

# 基于折减模型和应力集中效应的筛管剩余强度分析

李明飞<sup>1</sup>, 牛耿<sup>1</sup>, 王莉芳<sup>2</sup>, 贺建磊<sup>3</sup>

1. 西安石油大学机械工程学院 陕西西安 710065

2. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司第十一采油厂 陕西西安 745000

3. 中国石油天然气股份有限公司大庆油田射孔器材有限公司 黑龙江大庆 163511

项目支持: 国家科技重大专项子课题“深层煤岩气水平井安全高效钻完井技术攻关与集成应用”(2025ZD1405703); 陕西省秦创原“首席科学家+工程师”项目“‘双碳’背景下的非常规油气藏高效射孔工艺技术研究与应用”(2024QCY-KXJ144)

引用: 李明飞, 牛耿, 王莉芳, 等. 基于折减模型和应力集中效应的筛管剩余强度分析[J]. 油气井测试, 2026, 35(2): 51-58.

Cite: LI Mingfei, NIU Geng, WANG Lifang, et al. Residual strength analysis of screen pipes based on a reduction model and stress concentration effects [J]. Well Testing, 2026, 35(2): 51-58.

**摘要** 针对射孔筛管易发生破裂、挤毁等井下复杂情况, 揭示布孔参数对圆孔筛管剩余强度的影响规律, 为油气田机械防砂筛管布孔设计提供理论依据。以 P110 钢级  $\Phi 127 \text{ mm} \times 9.19 \text{ mm}$  螺旋布孔圆孔筛管为研究对象, 结合经典折减模型与相位角影响系数模型, 建立考虑开孔面积折减和失稳的筛管剩余强度解析模型; 结合有限元分析方法, 数值模拟孔径、孔密、相位角对筛管剩余强度的耦合影响, 并对比验证解析解与数值解。研究表明, 孔径是影响筛管剩余强度的最主要因素, 孔径越大, 强度越低, 高孔密、小相位角会加剧孔径的弱化效应; 相位角为次要因素,  $90^\circ$  相位角对应的筛管剩余强度最高,  $60^\circ$  次之,  $30^\circ$  最差; 孔密影响稍弱, 孔密越高, 强度越低。小孔径、低孔密、 $90^\circ$  相位角组合下筛管剩余强度最优, 解析解与数值解相对误差为  $-5.14\% \sim 3.70\%$ , 满足工程精度。所建立的解析模型准确可靠, 可为现场筛管布孔参数优化设计与安全评价提供理论支撑。

**关键词** 筛管; 剩余强度; 布孔参数; 折减模型; 数值模拟; 安全性评价

中图分类号: TE257

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2026.02.008

## Residual strength analysis of screen pipes based on a reduction model and stress concentration effects

LI Mingfei<sup>1</sup>, NIU Geng<sup>1</sup>, WANG Lifang<sup>2</sup>, HE Jianlei<sup>3</sup>

1. College of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China

2. Changqing Oilfield Branch of CNPC, Eleventh Oil Production Plant, Xi'an, Shaanxi 710065, China

3. Daqing Oilfield Perforating Equipment Co., Ltd., CNPC, Daqing, Heilongjiang 163511, China

**Abstract:** To address downhole complications such as burst and collapse that frequently occur in perforated screen pipes, this study investigates the influence of perforation arrangement parameters on the residual strength of round-hole screen pipes, providing a theoretical basis for the perforation design of mechanical sand control screens in oil and gas fields. Taking a P110 steel grade  $\Phi 127 \text{ mm} \times 9.19 \text{ mm}$  round-hole screen pipe with a spiral perforation pattern as the research object, and combining the classical reduction model with the phase angle influence coefficient model, an analytical model for the residual strength of the screen pipe considering opening area reduction and instability was established. Integrated with the finite element method, the coupled effects of hole diameter, perforation density, and phase angle on the residual strength of the screen pipe were numerically simulated, and the analytical solutions were compared and verified against the numerical results. The study demonstrates that the hole diameter is the primary factor affecting the residual strength of the screen pipe; a larger hole diameter results in lower strength, while a high perforation density and a small phase angle exacerbate the weakening effect of the hole diameter. The phase angle acts as a secondary factor, with a  $90^\circ$  phase angle yielding the highest residual strength, followed by  $60^\circ$ , and  $30^\circ$  being the lowest. The influence of perforation density is relatively weaker, with higher density corresponding to lower strength. The combination of a small hole diameter, low perforation density, and a  $90^\circ$  phase angle provides the optimal residual strength for the screen pipe. The relative error between the analytical and numerical solutions ranges from  $-5.14\%$  to  $3.70\%$ , which satisfies engineering accuracy requirements. The established analytical model is accurate and reliable, offering theoretical support for the optimization design of perforation parameters and the safety evaluation of field screen pipes.

**Keywords:** screen pipe; residual strength; perforation arrangement parameters; reduction model; numerical simulation; safety evaluation

筛管作为机械防砂完井的核心工具,其结构完整性直接关系到油气井的防砂效果与服役寿命,是保障油气资源高效开采的重要基础。随着油气开采向深层、复杂地层延伸,筛管服役环境日趋复杂,高温、高压、强腐蚀等工况显著加剧了筛管结构损伤风险,基于缺陷特性的应力集中分析方法逐渐成为该领域的研究热点。

在相关研究中,基于结构参数优化的折减模型方法应用广泛,核心是筛选筛管关键结构参数,构建折减计算模型,实现不同工况下剩余强度的精准量化与调控。领域内学者针对深层与超深层碳酸盐岩油藏的复杂地质特点,通过完井结构优化构建适配折减模型<sup>[1]</sup>;基于组合缺陷形状,系统明确了缺陷对强度折减的影响规律<sup>[2]</sup>;针对高渗透率复合滤砂筛管,通过优化折减模型参数有效提升预测性能<sup>[3]</sup>。该方法贴合实际工况,但复杂地质条件下,结构参数筛选与折减系数确定难度较大,限制了其应用精度。

随着筛管服役环境进一步复杂化,基于缺陷特性的应力集中分析方法愈发受到重视。该方法聚焦各类缺陷引发的应力集中现象,深入探究其与筛管剩余强度的内在关联,为筛管强度评价提供了坚实的理论支撑。目前,相关研究已取得一定进展:针对含腐蚀缺陷筛管,明确了腐蚀程度与剩余强度的量化关系<sup>[4]</sup>;基于参考应力法结合应力集中系数,构建了筛管安全评价模型<sup>[5]</sup>;系统研究了射孔参数、椭圆度等缺陷对应力集中的影响,为筛管结构优化提供了理论依据<sup>[6-7]</sup>。但各类方法均存在不足:磨损缺陷相关研究适用性较窄<sup>[8]</sup>;孔眼排列研究未考虑多缺陷耦合效应<sup>[9]</sup>;响应曲面法优化精度高,但计算过程繁琐<sup>[10]</sup>。

此外,相关研究还形成了多种补充方法与验证路径,进一步完善了筛管强度研究体系,如通过修正强度计算模型提升预测精度<sup>[11]</sup>、采用全尺寸试验验证模型可靠性<sup>[12]</sup>、优化柔性筛管接头结构增强稳定性<sup>[13]</sup>、研究煤层筛管相位角对强度的影响<sup>[14]</sup>。同时,学者们将折减模型与应力集中分析方法相结合,进一步提升强度预测精准度,通过抗挤毁分析、压溃强度公式构建等方式优化折减模型<sup>[15-16]</sup>,基于抗挤强度与表皮因子优化筛管结构参数<sup>[17]</sup>。此类方法兼顾量化优势与机理分析,但在多工况、多缺

陷耦合场景下,模型适应性与计算效率仍需进一步提升。

综上所述,现有研究在筛管强度研究上已取得大量成果,但仍存在明显不足:大多针对单一布孔参数开展分析,较少考虑多种布孔参数的综合影响,且缺乏工程适用的筛管剩余强度解析模型。基于此,本文以螺旋布孔筛管为研究对象,建立剩余强度解析模型,通过数值模拟揭示多布孔参数对筛管强度的影响规律,并验证模型精度,为筛管布孔优化与强度校核提供可靠的理论依据。

## 1 筛管剩余强度解析方法建立

筛管作为完井工程的核心组件,其结构的完整性直接决定了油气井的生产寿命与安全。由于传统的套管强度校核准则难以准确表征其在复杂井下工况中的承载特征。为此,本章基于结构折减理论,通过引入相位角修正因子对经典力学模型进行改进,旨在构建一套能定量描述多参数耦合影响的剩余强度预测解析体系。

### 1.1 力学模型建立

筛管在外压作用下的失效模式与完整套管具有一致性,主要取决于其径厚比  $D/t$  和材料屈服强度。根据 GB/T 20657—2022 标准,完整套管的挤毁压力可根据不同的失效模式(屈服挤毁、塑性挤毁、过渡挤毁、弹性挤毁)由相应公式计算。套管挤毁失效按控制机理不同可划分为四种典型模式,不同模式对应不同的强度计算公式,可准确判定管体在不同径厚比区间的主导失效形式,为基准强度计算提供依据。

当  $D/t \leq (D/t)_y$  时,管壁发生屈服挤毁,失效源于管壁应力达到材料屈服强度所致的局部塑性变形。套管屈服挤毁压力为

$$p = 2\sigma_y \frac{D/t - 1}{(D/t)^2} \quad (1)$$

式中: $\sigma_y$  为套管屈服强度,MPa; $D/t$  为管道外径与壁厚的比值,即径厚比。

当  $(D/t)_y < D/t \leq (D/t)_p$  时,失效模式转为塑性挤毁,此时材料塑性流动与结构失稳共同作用,此为多数筛管基管的典型失效形式。套管塑性挤毁压力为

$$p = \sigma_y \left( \frac{A}{D/t} - B \right) - C \quad (2)$$

式中: $A$ 、 $B$ 、 $C$ 为管体挤毁压力设计公式经验系数。

当 $(D/t)_p < D/t \leq (D/t)_i$ 时,失效模式为过渡挤毁,此阶段管体对几何初始缺陷极为敏感,失稳临界压力介于塑性挤毁与弹性挤毁之间。套管过渡挤毁压力为

$$p = \sigma_y \left( \frac{F}{D/t} - G \right) \quad (3)$$

式中: $F$ 、 $G$ 为管体挤毁压力设计公式经验系数。

当 $D/t > (D/t)_i$ 时,发生弹性挤毁,此时管壁很薄,结构在材料屈服前即因弹性失稳而发生整体屈曲。套管弹性挤毁压力为

$$p = \frac{46.95 \times 10^6}{(D/t)(D/t - 1)^2} \quad (4)$$

上述失效模式间的临界径厚比阈值 $(D/t)_y$ 、 $(D/t)_p$ 、 $(D/t)_i$ 是基于管体材料屈服强度通过经验公式计算确定的参数,具体解析式如下

$$\begin{cases} (D/t)_y = \frac{\sqrt{(A-2)^2 + 8(B+C\sigma_y^{-1})} + (A-2)}{2(B+C\sigma_y^{-1})} \\ (D/t)_p = \sigma_y \frac{(A-F)}{C+\sigma_y(B-G)} \\ (D/t)_i = \frac{2+B/A}{3(B/A)} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $F$ 、 $G$ 均为管体挤毁压力设计公式经验系数。

在此基础上,针对开孔导致管体有效承载面积下降、结构刚度非均匀弱化的问题,引入洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)提出的经典折减模型,该模型基于大量穿孔管件试验数据,认为开孔管剩余抗挤强度随开孔直径增大而降低,随孔间距增大而升高,二者呈线性折减关系,能够较好反映开孔面积损失对强度的影响,是穿孔管强度评价中应用最广泛的基础模型。

$$P_r = P_0 \cdot \left[ 1 - \frac{d}{s} \right] \quad (6)$$

式中: $P_r$ 为筛管的剩余抗挤毁强度,MPa; $P_0$ 为未开孔的完整管体的抗挤毁强度,MPa; $d$ 为筛管的开孔直径,mm; $s$ 为筛管的孔间距,mm。其中 $s = 1\,000/n$ , $n$ 为孔密,孔/m。

常规折减模型仅考虑了轴向孔间距与孔径的影响,未涉及螺旋布孔带来的周向相位角效应。而现场筛管多采用螺旋布孔,不同相位角会直接改变孔眼分布的对称性、孔边应力集中程度以及结构刚度的周向均匀性。相位角越小,孔眼分布越密集、

不对称性越强,应力集中越剧烈;相位角越大,布孔对称性越好,应力分布越均匀,剩余强度越高。

因此,传统折减模型无法完整表征螺旋布孔筛管的强度弱化规律。为弥补这一缺陷,本研究在经典模型基础上引入相位角影响系数 $\eta_\theta$ ,从而反映螺旋布孔下不均匀刚度削弱的敏感度。相位角影响系数结合经验公式表达式为

$$\eta_\theta = -1.6667 \times 10^{-5} \cdot \theta^2 + 3.5 \times 10^{-3} \cdot \theta + 0.71 \quad (7)$$

式中: $\theta$ 为筛管的相位角,°。

将相位角影响系数代入基础折减模型并整理,最终建立同时考虑开孔面积折减、结构失稳与相位角修正的筛管剩余强度解析模型。

$$P_r = P_0 \cdot \eta_\theta \cdot \left[ 1 - \frac{d \cdot n}{1\,000} \right] \quad (8)$$

## 1.2 筛管剩余强度解析结果分析

以P110钢级 $\Phi 127\text{ mm} \times 9.19\text{ mm}$ 筛管为研究对象,材料参数为:屈服强度758 MPa,弹性模量210 GPa,切线模量820.48 MPa,泊松比0.3,计算得完整基管失效压力为77.27 MPa。假设采用螺旋布孔方式,研究聚焦于孔密、孔径及相位角三个关键变量,取孔径分别为10、16、20 mm,相位角分别为30°、60°和90°,孔密分别为4、6、8孔/m。基于解析模型计算筛管剩余强度及剩余强度系数,结果如表1所示。

表1 筛管剩余强度解析值

Table 1 Analytical value of screen residual strength

		孔密4孔/m	孔密6孔/m	孔密8孔/m
孔径 10 mm	30°相位角	59.34 MPa	58.11 MPa	56.87 MPa
	60°相位角	63.15 MPa	61.83 MPa	60.51 MPa
	90°相位角	66.76 MPa	65.37 MPa	63.98 MPa
孔径 16 mm	30°相位角	57.86 MPa	55.88 MPa	53.90 MPa
	60°相位角	61.57 MPa	59.46 MPa	57.36 MPa
	90°相位角	65.09 MPa	62.87 MPa	60.64 MPa
孔径 20 mm	30°相位角	56.87 MPa	54.40 MPa	51.93 MPa
	60°相位角	60.51 MPa	57.88 MPa	55.25 MPa
	90°相位角	63.98 MPa	61.20 MPa	58.42 MPa

由表1可知,筛管最小剩余强度为51.93 MPa,对应参数组合为孔径20 mm、孔密8孔/m、相位角30°,该值较所有测试组的最大剩余强度66.76 MPa降幅达22.20%,对应参数组合为孔径10 mm、孔密4孔/m、相位角90°,凸显了参数组合对筛管强度的显著影响。从影响因素的协同作用来看,最小剩余强度的出现是大孔径、高孔密与低相位角三者叠加作用的结果。20 mm的大孔径使筛管有效承载面积

最小,应力集中效应最为突出;8孔/m的高孔密进一步削弱了结构完整性,加剧了强度损失;30°的低相位角导致开孔分布对称性最差,进一步加剧了局部应力集中,三者共同作用使筛管剩余强度降至最低。

### 1.3 筛管剩余强度解析值分析

图1为筛管剩余强度随孔密变化的趋势图。孔径和相位角不变时,筛管剩余强度随孔密增加呈单调下降趋势,且孔径越大,强度下降幅度越显著。以 $\theta=90^\circ$ 为例, $d=10\text{ mm}$ 时,孔密由4孔/m增至8孔/m,剩余强度从66.02 MPa降至63.27 MPa,相对降幅4.17%; $d=20\text{ mm}$ 时,相对降幅达6.83%。高孔密进一步削弱了管体结构完整性,加剧了应力集中,导致强度损失增大。

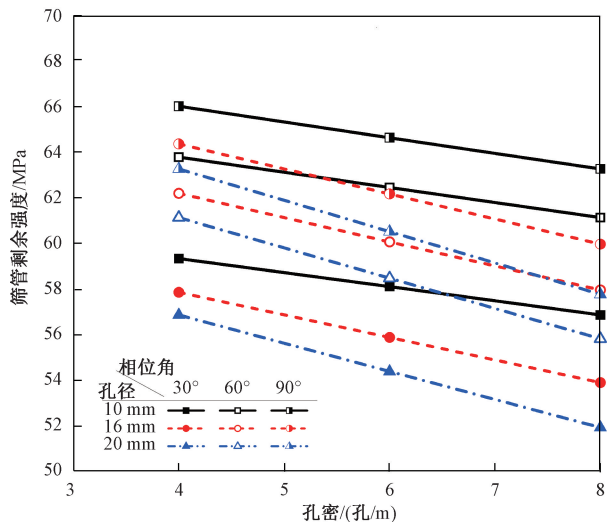


图1 筛管剩余强度随孔密变化曲线

Fig. 1 Curve of screen residual strength varying with perforation density

图2为筛管剩余强度随孔径变化的趋势图。孔密和相位角不变时,筛管剩余强度随孔径增大呈单调下降趋势,且孔密越高,强度下降幅度越剧烈。以 $n=6\text{ 孔/m}$ 、 $\theta=60^\circ$ 为例,孔径由10 mm增至20 mm,剩余强度从62.46 MPa降至58.48 MPa,相对降幅6.37%; $n=8\text{ 孔/m}$ 、 $\theta=60^\circ$ 时,相对降幅达8.71%。孔径增大会直接减少管体有效承载面积,强化孔边应力集中效应,高孔密下该效应更突出。

图3为筛管剩余强度随相位角变化的趋势图。孔径和孔密不变时,筛管剩余强度随相位角增大呈显著提升趋势,且孔径越大,强度提升效果越显著。以 $n=8\text{ 孔/m}$ 为例, $d=10\text{ mm}$ 时,相位角由30°增至90°,剩余强度从56.87 MPa提升至

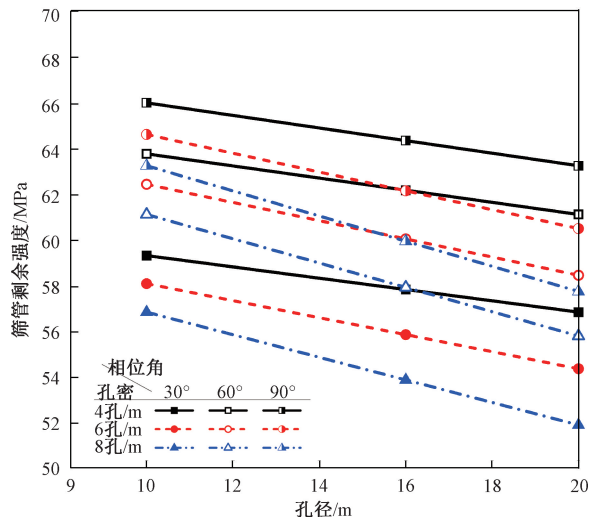


图2 筛管剩余强度随孔径变化曲线

Fig. 2 Curve of screen residual strength varying with hole diameter

63.27 MPa,相对增幅11.25%; $d=20\text{ mm}$ 时,相对增幅高达12.25%。增大相位角可改善孔周应力分布,提升结构整体承载效率,大孔径下应力分布的改善效果更明显。

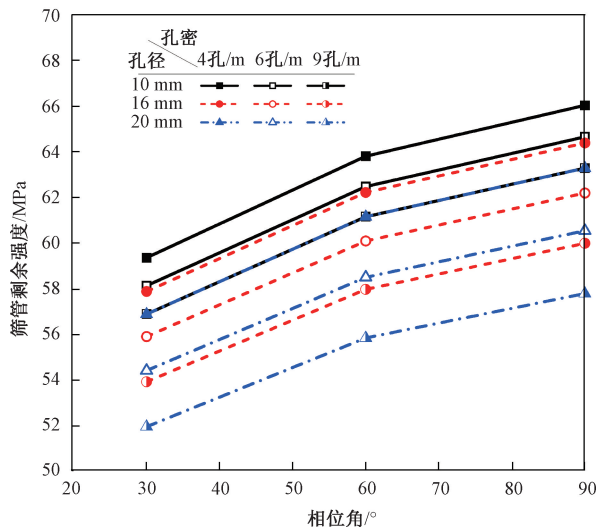


图3 筛管剩余强度随相位角变化曲线

Fig. 3 Curve of screen residual strength varying with phase angle

## 2 筛管剩余强度分析有限元模型建立

为验证理论模型的可靠性,并进一步揭示筛管在极限载荷下的失稳机理。本章依托 ANSYS Workbench 数值仿真计算平台,建立考虑大变形和材料非线性的三维精细化有限元模型,如图4所示,通过模拟筛管在井下外压下的真实力学响应过程。构建了基于螺旋布孔特征的精细化有限元模型。

## 2.1 几何模型与网格划分

在 SolidWorks 中建立  $\Phi 127 \text{ mm} \times 9.19 \text{ mm} \times 1\,000 \text{ mm}$  的筛管三维几何模型,采用螺旋布孔形式,孔眼为理想光滑圆柱形通孔。基本假设:材料各向同性且均匀分布;忽略加工毛刺、初始椭圆度及残余应力;筛管卸载前为理想圆筒。

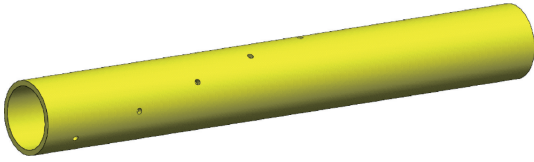


图 4 筛管有限元三维模型

Fig. 4 3D finite element model of the screen

将模型以 STEP 格式导入 ANSYS Workbench,采用 10 节点四面体单元 (Solid187) 进行自由网格划分,基本尺寸为 5 mm。为提高计算精度,对孔边区域进行局部网格细化。模型单元总数约 25 万,确保了计算精度与效率的平衡。

## 2.2 材料模型和边界条件及加载

为模拟材料在弹塑性阶段的力学行为,本研究采用双线性等向强化本构模型。模型参数依据 P110 钢级的典型材料特性确定:弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,屈服强度为 758 MPa,切线

模量为 820.48 MPa。

边界条件设置需模拟实际井下套管段受力状态。在筛管模型一端端面上施加固定约束,在另一端端面上施加圆柱面约束,即释放其轴向平动自由度,约束其径向平动自由度及所有转动自由度。该设置允许筛管受外压时产生轴向位移,同时防止发生刚体移动和转动,符合实际工程工况。载荷以均匀外压力的形式施加于筛管外表面,通过逐步增大载荷求解,当结构等效应力达到屈服强度时,对应的外压值即为筛管的剩余强度。

## 3 筛管剩余强度数值结果分析

基于上述所建立的有限元模型,系统分析了孔密、孔径及相位角三个关键布孔参数对筛管剩余强度的影响规律。筛管受载过程中,应力集中效应显著体现于孔眼结构处,此处为筛管整体的最先达到屈服强度的位置;基于该力学特征,选取筛管最大应力位置对应的横截面作为研究目标截面。以孔径 10 mm 的筛管为例,应力分布云图如图 5 所示。通过提取不同参数组合下筛管模型的极限承载压力、应力分布及失效模式,获得了筛管剩余强度的数值解如表 2 所示。

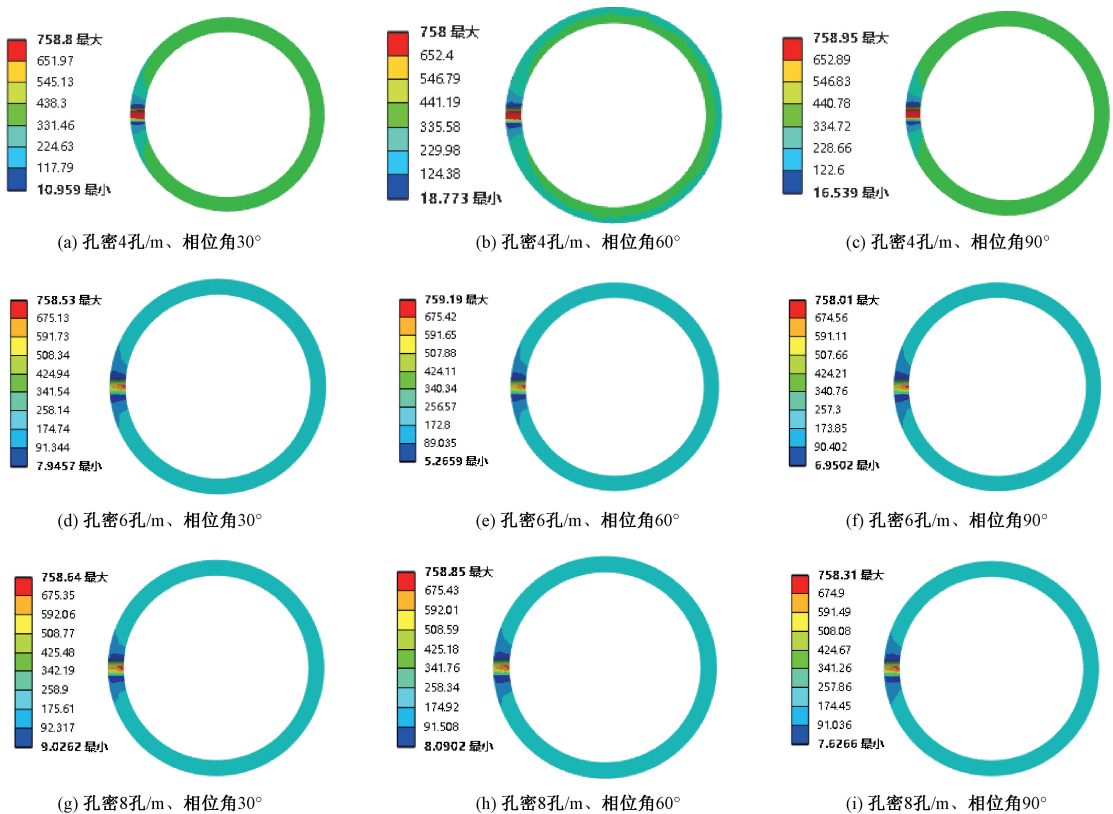


图 5 孔径 10 mm 筛管截面应力云图

Fig. 5 Stress contour of screen pipe cross-section with 10 mm hole diameter

表2 筛管剩余强度模拟结果

Table 2 Simulation results of screen residual strength

		孔密 4 孔/m	孔密 6 孔/m	孔密 8 孔/m
孔径 10 mm	30°相位角	58.63 MPa	57.39 MPa	56.06 MPa
	60°相位角	66.21 MPa	61.95 MPa	61.03 MPa
	90°相位角	66.64 MPa	65.09 MPa	63.58 MPa
孔径 16 mm	30°相位角	57.97 MPa	56.95 MPa	54.27 MPa
	60°相位角	61.45 MPa	60.23 MPa	56.81 MPa
	90°相位角	64.22 MPa	61.78 MPa	60.89 MPa
孔径 20 mm	30°相位角	56.04 MPa	54.45 MPa	50.87 MPa
	60°相位角	59.39 MPa	58.58 MPa	52.95 MPa
	90°相位角	60.32 MPa	59.68 MPa	57.33 MPa

### 3.1 孔密对筛管剩余强度的影响

图6为筛管剩余强度随孔密变化的趋势图,孔密与筛管剩余强度呈负相关,削弱效应受孔径和相位角协同调控,存在边际效应。相同参数组合下,孔密从4孔/m增至8孔/m,强度均呈下降趋势且降幅差异显著。孔径10 mm、相位角30°时削弱效应最弱,总降幅2.57 MPa,下降率4.38%;孔径20 mm、相位角60°时削弱最强,总降幅6.44 MPa,下降率10.84%。

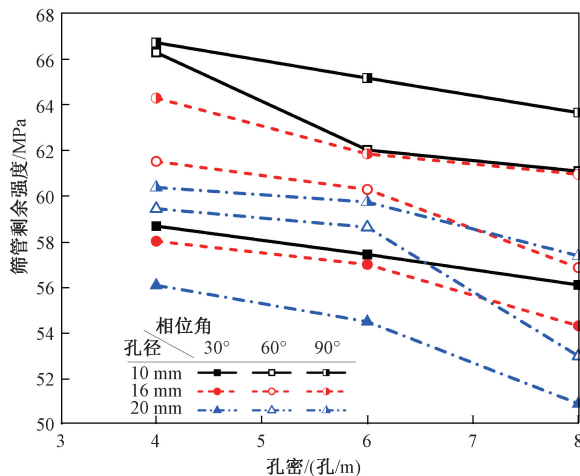


图6 筛管剩余强度随孔密变化曲线

Fig. 6 Curve of screen residual strength versus perforation density

### 3.2 孔径对筛管剩余强度的影响

图7为筛管剩余强度随孔径变化的趋势图,孔径与筛管剩余强度呈负相关,削弱效应受孔密和相位角制约。固定参数条件下,强度随孔径增大单调下降,大孔径组合对强度损失更敏感。孔密8孔/m、相位角60°时削弱效应最强,孔径从10 mm增至20 mm总降幅8.08 MPa,下降率13.24%;孔密4孔/m、相位角30°时削弱效应最弱,总降幅

2.59 MPa,下降率4.42%。

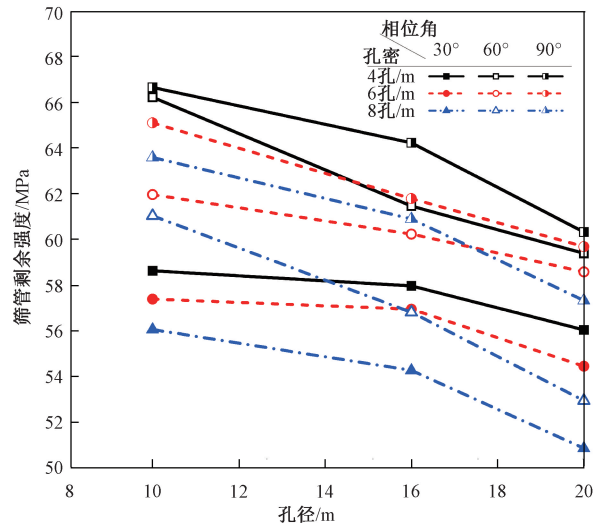


图7 筛管剩余强度随孔径变化曲线

Fig. 7 Curve of screen residual strength versus hole diameter

### 3.3 相位角对筛管剩余强度的影响

图8为筛管剩余强度随相位角变化的趋势图,相位角对筛管剩余强度具有显著提升作用,增长规律随孔径和孔密变化呈现差异化特征。多数组合中,30°至60°区间增长最为显著,60°至90°区间增长放缓;孔径20 mm、孔密4孔/m时总增长率最高,达15.50%;孔径10 mm、孔密8孔/m时增长相对均衡,总增长率8.20%。

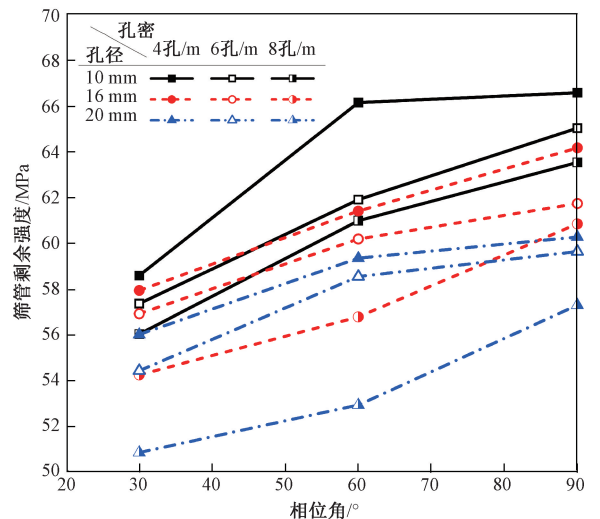


图8 筛管剩余强度随相位角变化曲线

Fig. 8 Curve of screen residual strength versus phase angle

## 4 解析解与数值解对比分析

为验证解析模型的准确性,对27组参数组合的解析解与数值解进行误差分析,结果如表3所示。

表3 筛管剩余强度解析值与数值解对比表

Table 3 Comparison table of analytical and numerical solutions for screen residual strength

序号	误差/%	序号	误差/%	序号	误差/%
1	-1.20	10	0.19	19	-1.46
2	3.70	11	-1.21	20	-2.86
3	0.94	12	-0.23	21	-4.66
4	-1.24	13	1.91	22	0.11
5	-0.82	14	0.27	23	0.17
6	0.70	15	-0.63	24	-1.39
7	-1.42	16	0.69	25	-2.04
8	-0.18	17	-1.97	26	-5.14
9	0.49	18	1.53	27	-0.76

由表3可知,在统计的27组工况下,整体相对误差控制在-5.14%至3.70%之间,且绝大多数样本误差在2%以内。数据分析表明,最大正误差分别为3.70%,对应参数为孔径10 mm、孔密4孔/m、相位角60°;最大负误差为-5.14%,对应参数为孔径20 mm、孔密8孔/m、相位角60°。随着孔径和孔密的增加,解析模型的计算偏差略有扩大。

为了更直观地反映解析模型与数值模拟结果的匹配程度,根据表3中的计算数据绘制了筛管剩余强度解析解与数值解的对比散点图,如图9所示。将所有工况下的解析计算结果与数值模拟结果进行对比,可以发现所有数据点均紧密分布在对比基准线附近,两者展现出极高的一致性。

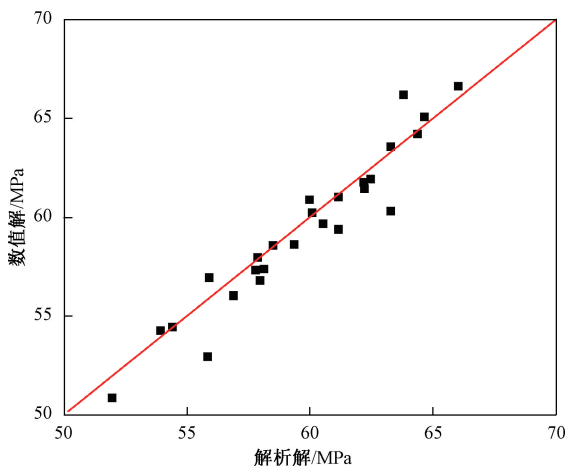


图9 筛管剩余强度解析解与数值解误差分析

Fig. 9 Error analysis between analytical and numerical solutions for screen residual strength

从误差分布特征来看,解析模型在整体范围表现稳定,未出现明显的系统性偏差。在孔径较大、相位角较大等极端参数组合下最大相对误差为5.14%。随着孔径和孔密的增加。通过散点分布的紧凑程度可以发现,该解析公式不仅能够准确捕捉

不同参数下剩余强度的变化趋势,且在全量程范围内均保持了较低的离散度,具有良好的稳定性。这验证了本文建立的解析计算模型在理论上的正确性,表明该方法能够替代复杂的有限元模拟,为筛管剩余强度的快速评价提供可靠的理论支持。

## 5 结论

(1)孔径、孔密、相位角对筛管剩余强度的影响存在主次差异,孔径影响最显著,相位角次之,孔密最弱;孔径、孔密越大,剩余强度越低,相位角越大则剩余强度越高,90°为最优相位角。

(2)布孔参数组合对剩余强度影响显著,20 mm孔径、8孔/m孔密、30°相位角为最劣组合,剩余强度达最小值50.87 MPa;10 mm孔径、4孔/m孔密、90°相位角为最优组合,剩余强度达最大值66.76 MPa,二者降幅22.20%。

(3)所建剩余强度解析模型计算精度均满足工程要求,27组参数下解析解与数值解误差值为-5.14%~3.70%,最大绝对差值3.66 MPa,可利用本文模型进行筛管剩余强度快速精准计算,为现场布孔参数优化与安全评价提供理论支撑。

致谢:感谢西安石油大学同意本文公开发表。感谢长庆油田第十一采油厂及大庆油田射孔器材有限公司各位领导及专家给予的支持和帮助。

## 参考文献

- [1] 张宝,董长银,李梦茹. 深层与超深层碳酸盐岩油藏打靶筛管完井结构优化与性能调控[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2026,50(1):145-153.  
ZHANG Bao, DONG Changyin, LI Mengru. Structural optimization and performance regulation of well completion with through-hole screen in deep and ultra-deep carbonate reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2026, 50 (1): 145-153.
- [2] 朱琳. 基于组合缺陷形状的管道剩余强度分析与研究[J]. 油气田地面工程,2025,44(10):14-19.  
ZHU Lin. Analysis and research of residual strength of pipeline based on complex defect shape [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2025, 44 (10): 14-19.
- [3] 尚兴宾,王占伟,张培涛,等. 高渗透率高强度复合滤砂筛管的性能提升策略与效果分析[J]. 石化技术,2025,32(9):106-108.  
SHANG Xingbin, WANG Zhanwei, ZHANG Peitao, et al. Performance improvement strategy and effect analysis of high permeability and high strength composite sand filter screen tube [J]. Petrochemical Industry Technology, 2025, 32 (9): 106-108.

- [4] 陈刚,曹永波. 含腐蚀缺陷套管的剩余强度研究[J]. 全面腐蚀控制,2025,39(8):112-117.  
CHEN Gang, CAO Yongbo. Research on remaining strength of corrosion-damaged casing[J]. Total Corrosion Control, 2025, 39 (8): 112-117.
- [5] 李东泽,王战辉,湛静茹,等. 基于参考应力法的油气管道剩余强度安全评价[J]. 化工科技,2025,33(5):16-20.  
LI Dongze, WANG Zhanhui, CHEN Jingru, et al. Safety evaluation of residual strength of oil and gas pipelines based on reference stress method[J]. Science & Technology in Chemical Industry, 2025, 33 (5): 16-20.
- [6] 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.  
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.
- [7] 李明飞,董帆,曹欣,等. 椭圆度和偏心及微裂纹缺陷套管剩余强度分析[J]. 中国科技论文,2024,19(11):1200-1208.  
LI Mingfei, DONG Fan, CAO Xin, et al. Residual strength analysis of ovality and eccentricity and microcrack defects[J]. China Sciencepaper, 2024, 19 (11): 1200-1208.
- [8] 曹银萍,潘莹,窦益华,等. 连续管磨损程度及剩余抗内压强度敏感性分析[J]. 机械设计与制造,2024(8):80-83.  
CAO Yinping, PAN Ying, DOU Yihua, et al. Analysis of wear degree and sensitivity to residual internal compressive strength of coiled tubing[J]. Machinery Design & Manufacture, 2024(8): 80-83.
- [9] 张永斌. 松软煤层筛管孔眼排列方式对压溃强度的影响分析[J]. 机械管理开发,2023,38(12):44-45.  
ZHANG Yongbin. Analysis of the effect of sieve pipe mesh arrangement on crushing strength in loose coal seam[J]. Mechanical Management and Development, 2023, 38 (12): 44-45.
- [10] 吴欣袁,田浩,杨文领,等. 基于响应曲面法的割缝筛管结构参数优化[J]. 科学技术与工程,2023,23(34):14555-14562.  
WU Xinyuan, TIAN Hao, YANG Wenling, et al. Optimization of slotted screen structural parameters based on response surface method[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23 (34): 14555-14562.
- [11] 姬丙寅,史交齐,徐蒿彦,等. 筛管抗拉强度计算及全尺寸试验[J]. 钻采工艺,2023,46(4):110-115.  
JI Bingyin, SHI Jiaoqi, XU Aiyan, et al. Calculation of tension strength and full-scale test of sand screens[J]. Drilling & Production Technology, 2023, 46 (4): 110-115.
- [12] 刘鑫阳,胡中志,朱军.  $\Phi 120$  mm 柔性筛管球铰接头结构强度分析与优化[J]. 科学技术与工程,2023,23(20):8634-8641.  
LIU Xinyang, HU Zhongzhi, ZHU Jun. Structural strength analysis and optimization of  $\Phi 120$  mm flexible screen spherical hinged head[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23 (20): 8634-8641.
- [13] 钟锋,唐胜利,王力,等. 煤矿井下碎软煤层完孔筛管相位角研究[J]. 煤炭技术,2023,42(6):197-200.  
ZHONG Feng, TANG Shengli, WANG Li, et al. Research on phase angle of screen pipe in broken soft coal seam in underground coal mines[J]. Coal Technology, 2023, 42 (6): 197-200.
- [14] 李承祥. 割缝筛管的抗挤毁能力分析与参数优化[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2021:24-55.  
LI Chengxiang. Analysis of collapse resistance and parameter optimization of slotted screens[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2021:24-55.
- [15] 孙宝江,彭玉丹,张伟国,等. 筛管压溃强度计算公式及适用性[J]. 石油学报,2020,41(3):363-371.  
SUN Baojiang, PENG Yudan, ZHANG Weiguo, et al. Calculation formula of collapsing strength of screen casing and analysis of its applicability[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41 (3): 363-371.
- [16] 高定祥,刘磊,吕孝孝,等. 基于抗挤强度及表皮因子的割缝筛管参数优化[J]. 石油机械,2019,47(6):79-84.  
GAO Dingxiang, LIU Lei, Lyu Xiaoxiao, et al. Parameter optimization of slotted screens based on collapse strength and skin factor[J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47 (6): 79-84.

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。