

# 射孔参数对定面射孔套管剩余强度的影响分析

李明飞<sup>1,2</sup>, 张明友<sup>3</sup>, 黄靖富<sup>3</sup>, 梁经纬<sup>4</sup>, 窦益华<sup>1,2</sup>, 景思宇<sup>1,2</sup>

1. 西安石油大学机械工程学院 陕西西安 710065
2. 西安市高难度复杂油气井完整性评价重点实验室 陕西西安 710065
3. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司试修公司 四川成都 618300
4. 西安石油大学石油工程学院 陕西西安 710065

通讯作者: Email: limf88@126.com

项目支持: 国家自然科学基金(52004215); 中国石油集团项目“230℃/140 MPa抗硫试油测试关键装备研制”(2021ZG09); 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室开放课题(NO. 2023014)

引用: 李明飞, 张明友, 黄靖富, 等. 射孔参数对定面射孔套管剩余强度的影响分析[J]. 油气井测试, 2024, 33(6): 1-8.

Cite: LI Mingfei, ZHANG Mingyou, HUANG Jingfu, et al. Residual strength analysis of perforating casing with coplanar surface[J]. Well Testing, 2024, 33(6): 1-8.

**摘要** 针对定面射孔施工无法定量评价射孔套管的应力状态和剩余强度的问题, 以孔板理论为基础, 构建定面射孔套管剩余强度分析模型, 并结合有限元分析方法, 建立定面射孔套管剩余强度分析方法。研究表明, 以 $\Phi 139.7\text{ mm} \times 9.17\text{ mm}$  N80定面射孔套管为例, 1.5簇/m孔密、10 mm孔径保持不变, 相位角在 $15^\circ \sim 90^\circ$ 变化, 剩余强度降低幅值在8.3%~17.35%之间。1.5簇/m孔密、 $30^\circ$ 相位角保持不变, 孔径在4~18 mm变化, 套管剩余强度降低幅值在8.31%~21.70%之间。10 mm孔径、 $30^\circ$ 相位角保持不变, 孔密在1.5~4簇/m变化, 剩余强度计算结果与孔密呈负相关, 剩余强度降低幅值在8.31%~23.15%之间。孔径、孔密、相位角变化时, 对比理论解和数值解, 上下限值相差小于8%, 剩余强度变化趋势吻合性很好。该研究成果对定面射孔套管合理优化射孔参数具有参考意义, 也为定面射孔套管剩余强度分析提供理论支持。

**关键词** 定面射孔; 套管剩余强度; 孔板理论; 有限元; 射孔参数; 数值模拟; 定量评价

中图分类号: TE257.1 文献标识码: A DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.06.001

## Residual strength analysis of perforating casing with coplanar surface

LI Mingfei<sup>1,2</sup>, ZHANG Mingyou<sup>3</sup>, HUANG Jingfu<sup>3</sup>, LIANG Jingwei<sup>4</sup>, DOU Yihua<sup>1,2</sup>, JING Siyu<sup>1,2</sup>

1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China
2. Xi'an Key Laboratory for Integrity Evaluation of Highly Difficult and Complex Oil and Gas Wells, Xi'an, Shaanxi 710065, China
3. China Petroleum Group Chuangqing Drilling Engineering Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 618300, China
4. College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China

**Abstract:** Aiming at the problem that the stress state and residual strength of perforating casing can't be quantitatively evaluated in fixed-plane perforating construction, the residual strength model of perforating casing is constructed based on the orifice plate theory, and combined with finite element method, the residual strength of perforating casing is established. The results show that, taking  $\Phi 139.7\text{ mm} \times 9.17\text{ mm}$  N80 fixed-plane perforation casing as an example, the perforation density of 1.5 clusters/m, the perforation diameter of 10 mm remain unchanged, the phase angle varies from  $15^\circ$  to  $90^\circ$ , and the residual strength amplitude ranges from 8.3% to 17.35%. With 1.5 cluster/m pore density,  $30^\circ$  phase angle unchanged, pore diameter varying from 4 to 18 mm, the residual strength amplitude of casing ranged from 8.31% to 21.70%. The pore density varies from 1.5 to 4 clusters/m with 10mm pore diameter and  $30^\circ$  phase angle unchanged. The residual strength is negatively correlated with the pore density, and the amplitude of the residual strength is between 8.31% and 23.15%. When the pore diameter, pore density and phase angle change, the difference between the upper and lower limits is less than 8% compared with the theoretical solution and the numerical solution, and the variation trend of the residual strength coincides well. The research results have reference significance to optimize the perforating parameters of perforating casing reasonably, and also provide theoretical support for the residual strength of perforating casing.

**Keywords:** transverse perforation; remaining strength of casing; orifice plate theory; finite element; perforating parameters; numerical simulation; quantitative assessment

定面射孔作为一种新型的射孔方式,是页岩气、煤气层等非常规油气田开发重要工艺手段<sup>[1]</sup>。不同于普通螺旋射孔,是在套管同一横截面的管壁上形成多个孔眼,在有效油层面上获得更多的射孔通道,从而获得更大的泄流面积,但这些孔眼在地层中会造成沿井筒的应力集中,在套管壁上也会发生明显的应力集中,降低套管强度<sup>[2]</sup>。唐凯等<sup>[3]</sup>用有限元法建立半圆模型,分析了定面射孔的剩余强度,但是没考察射孔参数的影响。张儒鑫等<sup>[4]</sup>利用有限元方法建立套管-水泥环三维定面射孔模型,分析射孔参数组合对压裂起裂压力的规律。王素玲等<sup>[5]</sup>分析了套管尺寸、孔径、相位角、地层边界对射孔套管剩余强度影响,分析认为定面射孔会很大程度降低套管承载能力。井素娟等<sup>[6]</sup>比较了常规射孔技术和定面射孔技术,模拟分析了定面射孔下的水力压裂。Han 等<sup>[7]</sup>针对非常规射孔方式,对油田复杂压裂工艺进行套管射孔物理模拟试验,根据物理模拟试验结果,建立射孔套管有限元模型,并分析不同施工条件下射孔周围的应力集中情况,确定外挤压安全系数。吴魏等<sup>[8]</sup>分别建立定面、定向、螺旋射孔的数值模型,分析了不同射孔下套管的承载力。唐凯等<sup>[9]</sup>从原理及参数优化等方面介绍了定面射孔工艺,并分析定面射孔技术的应用前景和效果。Fan 等<sup>[10]</sup>在分段有限元分析的基础上,建立了各向异性地层中射孔套管的有限元分析模型,分析了套管的强度安全性。刘奉银等<sup>[11]</sup>利用 ABAQUS 软件,分析了不同方位角、地应力下起裂压力的变化规律。

从以上研究可以看出,前人对于射孔套管剩余强度情况做了大量研究,但是针对非常规射孔后的套管剩余强度有待进一步研究。本文将以孔板理论为基础,对定面射孔后的套管剩余强度进行研究,为非常规射孔套管剩余强度提供理论依据,构建定面射孔套管剩余强度分析模型,并结合有限元分析方法,建立定面射孔套管剩余强度分析方法,分析了不同射孔参数下  $\Phi 139.7 \text{ mm} \times 9.17 \text{ mm}$  N80 套管剩余强度,通过有限元分析分别得到不同相位角大小、孔径和孔密下定面射孔套管应力分布和定面射孔套管仿真结果变化。运用所建立的方法来分析定面射孔后套管强度,保护套管的使用寿命。

## 1 定面射孔套管剩余强度建模与算例分析

为了建立一种新的射孔方式,分析定面射孔套

管受力状态、应力状态与单个孔眼的受力情况,构建相应力学模型。根据孔板理论推广得到定面射孔套管剩余强度分析理论,以此来判断套管在不同情况下是否屈服,将  $\Phi 139.7 \text{ mm} \times 9.17 \text{ mm}$  N80 套管作为算例对象,分别带入不同射孔参数,得到理论情况下射孔套管剩余强度随相位角、孔径、孔密的变化趋势。

### 1.1 定面射孔套管剩余强度力学模型建立

定面射孔作为一种新型的射孔方式,是页岩气、煤气层等非常规油气田开发重要工艺手段<sup>[12]</sup>。不同于普通螺旋射孔,是在套管同一横截面的管壁上形成多个孔眼,在有效油层面上获得更多的射孔通道,从而获得更大的泄流面积,但这些孔眼在地层中会造成沿井筒的应力集中,在套管壁上也会发生明显的应力集中,降低套管强度<sup>[13]</sup>。

假定射孔套管外径与内径分别为  $D$  与  $d$ ,且内壁表面、外壁表面分别承受  $P_i$ 、 $P_o$  的压力,轴向承受  $F_s$  的作用力,见图 1(a)。套管每单元应力分布见图 1(b),径向应力、环向应力、轴向应力分别为  $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$ 、 $\sigma_s$ 。

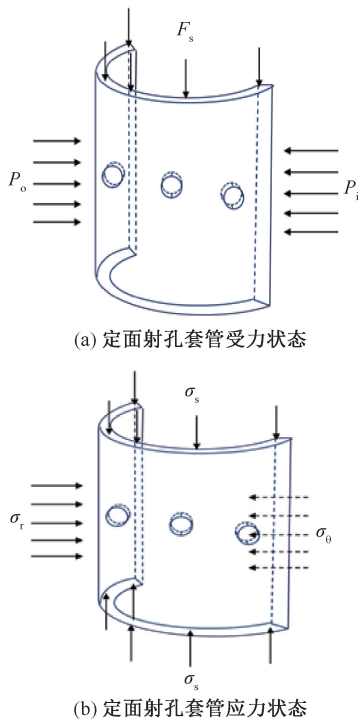


图 1 定面射孔套管应力状态以及受力状态  
Fig. 1 Stress state and stress state of perforating casing in coplanar plane

在分析定面射孔套管时,参考常规射孔套管构建模型的方式构建其模型,沿轴线方向展开套管,

并分析单个孔眼的受力情况,其受力情况可以转换为如图2所示孔板受力模型。

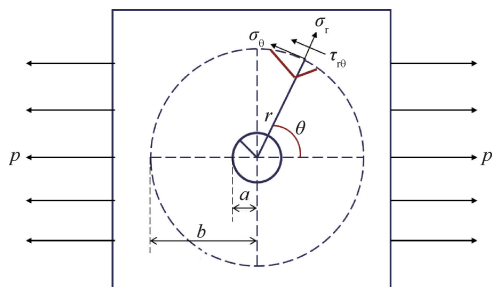


图2 孔板力学模型受力图

Fig. 2 Force diagram of orifice plate mechanical model

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{1}{2}p(1 + \cos 2\theta) \\ \sigma_{r\theta} = -\frac{p}{2}\sin 2\theta \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可知,半径为  $b$  的圆周上分布有两种力,  $p/2$  为分布均匀的法向力,  $p\cos 2\theta/2$  随着  $\theta$  角变化的法向力,  $-p\sin 2\theta/2$  为切向力。

根据弹性力学平面理论,边界条件

$$\begin{cases} (\sigma_r)_{r=a} = 0, (\sigma_r)_{r=b} = \frac{p}{2}\cos 2\theta \\ (\sigma_{r\theta})_{r=a} = 0, (\sigma_{r\theta})_{r=b} = -\frac{p}{2}\sin 2\theta \end{cases} \quad (2)$$

根据弹性力学理论,法向力在圆周上的分布

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{b^2}{b^2 - a^2} \frac{p}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \\ \sigma_\theta = \frac{b^2}{b^2 - a^2} \frac{p}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) \\ \sigma_{r\theta} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

该模型应力函数由弹塑性力学<sup>[14]</sup>可知

$$U = (Ar^2 + Br^4 + Cr^{-2} + D)\cos 2\theta \quad (4)$$

应力分量

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} = -\left(2A + \frac{6C}{r^4} + \frac{4D}{r^2}\right)\cos 2\theta \\ \sigma_\theta = \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} = \left(2A + 12Br^2 + \frac{6C}{r^4}\right)\cos 2\theta \\ \sigma_{r\theta} = -\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta}\right) = \left(2A + 6Br^2 - \frac{6C}{r^4} - \frac{2D}{r^2}\right)\sin 2\theta \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  为任意参数。

将(2)代入(5)式可求得参数,并得到新的径向应力、周向应力及切应力方程

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{p}{2}\left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{p}{2}\left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2}\right)\cos 2\theta \\ \sigma_\theta = \frac{p}{2}\left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{p}{2}\left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta \\ \sigma_{r\theta} = -\frac{p}{2}\left(1 - \frac{3a^4}{r^4} + \frac{2a^2}{r^2}\right)\sin 2\theta \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $r$  为套管中心到射孔点间距, mm;  $a$  为孔眼半径, mm;  $\theta$  为与水平正方向夹角, °。

根据 Mises 屈服理论<sup>[15]</sup>,任意状态下射孔套管的屈服应力

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 + \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \quad (7)$$

根据 Mises 屈服理论,任意状态下射孔套管的屈服应力

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} + \sqrt{\left[\frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2}\right]^2 + \tau_{r\theta}^2} \\ \sigma_2 = 0 \\ \sigma_3 = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} - \sqrt{\left[\frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2}\right]^2 + \tau_{r\theta}^2} \end{cases} \quad (8)$$

按照第四强度理论,将射孔套管的屈服应力  $\sigma_s$  与许用应力  $[\sigma]$  的比较作为判断套管是否屈服的准则。根据孔板理论推广得到的定面射孔套管剩余强度分析理论,分别带入不同射孔参数得到理论解。

## 1.2 定面射孔套管几何模型建立

以  $\Phi 139.7 \text{ mm} \times 9.17 \text{ mm}$  N80 的定面射孔套管作为研究对象,使用 SolidWorks 建模软件构建定面射孔套管三维模型,选用相位角为  $15^\circ \sim 90^\circ$ ,孔径为  $4 \sim 18 \text{ mm}$ ,孔密为  $1.5 \sim 4$  簇/m 的射孔参数,建立三维几何模型如图3所示,其中定面射孔细节如红色框所示。

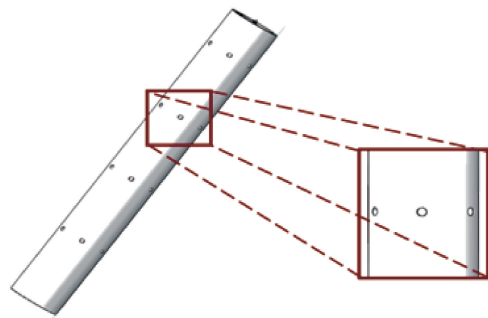


图3 定面射孔套管几何模型

Fig. 3 Geometric model of coplanar perforating casing

## 1.3 定面射孔套管剩余强度算例分析

如图4、图5、图6分别是  $\Phi 139.7 \text{ mm} \times 9.17 \text{ mm}$

N80 射孔套管剩余强度随相位角、孔径、孔密变化的理论趋势图。

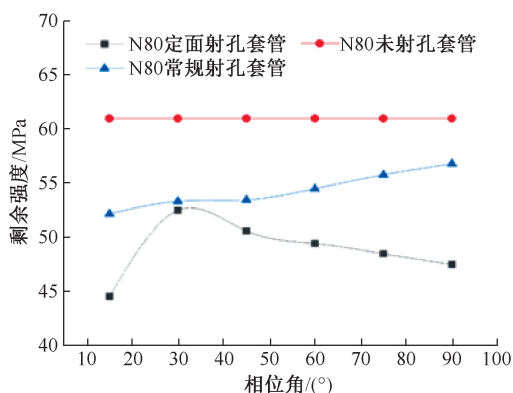


图4 定面射孔套管剩余强度随相位角变化曲线

Fig.4 Variation curve of residual strength of coplanar perforating casing with phase angle

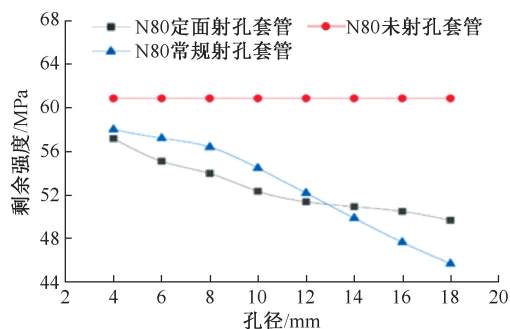


图5 定面射孔套管剩余强度随孔径变化曲线

Fig.5 Variation curve of residual strength of coplanar perforating casing with pore size

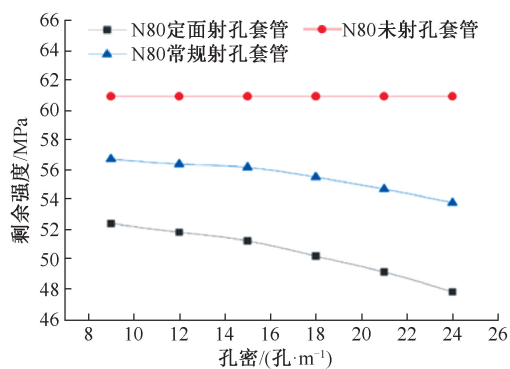


图6 定面射孔套管剩余强度随孔密变化曲线

Fig.6 Variation curve of residual strength of coplanar perforating casing with pore size

由图4可知,以 $\Phi 139.7\text{ mm} \times 9.17\text{ mm}$  N80 定面射孔套管为例,1.5 簇/m 孔密、10 mm 孔径保持不变,相位角在 $15 \sim 90^\circ$  范围内变化,其剩余强度计算结果与相位角先呈正相关后呈负相关。相位角为 $30^\circ$  时套管剩余强度最大,相位角为 $15^\circ$  时套管剩余强度最小。相较于常规射孔套管,剩余强度变化幅

值在 $0.91\% \sim 9.31\%$  之间;相较于未射孔套管,剩余强度降低幅值在 $8.3\% \sim 17.35\%$  之间。

由图5可知,以 $\Phi 139.7\text{ mm} \times 9.17\text{ mm}$  N80 定面射孔套管为例,1.5 簇/m 孔密、 $30^\circ$  相位角保持不变,孔径在 $4 \sim 18\text{ mm}$  范围内变化,剩余强度计算结果与孔径呈负相关。相较于未射孔套管,套管剩余强度降低幅值在 $8.31\% \sim 21.70\%$  之间。

由图6可知,以 $\Phi 139.7\text{ mm} \times 9.17\text{ mm}$  N80 定面射孔套管为例,孔密在 $1.5 \sim 4$  簇/m 范围内变化,剩余强度计算结果与孔密呈负相关,相较于未射孔套管,剩余强度降低幅值在 $8.31\% \sim 23.15\%$  之间。

根据孔板理论推广得到定面射孔套管剩余强度分析理论,以此来判断套管在不同情况下的理论应力状态,将 $\Phi 139.7\text{ mm} \times 9.17\text{ mm}$  N80 套管作为算例对象,分别带入不同射孔参数,得到理论情况下射孔套管剩余强度随相位角、孔径、孔密的变化趋势,以此来验证下文数值解值与理论解的趋势吻合性。

## 2 定面射孔套管剩余强度有限元分析

以 $\Phi 139.7\text{ mm} \times 9.17\text{ mm}$  N80 定面射孔套管为例,建立定面射孔套管三维模型,对几何模型进行有限元网格划分,并设置约束条件。通过有限元分析分别得到不同相位角大小、孔径和孔密下定面射孔套管应力分布和定面射孔套管仿真结果变化,并与理论解变化趋势进行对比。

### 2.1 定面射孔套管有限元网格划分及约束条件

自由网格划分凭借其自由度高、随机性好、划分质量优等特点成为最常用的网格划分方法,因射孔套管孔眼存在应力集中,在孔眼周边加大网格划分密度,使用自由网格划分算法生成网格。定义单元尺寸(Element Size)为 $10\text{ mm}$ 。网格在弯曲部分细分,所以跨度中心角(Span Angle Center)选择细化,划分结果得到 $35\,480$  个网格,节点数为 $87\,620$ 。套管孔眼处不受约束,设置以下约束条件:

(1)管体两端部加对称约束。

(2)管体两端加固定,避免套管在外部载荷作用时产生位移。

(3)管体外部载荷,在管体的外表面加均匀分布的压力 $p$ 。

### 2.2 相位角对定面射孔套管剩余强度的影响分析

以 $\Phi 139.7\text{ mm} \times 9.17\text{ mm}$  N80 定面射孔套管为例,1.5 簇/m 孔密、10 mm 孔径保持不变,相位角在



15~90°范围内变化。部分相位角下定面射孔套管

应力分布云图如图 7 所示。

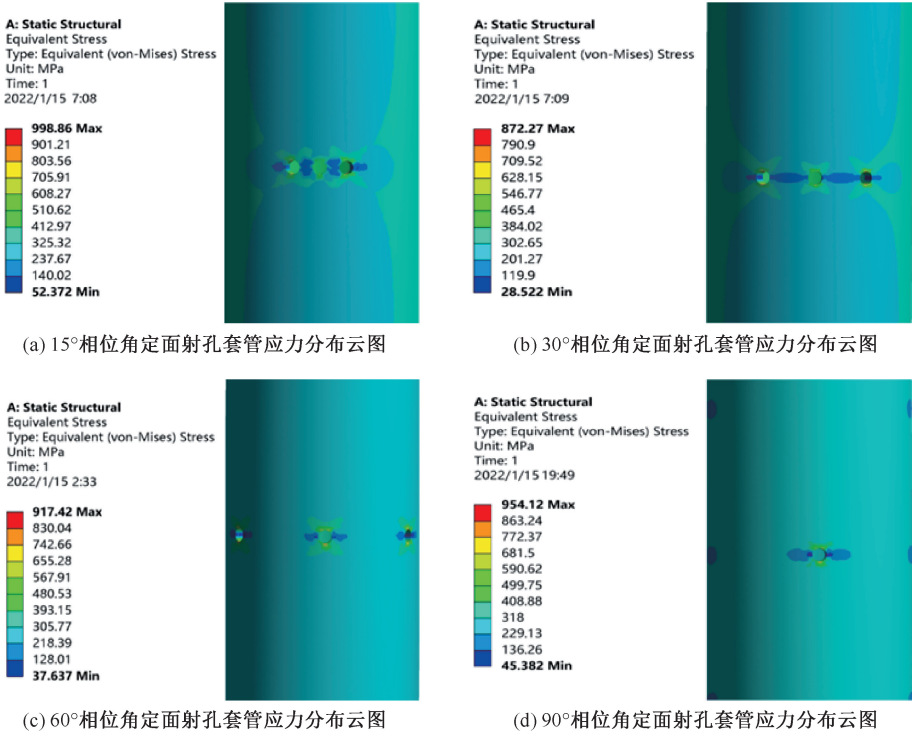


图 7 不同相位角大小下定面射孔套管应力分布云图

Fig. 7 Stress distribution cloud diagram of coplanar perforating casing at different phase angles

由图 7 可知,对于除相位角外其他射孔参数不变的定面射孔套管,其剩余强度随相位角的增大先增大后减小。当射孔相位角为 15°时,如图 7 (a) 所示,其应力集中现象发生在两个射孔中间,由于射孔相位角偏小导致套管射孔间剩余管料较少,应力集中作用显著,易在射孔孔眼中间发生挤毁,定面射孔套管剩余强度最低。如图 7 (b) 可知,当相位角在 30°左右,此时孔眼附近的最大应力与最小应力差值较其他相位角时要小,体现了定面射孔所导致集中应力被释放,从而提高套管剩余强度,定面射孔套管的剩余强度达到最大值。当射孔相位角从 30°继续升高至 90°,随着相位角逐渐增大,射孔集中应力释放效果降低,其剩余强度也逐渐降低。

如图 8 所示为定面射孔套管剩余强度随相位角变化示意图。由图 8 可以看出,当除相位角外其他射孔变量不变时,Φ139.7 mm×9.17 mm N80 定面射孔套管剩余强度与相位角先呈正相关后呈负相关。与理论解趋势吻合性很好,相较于常规射孔套管,剩余强度变化幅值在 1.32%~10.35%之间;相较于未射孔套管,剩余强度降低幅值在 9.3%~18.25%之间。上下限值较理论解相差不超过 8%。

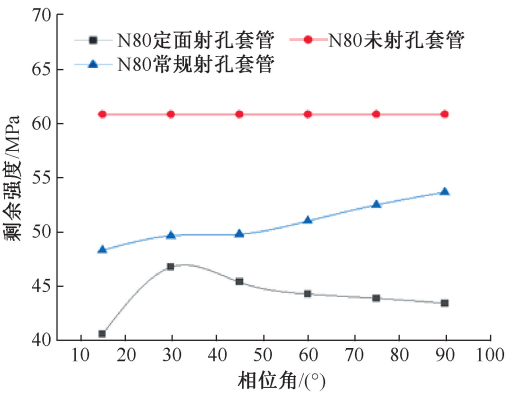


图 8 定面射孔套管仿真结果随相位角变化曲线

Fig. 8 Simulation results of coplanar perforating casing changing with phase angle

### 2.3 孔径对定面射孔套管剩余强度的影响分析

以 Φ139.7 mm×9.17 mm N80 定面射孔套管为例,孔密为 1.5 簇/m,相位角为 30°,孔径在 4~18 mm 范围内变化。部分孔径下定面射孔套管应力分布云图如图 9 所示。

由图 9 可以看出,对于除孔径外其他射孔参数不变的定面射孔套管,随着孔径的增大,射孔间管料减少,定面射孔周围最大 Mises 应力逐渐增大,射孔周围应力云图颜色不断加深,剩余强度也逐渐降低。

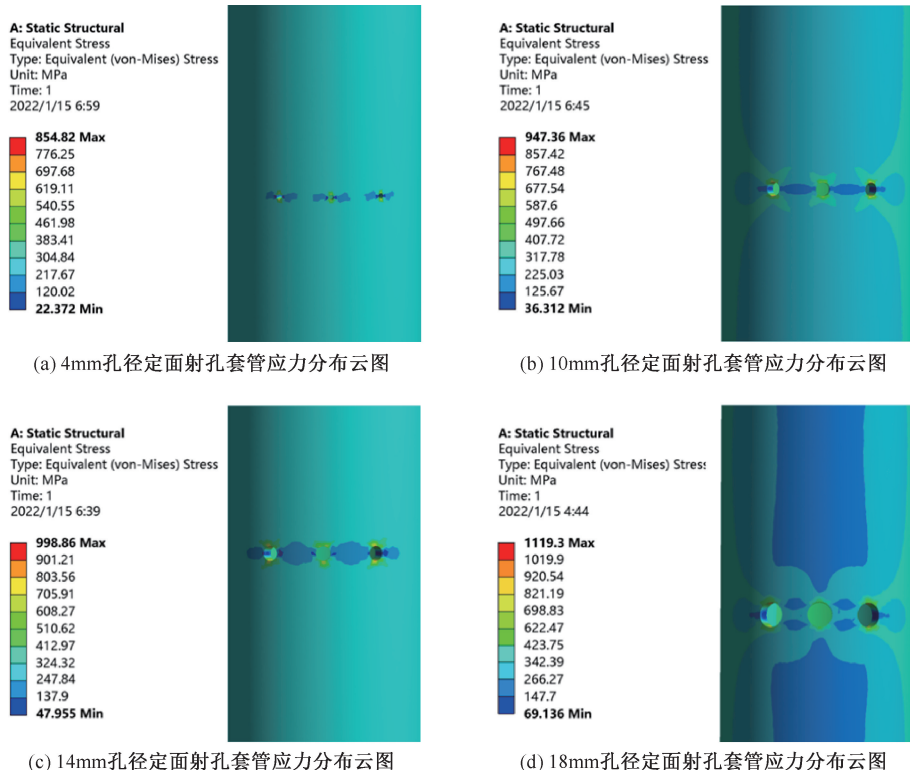


图 9 不同孔径大小下定面射孔套管应力分布云图

Fig. 9 Stress distribution cloud diagram of coplanar perforating casing at different pore sizes

如图 10 所示为定面射孔套管剩余强度随孔径变化曲线。由图 10 可以看出,当除孔径外其他射孔变量不变时, $\Phi 139.7 \text{ mm} \times 9.17 \text{ mm}$  N80 定面射孔套管剩余强度与孔径呈负相关,但在孔径大约为 15 mm 时,两种射孔方式得到的套管剩余强度相同,与理论解趋势吻合性很好。相较于未射孔套管,套管剩余强度降低幅值在 9.3%~22.70%之间。上下限值较理论解相差不超过 8%。

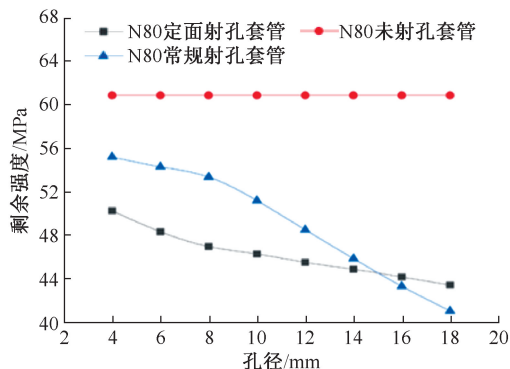


图 10 定面射孔套管剩余强度随孔径变化曲线

Fig. 10 Variation curve of residual strength of coplanar surface perforating casing with pore size

## 2.4 孔密对定面射孔套管剩余强度的影响分析

以  $\Phi 139.7 \text{ mm} \times 9.17 \text{ mm}$  N80 定面射孔套管为例,选定孔径为 10 mm,相位角为  $30^\circ$ ,孔密在 1.5~

4 簇/m 范围内变化,部分孔密下定面射孔套管应力分布云图如图 11 所示。

由图 11 可以看出,对于除孔密外其他射孔参数不变的定面射孔套管,随着孔密的增大,不同射孔簇/m 间管料减少,定面射孔周围最大 Mises 应力逐渐增大,射孔周围应力云图颜色不断加深,剩余强度也逐渐降低。如图 12 所示为定面射孔套管剩余强度随孔密变化曲线。

由图 12 可以看出,定面射孔套管剩余强度与孔密呈负相关。与理论解趋势一致。相较于未射孔的套管,套管剩余强度降低幅值在 9.4%~24.35%之间。上下限值较理论解相差不超过 8%。

以  $\Phi 139.7 \text{ mm} \times 9.17 \text{ mm}$  N80 定面射孔套管为例,对定面射孔几何模型进行有限元网格划分,并设置约束条件。通过以下三种情况:①孔密为 1.5 簇/m、10 mm 孔径保持不变,相位角在  $15^\circ \sim 90^\circ$  范围内变化;②孔密为 1.5 簇/m,相位角为  $30^\circ$ ,孔径在 4~18 mm 范围内变化;③孔径为 10 mm,相位角为  $30^\circ$ ,孔密在 1.5~4 簇/m 范围内变化。通过有限元分析分别得到不同情况下定面射孔套管应力分布和定面射孔套管仿真结果变化,并与理论解变化趋势进行对比得到以下结论:与相位角先呈正相关后呈负相关;与孔径呈负相关,但在孔径大约为

15 mm 时,两种射孔方式得到的套管剩余强度相同;

与孔密呈负相关。数值解与理论解趋势一致。

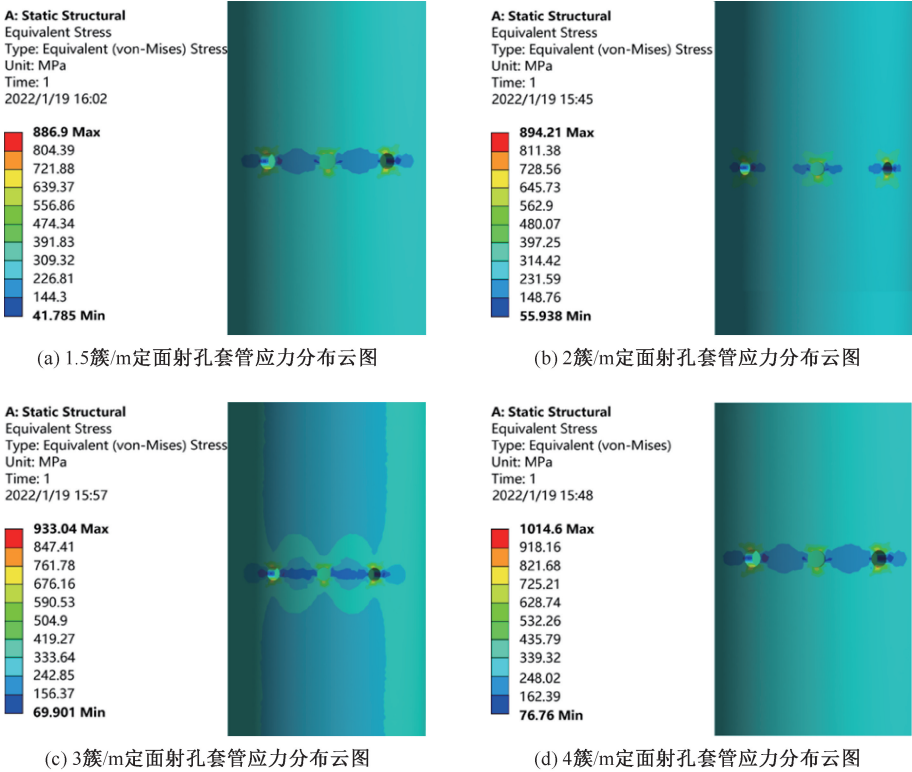


图 11 不同孔密下定面射孔套管应力分布云图

Fig. 11 Stress distribution cloud diagram of coplanar perforating casing at different perforation densities

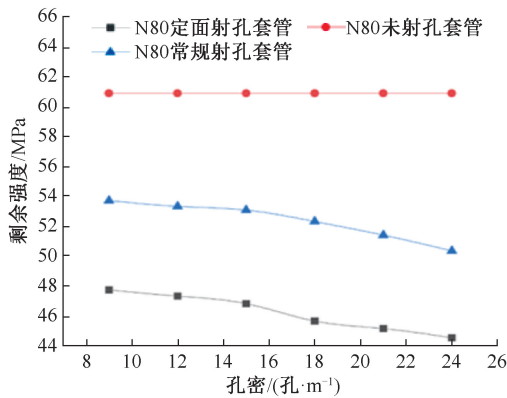


图 12 定面射孔套管剩余强度随孔密变化曲线

Fig. 12 Variation curve of residual strength of coplanar surface perforating casing with pore density

3 结论

(1)本文以孔板理论为基础,构建定面射孔套管剩余强度分析模型,并结合有限元分析方法,建立定面射孔套管剩余强度分析方法。

(2)以  $\Phi 139.7\text{ mm}\times 9.17\text{ mm}$  N80 定面射孔套管为例,1.5 簇/m 孔密,10 mm 孔径保持不变,相位角在  $15\sim 90^\circ$  范围内变化,相较于常规射孔套管,剩余强度变化幅值在  $0.91\%\sim 9.31\%$  之间;相较于未射孔套管,

剩余强度降低幅值在  $8.3\%\sim 17.35\%$  之间。

(3)1.5 簇/m 孔密、 $30^\circ$  相位角保持不变,孔径在  $4\sim 18\text{ mm}$  范围内变化,相较于未射孔套管,套管剩余强度降低幅值在  $8.31\%\sim 21.70\%$  之间。

(4)10 mm 孔径、 $30^\circ$  相位角保持不变,孔密在  $1.5\sim 4$  簇/m 范围内变化,剩余强度计算结果与孔密呈负相关,相较于未射孔套管,剩余强度降低幅值在  $8.31\%\sim 23.15\%$  之间。

(5)对比理论解和数值解,孔径、孔密、相位角变化时,定面射孔套管的剩余强度变化趋势吻合性很好,趋势一致,上下限值较理论解相差不超过  $8\%$ 。

致谢:感谢西安石油大学“试油与完井系统安全评价及控制技术研究课题组”、西安市高难度复杂油气井完整性评价重点实验室和中国石油集团川庆钻探工程有限公司试修公司的领导和同事们在论文撰写过程中提供的支持和帮助。

参考文献

[1] 余前港. 螺旋射孔裂缝扩展规律及不同储层压裂优化研究[D]. 黑龙江:东北石油大学, 2023:18-21.  
YU Qiangang. Study on fracture propagation law of spiral

- perforation and optimization of fracturing for different reservoirs [D]. Heilongjing: Northeast Petroleum University, 2023: 18-21.
- [2] 苗夏楠, 徐秀芬, 李泓霏, 等. 非常规油气井定面射孔套管强度稳定性[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2022, 41(3): 219-224.
- MIAO Xianan, XU Xiufen, LI Hongfei, et al. Strength stability of perforated casing in unconventional oil and gas wells[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2022, 41(3): 219-224.
- [3] 唐凯, 陈建波, 张清彬, 等. 定面射孔套管结构动态响应分析及应用[J]. 测井技术, 2017, 41(4): 485-489.
- TANG Kai, CHEN Jianbo, ZHANG Qingbin, et al. Analysis and application of casing structural strength response of transverse perforation [J]. Well Logging Technology, 2017, 41(4): 485-489.
- [4] 张儒鑫, 侯冰, 单清林, 等. 采用定面射孔时射孔参数的优选方法[J]. 钻采工艺, 2017, 40(3): 38-41.
- ZHANG Ruxin, HOU Bing, SHAN Qinglin, et al. How to decide optimum perforation parameters for coplanar perforation [J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(3): 38-41.
- [5] 王素玲, 苏义宝, 孙延安, 等. 定面射孔新工艺对套管强度的影响研究[J]. 力学与实践, 2018, 40(4): 402-408.
- WANG Suling, SU Yibao, SUN Yan'an, et al. The influence of the new technology of fixed surface perforation on casing strength [J]. Mechanics in Engineering, 2018, 40(4): 402-408.
- [6] 井素娟, 王艳梅, 井毅, 等. 定面射孔技术在姬塬地区长 9 底水油藏的应用[J]. 测井技术, 2017, 41(5): 616-622.
- JING Sujuan, WANG Yanmei, JING Yi, et al. Applications of oriented perforation technology in bottom water reservoir of Chang 9 formation in Jiuyan region [J]. Well Logging Technology, 2017, 41(5): 616-622.
- [7] HAN Lihong, LIU Guangxi, YANG Shangyu, et al. Experimental analysis on mechanical properties of perforated casing in complex fracturing [J]. Materials Science Forum, 2019, 944(2): 918-922.
- [8] 吴巍. 数值分析模型下页岩气定面定向射孔技术对套管的影响机理研究[J]. 江汉石油职工大学学报, 2021, 34(3): 67-69.
- WU Wei. Study on the impact mechanism of fixed-face and oriented perforation technology on casing under numerical analysis model[J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2021, 34(3): 67-69.
- [9] 唐凯, 陈建波, 陈华彬, 等. 定面射孔技术在四川盆地致密气井中的应用[J]. 测井技术, 2014, 38(4): 495-498.
- TANG Kai, CHEN Jianbo, CHEN Huabin, et al. Application of transverse perforation technology in tight gas well in Sichuan basin [J]. Well Logging Technology, 2014, 38(4): 495-498.
- [10] FAN Mingtao, LI Jun, LIU Gonghui, et al. Stress analysis of perforated casing in shale formation using staged finite element method [J]. Journal of Engineering Science & Technology Review, 2017, 10(2): 86-95.
- [11] 刘奉银, 段鹏辉, 苏良银, 等. 定面射孔水力压裂影响因素研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(8): 71-76.
- LIU Fengyin, DUAN Penghui, SU Liangyin, et al. Research on fixed surface perforating hydro-fracture [J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(8): 71-76.
- [12] 王小增, 杨久红, 窦益华. 套管磨损后剩余壁厚及剩余强度分析[J]. 石油钻探技术, 2008(2): 14-17.
- WANG Xiaozeng, YANG Jiuhong, DOU Yihua. Analysis of casing remaining thickness and residual strength after wearing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008(2): 14-17.
- [13] 杨斌, 练章华, 刘景超. 射孔套管剩余强度有限元分析[J]. 西部探矿工程, 2006(8): 193-195.
- YANG Bin, LIAN Zhanghua, LIU Jingchao. Finite element analysis of residual strength of perforated casing [J]. West-China Exploration Engineering, 2006(8): 193-195.
- [14] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2018: 165-167.
- [15] YU Maohong. Unified strength theory and its applications [M]. Second Edition, Berlin: Springer-Verlag, 2004: 57-61.

编辑 程莹

**第一作者简介:**李明飞,男,1979 年出生,博士,副教授,2019 年毕业于西北工业大学固体力学专业,现从事以振动力学、岩石力学、土力学、结构力学、和蠕变(损伤)力学为主要理论支撑的井筒安全和长输管道结构振动特性和安全性评价研究。电话:18302909000,Email:limf88@126.com。通信地址:陕西省西安市雁塔区电子二路 18 号西安石油大学,邮政编码:710065。