄压时刻的整个压力衰减阶段(图 2)。图中横轴为压力，纵轴为无量纲总系统刚度 S_t'，识别闭合的特征拐点以向下的蓝色箭头标示。可以看出，所有分析结果中，TSS 方法都清晰地显示了总系统刚度的演化历程，且与前述理论公式预期的演化过程基本吻合(图 3)。随着流体压力的下降，总系统刚度的演化大致可以分为以下 3 个主要阶段。

表 1 各水压致裂测段的基本信息

Table 1 Basic information of each hydraulic fracturing test interval

编号	钻孔位置	钻孔类型	孔口埋深/m	测深/m	岩性	压力计位置	流量计位置	孔隙压力/MPa
a	甘肃酒泉	垂直孔	0.00	797.00	花岗岩	孔口+测段	孔口	7.97
b				930.00				9.30
c	湖南怀化	垂直孔	0.00	512.00	灰岩	孔口+测段	孔口	5.12
d				1446.00	硅质岩			14.46
e	辽宁抚顺	垂直孔	403.00	8.20	片麻岩	孔口	孔口	0.00
f				38.50				0.00
g	江西上饶	水平孔	830.00	14.00	花岗岩	孔口	孔口	0.00
h				17.00				0.00

第 I 阶段：关泵至裂缝尖端闭合。关泵初期，由于系统摩阻和裂缝尖端扩展(可能伴随水锤效应)等原因，数据整体呈现下降趋势，并可能出现不稳定波动。此后，随着流体压力的下降，刚度缓慢增加。

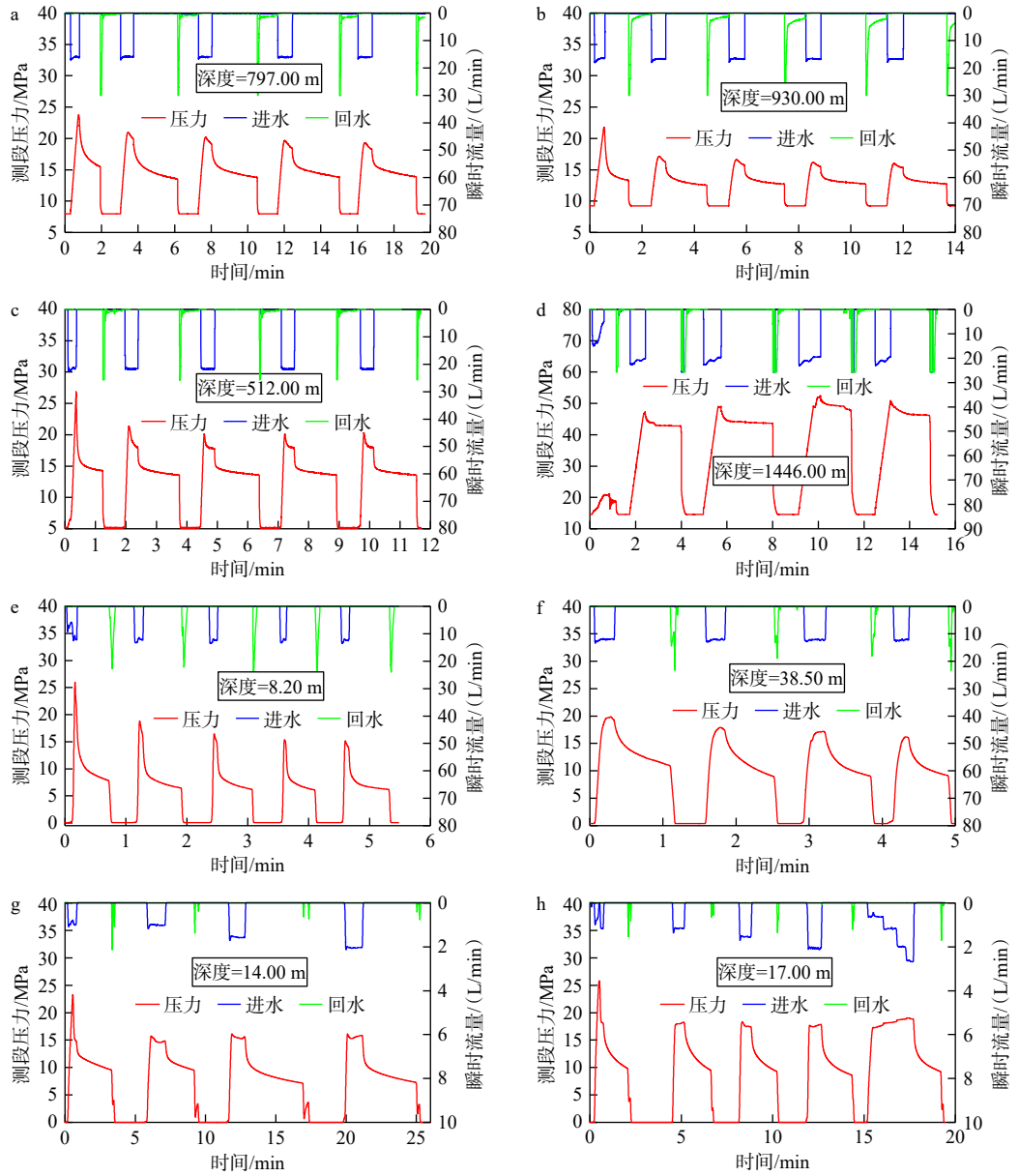
第 II 阶段：裂缝尖端闭合至裂缝完成闭合。随着裂缝壁的接触，裂缝刚度增加速度变快，导致总系统刚度的快速增加。相较于第 I 阶段，该阶段曲线更加连续，总体呈现单调快速增加的趋势。

第 III 阶段：裂缝闭合后。该阶段的刚度曲线趋于水平，或随压力下降呈均匀缓慢的增加，表明闭合已基本完成，总系统刚度由测试系统的水体体积主导，而裂缝刚度已趋于无限大。

综上所述，TSS 方法中裂缝开始闭合点(闭合压力上限值)可在刚度开始持续明显增加时选取，但受系统摩阻和裂缝尖端扩展等原因影响，该点的拾取可能存在一定的主观性；裂缝闭合完成点(闭合压力下限值)则对应刚度开始趋于稳定时，即曲线近似水平时选取，可由切线的方法确认。因此，该方法拾取的 2 个拐点可同时确定裂缝闭合压力的上下限，其均值可作为确定最小(水平)主应力量值的稳健取值。

3 讨论

该研究表明，水力裂缝的闭合是一个渐进的复杂过程，即存在一个发生闭合所需的时间区间，而非瞬时事件。因此，使用传统闭合压力分析方法时应该谨慎小心，特别是那些仅可识别单独闭合点的



a—花岗岩，测深 797.00 m；b—花岗岩，测深 930.00 m；c—灰岩，测深 512.00 m；d—硅质岩，测深 1446.00 m；e—片麻岩，测深 8.20 m；f—片麻岩，测深 38.50 m；g—花岗岩，测深 14.00 m(水平孔)；h—花岗岩，测深 17.00 m(水平孔)

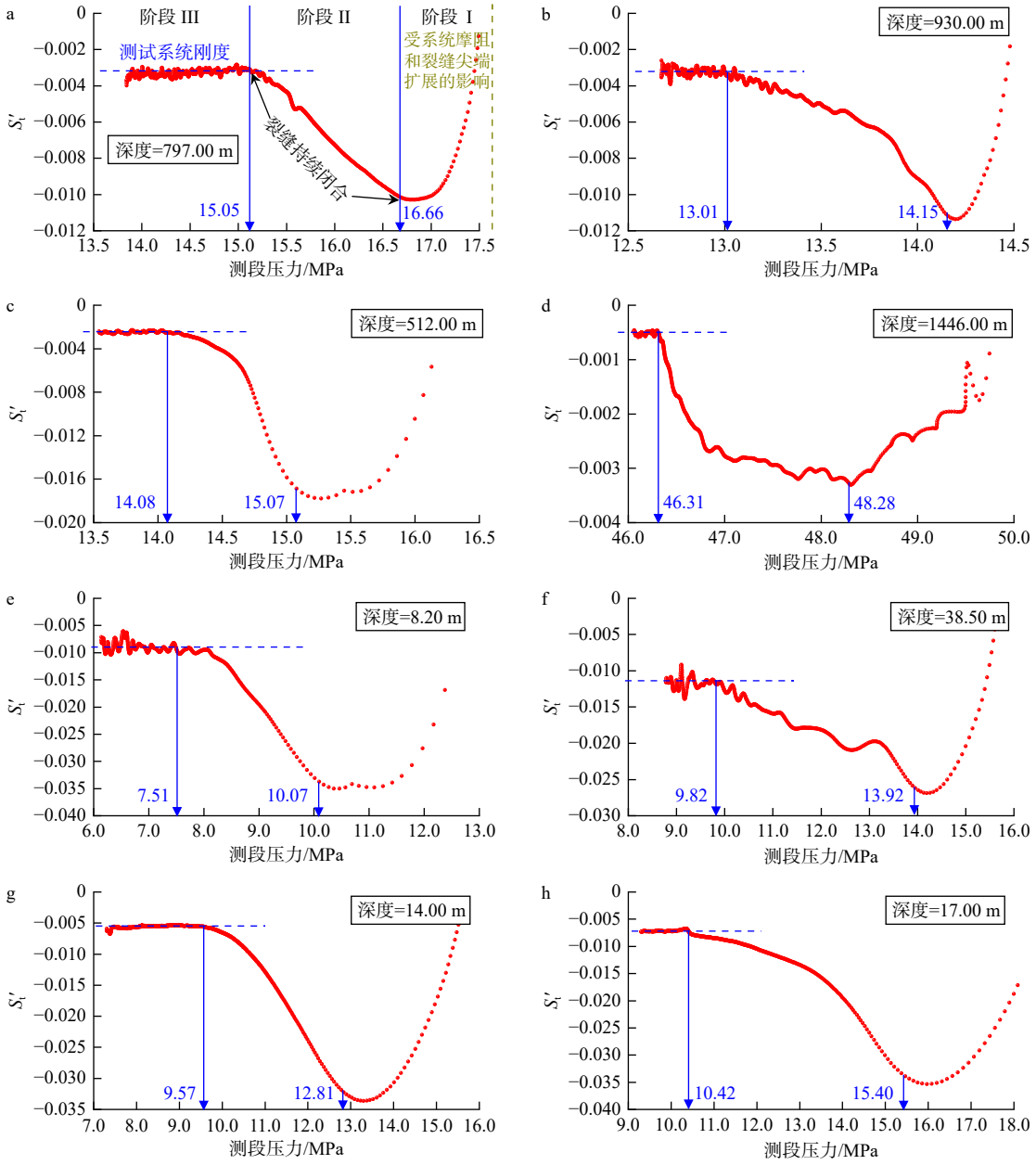
图 4　各测段水压致裂地应力测量压力和流量曲线

Fig. 4　Pressure and flowrate curves of hydraulic fracturing in situ stress measurements

(a) Granite, depth 797.00 m; (b) Granite, depth 930.00 m; (c) Limestone, depth 512.00 m; (d) Siliceous rock, depth 1446.00 m; (e) Gneiss, depth 8.20 m; (f) Gneiss, depth 38.50 m; (g) Granite, depth 14.00 m (horizontal borehole); (h) Granite, depth 17.00 m (horizontal borehole)

方法。首先，传统分析方法取值点的物理意义及其所对应的裂缝闭合状态存在一定的模糊性；其次，传统方法难以确定压裂缝是否完成闭合，导致时间窗口的终点在测试中是不确定的，而这种不确定性一般取决于现场工程师的经验。此外，数据处理人员在选择时间窗口的终点时也可能会引入主观性。换言之，在使用基于切线或者最佳拟合线的取值方法时，分析结果会受计算所用时间窗口的影响，进而引入误差，因为无论时间窗口右界在什么位置此类方法似乎总是可以取值(Yang et al., 2025)。这一问题在深孔(系统水体柔度大)或低渗透岩体(渗透率低)应力测试中愈加突出。

基于刚度演化特征的 TSS 方法为识别裂缝闭合过程提供了有价值的参考，可同时获得闭合压力的上限和下限，其均值可视为确定地层最小水平主应力或最小主应力的稳健估计值。与单点取值的



蓝色箭头代表识别闭合的特征拐点

a—花岗岩，测深 797.00 m; b—花岗岩，测深 930.00 m; c—灰岩，测深 512.00 m; d—硅质岩，测深 1446.00 m; e—片麻岩，测深 8.20 m; f—片麻岩，测深 38.50 m; g—花岗岩，测深 14.00 m(水平孔)；h—花岗岩，测深 17.00 m(水平孔)

图 5 各水压致裂测段最后一个重张回次的 TSS 法分析结果

Fig. 5 The TSS method analysis results of the last re-opening cycle in each hydraulic fracturing measurement interval

(a) Granite, depth 797.00 m; (b) Granite, depth 930.00 m; (c) Limestone, depth 512.00 m; (d) Siliceous rock, depth 1446.00 m; (e) Gneiss, depth 8.20 m; (f) Gneiss, depth 38.50 m; (g) Granite, depth 14.00 m (horizontal borehole); (h) Granite, depth 17.00 m (horizontal borehole)

The blue arrows indicate the inflection points for identifying fracture-closure behavior.

方法相比，该区间化的结果不仅在理论上更符合裂缝力学过程，也为工程实践提供了更稳健的设计依据。在实际应用中，可根据具体情况独立选择合适的压力点。例如，在确定储气库上限运行压力或隧道衬砌设计时，可只选择闭合压力的下限值参与计算和设计，为工程建设和运行带来额外的安全系数。

利用文章提出的方法，已对数十个来自不同钻孔、不同岩性和不同深度的水压致裂测试曲线进行了分析，大多数解释结果呈现出与图 3 和图 5 类似的三阶段物理特征，仅有个别案例未能达到预期结

果。分析结果未达预期特征的原因可能包括短暂的压降时间、诱导裂缝尺寸、裂缝壁粗糙度或者测试系统本身的密封性等，额外的钻孔测试数据和其他测试手段有助于更全面地阐明这些现象。此外，TSS 方法的推导计算过程中不依赖裂缝几何模型的具体假设，如经典的 PKN、KGD 或者径向裂缝模型（Economides and Nolte, 2000），避免了模型假设与实际裂缝形态不符引入的误差，从而具有较强适用性。

总之，地层岩石属性、裂缝几何尺寸、天然裂缝、测试系统柔度以及原位地应力状态等诸多因素都会影响水压致裂地应力测试数据的特征，导致不同地点的测试曲线存在差异。对于一个给定的测试曲线，某些闭合压力取值方法可能比其他方法更合适。因此，强烈建议采用多种数据分析方法进行综合分析，并将 TSS 方法作为其中一个关键的诊断技术。未来的研究中，应进一步探索压力瞬态分析方法与井下动态成像、测段温度、测段流量和微地震等多源监测数据的融合潜力，以增强闭合压力识别的物理约束，确保对闭合压力的可靠估计，从而为深部地应力测量提供更坚实的技术支撑。

4　结论

（1）由裂缝闭合主导的总系统刚度演化过程可分为 3 个主要阶段。第 I 阶段，关泵至裂缝尖端闭合，数据整体呈现下降趋势，并可能出现不稳定波动，随着流体压力的下降，刚度缓慢增加；第 II 阶段，裂缝尖端闭合至裂缝完成闭合，刚度呈现连续快速增加的趋势；第 III 阶段，裂缝闭合后，刚度趋于稳定。

（2）TSS 方法能够表征压力衰减阶段总系统刚度的演化趋势，其特征可确定闭合压力的上下限。上限，即裂缝尖端闭合，在刚度曲线开始持续显著增加时选取；下限，即裂缝完全闭合，在刚度曲线开始趋于稳定时选取。两者均值可作为确定测点最小主应力或最小水平主应力的稳健估计值。

（3）与传统方法相比，TSS 方法受时间窗口影响减小，且具有较强的适用性，可用于分析水力裂缝是否完全闭合，并评估压力曲线是否适用于获取原位应力信息。其计算过程简单，仅依赖于压力数据，无需拟合或外推。将该方法集成到水压致裂数据系统采集中，能够在压力衰减阶段实时分析水力裂缝的闭合状态，从而为现场工程师进行泄压等操作提供重要参考。

References

AMADEI B, STEPHANSSON O, 1997. Rock stress and its measurement［M］. Dordrecht: Springer.

BRUDY M, ZOBACK M D, FUCHS K, et al., 1997. Estimation of the complete stress tensor to 8 km depth in the KTB scientific drill holes: implications for crustal strength［J］. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 102(B8): 18453-18475.

CHEN Q C, SUN D S, CUI J J, et al., 2019. Hydraulic fracturing stress measurements in Xuefengshan deep borehole and its significance［J］. Journal of Geomechanics, 25(5): 853-865. (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 Confining Pressures［J］. Geoscience, 37 (4): 972-976. DOI:10.19657/j.geoscience.1000-8527.2023.059. (in Chinese with English abstract)

DONG S W, LI T D, GAO R, et al., 2010. International progress in probing the earth's lithosphere and deep interior: a review［J］. Acta Geologica Sinica, 84(6): 743-770. (in Chinese with English abstract)

ECONOMIDES M J, NOLTE K G, 2000. Reservoir stimulation［M］. 3rd ed. New York: Wiley.

FAN T Y, LU C X, LU G X. Analysis of Crustal Stress in Tectonic Ore-forming Processes: Research Status and Thought［J］. Geoscience, 2024, 38 (04) : 865-872. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2024.086. (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)

GUO F, MORGENSTERN N R, SCOTT J D, 1993. Interpretation of hydraulic fracturing pressure: a comparison of eight methods used to identify shut-in pressure［J］. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 30(6): 627-631.

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.

HU C Y, LI C, YANG Z B, et al., 2024. Quantitative evaluation of maximum operating pressure and storage capacity for gas-top sandstone reservoir-type gas storage［J］. Journal of Geomechanics, 30(3): 419-426. (in Chinese with English abstract)

ITO T, EVANS K, KAWAI K, et al., 1999. Hydraulic fracture reopening pressure and the estimation of maximum horizontal stress［J］. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36(6): 811-826.

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.

QIN X H, CHEN Q C, TAN C X, et al., 2013. Analysis of current geostress state and seismic risk in southwest segment of Longmenshan fracture belt［J］. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 32(S1):

2870-2876. (in Chinese with English abstract)

RAAEN A M, SKOMEDAL E, KJØRHOLT H, et al., 2001. Stress determination from hydraulic fracturing tests: the system stiffness approach[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38(4): 529-541.

RALEIGH C B, HEALY J H, BREDEHOEFT J D, 1976. An experiment in earthquake control at Rangely, Colorado[J]. Science, 191(4233): 1230-1237.

SCHMITT D R, HAIMSON B, 2017. Hydraulic fracturing stress measurements in deep holes[M]//FENG X T. Rock mechanics and engineering volume 1. London: CRC Press.

SUN D S, FENG C J, XU H B, et al., 2015. In-situ stress measurement at deep borehole of Dataigou Iron Mine area and its application[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 46(4): 1384-1392. (in Chinese with English abstract)

TRINH N Q, HAGEN S A, STRØMSVIK H, et al., 2023. Two new methods for defining shut-in pressure in hydraulic fracturing tests[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 56(4): 3055-3076.

VOGLER D, SETTGAST R R, ANNAVARAPU C, et al., 2018. Experiments and simulations of fully hydro-mechanically coupled response of rough fractures exposed to high-pressure fluid injection[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123(2): 1186-1200.

WANG C H, SONG C K, XING B R, 2012. Compliance of drilling-rod system for hydro-fracturing in situ stress measurement and its effect on measurements at great depth[J]. Geoscience, 26(4): 808-816. (in Chinese with English abstract)

WANG H Y, SHARMA M M, 2017. New variable compliance method for estimating in-situ stress and leak-off from DFIT data[C]//Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio: OnePetro: SPE-187348-MS.

YANG Y H, GAO G L, WANG F, et al., 2022. Layered in-situ stress measurement method for perforated interval of Nanpu Gas Storage, Jidong Oilfield[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 41(9): 1029-1035. (in Chinese with English abstract)

YANG Y H, SUN D S, MA X D, et al., 2025. A total system stiffness approach for determining shut-in pressure in hydraulic fracturing stress measurements[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 192: 106160.

附中文参考文献

陈群策，孙东生，崔建军，等，2019. 雪峰山深孔水压致裂地应力测量及其意义[J]. 地质力学学报，25(5)：853-865.

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. DOI:10.19657/j.geoscience.1000-8527.2023.059.

董树文，李廷栋，高锐，等，2010. 地球深部探测国际发展与我国现状综述[J]. 地质学报，84(6)：743-770.

范桃园，吕承训，吕古贤. 2024. 构造成矿作用的地应力分析：研究现状与思考[J]. 现代地质，38(4)：865-872. DOI:10.19657/j.geoscience.1000-8527.2024.086.

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.

胡彩云，李聪，杨智斌，等，2024. 气顶砂岩油藏型储气库运行上限压力和库容量定量评价研究[J]. 地质力学学报，30(3)：419-426.

秦向辉，陈群策，谭成轩，等，2013. 龙门山断裂带西南段现今地应力状态与地震危险性分析[J]. 岩石力学与工程学报，32(S1)：2870-2876.

孙东生，丰成君，许洪斌，等，2015. 大台沟矿区深孔水压致裂原地应力测量及应用[J]. 中南大学学报(自然科学版)，46(4)：1384-1392.

王成虎，宋成科，邢博瑞，2012. 水压致裂应力测量系统柔性分析及其对深孔测量的影响[J]. 现代地质，26(4)：808-816.

杨跃辉，高广亮，王芳，等，2022. 冀东南堡储气库射孔段分层地应力测量方法[J]. 油气储运，41(9)：1029-1035.