◀油气田开发工程▶

基于多级压裂中套管损伤效应的射孔参数优化研究*

刘献博[1,2] 王尚卫[1,2] 刘忠能[1,2] 杨义兴[1,2] 罗有刚[1,2] 隋明祥[1,2] 李 军[3]

（1. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司油气工艺研究院 2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室 3. 中国石油大学（北京）克拉玛依校区）

刘献博，王尚卫，刘忠能，等. 基于多级压裂中套管损伤效应的射孔参数优化研究［J］. 石油机械，2025，53（10）：139-144.

Liu Xianbo，Wang Shangwei，Liu Zhongneng，et al. Perforation parameter optimization based on casing damage effects in multistage fracturing［J］. China Petroleum Machinery，2025，53（10）：139-144.

摘要：多级压裂是实现长庆油田页岩油高效开发的关键技术，而多级压裂过程中套管安全性问题受到越来越多的关注。基于冲击动力学原理，建立了考虑射孔-多级压裂作业的射孔数值计算模型，明确了射孔、多级压裂过程中射孔套管的塑性应变变化规律，揭示了射孔孔密、相位角对射孔-压裂作业后套管剩余强度的影响规律。研究结果表明：多级压裂过程中的循环内压加剧了射孔套管的损伤，随着压裂级数的增加射孔套管塑性应变呈现阶梯状升高趋势，相应地射孔套管的剩余强度则呈现阶梯状降低的趋势；合理的射孔参数能够同时降低射孔、多级压裂过程中的套管塑性变形，提高生产阶段的套管剩余强度；DP41RDX32型射孔弹工作时的最优孔密为18孔/m，相位角为90°，该工况下的射孔-压裂过程中套管损伤程度最小。研究结果对长庆油田页岩油水平井射孔参数优化设计具有参考意义。

关键词：多级压裂；射孔；塑性应变；射孔孔密；射孔相位角；套管损伤效应；参数优化

中图分类号：TE357 **文献标识码：**A DOI：10.12473/CPM.202409053

Perforation Parameter Optimization Based on Casing Damage Effects in Multistage Fracturing

Liu Xianbo[1,2] Wang Shangwei[1,2] Liu Zhongneng[1,2] Yang Yixing[1,2] Luo Yougang[1,2] Sui Mingxiang[1,2] Li Jun[3]

（1. *Oil and Gas Technology Institute*, *PetroChina Changqing Oilfield Company*; 2. *National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low Permeability Oil and Gas Field*; 3. *China University of Petroleum*（*Beijing*）*at Karamay*）

Abstract: Multistage fracturing is a key technology for achieving efficient development of shale oil in Changqing Oilfield, and the casing safety issues during multistage fracturing have attracted increasing attention. Based on impact dynamics principles, a numerical calculation model for perforation considering perforation-multistage fracturing operations was established. The plastic strain variation law of perforated casing during perforation and multistage fracturing processes was clarified, and the influence of perforation density and phase angle on the residual strength of casing after perforation-fracturing operations was revealed. The study results show that the cyclic internal pressure increases the damage of the perforated casing during multistage fracturing process. As the number of fracturing stages increases, the plastic strain of the perforated casing shows a stepwise increase trend, while the residual strength of the perforated casing exhibits a stepwise decrease trend correspondingly. Reasonable perfora-

* 基金项目：中国石油天然气股份有限公司攻关性应用性科技专项“非常规储层改造关键技术研究（2023ZZ28）”之课题4：多类型页岩油个性化压裂技术研究与试验。

tion parameters can simultaneously reduce the plastic deformation of casing during perforation and multistage fracturing processes, and enhance the residual strength of casing in production phase. For the DP41RDX32 perforation charge, the optimal perforation density is 18 perforations/m, with a phase angle of 90°. Under this operating condition, the degree of casing damage is the minimum during perforation and fracturing processes. The study results have reference significance for the optimization design of perforation parameters in shale oil horizontal wells in Changqing Oilfield.

Keywords: multistage fracturing; perforation; plastic strain; perforation density; perforating phase angle; casing damage effect; parameter optimization

0　引　言

长庆油田储层具有典型的低渗、超低渗特征，压裂已成为其改善储层油气渗流条件、提高采收率的常用手段[1-2]。2014 年，于浩等[3]基于 ABAQUS 软件建立了考虑压裂过程中套管变形的二维平面应变模型，开展了压裂后套管的变形及应力计算，分析了压裂后套管变形的主要影响因素。2015 年，LIAN Z. H. 等[4]建立了油气井体积压裂有限元模型，开展了压裂过程中套管的应力分布特征研究，认为体积压裂过程中出现的零应力区或者拉应力亏损区均分布在体积压裂的有效范围内；同时，调整套管材料强度及壁厚无法改变压裂过程中套管变形的事实，通过优化压裂簇间距是减小压裂过程中套管变形的可行手段。2016 年，刘奎等[5]基于弹塑性力学原理，分析了页岩气压裂过程中水平段的套管-水泥环-岩石的力学行为，认为增加套管壁厚、缩小套管内径、降低水泥环强度均能够有效提高压裂过程中的井筒完整性。2017 年，席岩等[6]基于压裂过程中压裂液与壁面传热系数关系，建立压裂过程中井筒温度场计算模型，认为压裂过程中井筒温度变化对套管抗外挤强度影响较大。2019 年，张智等[7]开展了页岩气压裂过程中套管损伤机理的研究，认为井筒温度变化达到临界条件时会导致局部圈闭载荷超过套管的抗外挤强度，导致套管损伤，通过增加套管壁厚或者套管强度能够改善压裂过程中套管的损伤。2020 年，刘合等[8]通过在体积压裂全区嵌入 Cohesive 单元和渗流节点，实现了对套管周围复杂裂缝的非均匀扩展，认为体积压裂过程中套管周围裂缝的非均匀扩展方式改变了套管周围应力的分布特征。2021 年，刘洪涛等[9]基于 P110 套管的拉伸、残余应力测试试验与有限元建模相结合的方式，开展了套管抗外挤强度的相关研究。2022 年，高德利等[10]总结了国内页岩气井压裂过程中井筒完整性失效与控制的研究进展，介绍了该领域内的创新性研究成果。2023 年，孙锐等[11]建立了基于理论分析与有限元分析的多簇压裂套管应力计算模型，并且对有限元模型进行了验证，认为压裂簇数、岩石强度参数、水泥环强度参数、套管内压力、地应力变化等均会引起压裂过程中套管的应力变化。

目前，针对射孔或者压裂作业过程中套管损伤的研究相对较多，但是对于多级压裂过程中的套管损伤及强度失效，多数研究并未考虑射孔作业导致套管的损伤特征。为此，笔者基于爆炸动力学原理建立射孔数值计算模型，并针对该模型开展射孔作业及多级压裂作业中套管损伤效应及剩余强度的影响研究，揭示射孔及多级压裂过程中套管塑性应变及剩余强度的变化规律，完成射孔参数的优化。研究结果可为油气井现场射孔参数优化设计提供参考。

1　数值模型

1.1　物理模型

长庆油田页岩油储层具有明显的特低孔、超低渗特征，多级压裂已成为页岩油高效开发的关键技术（见图 1）。

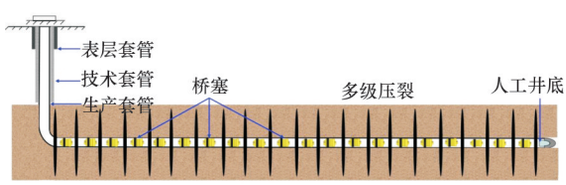


图 1　长庆油田水平井多级压裂示意图

Fig. 1　Multistage fracturing of horizontal well in Changqing Oilfield

考虑射孔枪上射孔弹分布特征，基于冲击动力学原理，建立了射孔冲击载荷作用下的套管损伤数值模型（见图 2）。模型中套管直径为 139.7 mm，壁厚为 9.17 mm，套管钢级为 P110；水泥环厚度为 30 mm，岩石厚度为 50 mm，模型整体高度 320 mm。物理模型中的主体部分为射孔弹、射孔

枪、套管，其中射孔枪位置截面如图 3 所示。射孔弹型号为 DP41RDX32。考虑不涉及射孔枪枪身强度的研究，因而射孔枪整体壁厚与盲板厚度均相同，为 3.5 mm。由于水平井线缆下入射孔枪时无法保证射孔枪在井筒中的姿态，导致射孔孔眼直径不同，所以对其进行了相应的简化，简化后的射孔枪位于套管中心位置处。

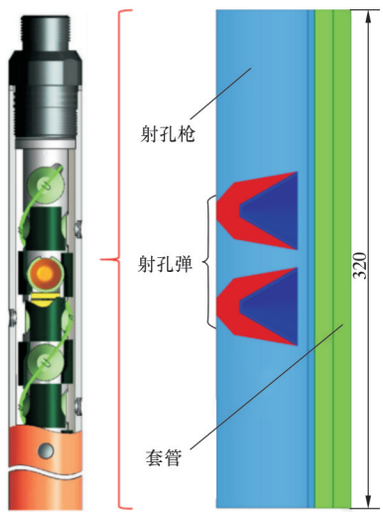


图 2　物理模型

Fig. 2　Physical model

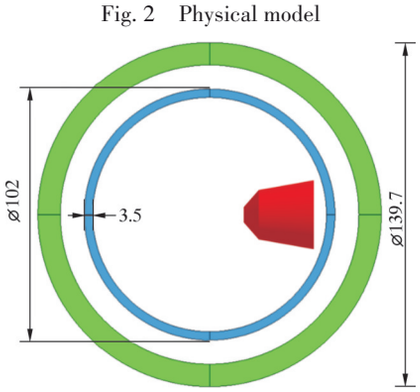


图 3　射孔枪位置截面

Fig. 3　Perforating gun location

1.2　载荷与边界条件特征

聚能射孔计算中首先要考虑射孔弹的数学模型，射孔弹直接影响射孔完井的效果，合理的射孔弹数学模型可以提高数值计算的精度。将关键字*EOS_JWL 作为炸药的状态方程，状态方程中的 JWL（Jones Wilkins Lee，JWL）数学模型如下：

$$p = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 v}\right)\mathrm{e}^{-R_1 v} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 v}\right)\mathrm{e}^{-R_2 v} + \frac{\omega E}{v} \quad (1)$$

式中：p 为轰爆压力，取 374 GPa；E 为单位体积轰爆能量，kJ/cm³；A、B 为有量纲材料常数，分别为 3.2、10 GPa；R_1、R_2、ω 为无量纲材料常数，分别为 4.15、0.95、0.3；v 为轰爆产物的相对比容，无量纲。

DP41RDX32 型射孔弹的装药类型为 RDX，装药密度为 1.63 g/cm³，轰爆速度为 6 930 m/s。

2　多级压裂作业中套管剩余强度分析

ZHAO C. J. 等[12-13]基于全尺寸井筒循环内载荷试验装置，改进了压裂过程中套管应变监测系统，开展压裂过程中套管应变特征的研究。研究结果表明，压裂过程中套管发生弹塑性变形，套管残余应变的存在严重影响了套管服役过程中的强度。同时，其基于压裂过程中井筒载荷特征修正了套管尺寸模型。

循环内压载荷下全尺寸井筒变形测量试验表明，套管经历多次压裂载荷作用将产生不可恢复的残余应变。故需要根据压裂载荷情况对套管尺寸进行修正：

$$D = D_0 + D_0\varepsilon_{\mathrm{R}} \quad (2)$$

式中：D 为压裂后的套管外径，mm；D_0 为压裂前标准套管外径，mm；ε_{R} 为压裂后的套管残余应变，无量纲。

压裂过程中套管发生一定的塑性变形，但塑性变形量有限，因而压裂后套管的壁厚为：

$$\delta = \delta_0\sqrt{\frac{(D_0 - \delta_0)\delta}{(D - \delta)\delta_0}} \quad (3)$$

式中：δ_0、δ 分别为多级压裂前标准套管壁厚及多级压裂后套管壁厚，mm。

压裂后套管发生变形，其抗外挤强度较原始状态发生变化。基于套管抗外挤强度模型可以得到不同压裂级数下的套管抗外挤强度[14]：

$$p_{\mathrm{c}} = \frac{1}{2}\left[p_{\mathrm{e}} + \sigma_0 - \sqrt{(p_{\mathrm{e}} - \sigma_0)^2 + \theta p_{\mathrm{e}}\sigma_0}\right] \quad (4)$$

式中：p_{c} 为压裂后套管抗外挤强度，MPa；p_{e} 为套管弹性极限外压力，MPa；σ_0 为压裂中套管有效应力，MPa；θ 为套管缺陷参数，无量纲。

其中：

$$p_{\mathrm{e}} = \frac{454\,950\ \mathrm{MPa}}{\dfrac{D_0}{t_0}\left(\dfrac{D_0}{t_0} - 1\right)^2} \quad (5)$$

式中：t_0 为压裂前套管的壁厚，mm。

$$\sigma_0 = 2.308\sigma_{\mathrm{y}}\frac{\dfrac{D_0}{t_0} - 1}{\left(\dfrac{D_0}{t_0}\right)^2} \quad (6)$$

式中：σ_{y} 为套管屈服强度，MPa。

3　射孔参数优化

3.1　基于射孔套管损伤的射孔参数优化

生产段套管射孔后，相邻射孔孔道间形成应力集中区域，冲击载荷作用下套管在该区域产生塑性应变。考虑到射孔枪设计中的关键参数为射孔孔密及射孔相位角[15-17]，基于冲击动力学原理，建立射孔-压裂数值计算模型，开展不同射孔孔密、射孔相位角作用下套管抗外挤强度分析。

数值模型中通过改变射孔孔密、射孔相位角实现对射孔参数的研究（见图4）。其中射孔孔密分别为10、12、14、16、18、20、22孔/m，射孔相位角分别为0°、20°、30°、45°、60°、90°。

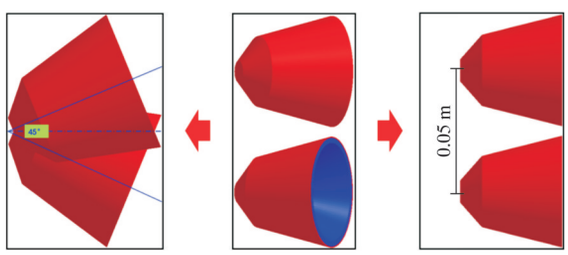


图4　射孔弹空间特征

Fig. 4　Spatial characteristics of perforation charge

图5显示了射孔相位角为45°时不同射孔孔密下相邻射孔孔道间中心点的塑性应变曲线。由图5可知，随着射孔孔密的增加，相邻射孔孔道间的套管塑性应变逐渐增大。射孔孔密为10孔/m时，相邻射孔孔道间中心点位置处的塑性应变为0，表明相邻射孔孔道间不存在应力叠加区域（见图6）。

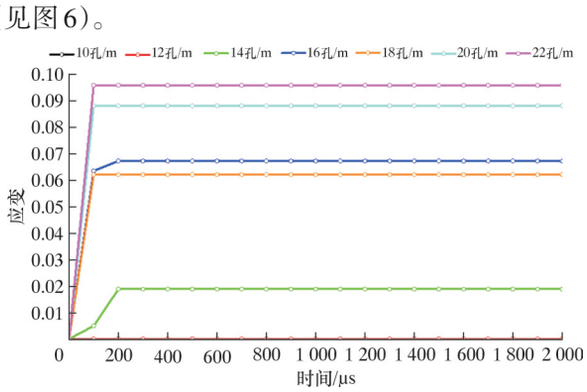


图5　不同孔密下应力集中区塑性应变

Fig. 5　Plastic strain in stress concentration zone at different perforation densities

图7显示了射孔孔密为20孔/m时不同射孔相位角下，相邻射孔孔道间中心点的塑性应变曲线。由图7可知，射孔相位角为45°时，相邻射孔孔道间中心点位置处的套管塑性应变最大；而当射孔相位角为0°~20°或者90°时，相邻射孔孔道间中心点位置处的套管塑性应变较小。

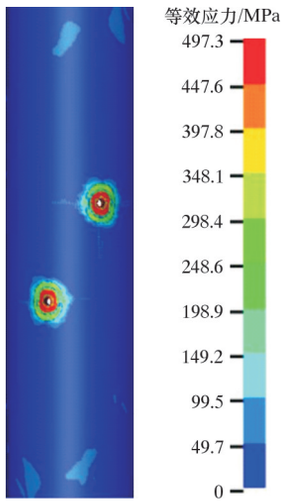


图6　10孔/m时套管应力分布特征

Fig. 6　Casing stress distribution characteristics at 10 perforations/m

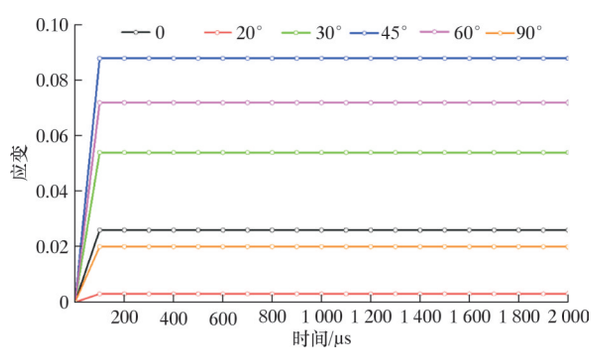


图7　不同相位角下应力集中区塑性应变

Fig. 7　Plastic strain in stress concentration zone at different phase angles

综上分析，随着射孔孔密的增加，套管相邻射孔孔道间中心点的塑性应变增大，表明射孔孔密增大会直接导致套管强度的降低。考虑射孔孔密与油气井产能的关系，射孔孔密较小时虽然能够减轻套管在射孔过程中的损伤，但是产能相对也会降低。最优的射孔孔密应是在孔密尽可能大的同时套管塑性应变没有较大增加，因而最优射孔孔密应为16~18孔/m；最优的射孔相位角存在2个选择，分别是0°~20°及90°。

3.2　基于多级压裂中套管损伤的射孔参数优化

图8为压裂过程中射孔孔密对套管损伤的影响。由图8可知：不同射孔孔密下的套管塑性应变随压裂级数的增加而增大；相同压裂级数时，随套管射孔孔密的增加，套管塑性应变增大。

图9为压裂过程中射孔相位角对套管损伤的影响。由图9可知：不同射孔相位角下的套管塑性应

变随压裂级数的增加，整体上呈现增大的趋势；相同的压裂级数下，随套管射孔相位角增大，套管塑性应变逐渐减小。

基于冲击动力学原理，结合式（4），计算了不同射孔相位角及射孔孔密下压裂后相邻射孔孔道间中心点位置处的套管剩余强度（见图 10 及图 11）。基于压裂的射孔套管变形特征，最优射孔孔密 18 孔/m、射孔相位角为 90°时，压裂过程中射孔套管的塑性变形较小。

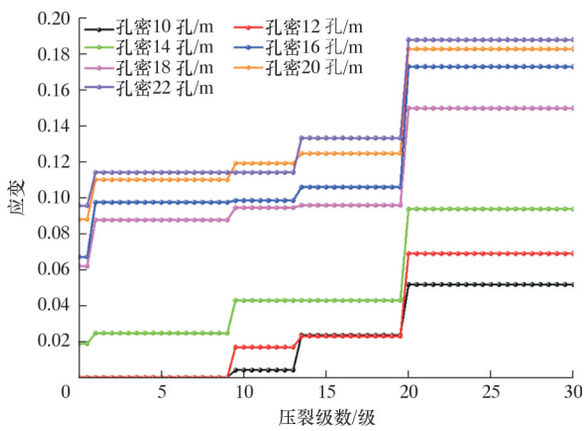


图 8　压裂过程中射孔孔密对套管损伤的影响

Fig. 8　Influence of perforation density in fracturing

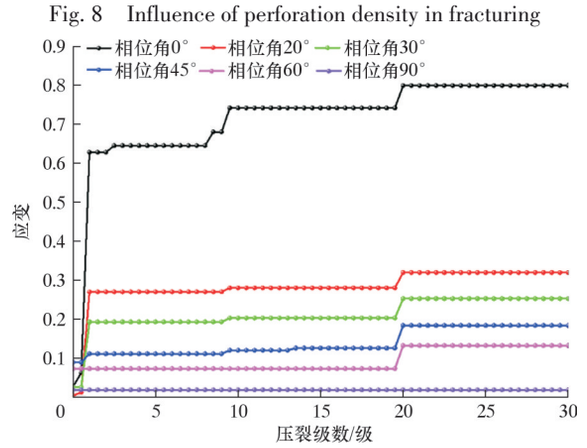


图 9　压裂过程中射孔相位角对套管损伤的影响

Fig. 9　Influence of perforating phase angle in fracturing

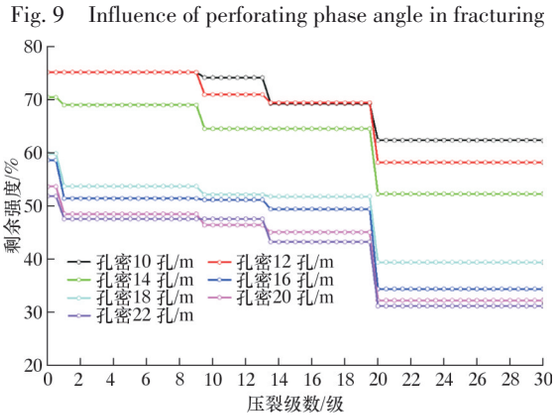


图 10　循环载荷下不同孔密射孔套管剩余强度

Fig. 10　Residual strength of perforated casing with different perforation densities under cyclic loading

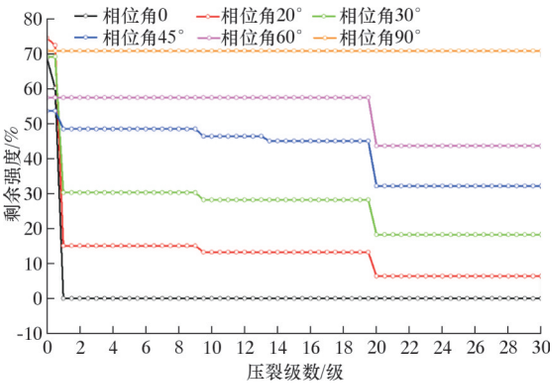


图 11　循环载荷下不同相位角射孔套管剩余强度

Fig. 11　Residual strength of perforated casing with different phase angles under cyclic loading

综上分析，压裂后射孔套管塑性应变随着压裂级数的增加呈阶梯状升高，套管射孔剩余强度也呈阶梯状降低。考虑多级压裂对射孔套管抗外挤强度的影响，结合射孔过程中射孔孔密、射孔相位角优化结果，射孔-压裂作业过程中最优的射孔孔密为 18 孔/m，射孔相位角为 90°。

4　结　论

（1）压裂作业中，循环内压的作用加剧了射孔后套管的损伤，套管塑性应变随压裂级数的增加呈阶梯状升高的趋势，套管剩余强度呈阶梯状降低的趋势。

（2）合理的射孔参数不仅能够减轻射孔过程中套管的初始损伤，提高套管剩余强度，还保证了油气井生产过程中井筒的安全性。考虑多级压裂过程中套管损伤效应对强度的影响，DP41RDX32 型射孔弹工作时的最优孔密为 18 孔/m，相位角为 90°，该工况下的射孔-压裂过程中套管损伤程度最小。

参　考　文　献

[1] WANG B，LI J，LIU G H，et al. Near-wellbore fracture propagation physical simulation based on innovative interlaced fixed perforation [J]. Petroleum Exploration & Development，2019，46（6）：1187-1196.

[2] JIANG H，CHEN M，ZHANG G Q，et al. Impact of oriented perforation on hydraulic fracture initiation and propagation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2008，28（7）：1321-1326.

[3] 于浩，练章华，林铁军. 页岩气压裂过程套管失效机理有限元分析 [J]. 石油机械，2014，42（8）：84-88，93.

YU H，LIAN Z H，LIN T J. Finite element analysis of

failure mechanism of casing during shale gas fracturing [J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42 (8): 84-88, 93.

[4] LIAN Z H, YU H, LIN T J, et al. A study on casing deformation failure during multi-stage hydraulic fracturing for the stimulated reservoir volume of horizontal shale wells [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 23: 538-546.

[5] 刘奎，王宴滨，高德利，等. 页岩气水平井压裂对井筒完整性的影响 [J]. 石油学报，2016，37 (3)：406-414.
LIU K, WANG Y B, GAO D L, et al. Effects of hydraulic fracturing on horizontal wellbore for shale gas [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37 (3): 406-414.

[6] 席岩，柳贡慧，李军，等. 页岩气井体积压裂井筒温度计算及套管强度变化分析 [J]. 断块油气田，2017，24 (4)：561-564.
XI Y, LIU G H, LI J, et al. Calculation of wellbore temperature and analysis of its effect on casing strength during volume fracturing in shale gas well [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2017, 24 (4): 561-564.

[7] 张智，刘金铭，刘和兴，等. 页岩气井压裂过程中套管损坏的机理 [J]. 天然气工业，2019，39 (10)：82-87.
ZHANG Z, LIU J M, LIU H X, et al. Mechanisms of casing damage during shale gas well fracturing treatment [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39 (10): 82-87.

[8] 刘合，刘伟，王素玲，等. 水平井体积压裂套管失效机制研究现状及趋势初探 [J]. 中国石油大学学报 (自然科学版)，2020，44 (6)：53-62.
LIU H, LIU W, WANG S L, et al. Research status and development trend of mechanisms of casing failure caused by volume fracturing in horizontal wells [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020, 44 (6): 53-62.

[9] 刘洪涛，徐蔼彦，赵密锋，等. 套管极限挤毁强度的计算及有限元模拟 [J]. 机械工程材料，2021，45 (9)：79-82.
LIU H T, XU A Y, ZHAO M F, et al. Calculation and finite element simulation of ultimate collapse strength of drivepipe [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2021, 45 (9): 79-82.

[10] 高德利，刘奎，王宴滨，等. 页岩气井井筒完整性失效力学机理与设计控制技术若干研究进展 [J]. 石油学报，2022，43 (12)：1798-1812.
GAO D L, LIU K, WANG Y B, et al. Some research advances in the failure mechanism and design&control technologies of shale gas well integrity [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43 (12): 1798-1812.

[11] 孙锐，梁飞，杨钊等. 页岩气井多簇压裂套管应力影响因素分析 [J]石油机械，2023，51 (08)：148-156.

[12] ZHAO C J, LI J, LIU G H, et al. Analysis of the influence of cement sheath failure on sustained casing pressure in shale gas wells [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019, 66: 244-254.

[13] ZHAO C J, LI J, LIU G H, et al. Analysis of well stress with the effect of natural fracture nearby wellbore during hydraulic fracturing in shale gas wells [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 188: 106885.

[14] 金春玉，艾池，于洪金，等. 套管变形对抗挤强度的影响 [J]. 油气地质与采收率，2011，18 (5)：104-107.
JIN C Y, AI C, YU H J, et al. Effect of casing deformation on crush strength [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18 (5): 104-107.

[15] 慈建发，刘献博，李军，等. 基于套管损伤分析的射孔关键参数优化研究 [J]. 石油管材与仪器，2022，8 (2)：19-22.
CI J F, LIU X B, LI J, et al. Optimization of perforation key parameters based on casing damage analysis [J]. Petroleum Instruments, 2022, 8 (2): 19-22.

[16] 刘献博，李军，高德伟，等. 考虑射孔初始损伤的套管强度失效数值研究 [J]. 石油机械，2023，51 (10)：127-135.
LIU X B, LI J, GAO D W, et al. Numerical study on casing strength failure considering initial perforation damage [J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51 (10): 127-135.

[17] LIU X B, LI J, YANG H W, et al. A new investigation on optimization of perforation key parameters based on physical experiment and numerical simulation [J]. Energy Reports, 2022, 8: 13997-14008.

第一作者简介：刘献博，生于 1994 年，2024 年毕业于中国石油大学（北京）石油与天然气工程专业，获博士学位，现从事低渗透油气田开发工艺技术研究工作。地址：(710018) 陕西省西安市。email：Liuxbpetroleum@163.com。

收稿日期：2024-09-25　　**修改稿收到日期：**2025-04-20

（本文编辑　任　武）