

平面 SH 波作用下套管 – 水泥环的动力响应

徐 平^{1,2}, 李小春¹, 方志明¹, 王小明³

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001;
3. 中国地质大学 资源学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 套管完井结构(套管+水泥环+围岩)的长度远大于直径, 将平面 SH 波作用下套管完井结构的动力响应问题简化为二维平面问题, 假定套管、水泥环和围岩均为各向同性的均质弹性体, 运用波函数展开法和复变函数的保角映射法, 根据套管内边界自由、套管与水泥环完全联结和水泥环与围岩完全联结的边界条件, 得到散射和折射 SH 波势函数展开式的待定复系数的理论解。以某气田 102 井的套管结构为实例, 计算地震 SH 波产生的套管动应力, 其最大值大于套管屈服应力, 由此说明地震是导致该气田套管变形的直接原因。最后, 通过引入动应力集中因子概念, 分析围岩和水泥环对动应力集中的影响, 结果表明: (1) 降低水泥环的强度可以减小水泥环的动应力集中; (2) 围岩越硬, 水泥环的动应力集中越小; (3) 围岩的动应力集中基本不受围岩软硬程度和水泥环强度的影响。

关键词: 石油工程; 套管; 水泥环; 动力响应; 保角映射法; 动应力集中因子

中图分类号: TE 35

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2012)增 2-3497-06

DYNAMIC RESPONSE OF CASING AND CONCRETE RING CAUSED BY PLANE SH WAVES

XU Ping^{1,2}, LI Xiaochun¹, FANG Zhiming¹, WANG Xiaoming³

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. School of Water and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China; 3. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: The length of casing well completion structures that composed of casing, concrete ring and surrounding rocks are much larger than their outer diameters, so the problem of dynamic response of casing well completion structures caused by incident plane SH wave can be simplified as 2D plane problems. The casing, concrete ring and surrounding rocks are all considered as homogeneous isotropic elastic bodies. The wave function expansion method and conformal mapping method of complex function are adopted. The theoretical solutions about the complex coefficients of the scattering and refracting SH waves are obtained based on the boundary conditions that the inner side of the casing is free and the casing, concrete ring and surrounding rocks are tied completely. The casing well structures of 102 well in a gas field is taken as an example. The dynamic stresses of the casing caused by earthquake SH waves are calculated. The maximum stress is larger than the yield stress. Therefore the earthquake is the direct reason that causes the casing deformation in this gas field. In the end, the dynamic stress concentration factor is introduced, and the influences of surrounding rocks and concrete ring on the dynamic stress concentration factor are analyzed. Some important conclusions are obtained, which include: (1) reduction the strength of the concrete ring would reduce its dynamic stress concentration factor; (2) the stiffer the surrounding rocks are, the lower the dynamic stress concentration factor in concrete ring would be; (3) dynamic stress concentration factor of surrounding rocks is less influenced by the thickness of surrounding rocks and modulus of concrete ring.

Key words: petroleum engineering; casing; concrete ring; dynamic response; conformal mapping method; dynamic stress concentration factor

收稿日期: 2012-04-12; **修回日期:** 2012-05-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51008286, 51278467)

作者简介: 徐 平(1977-), 男, 2000 年毕业于河南理工大学地质矿产勘查专业, 现为博士研究生、副教授, 主要从事岩土力学和煤层气地质方面的教学与研究工作。E-mail: plian127@163.com

1 引言

伴随着强大的能量释放，地震引起大范围的构造应力场的变化，这种变化形成了巨大的地震载荷施加给油气井套管，造成套管的非正常损坏。例如，距离 5·12 汶川特大地震活动断裂带约 260 km 的某气田，处于地震强烈影响场的范围内，多口井的套管发现了不同程度的变形，严重影响了该气田的正常生产和产气量^[1]。

国内外众多学者对地层、水泥环和套管的静力耦合问题进行了理论和试验研究：殷有泉等^[2]将套管-水泥环-地层系统分解为 2 个相对简单的子问题，基于 2 个弹性力学平面应变基本问题的解，采用结构力学的求解思想，由位移连续条件求得了 2 个子问题的解，最后通过叠加得到了原问题的理论解；李军等^[3]基于多层组合厚壁圆筒理论，建立了套管、水泥环及井壁围岩组合体的力学模型，对均匀地应力作用下的组合体进行了弹塑性分析，经推导出弹塑性条件下套管、水泥环及井壁围岩组合体的应力分布表达式；白冰等^[4]建立了考虑 CO₂ 煤岩吸附膨胀效应的套管-充填材料-煤岩平面应变模型，计算得到的套管应力和变形理论解与 ABAQUS 数值模拟结果具有良好的一致性，研究得出：套管和充填材料的壁厚、充填材料和煤岩的力学参数等是影响套管应力的主要因素，可通过增加套管、充填材料壁厚或改变充填材料力学参数来降低套管应力；王力军等^[5]将套管和地层分别视为弹性体和无穷大的黏弹性体，建立了非均匀地应力条件下蠕变地层的开尔文模型本构方程，运用应力分析法和拉普拉斯变换法，得到非均匀地应力条件下蠕变地层套管的荷载表达式。

上述研究主要集中于静力问题，并未考虑地震波引起的动力响应。地震或爆破等振动能量都是以弹性波的形式在岩土体中传播，在结构物上产生反射、散射或折射，进而引起结构物的二次振动^[6]。本文借助波函数展开法和复变函数的映射函数方法，对平面 SH 波引起套管和水泥环结构的动力问题进行了求解。

2 波场的势函数展开

套管和水泥环结构的长度远大于直径，因此可将入射平面 SH 波引起的动力问题简化二维平面问题，计算模型如图 1^[3]所示。并作如下基本假设：(1) 围

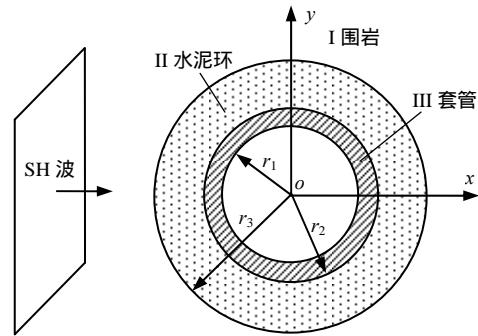


图 1 简化的二维平面模型^[3]

Fig.1 Simplified two-dimensional plane model^[3]

岩、水泥环、套管均为各向同性的弹性材料；(2) 水泥环、套管均视为均匀壁厚圆筒，且与井眼中心同心；(3) 套管、水泥环和围岩之间胶结良好，将边界视为完全联结。取套管内半径为 r_1 、套管与水泥环交界面的半径为 r_2 、水泥环外半径为 r_3 。

2.1 入射 SH 波的势函数

取 w_0 为入射 SH 波的幅值，则在直角坐标系 (x, y) 下，入射 SH 波的波场^[7]可表示为

$$w_1^{inc}(x, y) = w_0 \exp[ik_s^I(x \cos \alpha + y \sin \alpha)] \quad (1)$$

式中：上标“inc”表示入射， α 为入射 SH 波与 x 轴的夹角， k_s^I 为围岩中 SH 波的波数。

为了研究和讨论方便，式(1)及以下的公式中都略去了公共时间因子 $e^{-i\omega t}$ 。

根据复数坐标表达式 $e^{i\alpha} = \cos \alpha + i \sin \alpha$ 和 $z = x + iy$ ，则式(1)可以写成复坐标系 (z, \bar{z}) 下的形式：

$$w_1^{inc}(z, \bar{z}) = w_0 \exp\left[\frac{ik_s^I}{2}(ze^{-i\alpha} + \bar{z}e^{i\alpha})\right] \quad (2)$$

2.2 散射 SH 波的势函数

入射 SH 波在围岩与水泥环界面处(即水泥环的外边界)产生散射和折射，在极坐标系 (r, θ) 下散射 SH 波的势函数为

$$w_1^{sc}(r, \theta) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n H_n^{(1)}(k_s^I r) e^{in\theta} \quad (3)$$

式中：上标“sc”表示散射， A_n 为待定复系数， $H_n^{(1)}(\cdot)$ 为 n 阶第一类 Hankel 函数。

在复坐标系 (z, \bar{z}) 下，存在关系式 $r = |z|$ ， $i\theta = z/|z|$ ，则满足稳态波动方程及 Sommerfeld 无穷远辐射条件的散射 SH 波的势函数^[8]可表示为

$$w_1^{sc}(z, \bar{z}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n H_n^{(1)}(k_s^I |z|) \left(\frac{z}{|z|}\right)^n \quad (4)$$

2.3 折射 SH 波的势函数

入射 SH 波在围岩与水泥环界面处产生的折射 SH 波(内聚波)会进一步在水泥环与套管界面处(即水泥环的内边界)产生散射 SH 波(外散波), 内聚波和外散波叠加进而形成折射驻波, 参照式(4)可直接给出复坐标系 (z, \bar{z}) 下的水泥环中折射 SH 波的势函数:

$$w_{II}^{re}(z, \bar{z}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n H_n^{(1)}(k_s^{II} |z|) \left(\frac{z}{|z|}\right)^n \quad (5a)$$

$$w_{II}^{sc}(z, \bar{z}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n H_n^{(2)}(k_s^{II} |z|) \left(\frac{z}{|z|}\right)^n \quad (5b)$$

式中: 上标“re”表示折射; B_n, C_n 均为待定复系数; k_s^{II} 为水泥环中 SH 波的波数; $H_n^{(2)}(\cdot)$ 为 n 阶第二类 Hankel 函数。

与水泥环中折射 SH 波的原理相同, 套管中的折射 SH 波的势函数可表示为

$$w_{III}^{re}(z, \bar{z}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} D_n H_n^{(1)}(k_s^{III} |z|) \left(\frac{z}{|z|}\right)^n \quad (6a)$$

$$w_{III}^{sc}(z, \bar{z}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} E_n H_n^{(2)}(k_s^{III} |z|) \left(\frac{z}{|z|}\right)^n \quad (6b)$$

式中: D_n, E_n 均为待定复系数; k_s^{III} 为套管中 SH 波的波数。

3 待定复系数的求解

在复坐标系 (z, \bar{z}) 下, 所有入射、散射和折射波场中的剪应力都可通过下式求解:

$$\tau_{rz} = G \left(\frac{\partial w}{\partial z} e^{i\gamma} + \frac{\partial w}{\partial \bar{z}} e^{-i\gamma} \right) \quad (7)$$

式中: G 为围岩、水泥环、套管的剪切模量 G_I, G_{II} 和 G_{III} ; γ 为位移场中任一点在复坐标系 (z, \bar{z}) 下的方位角; w 为入射、散射和折射 SH 波的势函数 $w_I^{sc}, w_{II}^{re}, w_{II}^{sc}, w_{III}^{re}$ 和 w_{III}^{sc} 。

引入保角变换:

$$z = \omega(\eta) \quad (8a)$$

其中,

$$\eta = R \exp(i\theta) \quad (8b)$$

将水泥环和套管以外的区域映射为复平面 (z, \bar{z}) 上半径为 R 的圆的外域。

保角变换式(8)与式(7)中 $e^{i\gamma}$ 和 $e^{-i\gamma}$ 存在下述关系^[9]:

$$\left. \begin{aligned} e^{i\gamma} &= \frac{\eta}{R} \frac{\omega'(\eta)}{|\omega'(\eta)|} \\ e^{-i\gamma} &= \frac{\bar{\eta}}{R} \frac{\overline{\omega'(\eta)}}{|\omega'(\eta)|} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

将式(9)代入式(7), 整理可得剪应力的求解公式^[10-11]:

$$\tau_{rz} = \frac{G}{R} \frac{1}{|\omega'(\eta)|} \left(\eta \frac{\partial w}{\partial \eta} + \bar{\eta} \frac{\partial w}{\partial \bar{\eta}} \right) \quad (10)$$

入射 SH 波、围岩与水泥环界面处的散射 SH 波、水泥环内的折射 SH 波、套管内的折射 SH 波的势函数相应地变换成:

$$w_I^{inc}(\eta, \bar{\eta}) = w_0 \exp \left\{ \frac{i k_s^I}{2} \left[\omega(\eta) e^{-i\alpha} + \overline{\omega(\eta)} e^{i\alpha} \right] \right\} \quad (11)$$

$$w_{II}^{sc}(\eta, \bar{\eta}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n H_n^{(1)}(k_s^I |\omega(\eta)|) \left[\frac{\omega(\eta)}{|\omega(\eta)|} \right]^n \quad (12)$$

$$w_{II}^{re}(\eta, \bar{\eta}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n H_n^{(1)}(k_s^{II} |\omega(\eta)|) \left[\frac{\omega(\eta)}{|\omega(\eta)|} \right]^n \quad (13)$$

$$w_{II}^{sc}(\eta, \bar{\eta}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n H_n^{(2)}(k_s^{II} |\omega(\eta)|) \left[\frac{\omega(\eta)}{|\omega(\eta)|} \right]^n$$

$$w_{III}^{re}(\eta, \bar{\eta}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} D_n H_n^{(1)}(k_s^{III} |\omega(\eta)|) \left[\frac{\omega(\eta)}{|\omega(\eta)|} \right]^n$$

$$w_{III}^{sc}(\eta, \bar{\eta}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} E_n H_n^{(2)}(k_s^{III} |\omega(\eta)|) \left[\frac{\omega(\eta)}{|\omega(\eta)|} \right]^n \quad (14)$$

假定套管、水泥环和围岩在界面处都完全联结(即应力和位移连续), 而套管内边界自由(即应力为 0), 则边界条件可描述为

(1) 当 $r = r_1$ 时, 有 $\tau_{r\theta III}^{sc} = 0$ (15a)

(2) 当 $r = r_2$ 时, 有 $\left. \begin{aligned} \tau_{r\theta II}^{re} + \tau_{r\theta II}^{sc} &= \tau_{r\theta III}^{re} + \tau_{r\theta III}^{sc} \\ w_{II}^{re} + w_{II}^{sc} &= w_{III}^{re} + w_{III}^{sc} \end{aligned} \right\}$ (15b)

(3) 当 $r = r_3$ 时, 有 $\left. \begin{aligned} \tau_{r\theta I}^{inc} + \tau_{r\theta I}^{sc} &= \tau_{r\theta II}^{re} + \tau_{r\theta II}^{sc} \\ w_I^{inc} + w_I^{sc} &= w_{II}^{re} + w_{II}^{sc} \end{aligned} \right\}$ (15c)

将式(11) ~ (14)代入式(10), 根据式(15a) ~ (15c), 经过整理可得到关于待定复系数 $A_n \sim E_n$ 的一个无穷线性方程组:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & P_{14}^n & P_{15}^n \\ 0 & P_{22}^n & P_{23}^n & P_{24}^n & P_{25}^n \\ 0 & P_{32}^n & P_{33}^n & P_{34}^n & P_{35}^n \\ P_{41}^n & P_{42}^n & P_{43}^n & 0 & 0 \\ P_{51}^n & P_{52}^n & P_{53}^n & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_n \\ B_n \\ C_n \\ D_n \\ E_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ Y_4 \\ Y_5 \end{bmatrix} \quad (16)$$

式(16)可简化为

$$\sum_{i=1}^5 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{j=1}^5 P_{ij}^n(z_i) X_j = Y_i(z_i) \quad (17a)$$

式中： $z_1 = r_1 e^{i\theta}$ ， $z_2 = z_3 = r_2 e^{i\theta}$ ， $z_4 = z_5 = r_3 e^{i\theta}$ ， $X_1 = A_n$ ， $X_2 = B_n$ ， $X_3 = C_n$ ， $X_4 = D_n$ ， $X_5 = E_n$ 。矩阵元素 $P_{11}^n \sim P_{55}^n$ 和 $Y_1 \sim Y_5$ 的详细表达式如下：

$$P_{14}^n(z_i) = P_{24}^n(z_i) = -\frac{G_{III} k_s^{III}}{2} H_{n-1}^{(1)}(k_s^{III} |z_i|) \left(\frac{z_i}{|z_i|}\right)^{n-1} e^{i\gamma} + \frac{G_{III} k_s^{III}}{2} H_{n+1}^{(1)}(k_s^{III} |z_i|) \left(\frac{z_i}{|z_i|}\right)^{n+1} e^{-i\gamma} \quad (17b)$$

$$P_{15}^n(z_i) = P_{25}^n(z_i) = -\frac{G_{III} k_s^{III}}{2} H_{n-1}^{(2)}(k_s^{III} |z_i|) \left(\frac{z_i}{|z_i|}\right)^{n-1} e^{i\gamma} + \frac{G_{III} k_s^{III}}{2} H_{n+1}^{(2)}(k_s^{III} |z_i|) \left(\frac{z_i}{|z_i|}\right)^{n+1} e^{-i\gamma} \quad (17c)$$

$$P_{22}^n(z_i) = P_{42}^n(z_i) = \frac{G_{II} k_s^{II}}{2} H_{n-1}^{(1)}(k_s^{II} |z_i|) \left(\frac{z_i}{|z_i|}\right)^{n-1} e^{i\gamma} - \frac{G_{II} k_s^{II}}{2} H_{n+1}^{(1)}(k_s^{II} |z_i|) \left(\frac{z_i}{|z_i|}\right)^{n+1} e^{-i\gamma} \quad (17d)$$

$$P_{23}^n(z_i) = P_{43}^n(z_i) = \frac{G_{II} k_s^{II}}{2} H_{n-1}^{(2)}(k_s^{II} |z_i|) \left(\frac{z_i}{|z_i|}\right)^{n-1} e^{i\gamma} - \frac{G_{II} k_s^{II}}{2} H_{n+1}^{(2)}(k_s^{II} |z_i|) \left(\frac{z_i}{|z_i|}\right)^{n+1} e^{-i\gamma} \quad (17e)$$

$$P_{32}^n(z_i) = P_{52}^n(z_i) = H_n^{(1)}(k_s^{II} |z_i|) \left(\frac{z_i}{|z_i|}\right)^n \quad (17f)$$

$$P_{33}^n(z_i) = P_{53}^n(z_i) = H_n^{(2)}(k_s^{II} |z_i|) \left(\frac{z_i}{|z_i|}\right)^n \quad (17g)$$

$$P_{34}^n(z_i) = -H_n^{(1)}(k_s^{III} |z_i|) \left(\frac{z_i}{|z_i|}\right)^n \quad (17h)$$

$$P_{35}^n(z_i) = -H_n^{(2)}(k_s^{III} |z_i|) \left(\frac{z_i}{|z_i|}\right)^n \quad (17i)$$

$$P_{41}^n(z_i) = -\frac{G_I k_s^I}{2} H_{n-1}^{(1)}(k_s^I |z_i|) \left(\frac{z_i}{|z_i|}\right)^{n-1} e^{i\gamma} + \frac{G_I k_s^I}{2} H_{n+1}^{(1)}(k_s^I |z_i|) \left(\frac{z_i}{|z_i|}\right)^{n+1} e^{-i\gamma} \quad (17j)$$

$$P_{51}^n(z_i) = -H_n^{(1)}(k_s^I |z_i|) \left(\frac{z_i}{|z_i|}\right)^n \quad (17k)$$

$$Y_4(z_i) = i G_I k_s^I w_0 \cos(\gamma - \alpha) \exp\left[\frac{i k_s^I}{2} (z_i e^{-i\alpha} + \bar{z}_i e^{i\alpha})\right] \quad (17l)$$

$$Y_5(z_i) = w_0 \exp\left[\frac{i k_s^I}{2} (z_i e^{-i\alpha} + \bar{z}_i e^{i\alpha})\right] \quad (17m)$$

式(17a)左端的系数矩阵为 $5(2\bar{n} + 1)$ 阶 (\bar{n} 为数值计算时波函数展开式截取的有效项数)，待定系数的数量大于方程数量，因此需要对其处理成一个方阵。目前常用的做法^[11]是：将式(17)左右两端同乘以变量 $\exp(-im\theta)$ ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$)，并对变量 θ 在区间 $[-\pi, \pi]$ 上求定积分，经过整理，最终可得到关于待定复系数 $A_n \sim E_n$ 的理论解的无穷线性方程组，系数矩阵为 $5(2\bar{n} + 1) \times 5(2\bar{n} + 1)$ 的方阵，则式(17a)变成

$$\sum_{i=1}^5 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{j=1}^5 P_{ij}^{nm}(z_i) X_j = Y_i^m(z_i) \quad (18)$$

其中，

$$P_{ij}^{nm}(z_i) = \int_{-\pi}^{\pi} P_{ij}^n(z_i) e^{-im\theta} d\theta \quad (19a)$$

$$Y_i^m(z_i) = \int_{-\pi}^{\pi} Y_i(z_i) e^{-im\theta} d\theta \quad (19b)$$

4 计算实例

引入动应力集中因子 S_d ^[7]：

$$S_d = |\tau_{\theta z} / k_s^I G_I w_0| \quad (20)$$

式(20)中，围岩和水泥环的 $\tau_{\theta z}$ 计算公式分别如下：

$$\tau_{\theta z}^I = i \frac{k_s^I G_I}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n H_{n-1}^{(1)}(k_s^I |z|) \left(\frac{z}{|z|}\right)^{n-1} e^{i\gamma} + i \frac{k_s^I G_I}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n H_{n+1}^{(1)}(k_s^I |z|) \left(\frac{z}{|z|}\right)^{n+1} e^{-i\gamma} \quad (21)$$

$$\tau_{\theta z}^{II} = i \frac{k_s^{II} G_{II}}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n H_{n-1}^{(1)}(k_s^{II} |z|) \left(\frac{z}{|z|}\right)^{n-1} e^{i\gamma} + i \frac{k_s^{II} G_{II}}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n H_{n+1}^{(1)}(k_s^{II} |z|) \left(\frac{z}{|z|}\right)^{n+1} e^{-i\gamma} + i \frac{k_s^{II} G_{II}}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n H_{n-1}^{(2)}(k_s^{II} |z|) \left(\frac{z}{|z|}\right)^{n-1} e^{i\gamma} + i \frac{k_s^{II} G_{II}}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n H_{n+1}^{(2)}(k_s^{II} |z|) \left(\frac{z}{|z|}\right)^{n+1} e^{-i\gamma} \quad (22)$$

4.1 汶川地震某气田套管结构的动应力分析

以某气田 102 井套管结构为实例，计算地震 SH 波引起的套管动应力。该气田位于汶川地震烈度分布的 VI 烈度区，与 5 级地震破坏能量相当，该地区的最大振幅为 100 mm，周期为 1s^[11]。

套管结构参数^[3-5]取：套管内半径 $r_1 = 0.0786$ m，

套管外半径(水泥环内半径) $r_2 = 0.0889\text{ m}$ ，水泥环外半径 $r_3 = 0.1080\text{ m}$ ，套管采用 P110 钢管。

该气田围岩、水泥环和套管的物理力学参数见表 1^[1]。

表 1 某气田套管、水泥环和围岩的物理力学参数^[1]

Fig.1 Physico-mechanical parameters of casing, concrete ring and surrounding rock in a gas field^[1]

套管完井结构	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
I 围岩	49	0.27	2 200
II 水泥环	20	0.25	2 300
III 套管	210	0.25	7 850

将表 1 中参数代入式(22)得到套管的应力分布曲线(见图 2)。

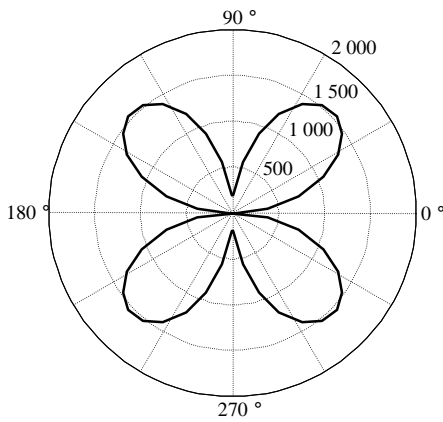


图 2 套管的动应力沿圆周分布曲线(单位：MPa)

Fig.2 Circumference curve of dynamic stress of the casing (unit: MPa)

从图 2 可以看出，套管的动应力超过 1 508 MPa，大于屈服极限 890 MPa，即地震波是造成该气田套管结构失稳的最主要因素。

4.2 动应力集中因子影响因素的定性分析

为了定性地分析材料参数对套管结构动应力集中的影响，围岩选取软、硬 2 种典型岩石为研究对象，参考李 军等^[3]的研究，取围岩、水泥环和套管的物理力学参数见表 2。

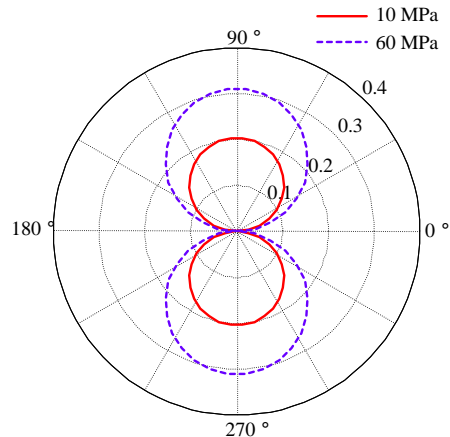
表 2 套管、水泥环和围岩的物理力学参数

Fig.2 Physico-mechanical parameters of casing, concrete ring and surrounding rocks

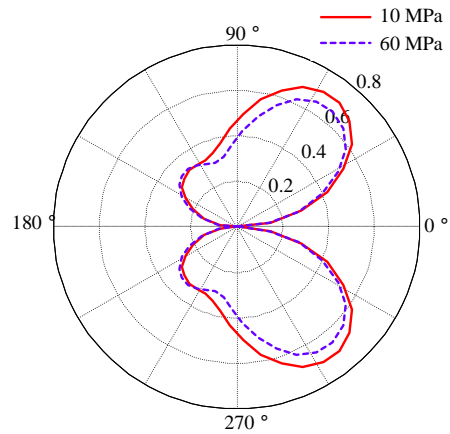
套管完井结构	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
I 围岩(软岩)	5	0.35	2 200
I 围岩(硬岩)	60	0.30	2 600
II 水泥环	10 ~ 60	0.25	2 300
III 套管	210	0.25	7 850

取量纲一的入射 SH 波频率 $k_s^1 r_3 = 1.0$ ，绘制了软岩(5 MPa)和硬岩(60 MPa)中分别采用低强度水

泥环(10 MPa)和高强度水泥环(60 MPa)等 4 种情况下，水泥环和围岩的动应力集中因子 S_d 沿周向的分布曲线，如图 3, 4 所示。



(a) 水泥环

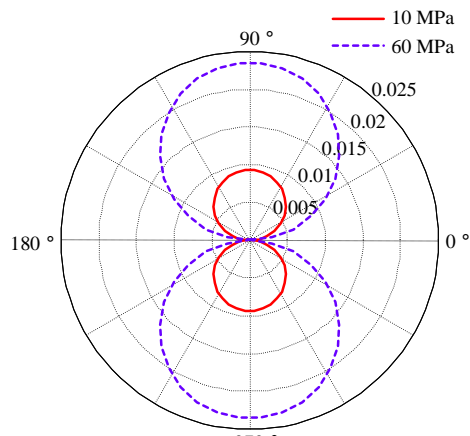


(b) 软围岩

图 3 水泥环和软围岩的 S_d 沿圆周分布曲线

Fig.3 Circumference curves of S_d of concrete ring and soft surrounding rock

图 3(a)和 4(a)反映的规律完全一致：低强度水泥环(10 MPa)的 S_d 曲线包含在高强度水泥环(60 MPa)的 S_d 曲线之内，即水泥环的强度越低，水泥环的 S_d 则越小，降低水泥环强度有利于减小水泥环的动应力集中，水泥环有一定的缓冲作用。



(a) 水泥环

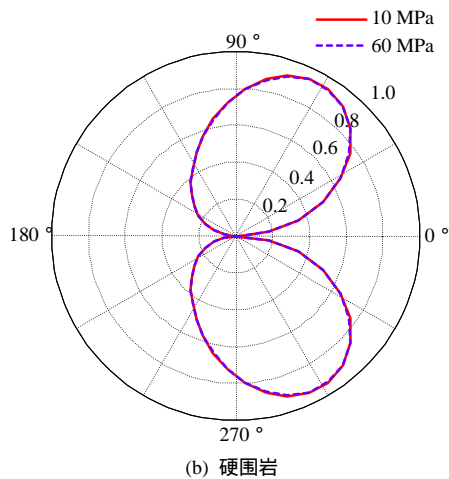


图4 水泥环和硬围岩的 S_d 沿圆周分布曲线
Fig.4 Circumference curves of S_d of concrete ring and hard surrounding rock

对比图 3(a)和 4(a)可以看出：图 3(a)的 S_d 曲线值明显高于图 4(a)，即围岩的软硬程度对水泥环动应力集中因子 S_d 的影响较大，当围岩由 5 MPa 提高到 60 MPa 时：对于低强度水泥环(10 MPa)， S_d 的最大值由 0.305 减小到 0.023，约降低 13 倍，而对于高强度水泥环(60 MPa)， S_d 的最大值由 0.2 减小到 0.019，约降低 20 倍。

对比图 3(b)和 4(b)可以看出，围岩的 S_d 曲线与水泥环存在明显的区别：对于低强度水泥环(10 MPa)和高强度水泥环(60 MPa)，围岩的 S_d 曲线基本重合，另外，软围岩(5 MPa)和硬围岩(60 MPa)的 S_d 值也基本相同，这说明围岩的软硬程度、水泥环的强度对围岩 S_d 的影响都很小。

5 结论

(1) 以某气田 102 井套管结构为例，计算了套管的动应力，其值大于屈服应力，由此验证了地震是导致该井田套管失稳的直接原因。

(2) 引入动应力集中因子概念，定性地分析了围岩和水泥环动应力集中因子的影响因素：对于相同性质的软岩或硬岩，降低水泥环的强度都有利于减小水泥环的动应力集中因子，水泥环强度的降低，在围岩和刚性套管之间起到一定的缓冲作用，即低强度的水泥环(相当于柔性夹层)也有利于提高套管完井结构的抗震性能；围岩越硬，水泥环的动应力集中因子越小，即坚硬的围岩有利于提高套管完井结构的抗震性能；围岩的动应力集中基本不受围岩软硬程度和水泥环强度的影响。

参考文献(References)：

- [1] 伍开松, 罗进军, 张庆生, 等. 地震作用下岩盐层套变规律研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(增): 231-234.(WU Kaisong, LUO Jinjun, ZHANG Qingsheng, et al. Study of casing deformation in halite bed under earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(Supp.): 231-234.(in Chinese))
- [2] 殷有泉, 陈朝伟, 李平恩. 套管-水泥环-地层应力分布的理论解[J]. 力学学报, 2006, 38(6): 835-842.(YIN Youquan, CHEN Zhaowei, LI Ping'en. Theoretical solutions of stress distribution in casing-cement and stratum system[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(6): 835-842.(in Chinese))
- [3] 李军, 陈勉, 柳贡慧, 等. 套管、水泥环及井壁围岩组合体的弹塑性分析[J]. 石油学报, 2005, 26(6): 99-103.(LI Jun, CHEN Mian, LIU Gonghui, et al. Elastoplastic analysis of casing-concrete sheath-rock combination[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(6): 99-103.(in Chinese))
- [4] 白冰, 李小春, 刘延锋, 等. CO₂ 驱煤层气中煤层膨胀对套管稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1043-1048.(BAI Bing, LI Xiaochun, LIU Yanfeng, et al. Influence of CO₂-induced swelling on casing stability in CO₂-ECBM[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7): 1043-1048.(in Chinese))
- [5] 王力军, 于永南, 李健, 等. 非均匀地应力下蠕变地层套管的载荷分布[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(1): 86-89.(WANG Lijun, YU Yongnan, LI Jian, et al. Casing loads distribution with non-uniform geostresses in creep stratum[J]. Journal of China University of Petroleum, 2008, 32(1): 86-89.(in Chinese))
- [6] XU P, XIA T D, HAN T C. Scattering of elastic wave by a cylindrical shell deeply embedded in saturated soils[J]. Acta Seismologica Sinica, 2006, 19(2): 191-198.
- [7] PAO Y H, MOW C C. Diffraction of elastic waves and dynamic stress concentrations[M]. New York: Crane, Russak and Company Inc., 1973: 111-140.
- [8] LIU D K, GAI B Z, TAO G Y. Applications of the method of complex function to dynamic stress concentration[J]. Wave Motion, 1982, (4): 293-304.
- [9] 徐芝纶. 弹性力学(上册)[M]. 北京: 人民教育出版社, 1982: 115-155.(XU Zhilun. Elasticity mechanics(Vol.1)[M]. Beijing: People's Education Press, 1982: 115-155.(in Chinese))
- [10] 陈志刚, 刘殿魁. 椭圆孔对 SH 波散射的远场解[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2003, 24(3): 335-338.(CHEN Zhigang, LIU Diankui. Far field solution of SH-wave scattering by elliptic cavity[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2003, 24(3): 335-338.(in Chinese))
- [11] 徐平. 多排弹性空心管桩屏障对平面 SV 波的隔离[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 392-397.(XU Ping. Isolation of incident plane SV waves by discontinuous barriers composed of several rows of elastic hollow pipe piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 392-397.(in Chinese))