基于刚度变化特征的最小主应力分析方法研究

杨跃辉，陈群策，孙东生，吴邦宸

地应力研究室，自然资源部地应力工程技术创新中心

研究概述：目前，水压致裂法从实测曲线中获取裂缝闭合压力具有一定模糊性，严重影响地应力测试结果可靠性，根本原因在于传统取值方法普遍缺乏对压力衰减过程中水力耦合机制和变化特征的定量刻画，以及裂缝闭合前后对应于压降曲线的特征反应。针对实测压力时间曲线(如图1)，推导了用于描述注入及压力衰减阶段流体累积泄漏体积的本构方程，研究了裂缝闭合过程中总系统刚度的演化规律，提出了一种基于刚度变化特征测定最小主应力分析方法—dP/dC法，并用钻孔实测数据进行了验证(如图2)。

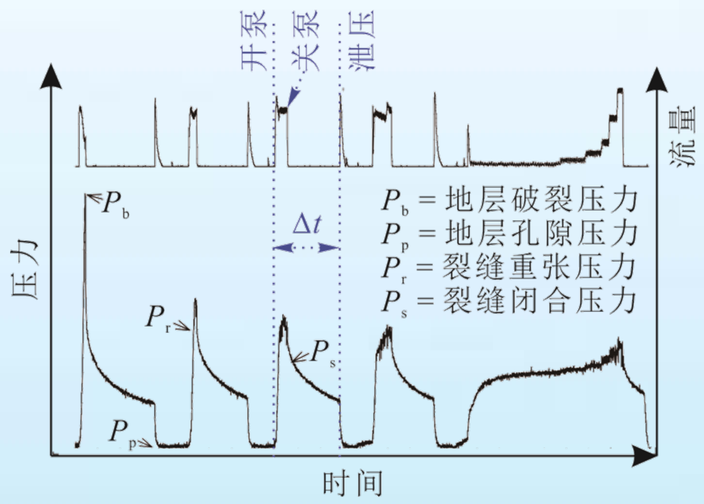

图1 HF典型测试曲线

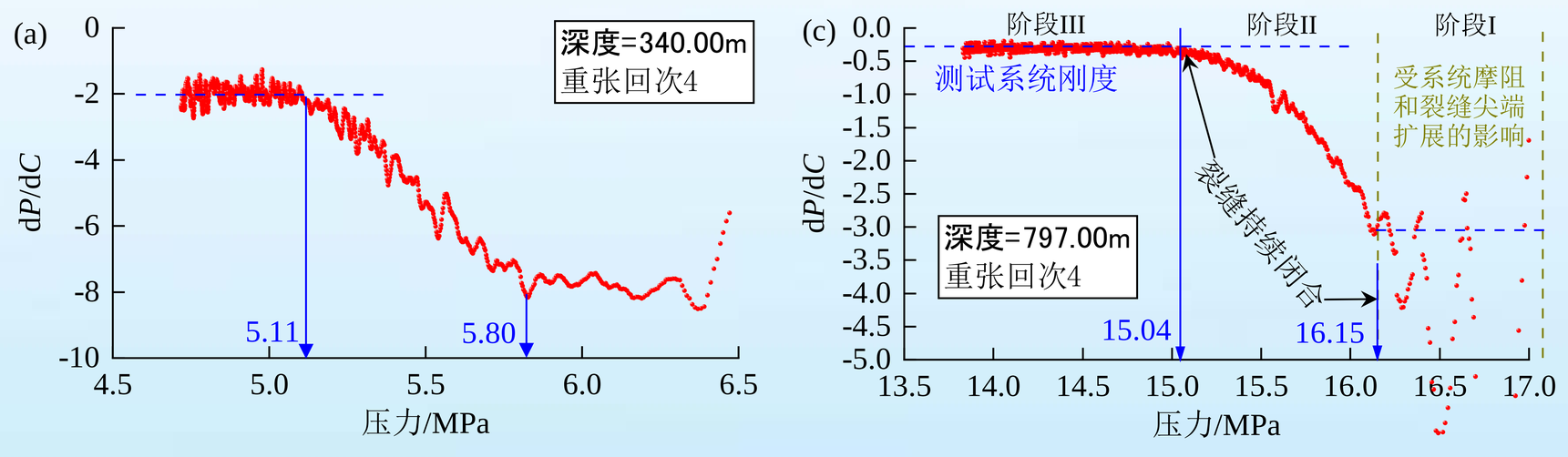

图2 d*P*/d*C*法的分析结果图

理论模型：图3为HF测量基本设备和诱发的压裂缝简图。重张回次中首先是恒定注入阶段(开泵到关泵)，此阶段中不仅有流体的注入，也持续发生着泄漏，但由于注入体积一般远大于泄漏，即$dV_I >> dV_L$，因此压力P会持续增加，而V_L与该阶段总系统刚度S_t的演化几乎无关；之后是压力衰减阶段(关泵到泄压)，该阶段流体压力会随着泄漏的持续而逐渐减小，并在原地应力的作用下裂缝壁逐渐闭合到残余缝宽水平。因此，在裂缝闭合过程中，流体泄漏的体积变化率与裂缝体积变化率近似相等，故压力衰减阶段S_t的演化规律将与裂缝刚度S_f的变化相对应，可由P与V_L的微分商来表征。综上，本文导出了与V_L成正比的C函数，由此通过实测数据得到折算刚度值dP/dC，以刻画刚度的演化历程并确定闭合压力。主要公式如下：

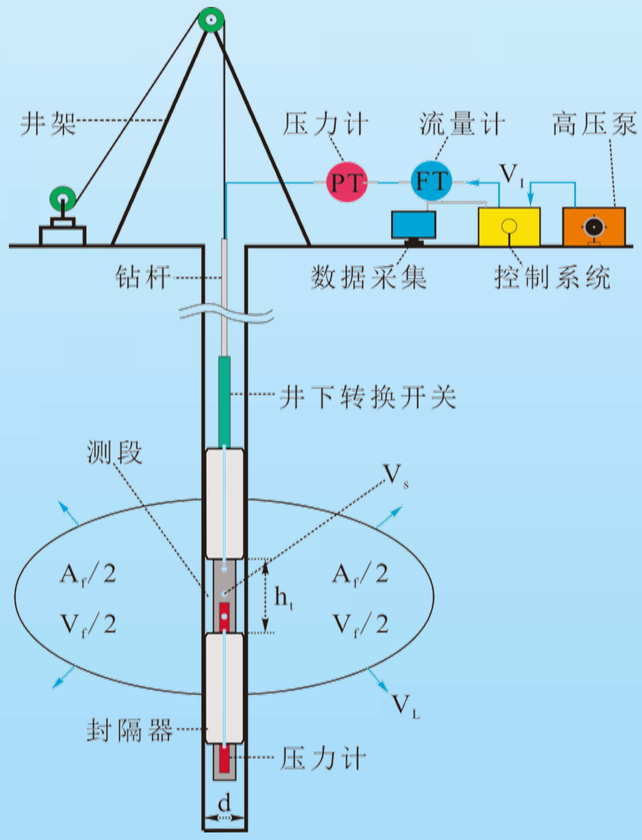

图3 HF测量基本设备及诱发压裂缝

$$A = A_f + \pi d h_t \qquad \tau = \Delta t \, n$$

$$v_L = \frac{C_L}{\sqrt{\Delta t}} \qquad C_L = \left(P - P_p\right)\sqrt{\phi c_t k / \pi\mu} \qquad S_t = \frac{1}{C_t} = \frac{1}{\frac{1}{S_f} + V_s c_w} = \frac{1}{\frac{dV_f}{dP} + V_s c_w} = \frac{1}{A_f \frac{dw_{fm}}{dP} + V_s c_w}$$

$$Q_L = \frac{A\left[P(t) - P_p\right]\sqrt{\phi c_t k / \pi\mu}}{\sqrt{t}} \qquad V_L(t) = A\Psi \int_0^{\Delta t} \frac{P(t) - P_p}{\sqrt{t}} dt$$

$$V_L = A\Psi \sum_{i=1}^{n}\left(\tau \frac{P(i) - P_p}{\sqrt{i\tau}}\right) = A\Psi\sqrt{\tau}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{P(i) - P_p}{\sqrt{i}}\right) = A\Psi\sqrt{\tau}C \qquad C = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{P(i) - P_p}{\sqrt{i}}\right) \propto V_L$$

$$S_t(2 \le i \le n) = \frac{dP}{dV} \approx \frac{dP}{dV_L} \propto \frac{dP}{dC} = \frac{\sqrt{i}\left[P(i) - P(i\text{-}1)\right]}{P(i) - P_p}$$

主要结论：

(1) 系统刚度演化过程分为裂缝尖端闭合、裂缝尖端闭合到完成闭合和裂缝闭合后三个阶段。

(2) 闭合压力上限在刚度开始持续明显增加时选取，闭合压力下限在刚度曲线开始趋于稳定时选取。

(3) 相较于传统方法， dP/dC法取值基本不受时间窗口影响，可用于评价实测曲线的有效性，实时分析裂缝的闭合状态和过程。