

基于组合体力学模型的固井水泥石封隔能力分析

王海柱, 石鲁杰, 郑永, 张诚成
(中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249)

摘 要: 为探究水力压裂过程中水泥石封隔失效的内在机理,建立了一套基于套管-水泥石-地层组合体弹塑性力学模型的水泥石封隔能力失效分析方法,并通过数值模拟和实验分别验证了力学模型和分析方法的可靠性.然后借助等效应力与屈服强度、应变与材料极限伸长率的对比,绘制了水泥石封隔能力图版.研究表明:水泥石弹性模量对水泥石封隔能力影响存在最优区间,在本文研究条件下,水泥石弹性模量在6~9.7 GPa之间有利于保持水泥石封隔能力.研究结果可为不同地区页岩气水平井固井水泥参数选择提供参考.

关 键 词: 水泥石;套管;封隔能力;等效应力;弹性模量
中图分类号: TE 256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2020)09-1334-07

Sealing Capacity Analysis of Cement Sheath Based on Combined Mechanical Model

WANG Hai-zhu, SHI Lu-jie, ZHENG Yong, ZHANG Cheng-cheng
(State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China. Corresponding author: WANG Hai-zhu, E-mail: whz0001@126.com)

Abstract: In order to explore the mechanism of cement sheath sealing failure during hydraulic fracturing, a failure analysis method of cement sheath sealing capacity based on combined casing-cement-formation elastic-plastic mechanical model was established. The reliability of the mechanical model and analysis method was verified by numerical simulation and experimental data. With the comparison of equivalent stress and yield strength, strain and ultimate elongation of the material, the cement sheath sealing capacity chart was drawn. The research shows that there is an optimal range for the influence of the elastic modulus of the cement sheath on its sealing capacity. Under the conditions presented in this paper, the elastic modulus of the cement sheath between 6 and 9.7 GPa is beneficial to maintain its sealing capacity. This study can provide a reference for the cement parameters selection in horizontal well in different shale formations.

Key words: cement sheath; casing; sealing capacity; equivalent stress; elastic modulus

我国页岩气储量丰富,具有广阔的开发前景.目前页岩气井开发手段主要是水平井与多级分段压裂技术相结合,而水平井压裂过程中易造成套管内压的大幅度波动,从而改变水泥石的受力状态,加剧水泥石封隔能力失效的风险.目前国内外学者主要从套管-水泥石-地层组合体受力情况、水泥石形变情况、固井界面胶结情况三个方向对固井水泥石封隔能力进行研究.

从单纯分析套管受力^[1]到分析组合体整体受力^[2]、从单纯借助井筒力学方程到综合使用多种理论与实验方法^[3-6]的演变.组合体受力研究已经成为解释井下作业现象、并揭示其内在原理的主要手段,但是组合体力学状态与固井水泥石封隔能力的关系仍没有被准确地揭示出来.

水泥石形变的研究目的是探究水泥石材料变形规律,与组合体受力研究的主要区别在于该方向研究不通过力学方程而是借助实验手段研究水

泥石的收缩程度、弹性模量、围压、水泥组分等因素对变形程度的影响. 通过水泥石形变实验现象, 可以研究水泥石胶结特性和水泥石微环隙^[7-9]产生规律, 从而为封隔能力预测提供指导.

固井界面的胶结情况是人们关注的重点, 目前最常用的研究方法是通过声波测井对固井两胶结面进行测量并解释. 声波测井方法简单有效但难以揭示固井界面胶结变化的内在机制, 为此学者们多通过室内模拟实验的方法揭示水泥石胶结规律. 1993年 Jackson等^[10]设计一套水泥石气窜检测装置, 使用循环改变套管内压并检测固井两界面是否产生气窜通道的方法对水泥石胶结能力进行研究, 其实验发现气窜通道总是在套管内压卸载时产生; 2007年 Garnier等^[11]通过模拟实验认为单独的水泥石抗压强度难以衡量水泥石胶结能力, 建议在胶结能力评价标准中引入弹性模量和破坏准则; 2011年王克诚等^[12]对受泥饼影响的水泥石胶结能力进行了实验研究, 其认为地层渗透性、环空压差及地层流体扰动共同影响着套管-水泥石界面水力封隔能力; 2019年 Vralstad等^[13]对受套管内压的水泥石进行实时 CT 扫描, 研究了不同弹性模量水泥石的胶结与变形特性.

综上, 水泥石受力及封隔能力方面的研究仍需深入. 本文在前人井下组合体力学研究基础上进行改进, 考虑水泥浆凝固过程对组合体位移分布的影响, 并根据水泥石材料特性推导了水泥石塑性阶段本构方程, 建立了水平井套管-水泥石-地层组合体弹塑性力学模型, 并借助 ANSYS 数值模拟验证该模型准确度. 随后深入分析水泥石封隔能力失效的两种基本形式, 并实现了对水泥石封隔能力的预测.

1 套管-水泥石-地层组合体弹塑性力学模型

1.1 假设条件及物理模型

水平井钻井完毕后需要注水泥固井, 此时水泥浆以流体的方式注入套管与地层间的环空中, 随着水泥浆逐渐凝固, 套管-水泥石-地层三者间应力相互影响, 最终可视为一个整体. 本文选择页岩气水平井为研究对象, 根据其地质及施工条件, 建立套管-水泥石-地层组合体物理模型, 模型假设条件如下:

- 1) 各组分材料为理想弹塑性体, 弹性阶段为线弹性材料, 且均不考虑各向异性;
- 2) 水泥浆完全驱替钻井液, 无泥饼影响;

3) 井眼轴向尺寸远大于径向尺寸, 模型简化为平面应变模型;

4) 忽略温度的影响;

5) 水泥石凝固后胶结界面处位移连续.

页岩气水平井段一般沿着地层最小主应力方向钻进, 井眼在垂向上受到上覆岩层压力, 横向受到地层最大和最小主应力影响. 故水平井段物理模型如图1所示, p_H 为上覆岩层压力, p_h 为最大水平主应力 (下标 H 为上覆岩层, h 为水平 horizontal), 两者均为压应力, p 为井筒内静液柱压力, r_1, r_2, r_3, r_4 分别为套管内半径、水泥石内半径、地层内半径和地层外半径且 $r_4 \geq 10r_3$.

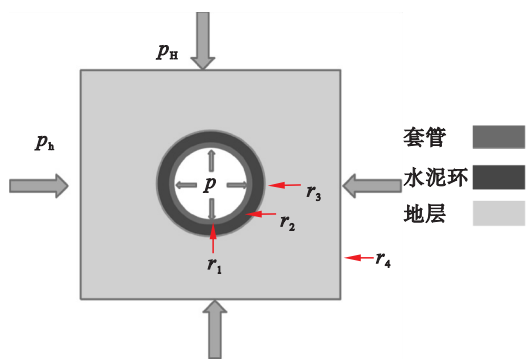


图1 水平井物理模型

Fig. 1 Physical model for horizontal well

1.2 数学模型

根据应力叠加原理, 将非均匀应力模型分解为均匀地应力下圆孔模型和均匀地应力下厚壁圆筒模型, p_H 和 p_h 分解方式为

$$\left. \begin{aligned} p_H &= \frac{p_H + p_h}{2} + \frac{p_H - p_h}{2}, \\ p_h &= \frac{p_H + p_h}{2} - \frac{p_H - p_h}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

整个厚壁圆筒^[14]的平衡方程为

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0. \quad (2)$$

式中, σ_r 为径向应力, σ_θ 为切向应力. 此方程为欧拉二阶线性齐次微分方程, 求得该方程通解, 再结合根据厚壁圆筒边界条件, 求得厚壁圆筒模型弹性阶段应力及位移分布:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{p_1 a^2 - p_2 b^2}{b^2 - a^2} - \frac{(p_1 - p_2) a^2 b^2}{(b^2 - a^2) r^2}, \\ \sigma_\theta &= \frac{p_1 a^2 - p_2 b^2}{b^2 - a^2} + \frac{(p_1 - p_2) a^2 b^2}{(b^2 - a^2) r^2}, \\ \varepsilon - \varepsilon_0 &= \frac{1 - \nu - 2\nu^2}{E} \frac{(p_1 a^2 - p_2 b^2)}{b^2 - a^2} - \\ &\quad \frac{1 + \nu}{E} \frac{(p_1 - p_2) a^2 b^2}{b^2 - a^2} \frac{1}{r^2}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: a 为组合体中套管、水泥石或地层任一内半径; b 为相对应的外半径; ν 为相对应的泊松比; E 为相对应的弹性模量.

关于无限大平面圆孔模型的推导,在弹塑性力学著作也有讲解,本文给出简要推导,假设该模型内应力函数 Φ 为

$$\Phi = -\frac{1}{2}qr^2\cos2\theta.$$

(4)

其中 $q = \frac{p_H - p_h}{2}$. 求解该方程通解,并代入边界条件即可求得无限大平面圆孔模型应力及位移分布:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \left(\frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} + 1\right)q\cos2\theta, \\ \sigma_\theta &= -\left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right)q\cos2\theta, \\ \tau_{r\theta} &= \left(\frac{3a^4}{r^4} - \frac{2a^2}{r^2} - 1\right)q\sin2\theta. \end{aligned} \right\}$$

(5)

式中, θ 表示与水平方向的夹角. 叠加式(4)与式(5),得到非均匀地应力下水泥石弹性阶段力学方程:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{p_1a^2 - p_2b^2}{b^2 - a^2} - \frac{(p_1 - p_2)a^2b^2}{(b^2 - a^2)r^2} + \\ &\quad \left(\frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} + 1\right)q\cos2\theta, \\ \sigma_\theta &= \frac{p_1a^2 - p_2b^2}{b^2 - a^2} + \frac{(p_1 - p_2)a^2b^2}{(b^2 - a^2)r^2} - \\ &\quad \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right)q\cos2\theta, \\ \varepsilon - \varepsilon_0 &= \frac{1 - \nu - 2\nu^2}{E} \frac{(p_1a^2 - p_2b^2)}{b^2 - a^2} - \\ &\quad \frac{1 + \nu}{E} \frac{(p_1 - p_2)a^2b^2}{b^2 - a^2} \frac{1}{r^2}. \end{aligned} \right\}$$

(6)

式中, ε_0 表示模型初始时刻所产生的变形. 模型位移计算需减去 ε_0 ,这是由于实际情况下水泥浆注入井下环空时为流体,后为固体,故初始地层压力的存在并不会使固体状态的水泥石发生形变. 即在水泥石凝固后,其内初始应力不为零,初始位移为零. 故位移计算中减去初始位移才符合井下实际工况.

当组合体不发生塑性变形时,方程(6)可计算组合体弹性阶段的应力与应变大小.

塑性变形是当材料受力超过一定极限时产生不可恢复的变形. 塑性变形阶段水泥石变形量较大,极易产生微环隙,研究水泥石封隔能力不能忽略水泥石塑性阶段的变形规律. 而在水平井压裂过程中,套管内压不断升高,造成水泥石产生塑性

屈服后,弹性阶段的力学方程不再适用于水泥石塑性区,故需建立塑性阶段的组合体力学模型.

平面应变状态下的米泽斯屈服条件为

$$\sigma_\theta - \sigma_r = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_s.$$

将米泽斯屈服条件代入组合体力学平衡方程(2),再根据塑性区边界条件可求得塑性区应力分布^[14]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -p_3 + \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_s \ln \frac{r}{a}, \\ \sigma_\theta &= \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_s \left(1 + \ln \frac{r}{a}\right) - p_3. \end{aligned} \right\}$$

(7)

式中 p_3 指套管外壁处径向应力.

由于塑性变形受外力加载历史影响,仅仅求出塑性区应力分布并不足以计算水泥石塑性变形. 本文根据前人对水泥材料弹塑性的实验研究结果^[15-16],选择幂次强化模型对水泥石塑性变形进行简化研究,如图 2 所示.

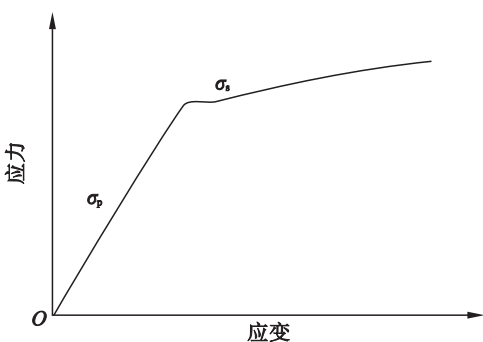


图 2 幂次强化模型示意图^[14]
Fig. 2 Schematic diagram of power enhancement model

图 2 中 σ_p 、 σ_s 分别表示弹性阶段应力和塑性阶段应力. 材料卸载服从弹性卸载定律, ε_p 为残余应变. 针对水泥石而言,在套管内压较小时,其应力小于 σ_s ,水泥石处于弹性变形阶段,本构方程为 $\sigma = E\varepsilon$. 当套管内压逐渐增大,水泥石应力大于 σ_s 后,进入塑性变形阶段,本构方程为 $\sigma = A\varepsilon^B$.

该模型表达式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma &\leq \sigma_s, \sigma = E\varepsilon, \\ \sigma &> \sigma_s, \sigma = A\varepsilon^B. \end{aligned} \right\}$$

(8)

将塑性区应力分布式(7)代入式(8)中得到塑性区域本构方程:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -p_3 + \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_s \ln \frac{r}{a}, \\ \sigma_\theta &= \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_s \left(1 + \ln \frac{r}{a}\right) - p_3, \\ u &= \sqrt{\frac{B}{A}} \frac{\sigma}{\sigma_s}. \end{aligned} \right\}$$

(9)

式中 A, B 均为根据实验所确定的常量. 从前人的实验数据来看, 在有围压的情况下, A 一般大于 20, B 一般小于 0.4.

2 水泥石封隔能力失效分析方法

根据文献[17-18]的研究, 横向封隔能力失效的原因为: 套管内压升高, 水泥石受压变形, 当水泥石变形量超过其极限伸长应变率时, 水泥石内部产生微裂纹, 油气水沿横向微裂纹进入组合体内, 造成封隔能力失效.

纵向封隔能力失效的原因为: 套管内压从高压开始降低, 水泥石在高压状态时由于发生塑性变形, 其部分变形不可恢复, 套管内压降低后, 可能会造成胶结界面分离而引起水泥石纵向封隔失效.

横向封隔能力失效的判断适用第二强度理论, 该理论认为材料断裂只与极限伸长线应变有关, 与应力状态无关. 判断条件为

$$\varepsilon_1 \leq [\varepsilon]. \tag{10}$$

结合第 1 节中组合体弹性阶段力学模型可求得横向封隔能力失效的判断准则:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r - \varepsilon_0 &\leq [\varepsilon], \\ \varepsilon_\theta - \varepsilon_0 &\leq [\varepsilon]. \end{aligned} \right\} \tag{11}$$

式中: ε_1 表示任一点处应变; $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$ 表示水泥石径向及切向应变.

纵向封隔能力失效适用第四强度理论的米泽斯屈服准则. 水泥石的纵向封隔能力失效的判断表达式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{1,2} &= \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{r\theta}^2}, \\ \sigma &= \sqrt{\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_1 \sigma_2}{2}} \leq \sigma_s. \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

式中: σ 表示米泽斯等效应力; $\sigma_{1,2}$ 表示第一与第二主应力.

通过式(6)和式(12)两个判别式分别结合水泥石材料特性中的许用应变和屈服应力, 可判断在不同井下工况下水泥石横向封隔能力和纵向封隔能力是否失效.

3 模型可靠性验证

本文研究内容主要为套管-水泥石-地层组合体弹塑性力学模型和水泥石封隔能力失效分析方法, 对二者分别采用数值模拟对比和实验对比的方式, 验证本文理论研究的可靠性.

选取延长地区页岩气延 A 井的参数, 作为可

靠性验证和实例分析中本文理论模型计算数据, 如表 1 所示.

Table 1 Wellbore parameters of Yan A well			
部位	内径/mm	弹性模量/GPa	泊松比
套管	121.4	210	0.3
水泥石	139.7	10	0.15
地层	222.4	27	0.2

3.1 组合体力学模型验证

在 ANSYS 数值模拟软件中根据表 1 所示参数建立井筒几何模型, 几何模型设为三维模型, 套管、水泥石、地层 Z 轴方向厚度均为 10 mm, 采用自由体网格划分方式对套管、水泥石、地层三者进行网格划分. 网格划分结果如图 3 所示.

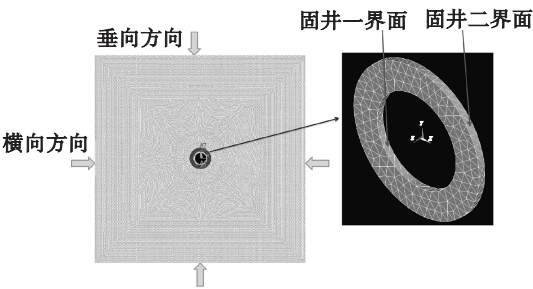


图 3 组合体整体及局部放大图
Fig. 3 Global and local meshing of combination

定义固井一界面与固井二界面接触类型时, 分别建立套管、水泥石、地层的节点组件, 固井两个界面均设为面面接触, 材料单元间摩擦系数设为 0.25, 接触性质为弹性接触. 套管内壁面施加表面应力 70 MPa, 组合体垂向方向施加表面应力 18 MPa, 组合体横向方向施加表面应力 16 MPa.

模型求解后提取水泥石横向和垂向的等效应力分布, 将其与相同条件下的本文理论模型计算结果进行对比, 如图 4、图 5 所示.

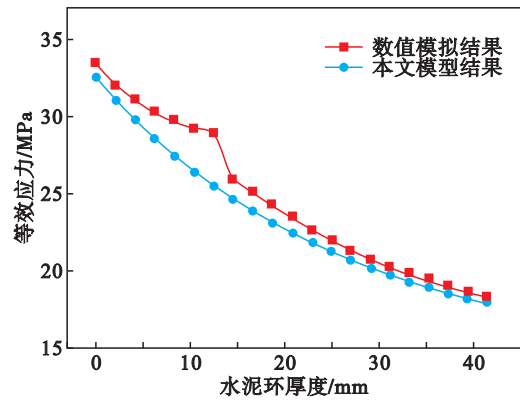


图 4 横向方向水泥石等效应力分布
Fig. 4 Lateral equivalent stress distribution of cement sheath

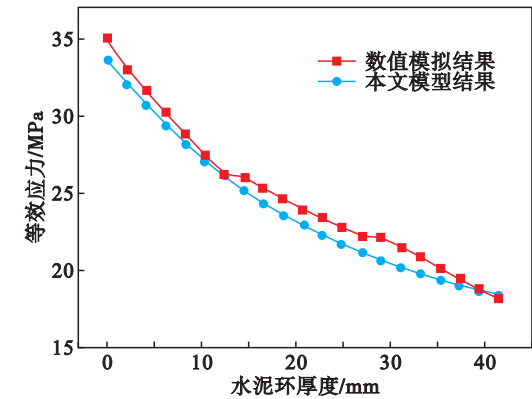


图 5 垂向方向水泥石等效应力分布
Fig. 5 Vertical equivalent stress distribution of cement sheath

从图 4,图 5 中可以看出,数值模拟结果与本文组合体力学模型计算结果基本一致,平均偏差不超过 7%,充分验证了组合体力学模型的可靠性.

3.2 水泥石封隔能力失效分析方法验证

采用 1993 年 Jackson 固井水泥石封隔能力检测实验结果对本文理论模型进行验证. 结合 Jackson 等对该种水泥的测量得到的应力-应变曲线(文献[10]图 1),可得到该种水泥石的屈服强度约为 30 MPa,极限伸长率约为 0.2%.

将其室内实验的参数代入本文模型编制的 MATLAB 程序中,求得在实验中水泥石内壁处等效应力与应变的变化过程,如图 6 所示.

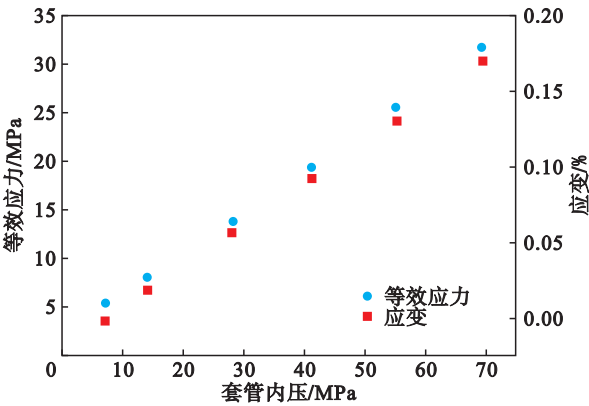


图 6 Jackson 实验中等效应力与应变
Fig. 6 Equivalent stress and strain in Jackson experiment

从图 6 中也可以看出,套管内压升至 69 MPa 后水泥石等效应力为 31.8 MPa,应变为 0.17%. 此时水泥石等效应力超过 30 MPa 屈服强度,应变未超过 0.2% 极限伸长率. 根据本文水泥石封隔能力失效分析方法,此时气窜是由于水泥石产生塑性变形而产生微环隙导致的. 该解释与实验中气窜后水泥石仍保持完整的实验现象一致.

对上述情况分析可以看出,本文水泥石封隔能力失效分析方法可以合理解释封隔能力失效的实验现象.

4 实例分析

4.1 水泥石弹性模量对封隔能力的影响

考察水泥石弹性模型对封隔能力的影响,对现场水泥种类和组分选择具有重要意义. 根据本文模型,求解不同条件下的水泥石等效应力与应变. 通过计算,当套管内压为 80 MPa 时,水泥石等效应力随水泥石弹性模量变化如图 7 所示.

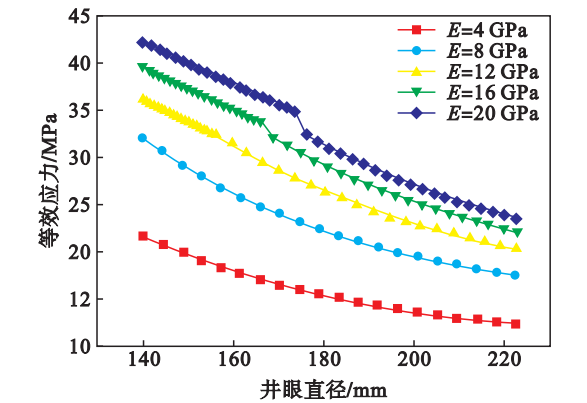


图 7 不同弹性模量下水泥石等效应力变化
Fig. 7 Equivalent stress change of cement sheath under different elastic modulus

由图 7 可知,同一弹性模量下,水泥石等效应力随水泥石直径增大而逐渐减小;同一水泥石直径下,水泥石等效应力随弹性模量的增大而增大. 弹性模量大于 12 GPa 的水泥石等效应变曲线均出现突变点,证明其在套管内压 80 MPa 时出现了塑性变形. 并随着弹性模量增大,其塑性区域不断增大.

从图 7 中发现,当弹性模量为 4,8 GPa 时,水泥石处于弹性变形阶段,需根据水泥石应变状态进一步判断其封隔能力是否失效,根据本文模型求得套管内压 80 MPa 时该两种水泥石应变,如图 8 所示.

由图 8 可知,同一弹性模量下,水泥石等效应变随直径增大而逐渐减小;同一水泥石直径下,弹性模量越小水泥石应变越大. 在该计算条件下,弹性模量为 4 GPa、直径在 139 ~ 152 mm 区间的水泥石应变已经超过 0.2%,该区间水泥石内部变形超过材料极限拉伸极限,已经出现不可逆的微裂纹,可判断当套管内压为 80 MPa 时,弹性模量为 4 GPa 的水泥石封隔能力已失效.

同理,弹性模量为 8 GPa 的水泥石由于应变

并未超过极限伸长率 0.2%, 判断当套管内压为 80 MPa 时,弹性模量为 8 GPa 的水泥石封隔能力未失效。

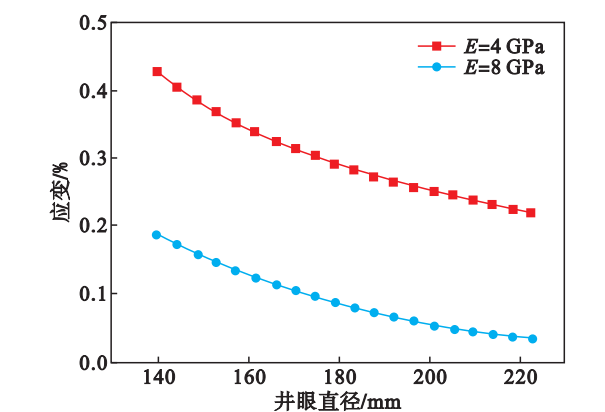


图 8 水泥石应变变化趋势
Fig. 8 Change trend of strain for cement sheath

综上可知,在水泥石弹性模量参数选择中应综合考虑等效应力与应变程度。根据本文理论模型计算套管内压为 80 MPa 时等效应力和应变随水泥石弹性模量的变化曲线,如图 9 所示。

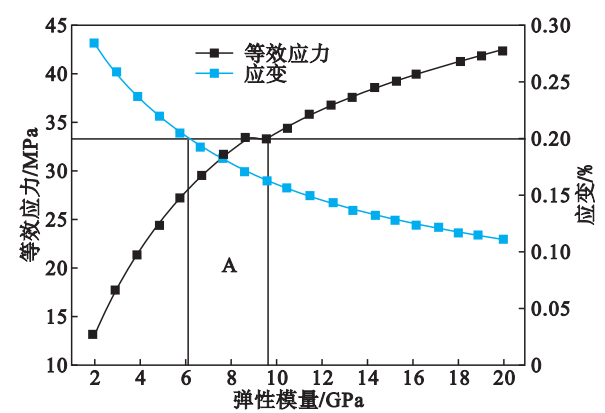


图 9 水泥石封隔能力图版
Fig. 9 Sealing capacity of cement sheath

等效应力和应变随水泥石弹性模量的变化曲线也可称为水泥石封隔能力图版。因为从图中可预测水泥石封隔能力何时失效,当水泥石弹性模量为 4 GPa 时,水泥石等效应力 36.6 MPa、应变 0.24%, 其应变超过极限伸长率,故水泥石发生纵向封隔能力失效。

从图 9 中可以看出,随着水泥石弹性模量增大,水泥石所受等效应力逐渐增大,应变逐渐减小。其中 A 区域水泥石等效应力未超过等效屈服应力,应变未超过极限伸长率,故此范围内水泥石封隔能力完好,即弹性模量为 6 ~ 9.7 GPa 的水泥石有利于保持水泥石封隔能力。

4.2 套管内压对封隔能力的影响

根据本文理论模型计算其水泥石内壁处等效

应力与应变随套管内压变化曲线,如图 10 所示。

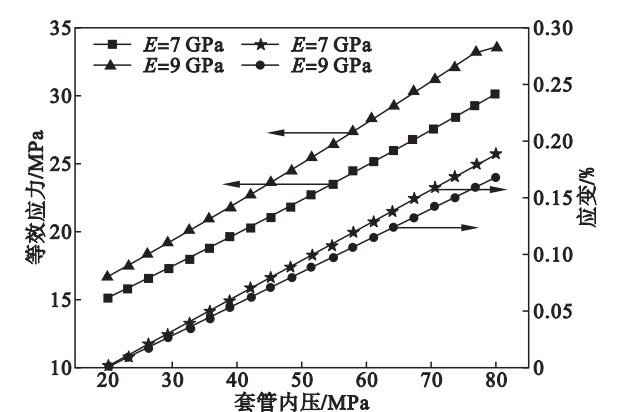


图 10 等效应力与应变随套管内压变化曲线
Fig. 10 Variation curves of equivalent stress and strain with casing pressure in casing

从图 10 可以看出,等效应力与应变均随套管内压增大而增大,且增长趋势都近似为直线。从 4 条曲线对比来看,两种水泥石在套管内压变化全过程中等效应力与应变均未超过极限值,故两种水泥石均可在套管内压变化全过程中保持封隔能力。

现场实际选择时,应以水泥石的屈服应力和极限伸长率为依据,结合封隔能力图版来选择水泥石最优配方。

5 结 论

1) 水泥石封隔能力失效形式主要分为横向封隔能力失效和纵向封隔能力失效,横向封隔能力失效主要由水泥石所受等效应力超过屈服强度引起,纵向封隔能力失效主要由水泥石应变超过极限伸长率引起。

2) 同一条件下,低弹性模量水泥石的等效应力小、应变大,适用于高压地层;高弹性模量水泥石等效应力大、应变小,适用于低压地层。

3) 水泥石弹性模量对封隔能力影响存在最优区间,根据水泥石封隔能力图版,在本文计算条件下水泥石弹性模量在 6 ~ 9.7 GPa 之间有利于保持水泥石封隔能力。

参考文献:

[1] Miles A J, Topping A D. Stresses around a deep well [J]. *Transactions of the AIME*, 1949, 179 (1): 186 – 191.
[2] Zinkham R E, Goodwin R J. Burst resistance of pipe cemented into the earth [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1962, 14 (9): 1033 – 1040.
[3] Li Y, Yuan J, Qi F, et al. Analysis of cemented casing mechanical failure under arbitrary in-situ stress field coupling effects of down hole pressure and temperature [C] // IADC/

- SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition. Tianjin; Society of Petroleum Engineers, 2012: 118 – 126.
- [4] Ferda A, Al-Ghadban H H. Simulation investigation of casing eccentricity estimation for different inclination angles and tensile forces using finite element method [C]//SPE International Petroleum Conference. Mexico City; Society of Petroleum Engineers, 2004: 26 – 41.
- [5] Salehabadi M, Jin M, Yang J, et al. Effect of casing eccentricity on casing stability analysis in wellbores drilled in gas hydrate bearing sediments[C]//SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition. Barcelona; Society of Petroleum Engineers, 2010: 67 – 82.
- [6] Gholami R, Aadnøy B, Fakhari N. A thermo-poroelastic analytical approach to evaluate cement sheath integrity in deep vertical wells [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, 147: 536 – 546.
- [7] Boukhelifa L, Moroni N, James S, et al. Evaluation of cement systems for oil and gas well zonal isolation in a full-scale annular geometry [J]. *SPE Drilling & Completion*, 2005, 20 (1): 44 – 53.
- [8] 初伟, 沈吉云, 杨云飞, 等. 连续变化内压下套管 – 水泥石 – 围岩组合体微环隙计算 [J]. 石油勘探与开发, 2015, 42 (3): 379 – 385.
(Chu Wei, Shen Ji-yun, Yang Yun-fei, et al. Calculation of micro-annulus size in casing-cement sheath-formation system under continuous internal casing pressure change [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42 (3): 379 – 385.)
- [9] Tabatabaei M, Dahi T A, Alem N. Economic nano-additive to improve cement sealing capability [C]//SPE Western Regional Meeting. San Jose; Society of Petroleum Engineers, 2019: 156 – 163.
- [10] Jackson P B, Murphey C E. Effect of casing pressure on gas flow through a sheath of set cement [C]//SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam; Society of Petroleum Engineers, 1993: 223 – 233.
- [11] Garnier A, Fraboulet B, Saint-Marc J, et al. Characterization of cement systems to ensure cement sheath integrity [C]//Offshore Technology Conference. Houston, 2007: 182 – 193.
- [12] 王克诚, 张立, 杨秀天, 等. 套管 – 水泥石界面水力封隔能力室内实验研究 [J]. 西部探矿工程, 2011, 23 (5): 69 – 70.
(Wang Ke-cheng, Zhang Li, Yang Xiu-tian, et al. Laboratory experimental study on hydraulic sealing capability of casing-cement ring interface [J]. *West-China Exploration Engineering*, 2011, 23 (5): 69 – 70.)
- [13] Vralstad T, Skorpa R, Werner B. Experimental studies on cement sheath integrity during pressure cycling [C]//SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition. Amsterdam; Society of Petroleum Engineers, 2019: 78 – 92.
- [14] 张靖华. 弹塑性力学基础 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2016: 171.
(Zhang Jing-hua. *Elastoplastic mechanics* [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2016: 171.)
- [15] Witt C, Tahmourpour F. Thermal sealants improve cementing in SAGD areas [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2009, 48 (6): 39 – 43.
- [16] Tahmourpour F, Hashki K, Elhassan H I. Different methods to avoid annular pressure buildup by appropriate engineered sealant and applying best practices (cementing and drilling) [J]. *SPE Drilling & Completion*, 2010, 25 (2): 248 – 252.
- [17] 刘继生, 曾桂红, 谢荣华, 等. 固井形成的水力封隔系统封隔能力评价方法 [J]. 测井技术, 2006 (1): 94 – 96.
(Liu Ji-sheng, Zeng Gui-hong, Xie Rong-hua, et al. Evaluation of isolation ability of the hydraulic isolating system formed by cementing [J]. *Well Logging Technology*, 2006 (1): 94 – 96.)
- [18] 景丰. 陆相页岩气水平井中增韧防气窜固井水泥浆体系的研究 [J]. 石油化工应用, 2018, 37 (7): 5 – 10.
(Jing Feng. Study on cementing slurry system of toughening and preventing gas channeling in continental shale gas horizontal wells [J]. *Petrochemical Industry Application*, 2018, 37 (7): 5 – 10.)