

页岩气水平井压裂工况下水泥环力学特性的研究

张稳鹏*, 刘 焯, 李鹏飞

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2024年4月24日; 录用日期: 2024年6月17日; 发布日期: 2024年6月27日

摘 要

本文主要目的是探究在页岩气水平井压裂过程中的水泥环的物理性质。我们利用有限元建模技术来精确划分单元格并设置约束条件, 以深入了解射孔孔径、密度、方向角度及相位角等因素如何影响水泥环的压力状态。此外, 我们也考察了分段压裂期间射孔段水泥环内的温度和压力的变化情况, 同时还研究了套管内压、孔径和孔密度对水泥环封闭效果的影响模式。我们的实验表明, 射孔参数的调整会对水泥环的压力分布产生重大影响, 进而影响到井壁的安全性。当考虑到瞬间的热力和机械相互作用时, 水泥环孔口处的失效概率会有所增加。虽然孔径和孔密度的变动对水泥环的剪切应力的影响相对较小, 但这些结论为实际操作提供有价值的理论参考, 有利于提升压裂设计的质量和增强井筒的安全性能。结论和建议部分总结了研究的主要发现, 并提出了未来研究方向。

关键词

压裂, 水泥环, 力学特性

Research on Mechanical Characteristics of Cement Ring under Fracturing Conditions of Shale Gas

Wenpeng Zhang*, Xuan Liu, Pengfei Li

School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Apr. 24th, 2024; accepted: Jun. 17th, 2024; published: Jun. 27th, 2024

*第一作者。

文章引用: 张稳鹏, 刘焯, 李鹏飞. 页岩气水平井压裂工况下水泥环力学特性的研究[J]. 石油天然气学报, 2024, 46(2): 179-193. DOI: 10.12677/jogt.2024.462023

Abstract

The main purpose of this article is to explore the physical properties of cement sheath during the fracturing process of shale gas horizontal wells. We utilize finite element modeling technology to precisely divide sub-cells and set constraint conditions, aiming to gain a deep understanding of how factors such as perforation diameter, density, direction angle, and phase angle affect the pressure state of the cement sheath. Additionally, we investigate the changes in temperature and pressure within the cement sheath of perforated sections during staged fracturing. Furthermore, we examine the patterns of influence on the sealing effect of the cement sheath caused by changes in the internal pressure of the casing, aperture, and hole density. Our experiments indicate that adjustments to perforation parameters have a significant impact on the pressure distribution of the cement sheath, further affecting the safety of the wellbore. When considering the instantaneous thermal and mechanical interactions, the failure probability at the orifice of the cement sheath increases. Although variations in aperture and hole density have a relatively minor influence on the shear stress of the cement sheath, these conclusions provide valuable theoretical references for practical operations, contributing to improving the quality of fracturing designs and enhancing the safety performance of wellbores. The conclusion and recommendations section summarizes the key findings of the study and proposes directions for future research.

Keywords

Fracturing, Cement Ring, Mechanical Characteristic

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在页岩气水平井压裂工况下，对水泥环的力学性质的研究具有关键意义。此项研究不仅仅关系着钻探过程中安全操作的问题，而且也决定了后续石油和天然气的长效稳定的产出情况。如果水泥环的完好度被打破，可能导致诸如环空压力等问题，这对石油和天然气的安全开发构成了极大的风险。1992年，R. E. Zinkham 等人就对井筒套管、水泥环和围岩组合体的力学模型进行了研究，并指出在其他条件不变的情况下，增大水泥环的弹性模量是一种保护套管完整性的有效方式。2017年，席岩等人基于页岩气水平井压裂工程实际，研究了瞬态温度 - 压力耦合作用对水泥环应力的影响。2022年，黄熠等人使用数值模拟方法针对套管居中及偏心条件下的压裂井水泥环进行了应力测试，得出套管偏心容易导致水泥环窄边应力集中，在同等水泥石强度条件下，套管偏心工况下水泥环完整性更容易失效，且套管偏心度越大，水泥环完整性失效风险更高。为了深入了解水泥环的力学特性，我们首先要建立页岩气水平井压裂力学模型。此模型基于井筒受到的外载，能更准确地模拟实际情况[1]。然后，针对水泥环(即“cement ring”)的相关属性如深度、弹性和 Poisson ratio 等方面进行了详细的研究与讨论，通过深层次探索后发现合适的条件为选用较厚的且具有较低刚度的并且泊松比大一些的水泥圈来改善自身的压力环境状态是最佳的选择[2]。然后使用 ANSYS 的 FEA (Finite Element Analysis) 工具进一步探究钻进操作中的各种影响要素对于“cement ring”内部压力情况的作用效果。最终的结果表明，应该尽量使打穿孔子的直径及密度稍有缩减，以便于保持“cement ring”结构上的稳定性能；另外需要特别注意的是要小心挑选适合的位置去实施击发动作，以免造成“cement ring”内的局部过大负荷的情况出现。通过这些研究，我们可以更深入

地理解水泥环的力学行为, 水泥环力学特性的研究对于提升工程结构的安全性、指导施工工艺的改进以及推动相关学科的发展具有重要意义。同时, 通过深入研究水泥环的力学特性, 还可以预测其服役性能、优化材料配方以及评估工程结构的安全性, 为现代工程建设提供有力的理论支持和实践指导。在未来的研究中, 应进一步加强对水泥环力学特性的理论和实验研究, 深入探索其受力变形规律及其影响因素, 为工程实践提供更加精准和有效的指导。同时, 随着新材料、新工艺的不断涌现, 也应关注水泥环力学特性研究的创新和发展, 以适应现代工程建设的需要, 为油气井的安全开采提供有力保障[3] [4]。

2. 模型建立

2.1. 有限元模型

基于力学中的叠加原理, 建立了一个考虑了温度应力的页岩气水平井压裂力学模型。之前已经导出了一个不涉及温度应力的组合体压裂力学模型理论公式。为了建立起考虑温度应力的模型, 将温度应力与之前的模型进行叠加, 从而建立起一个更加全面和实用的页岩气水平井压裂力学模型。

在构建这个模型时, 首先考虑了力学的叠加原理, 即在复杂应力状态下, 各个应力分量会相互叠加, 从而产生一个新的应力状态。在这个基础上, 引入了温度应力, 并将其与之前的组合体压裂力学模型进行叠加, 与此同时, 综合考虑影响水泥环力学的各种因素, 其中包括水泥环弹性模量、泊松比、以及各项射孔参数, 从而建立起一个全新的力学模型[5]-[9]。

这个模型对于页岩气水平井的压裂作业具有重要意义。在实际操作中, 温度应力是一个不可忽视的因素, 它会对页岩气的产量和压裂效果产生重要影响。因此, 通过建立考虑温度应力的压裂力学模型, 可以更加准确地预测页岩气的产量和压裂效果, 从而为实际操作提供更加可靠的指导。

在水泥环内侧, 即第一胶结面 $r = a$ 处, 水泥环的应力状况:

$$\sigma_r(a, \theta) = s_1 + s_2 \cdot \cos 2\theta + \sigma_r^T \quad (1)$$

$$\sigma_\theta(a, \theta) = (n_1 + n_2 + 2n_3) \cdot \cos 2\theta + \sigma_\theta^T \quad (2)$$

$$\sigma_z(a, \theta) = \mu(\sigma_r + \sigma_\theta) + \sigma_z^T \quad (3)$$

$$\tau_{r\theta}(a, \theta) = -s_3 \cdot \sin 2\theta \quad (4)$$

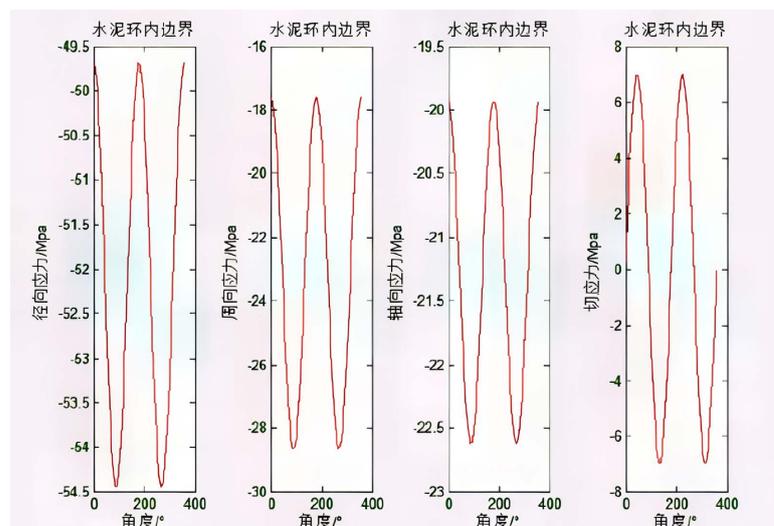


Figure 1. Wall stress of cement ring considering temperature stress

图 1. 考虑温度应力的水泥环内壁应力状况

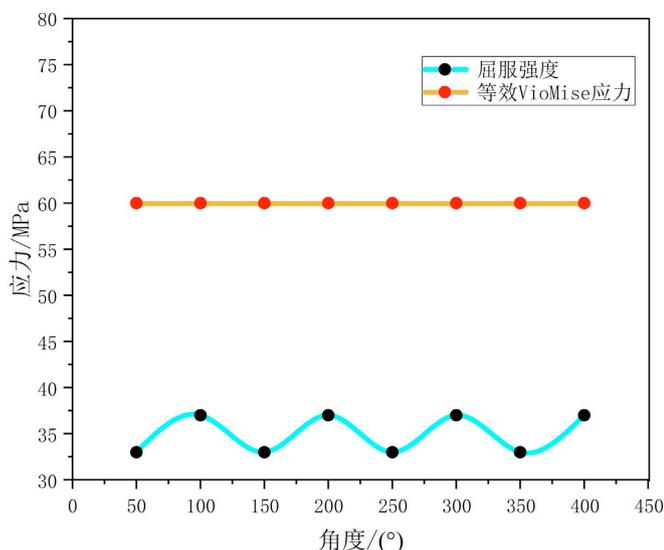


Figure 2. Equivalent Von Mises stress of cement ring inner wall considering temperature stress

图 2. 考虑温度应力的水泥环内壁等效 Von Mises 应力

然后利用 MATLAB 软件进行数值模拟, 得到不同条件下, 通过整理得到水平段趾头位置(含温度应力)复合体系首次胶结面的应力分布。在图 1 中可以看到。

通过对试验数据的分析, 发现在计入温度效应的情况下, 混凝土环内壁的径向、周向及周向的压力都会随之增加。在此基础上, 还可求出混凝土环内壁等效的 Von Mises 应力。在图 2 中可以看到。

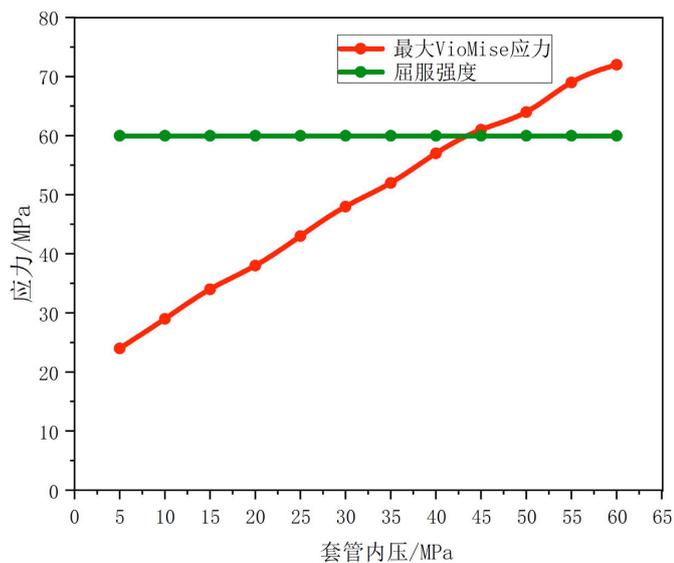


Figure 3. Von Mises maximum effect force in the inner wall of the cement ring affected by temperature

图 3. 考虑温度影响的水泥环内壁最大 Von Mises 等效应力

根据计算结果, 当考虑温度应力时, 水泥环内壁处等效 Von Mises 应力最大值 $\sigma'_{V,\max} = 35.6777\text{MPa}$, 位于 $\theta = 60^\circ, 120^\circ, 240^\circ, 300^\circ$; 水泥环内壁处等效 Von Mises 应力最小值 $\sigma'_{V,\min} = 33.1103\text{MPa}$, 位于 $\theta = 0^\circ, 180^\circ$; 对于水泥环内壁处的 Von Mises 等效应力, 相比较未考虑温度因素的情况, 水泥环内部表面

的等效 Von Mises 压力在考虑了温度因素之后,其最大的等效 von Mises 压力与最小的等效 Von Mises 压力相比,增幅分别为 4.80%和 6.94%。然而,即使如此水泥环内部表面的最大等效 Von Mises 压力依然低于水泥环的抗压能力,这表明此区域内的水泥环仍保持着良好的结构稳定性[10]-[13]。

通过上述研究,可以得到:在水力压裂条件下,随着温度场的增加,水平井段趾端水泥环内壁的径向、周向和轴向应力都会增加,水泥环内壁的当量 VonMise 应力也会增加,但增幅不超过 10%。此外,水泥环内壁的等效 Von Mises 应力也随着时间的推移而改变,从而改变了混凝土环内壁的应力强度。虽然上述数值模拟结果表明,在压裂条件下,虽然其对井壁等效 Von Mises 应力增幅小于 10%,但在工程实践中,其对井壁完整性的作用不容忽视。

由于温度应力的存在,在对水平井进行压裂作业时,其最大临界压裂压力也会相应的降低,如图 3 所示。

由上述数值分析可知,在 100 MPa 的套管压力下,水泥环的内壁达到了屈服的临界值,而 100 MPa 以上的水泥环内壁的最大 Von Mises 等效压力大于水泥环的屈服,导致水泥环破裂,从而导致井壁的整体稳定性下降。在计及热应力情况下,压裂过程中的临界压力较无热应力时降低 2.9%。

2.2. 网格划分

利用 ANSYS 软件构建了一个 1 米长的立体模型,并以该模型为基础,以套管、水泥环等不同部位的几何尺寸及射孔参数为依据,构建了一个完整的、具有一定厚度的、水平井射孔孔眼的三维数学模型(图 4)。

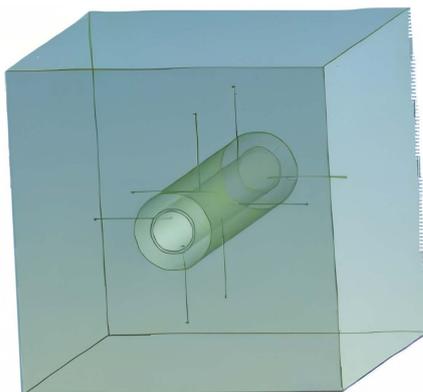


Figure 4. 3D model of horizontal well section
图 4. 水平井射孔段三维模型

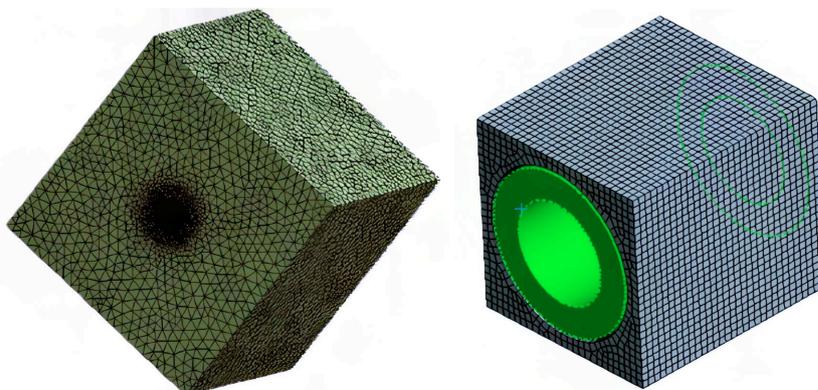


Figure 5. Grid division of casing, cement ring and formation assembly
图 5. 套管、水泥环和地层组合体网格划分

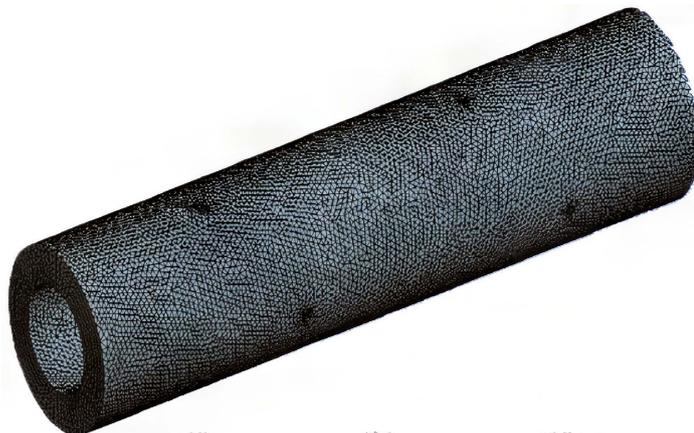


Figure 6. Grid division of cement ring
图 6. 水泥环网格划分

通过对模型的细致网格划分，得以在图 5 和图 6 中直观地展示出不同应力状态下的井筒及周围地层的应力分布情况。这一步骤对于理解和预测压裂效果至关重要，它能够更精确地模拟实际操作中的复杂情况，从而为页岩气的有效开发提供了坚实的理论基础。

2.3. 边界条件

为了更好地模拟页岩气水平井的压裂过程，构建了一个精细的三维力学模型。在这个模型中，分别在左右面和上下面的最大水平主应力以及上覆岩层压力施加了影响。在套管内壁处，添加了套管内压载荷，以模拟实际操作中的压力情况。

为了保证模型中各部分之间的相互作用，在套管、水泥环和地层之间设置了绑定接触。这种接触方式使得接触面在法向和切向都不允许分离，从而更好地模拟了实际操作中的情况。同时，在井段的前后面添加了法向约束，使其不能发生周向位移，以模拟平面应变的情况。

在设置边界条件时，参考了图 7 的显示，以保证模型的准确性和可靠性。通过这种精细的建模方式，能够更加准确地预测页岩气的产量和压裂效果，从而为实际操作提供更加可靠的指导。



Figure 7. The boundary conditions
图 7. 边界条件

3. 研究过程

在完成上述精细建模和边界条件设置后,利用 ANSYS 软件对该模型进行了模拟,以预测在特定条件下水泥环射孔段的应力分布情况。通过软件的运算和处理,成功获得了应力云图,并将其展示在图 8 中。

在模拟过程中,采用了精细的建模方式和严谨的边界条件设置,以确保模拟结果的准确性和可靠性。这种精细的建模方式不仅有助于更好地理解页岩气水平井的压裂机制,还为实际操作提供了更加可靠的指导。

通过模拟结果的应力云图,可以清晰地看到在特定条件下水泥环射孔段的应力分布情况。这一结果为的后续研究和实际操作提供了重要的参考依据,使能够更加准确地预测页岩气的产量和压裂效果。

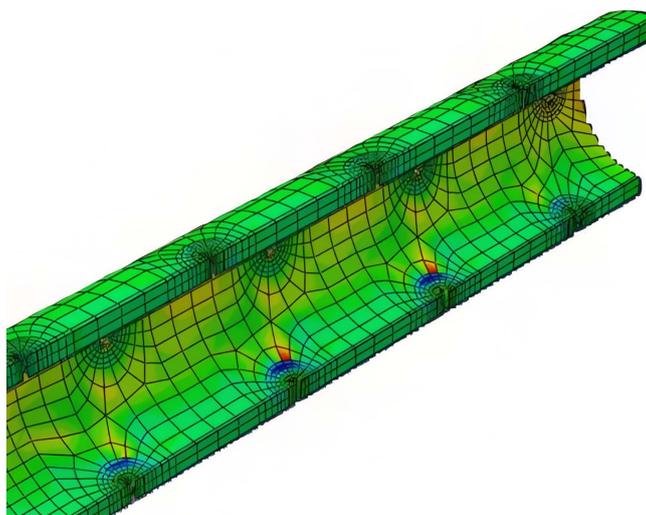


Figure 8. ANSYS simulation results of cement ring perforation section
图 8. 水泥环射孔段 ANSYS 模拟结果

在审视模拟数据的洞察中,揭示了射孔参数如何显著影响水泥环的应力状态。在保持其他压裂条件恒定的前提下,那么在使用 8 mm 大小的射孔孔径和每米 10 个射孔孔位的设置下,并把射孔角度设为 90° ,则会发现水泥环内部的最高等效压力达到了 59.896 MPa,这个值正好落在射孔孔口附近的位置上。然而,当我们没有执行射孔操作而在相同的压裂环境中观察,我们会发现在水泥环表面上的最大等效压力只有 37.578 MPa。这一数据表明,射孔作业导致水泥环内壁处的最大 Von Mises 应力增加了 59.4%,从而在射孔孔眼处引发了明显的应力集中现象。虽然这样,我们需要强调的是,即使是在完成钻井操作之后,位于水泥环内部边缘孔洞处最大的 Von Mises 应力和压力仍然没有超过水泥环的抗压能力。水泥环的失效系数 η 达到 0.998,意味着其尚未达到屈服点,即并没有发生塑性变形,因此水泥环依然是完整的,并未表现出任何屈服迹象。这一发现强调了水泥环在压裂过程中的坚韧性[14]。

ANSYS 模拟结果所揭示的另一个关键点是,射孔作业对水泥环的影响是显著的。这不仅指出了射孔参数对于水泥环应力状态的重要性,也提示在实际操作中需要对射孔作业进行细致的规划和管理,以确保水泥环的功能性和井筒的稳定性。通过对射孔孔径、孔密和相位角等关键参数的优化,有望减轻水泥环的应力集中,从而延长井筒的寿命并提高压裂效率[15]。

3.1. 射孔孔径对水泥环应力影响

经过射孔操作后,水泥环主体表面会出现许多孔眼,通常情况下,这些孔洞周边区域容易出现应力集中的情况。因此,我们需要进一步探讨孔洞直径对于水泥环完好程度的影响,同时维持孔密度及相位

角度的不变。在这个前提下，设置射孔孔密为每米 10 孔，并把射孔相位角定为 90 度，然后让孔洞的直径范围从 6 mm 到 5 mm 不等。与此同时，我们在保证套管、水泥环和地层承受的外部压力恒定的情形下，设置了与前面一样的边界条件，进而得到了不同孔眼孔径下的水泥环内部最大 Von Mises 等效应力的数据，详细信息见于表 1 中。

Table 1. Change of the maximum equal effect force of cement ring with aperture
表 1. 水泥环最大等效应力随孔径的变化

孔径/mm	相位角/(°)	孔密/(孔/m)	最大等效应力/MPa	水泥环失效系数
6	90	10	58.205	0.97
8	90	10	59.896	0.99
10	90	10	62.972	1.05
12	90	10	62.973	1.05
14	90	10	63.628	1.06
16	90	10	63.017	1.05
18	90	10	64.264	1.07
20	90	10	63.291	1.05
25	90	10	63.561	1.06
30	90	10	64.316	1.07
35	90	10	65.734	1.10
40	90	10	69.461	1.16
45	90	10	72.850	1.21
50	90	10	75.166	1.25

根据图 9 中的数据计算可知，在射孔相位角和孔密不变的情况下，随着射孔孔径的增加，水泥环内壁的最大 Von Mises 等效应力也在增加，同时水泥环的某些区域可能已经屈服(失效系数 $\eta > 1$)。当射孔孔径从 6 mm 增加到 30 mm 时，水泥环内壁的最大 Von Mises 等效应力增加了 10.5%。而当孔径进一步从 30 mm 增加到 50 mm 时，最大应力值增加了 16.9%。因此，可以观察到，随着孔径的扩大，水泥环内壁处的等效应力也在增加，并且应力增加的速度随着孔径的增加而加快，应力集中现象愈加显著。因此，射孔孔径的改变对水泥环的应力状态有着显著的影响[16]。

这一发现突显了在压裂设计中射孔参数的重要性，尤其是孔径的选择。合理的孔径选择不仅能够提高压裂效果，还能确保水泥环的完整性，从而维护井筒的稳定性和长期的安全运行。未来的研究和实践应当侧重于优化射孔参数，以实现最佳的压裂效果和最小的对水泥环的影响。

选择合适的射孔孔径是一个复杂的过程，需要在保持水泥环稳定性和降低压力集中的前提下，兼顾到提高压裂操作的效果和避免在石油天然气的开采晚期产生负面效应。所以，确定最佳的射孔孔径大小是关键，我们需仔细权衡各种因素以达到既保证了水泥环的安全又不过分限制压裂效果及产量的目标。

理想情况下，射孔孔径应略小于最优值，以保障水泥环的结构完整性，同时也要考虑到射孔作业的顺利进行以及油气田长期的开采效率。这样的策略不仅能够确保井筒的稳定，还有助于提高压裂的成功率和油气田的经济效益。因此，射孔孔径的选择是一个需要综合考虑多方面因素的决策过程，它涉及到工程安全、作业效率和经济回报之间的精心平衡。

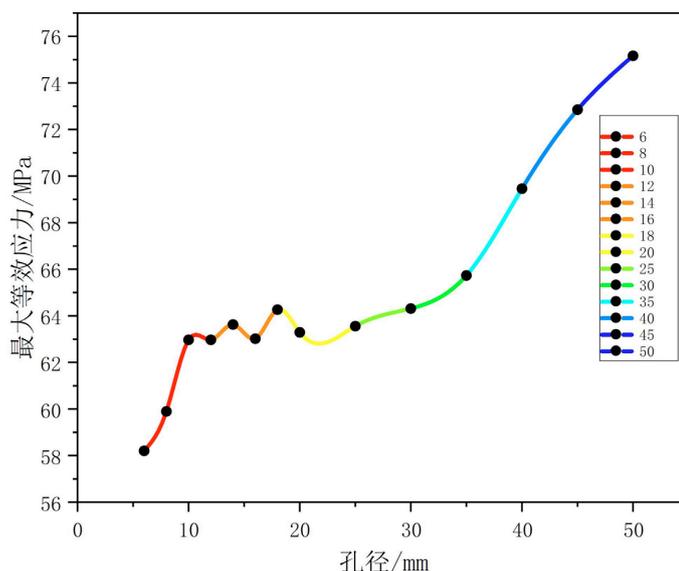


Figure 9. Change of maximum Von Mises of cement ring with aperture
图 9. 水泥环最大 Von Mises 等效应力随孔径的变化

3.2. 射孔孔密对水泥环应力影响

当我们深度研究射孔密度对水泥环应力状况的影响时，采用了与分析射孔直径影响类似的研究方法，也就是保持射孔直径和射孔相位角不变。本研究中，假定射孔孔径为 8 毫米，射孔相位角设定为 90 度，而射孔孔密则分布在 8 至 40 孔/米之间。在确保套管、水泥环和地层所受外载保持恒定的同时，维持了前述的边界条件设置。以下是不同射孔孔密条件下水泥环内壁的最大 Von Mises 等效应力结果，详见表 2。

Table 2. Change of the maximum equal effect force of cement ring with hole density
表 2. 水泥环最大等效应力随孔密的变化

孔密/(孔/m)	孔径/mm	相位角/(°)	最大应力/MPa	水泥环失效系数 η
10	8	90	59.896	0.99
16	8	90	60.819	1.01
20	8	90	61.153	1.02
25	8	90	61.358	1.03
40	8	90	61.993	1.04

图 10 展示了在压裂条件下，水泥环的最高 Von Mises 应力是如何随著射孔孔密度的变动而变动的。此图显示，在固定射孔角度与孔径的前提下，射孔密度提升会使水泥环内部的最大 Von Mises 应力增大。更进一步的是，这种升高现象会在某个点之后明显起来，一些水泥环的部分区域已经处于屈服的狀態，也就是其失效因子大于一。详细来说，当射孔孔密从 10 孔/米增加至 40 孔/米时，水泥环内的最高 Von Mises 应力只增加了 3.5%。

这一结果提示，射孔孔密对水泥环应力状况的影响虽然存在，但其效应并不如射孔孔径那样显著。换句话说，射孔孔密的变化对水泥环应力分布的调整作用相对较小。这一发现对于优化射孔设计具有重要的实际意义，它表明在射孔参数的选择上，应当更加关注射孔孔径的大小，而射孔孔密的调整可以在保证水泥环完整性的同时，对压裂效果的影响相对较小[17]。

在液压裂解操作中，射孔孔径和孔密是两个关键参数，它们共同决定了水泥环的应力状态和压裂效果。通过对这两个参数的精心选择和优化，可以实现对水泥环应力分布的精确调控，从而提高压裂作业的成功率，并确保井筒的长期稳定性。因此，尽管射孔孔密的变化对水泥环应力状况的影响相对较小，但它仍然是射孔参数设计中不可忽视的一个重要方面。

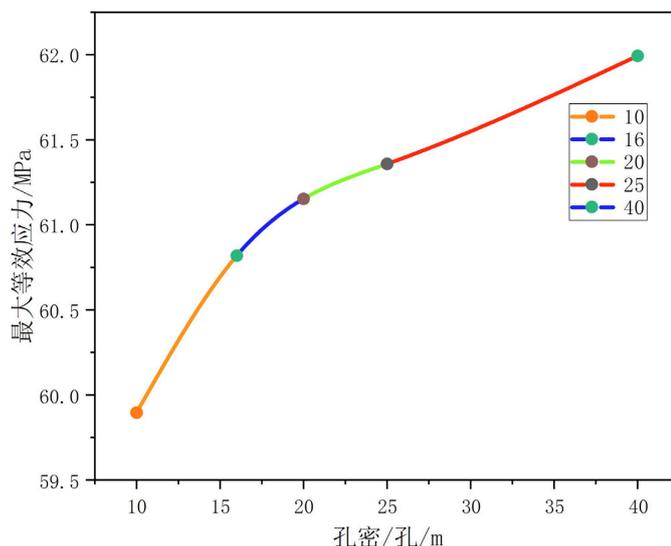


Figure 10. Change of maximum Von Mises of cement ring with hole density

图 10. 水泥环最大 Von Mises 等效应力随孔密的变化

3.3. 射孔方位角对水泥环应力影响

为了深入探究射孔工程中相位角对水泥环完整性的影响，本研究维持射孔孔径和射孔孔密不变，采用模拟方法分析了不同相位角下的水泥环应力状态。目的是为了揭示相位角如何作用于水泥环内壁的最大 Von Mises 等效应力，并确立其影响规律。然而，由于考虑到地层非均匀应力的影响，水泥环圆周上的 Von Mises 等效应力呈现不均匀分布，即在不同方位上存在差异。这种固有的应力不均匀性使得难以准确区分相位角变化引起的等效应力变化与方位差异所导致的应力差异。因此，传统的分析手段在此情境下并不适用，无法直接得出相位角对水泥环完整性的确切影响规律。

虽然这样，我们仍可通过分析射孔方位角对水泥环应力状况的影响，从而推断出其作用方式。在这个过程中，尤其要观察的是射孔方位与混凝土环内部边缘处的最小和最大的 Von Mises 等效力的相对位置。水泥环内壁的最大和最小的 Von Mises 等效力通常会集中在一个对称的位置上。因此，设定了如下射孔参数：孔径为 8 mm，射孔孔密为 10 孔/米，射孔相位角为 180，之所以选定这个角度，是因为它能保证所有射孔孔眼都在最小和最大等效力区域中。经过模拟后，得到的数据如图 11 和图 12 显示出来，这为我们提供了一种了水泥环应力状况变化的有价值的信息。

通过这一系列精细的实验设计和数据分析，不仅揭示了射孔参数对水泥环应力状态的细微影响，而且还展示了如何在复杂的非均匀应力场中理解和优化射孔设计。尽管无法直接得出相位角对水泥环完整性的影响规律，但通过对射孔方位角的深入分析，仍然能够获得有关水泥环应力分布的重要信息。这些发现对于提高射孔设计的精确性和优化油气田的开发策略具有重要意义。

在审视了上述模拟数据的深入分析之后，发现了射孔孔眼与水泥环内壁处 Von Mises 等效应力的方位关系对水泥环完整性有着显著的影响。当射孔孔眼恰好与水泥环内壁的最小 Von Mises 等效应力方位

相吻合时,观察到水泥环内壁的最大等效应力上升至 40.841 MPa,相较于无射孔状态,增幅达到了 43.7%。尽管这一增长幅度显著,但值得注意的是,该应力水平仍未能触及水泥环的屈服强度。在此情况下,水泥环的失效系数 η 为 0.68,表明水泥环尚未进入屈服状态,其完整性得以保持,显示出良好的性能。



Figure 11. Cross section of the perforated hole
图 11. 射孔孔眼截面图

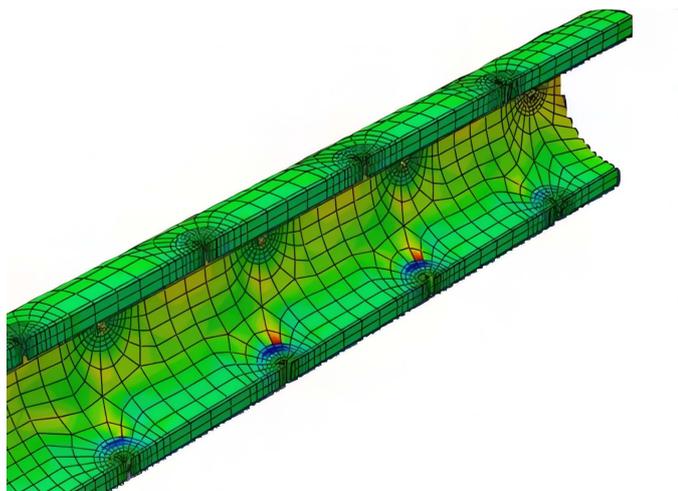


Figure 12. The perforation hole is located at the maximum equal effect force
图 12. 射孔孔眼位于最大等效应力处

反之,当射孔孔眼与水泥环内壁的最大 Von Mises 等效应力方位一致时,情况便有了显著的不同。此时,水泥环内壁的最大等效应力飙升至 61.649 MPa,相较于无射孔状态,增长幅度高达 64.1%。更为严峻的是,这一应力水平已超过了水泥环的屈服强度。因此,水泥环的失效系数 η 达到了 1.03,说明水泥环在此处已出现部分屈服现象,其完整性受到了一定的威胁[18]。

这两组对比鲜明的结果为提供了深刻的启示:射孔孔眼与水泥环内壁的 Von Mises 等效应力方位的

精准控制对于维护水泥环的完整性至关重要。相位角的选择和射孔方位的安排在这一过程中扮演着举足轻重的角色，它们不仅影响着水泥环的应力分布，更在很大程度上决定了水泥环在高压环境下的稳定性。因此，在进行射孔设计时，需要更加细致地考虑这些因素，以确保水泥环能够在极端条件下保持其结构完整性和功能稳定性。

3.4. 射孔相位角对水泥环应力影响

在深入剖析了射孔方位角如何作用于水泥环的完整性之后，明显地意识到射孔方位对水泥环内壁的最大 Von Mises 等效应力具有显著的影响。为了更加精确地探讨射孔相位角对于水泥环完整性的影响，本研究在分析相位角时，特别确保射孔孔眼位于水泥环内壁的最大 Von Mises 等效应力方位。通过这种方式，能够细致分析该关键位置的应力变化情况，从而揭示出相位角如何真正影响水泥环的完整性。模拟结果如表 3 所示，为提供了关于相位角影响规律的宝贵数据。

Table 3. Change of maximum stress of cement ring with phase angle

表 3. 水泥环最大应力随相位角的变化

相位角/ $^{\circ}$	孔径/mm	孔密/(孔/m)	最大等效应力/MPa	水泥环失效系数 η
30	8	10	61.509	1.03
60	8	10	60.49	1.01
90	8	10	60.09	1.00
120	8	10	70.497	1.17
180	8	10	61.649	1.03

图 13 揭示了射孔相位角如何影响水泥环的最大 Von Mises 等效应力。在保持射孔孔径和射孔孔密不变的条件下，我们发现水泥环圆柱体最大的 Von Mises 应力和其对应的相位角之间有联系；虽然这个关系并未表现得特别明显规律性。总的说来，角度增大后，等效应力逐渐减小、接着回升并再度减少的过程。研究表明，对于水泥环完整性而言，相位角在 60° 至 90° 之间可能最为有利。

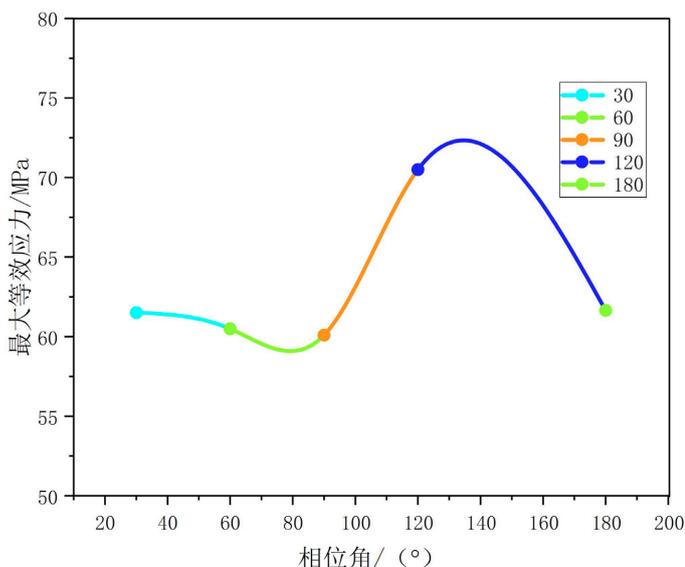


Figure 13. Change of maximum stress of cement ring with phase angle of perforation

图 13. 水泥环最大应力随射孔相位角的变化

需要注意的是, 为方便研究, 我们在选择钻孔时选择了和水泥环内部表面最大等效应力的方向相同的地方来做分析, 这样可以让我们更好地理解相位角变化对于水泥环完整性的影响模式。不过, 在实际的射孔过程中, 应该尽量避开那些和最大等效应力处于同一轴向的位置。从表格的数据来看, 所有的水泥环的失效系数 η 都超过了 1, 这就意味着当压力达到最高点时, 水泥环已经进入了屈服状态。

研究成果表明, 当实施非均匀地应力下水平井的射孔段压裂工程时, 射孔位置的影响不容忽视。为实现最高程度的水泥环完好无损, 我们必须保证射孔孔口和水泥环内部边缘处的最低 Von Mises 等效应力的方向一致。这样可以使水泥环的失效系数最小, 尚未处于受迫状态, 因而其保持完整性能最好。因为射孔角度直接决定着每一个孔洞的位置, 所以它的作用对于维持水泥环的稳固性是关键因素。实践操作过程中, 需要依据实际情况来判断并选择合适的射孔角度, 以此保障水泥环的稳定性。

4. 现场应用与安全评价

4.1. 现场应用

在现场应用方面, 页岩气水平井压裂技术已经取得了显著的成果。在页岩气水平井大规模体积压裂过程中, 套管 - 水泥环组合系统在外部载荷作用下产生破坏而引发的井筒完整性问题, 已经得到了有效的控制。利用弹性力学和复变函数计算方式构建了这个复合结构体系的力量属性研究框架; 并借助我们自己开发的研究设备来评估实际大小的“生产套管 - 水泥环 - 技术套管”, 组合体在强交变热载荷作用下的密封完整性和力学完整性进行测试及评价, 为现场应用提供了有力的技术支持。

另外, 对于由于固井水泥环密封失败而引发的环内空气泄漏的问题, 根据参考资料, 提出了一种解决方案: 在套管外围增加一圈橡胶套筒。该方法通过运用橡胶材质的弹性和抗压力能力来研究和评估在非均质应力环境中固井水泥环所承受的压力情况, 从而有效提升了其密闭效果。

4.2. 安全评价

对于页岩气水平井压裂作业中水泥环的力学特性研究来说, 其在安全评估领域的重要性是不言而喻的。当大量使用水力压裂技术来开发页岩气时, 由于井内温度和压力的变化与持久变动, 加上循环过程中的装卸操作可能导致的水泥环稳定性问题, 这都可能会影响井壁的安全性和完整性。所以, 通过深度探讨水泥环的力学属性, 可以揭开强交变热载荷下水泥环完整性失效机理, 进而防止在页岩气水平井大面积压裂工程中出现水泥环防护措施失败的情况。对于评价页岩水平井压裂效果具有重要意义。通过研究各种裂缝类型对应的复杂性指数, 我们能够改善压裂施工参数和现场控制技术, 从而提升裂缝复杂性指数, 这样就可以增加出现复杂裂缝的几率, 进一步提升页岩气开采的效果[19]。

页岩气水平井压裂工况下水泥环力学特性的研究, 无论在现场应用还是安全评价方面都具有重要的实际意义。通过对水泥环力学特性的深入研究和优化, 可以有效提高页岩气水平井压裂效果, 保障井筒的完整性, 为我国页岩气资源的开发提供有力的技术支持。

5. 结论

本文通过理论分析和模拟研究, 探讨了射孔方位、射孔相位角对水泥环应力状况的影响, 以及现场应用和安全评价方面的问题。研究发现, 射孔方位对水泥环最大等效应力影响较大, 射孔孔眼与水泥环内壁处最小 Von Mises 等效应力方位重合时, 水泥环完整性最好。同时, 射孔相位角对水泥环完整性也有显著影响, 最佳相位角在 60° ~ 90° 之间。在现场应用方面, 页岩气水平井压裂技术已取得显著成果, 但水泥环完整性问题仍需关注。针对固井水泥环密封失效引起的环空气窜问题, 提出在套管外部安装一层橡胶套筒的方案, 以提高水泥环的密封性能。在安全评价方面, 研究水泥环力学特性对揭示强交变热载荷

下水泥环完整性失效机理具有重要意义[20]。

6. 建议

综上所述,为提高页岩气水平井压裂效果和保障井筒完整性,提出以下建议:

- 1) 优化射孔方案,确保射孔孔眼与水泥环内壁处最小 Von Mises 等效应力方位重合,降低水泥环应力集中程度。
- 2) 针对不同裂缝类型,研究裂缝复杂性指数范围,优化压裂施工参数,提高页岩气开采效果。
- 3) 现场应用中,注意监测水泥环应力状况,及时发现并处理可能出现的完整性问题。
- 4) 进一步研究橡胶套筒在提高水泥环密封性能方面的应用,为现场提供技术支持。
- 5) 深入研究水泥环力学特性,揭示强交变热载荷下水泥环完整性失效机理,为安全评价提供理论依据。

通过以上建议,有望为我国页岩气资源的开发提供有力的技术支持,促进页岩气水平井压裂技术的发展。

基金项目

重庆科技大学大学生科技创新项目(2023132)。

参考文献

- [1] 陈川. 地震载荷作用下盐穴型地下储气库安全稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2019.
- [2] 汪衍刚. 热采井套管-水泥环界面破坏机理研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2019.
- [3] 邓宽海. 套管非均匀挤毁及修复工作力学研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2018.
- [4] 熊浩. 气井自由套管力学行为与井口抬升相关性研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- [5] 张景富, 张德兵, 张强, 岳宏野, 王博, 杨金龙. 水泥环弹性参数对套管-水泥环-地层固体结构完整性的影响[J]. 石油钻采工艺, 2013(5): 39-46.
- [6] 吴烁, 房军, 王宴滨, 翁炜, 贺云超, 张德龙. 一种非均匀地应力下椭圆井眼套管-水泥环-地层力学特性半解析解[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(3): 997-1003.
- [7] 范明涛, 李军, 柳贡慧. 页岩地层体积压裂过程中水泥环完整性研究[J]. 石油机械, 2017, 45(8): 40-49.
- [8] 刘奎, 丁士东, 初永涛, 刘仍光. 页岩气井压裂交变载荷水泥环密封能力研究[J]. 石油机械, 2023, 51(11): 79-86.
- [9] 张智, 王嘉伟, 吴优, 霍宏博, 谢涛, 李金蔓. 页岩气水平井固井水泥环状态对套管力学完整性的影响[J]. 石油学报, 2022, 43(8): 1158-1172.
- [10] 王宴滨, 高德利, 房军. 页岩气水平井压裂过程水泥环力学特性评价研究[J]. 石油管材与仪器, 2020, 6(4): 51-55.
- [11] 王宴滨, 曾静, 高德利, 房军. 橡胶套筒对非均匀地应力下固井水泥环受力的影响分析[J]. 应用力学学报, 2020, 37(4): 1731-1736, 1872.
- [12] 胡佳雯. 油气井水泥环初始应力状态实验与数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2021.
- [13] 刘奎, 丁士东, 周仕明, 陶谦, 杨广国, 刘仍光, 高元. 套管内压周期变化水泥环应力计算与失效分析[J]. 石油机械, 2021, 49(5): 1-8.
- [14] 席岩, 王海涛, 李军, 王江涛, 吴宏明. 循环载荷对水泥环密封性影响试验与数值研究[J]. 石油机械, 2021, 49(2): 88-93.
- [15] 刘硕琼, 李德旗, 袁进平, 等. 页岩气井水泥环完整性研究[J]. 天然气工业, 2017, 37(7): 76-82.
- [16] 孙锐, 梁飞, 杨钊, 高丽, 王宇. 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(8): 148-156.
- [17] 林魂, 宋西翔, 孙新毅, 杨兵. 深层页岩气压裂井套管应力影响因素分析[J]. 石油机械, 2022, 50(6): 84-90.
- [18] 聂荣国, 蔡明杰, 毛良杰, 傅栋, 夏宏伟. 压裂工况对页岩气套管应力分布的影响[J]. 石油机械, 2019, 47(12): 139-146.

-
- [19] 高德利, 刘奎, 王宴滨, 刘金海, 李轩. 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.
- [20] 丁士东, 陆沛青, 郭印同, 李早元, 卢运虎, 周仕明. 复杂环境下水泥环全生命周期密封完整性研究进展与展望[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 104-113.