

超膨胀波纹骨架封隔器结构与密封特性研究

张政, 毕绍东, 郭岩宝*, 王德国

中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249

* 通信作者, gyb@cup.edu.cn

收稿日期: 2023-07-10; 修回日期: 2023-12-04

中国石油大学(北京) 科研基金资助(2462023SZBH008)

摘要 储气库是国家战略储备、应急调峰、保障能源安全的重要基础设施。但复杂的注采工艺和频繁的压力波动对安全生产构成严峻挑战。过油管封隔器作为过油管作业关键井下装备,具有高效、低风险及操作简便等优势,因而在不动管柱暂堵、验封领域表现出巨大应用潜力。然而,传统叠层钢片式结构的过油管封隔器无法满足储气库用过 4-1/2 油管密封 7 寸套管的超膨胀密封的现场需求,亟需解决过小内径油管封大内径套管的问题,同时兼顾胶筒密封性能和强度要求。本文创新性提出一种新型波纹骨架过油管封隔器设计方案,确定了波纹骨架、三胶筒结构及关键部件的尺寸参数及材料选型,通过建立封隔器坐封力学模型,阐明了坐封机理,明确了井下作业的有效坐封条件;选用三阶 Ogden 模型对聚氨酯胶筒进行超弹本构分析,并利用 ABAQUS 有限元仿真软件模拟了封隔器的超膨胀过程,结果表明可以在 30 s 内实现整体完全超膨胀,验证了超膨胀行为的可行性;在此基础上,进一步优化了超膨胀波纹骨架封隔器波纹骨架和密封胶筒几何尺寸参数,模拟结果表明:当波纹骨架的型面表达式为 $y=3\sin 1.5x$, 外胶筒外径为 84 mm 时,封隔器整体应力变化平缓,坐封性能良好,可有效减少应力集中,提升密封性能和坐封效果。该超膨胀波纹骨架封隔器可满足储气库复杂工况的承压需求,降低密封胶筒应力集中,延长工具使用寿命,为储气库用超膨胀过油管封隔器的设计提供了理论支持与设计参考。

关键词 超膨胀封隔器; 波纹骨架; 结构设计; 胶筒性能; 模拟仿真

中图分类号: TE931; TH122

Structural design and sealing characteristics of super-expansion corrugated framework packer

ZHANG Zheng, BI Shaodong, GUO Yanbao, WANG Deguo

College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Received: 2023-07-10; Revised: 2023-12-04

Abstract Gas storage reservoirs are crucial infrastructures for strategic reserves, emergency peak regulation, and safeguarding national energy security. However, the complex injection and production processes and frequent pressure fluctuations pose severe challenges to safe production. The through-tubing retrievable packer, as a key downhole equipment for through-tubing operations, has the advantages of high efficiency, low risk, and simple operation. It shows the great application potentialities in

引用格式: 张政, 毕绍东, 郭岩宝, 王德国. 超膨胀波纹骨架封隔器结构与密封特性研究. 石油科学通报, 2025, 10(01): 169-177

ZHANG Zheng, BI Shaodong, GUO Yanbao, WANG Deguo. Structural design and sealing characteristics of super-expansion corrugated framework packer. Petroleum Science Bulletin, 2025, 10(01): 169-177. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.02.002

the fields of temporary plugging and seal verification of immobile pipe strings. However, the through-tubing packer with the traditional laminated steel sheet structure cannot meet the on-site requirements for the super-expansion sealing of using 4-1/2 tubing to seal the 7-inch casing in gas storage reservoirs. It is urgent to solve the problem of sealing a large-diameter casing with a small-diameter tubing while taking into account the sealing performance and strength requirements of the rubber element. Here, this paper innovatively put forward a design scheme for a new corrugated-skeleton through-tubing retrievable packer. It determined the size parameters and material selection of the corrugated skeleton, three-rubber-element structure and other key components. By establishing the setting mechanical models of through-tubing packer, the setting mechanism was elucidated and the effective setting conditions for downhole operations were defined. The 3rd-order Ogden model was selected to conduct a hyperelastic constitutive analysis on the polyurethane rubber element, and the ABAQUS finite element simulation software was adopted to simulate the super-expansion process of the packer. The results indicated that the overall complete super expansion could be achieved within 30 seconds, verifying the feasibility of the super expansion behavior. On this basis, the geometric size parameters of the corrugated skeleton and sealing rubber element of the super-expansion corrugated-skeleton through-tubing retrievable packer were further optimized. The simulation results showed that when the profile expression of the corrugated skeleton is $y=3\sin 1.5x$ and the outer diameter of the outer rubber element is 84 mm, the overall stress change of the packer is smooth, the setting performance is good, and thus the stress concentration can be effectively reduced, and the sealing performance and setting effect can be improved. This super expansion corrugated-skeleton through-tubing retrievable packer can meet the pressure-bearing requirements of the complex working conditions of gas storage reservoirs, reduce the stress concentration of the sealing rubber element, extend the service life of the downhole tool, and provide theoretical support and design reference for the design of super expansion through-tubing retrievable packers in gas storage reservoirs.

Keywords over-expansion packer; corrugated skeleton; structure design; rubber cylinder properties; simulation

DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.02.002

0 引言

储气库具有强注强采、压力频繁波动等显著特点,这使其安全生产面临着严峻的挑战。据相关调研表明,因气藏密封失效和注采井密封失效所造成的储气库事故占比约达 75%,因此对井筒完整性展开系统诊断显得尤为必要。然而,由于国内储气库建设起步相对较晚,不动管柱暂堵与验封技术存在缺失,致使检测工作难以有效推进,这已成为储气库管理中迫切需要解决的关键问题^[1-2]。过油管封隔器作为一种广泛应用于油气资源勘探开发的井下工具,具备隔绝产层、保护套管等功能,能够适用于储气库的高套压工况^[3]。现有的过油管封隔器大多采用叠层钢片式结构,具备一定的耐高温与承压能力^[4],能够降低地层污染以及对地层的伤害。近年来,科研人员对过油管封隔器开展了相关研究工作,刘友等^[5]对国内外过油管封隔器进行了广泛深入的调研,明确指出现有技术中存在的不足之处,并为面向复杂工况的优化提供了思路。韩家隽^[6]应用有限元分析方法对胶筒进行了研究,探讨了叠层钢片结构参数对坐封性能的影响。马力^[7]通过对胶筒参数的调整,解决了坐封过程中的非线性问题。尽管现阶段围绕过油管封隔器的结构参数以及密封性能的研究已取得了一定基础成果,但针对储气库现场的工艺要求,仍需着力解决以下问题。(1)传统的叠

层钢片式结构无法解决过小尺寸油管密封大尺寸套管(即过 4-1/2 油管密封 7 寸套管)的超膨胀密封问题^[5]。(2)坐封过程中叠层钢片之间存在间隙,容易与胶筒界面形成台阶差,进而导致密封面无法紧密贴合,甚至可能损伤外胶筒,致使工具卡堵,引发因打捞作业而产生的井下二次污染^[6]。

为解决上述问题,本文创新性提出一种新型波纹骨架过油管封隔器结构,能够实现超膨胀坐封,并对封隔器的关键部件进行参数优选,可以有效解决密封不严,刺穿胶筒等问题,确保坐封工艺的顺利实施,进一步延长过油管封隔器的使用寿命。

1 整体方案设计与机理分析

新型波纹骨架过油管封隔器须同时满足高膨胀率和有效坐封的实际需求,故确定其主要结构参数如下:封隔器需适用于 7 寸套管,内径为 157.1 mm,其最大外径 84 mm。下放时,封隔器需通过 4-1/2 油管,设计的最小内径为 40 mm,总长为 680 mm。

封隔器整体结构如图 1(a)所示,主要包括上下护箍接头、内外胶筒、波纹钢骨架、固定环、压帽、中心管等。工具主体采用高强度、耐腐蚀不锈钢材料。波纹骨架选用弹簧钢,满足回弹性与延展性要求。内外胶筒均采用高拉伸、高弹性材料,形成内胶筒一波

纹骨架—外胶筒的三层密封结构^[8], 保证整体密封性能。外胶筒设计为三胶筒结构与波纹骨架表面硫化胶粘, 填充沟槽, 实现锚定和承压功能^[9-10]。表1为封隔器主要部件材料和几何尺寸参数。

在封隔器下入指定暂堵位置后, 内胶筒受压膨胀, 波纹骨架扩张变形后与胶筒紧密贴合, 增大与套管的接触面, 最终完成坐封。封隔器坐封受力示意图如图1(b)所示。

外胶筒在工作过程中, 主要承受由井内压强所引发的剪切力以及因波纹骨架膨胀而产生的作用力。鉴于此, 在进行外胶筒的设计时, 其承受的压力必须严格控制在额定承压能力范围之内, 以确保外胶筒在使用过程中不会出现损坏或断裂的情况。对于坐封状态, 封隔器所产生的锚定力实际上是外胶筒与套管之间的摩擦力以及波纹骨架与套管之间摩擦力的累加值。由此, 最终可以确定封隔器若要实现有效的坐封, 就必须满足以下条件:

$$\begin{cases} F_0 + F_1 + F_2 + F_3 \geq \Delta P \times S \\ F_3 = 2\pi RLI \\ F_{i=0,1,2} = 2\pi RL_{0,1,2} P \mu \end{cases}$$

其中, $S = \pi R^2 - \pi R_2^2 - n \times \int_0^\pi \sin x dx$ 。

式中, S 为坐封受力面积, mm^2 ; R 为套管内径, mm ; R_2 为波纹曲线基圆半径, mm ; ΔP 为上下压差, MPa ; I 为胶筒所受剪应力, MPa ; $F_{i=0,1,2}$ 为胶筒所受压力, kN ; F_3 为胶筒所受剪切力, kN ; P 为法向压强, MPa ; L 为胶筒总长, mm ; μ 为与套管壁之间的摩擦系数。

2 过油管封隔器数值模拟计算

2.1 本构模型分析

聚氨酯材料可承受大弹性变形, 且体积通常不可压缩, 选用超弹模型, 其应力—应变曲线呈现高度非线性^[11]。在ABAQUS软件中常用的超弹模型主要包括: Neo-Hookean、Mooney-Rivlin、Yeoh、Ogden

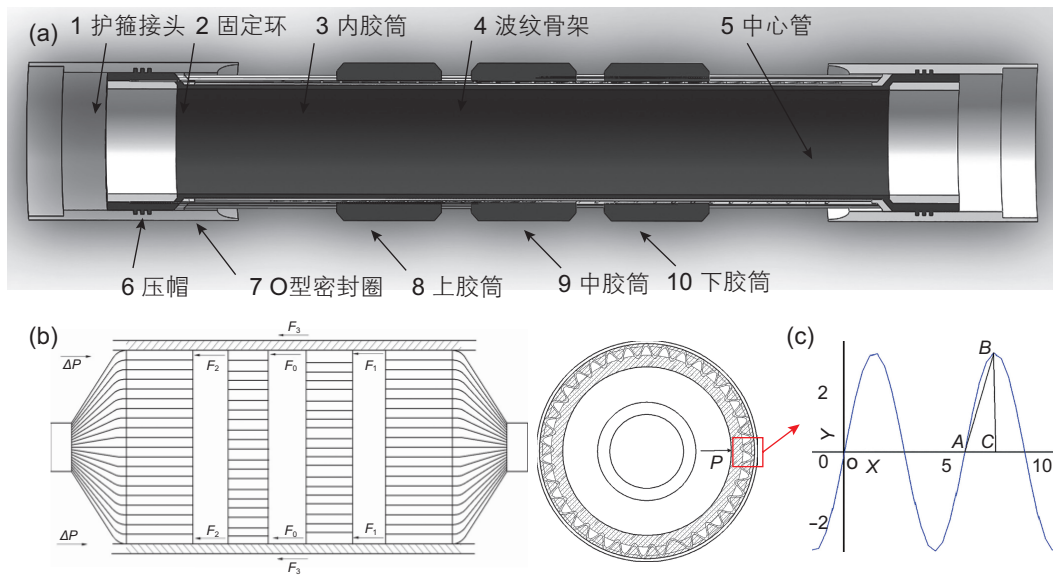


图1 过油管封隔器整体结构

Fig. 1 Overall structure of the through-tubing packer

表1 主要部件材料及尺寸参数

Table 1 Material and dimension parameters of main components

名称	材料	最大外径/mm	最小内径/mm	长度/mm
护箍接头	1Cr18Ni9	84	74	120
压帽	35CrMo	66	56	80
内胶筒	铸型聚氨酯	73	56	480
波纹骨架	65Mn	74	61	440
外胶筒	聚氨酯	84	74	60 × 3
中心管	35CrMo	56	40	560

等^[12]，如表 2 所示。

丁腈橡胶与氢化丁腈橡胶作为封隔器胶筒的常用材料，其变形率较小，无法实现大环空密封。因此为满足超膨胀技术要求，选用邵氏硬度为 75A 与 65A 的不可压缩型聚氨酯材料^[13]。应用微机控制电子万能试验机(CMT2502)对 65A 聚氨酯进行单轴拉伸实验测试，对实验数据进行仿真拟合，得到各模型拟合曲线如图 2 所示。

从图 2 中可看出，Neo-Hookean 模型与 Mooney-Rivlin 模型趋于线性变化，与实验数据差距较大，而 Yeoh 模型和 Ogden 模型在较大变形量下与实验数据拟合度较高，但 Yeoh 模型在应变较小时应力陡降，与实际曲线差别较大。因此选用三阶 Ogden 模型可更好吻合实验曲线，取相同条件分析 75A 聚氨酯材料，并提取超弹性系数如表 3 所示。

2.2 超膨胀过程有限元仿真

由于内胶筒—波纹骨架—外胶筒为非轴对称方式排列，因此需对封隔器模型进行简化处理。考虑到胶筒与波纹骨架粘连面之间不存在相对位移，可以通过 sur-sur Tie 方式实现。选用 3D 实体单元中的 C3D8R 单元，对波纹骨架网格采用局部加密处理，以提高计算精度，如图 3 所示。其中，波纹钢骨架网格数 471 464。常用的坐封打压范围是 10~40 MPa^[5-8]，故对波纹骨架内表面施加 20 MPa 内压^[14]。以外胶筒膨胀速度为指标，分别设置波纹骨架全局种子为 1.6、1.2、1.0、0.8，辅助使用质量缩放记录封隔器坐封完成所需时间。网格无关性分析结果如表 4 所示，最终确定波纹骨架全局种子数为 1，整体网格数量 59.8713 万，误差为 1.40%。

表 2 超弹本构模型介绍

Table 2 Introduction of the hyperelastic constitutive model

超弹性模型	弹性应变势能表达式	适用范围
Neo-Hookean	$W = \frac{\mu}{2}(I_1 - 3) + \frac{1}{D}(J - 1)^2$	一般近似预测 30%~40% 的单轴拉伸和部分纯剪切的橡胶力学性能。
Mooney-Rivlin	$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + \frac{1}{D}(J - 1)^2$	在橡胶应变 150% 范围内得到合理近似。
Yeoh	/	可描述范围较宽，但在处理复杂综合应变时会产生一定偏差。
Ogden	$U = \sum_{i=1}^N \frac{2u_i}{a_i} (\lambda_1^{a_i} + \lambda_2^{a_i} + \lambda_3^{a_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2i}$	可模拟橡胶在变形过程中刚度变化的应用场合，适用于较高的应变压缩条件。

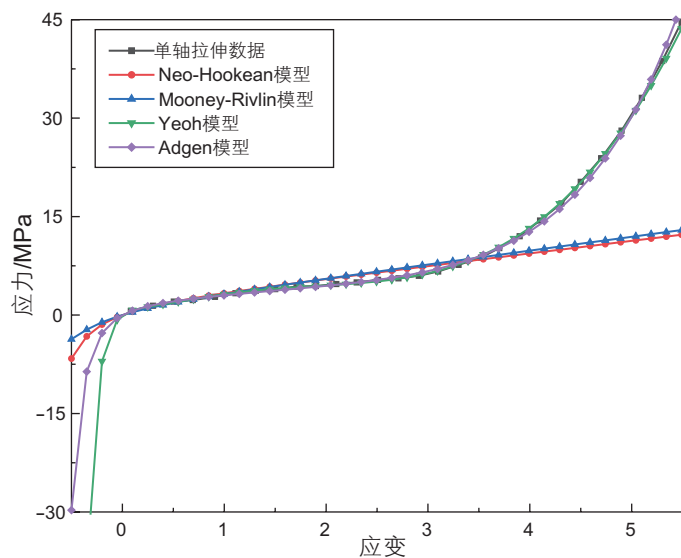


图 2 各本构模型与实验数据拟合曲线

Fig. 2 Fitting curves constitutive models with experimental data

当封隔器内部承受压力时, 波纹管受力膨胀, 进而逐步将外胶筒撑开。在这一膨胀进程中, 波纹管的单位受力面积持续增大, 使得工具整体的承压能力得到显著增强。从应变云图可以发现, 胶筒密封性能

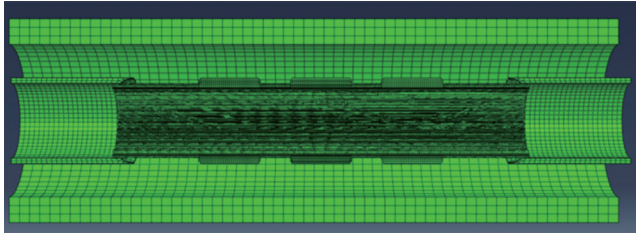


图3 封隔器模型网格划分

Fig. 3 Grid meshing of packer model

表3 Ogden模型三阶多项式超弹性模型系数计算结果

Table 3 Calculation results of Ogden model third-order polynomial hyperelastic model coefficients

硬度	D_1	D_2	D_3	λ_1	λ_2	λ_3	α_1	α_2	α_3
65A	0	0	0	0.81	3.62	1.90	1.39	7.94	-3.75
75A	0	0	0	-10.6	5.89	12.91	4.62	4.81	-7.90

表4 坐封完成时间随网格数的变化

Table 4 Changes of setting completion time with the number of grids

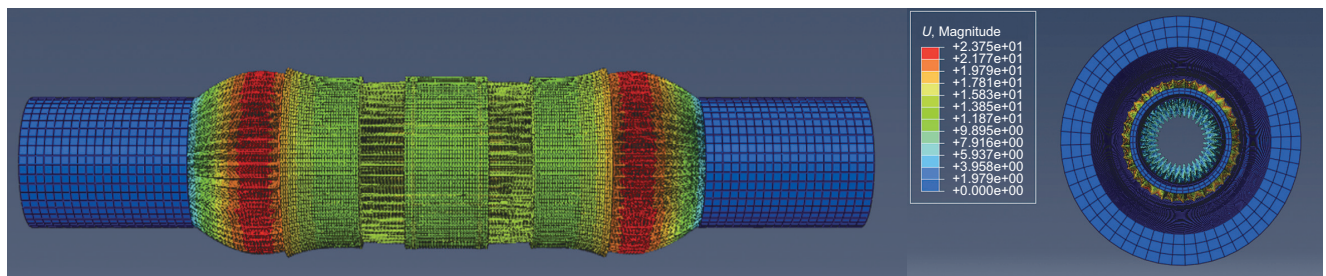
序号	总网格数/万	坐封完成时间/s	误差/%
1	30.7864	—	—
2	48.3289	27.6	3.49
3	59.8713	28.2	1.40
4	65.6588	28.6	—

表现出色, 有效规避了叠层钢片在膨胀过程中容易出现的阶梯差问题。与此同时, 该封隔器能够在更大环空内实现超膨胀坐封, 扩张性能良好, 如图4所示。根据模拟结果可知, 封隔器在经过13.8 s后开始出现明显的膨胀迹象, 直至28.4 s后, 封隔器在套管内部完全扩张膨胀到位, 达到预期的工作状态。

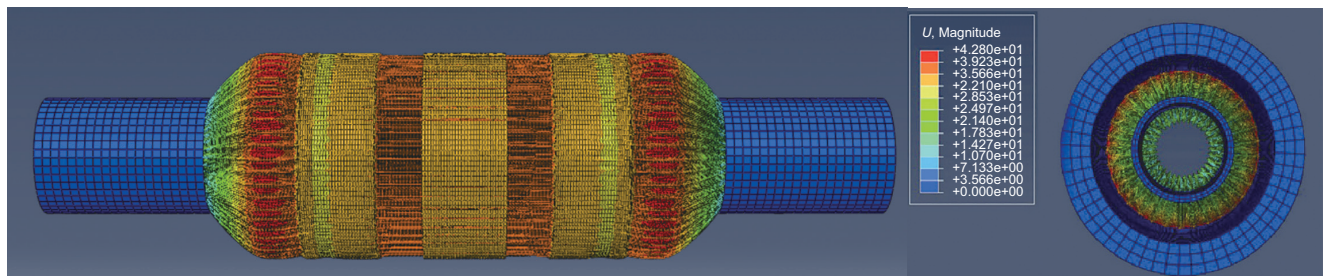
3 封隔器结构优选与性能分析

3.1 波纹管骨架结构参数优选

波纹管骨架的尺寸参数是保证封隔器良好密封性能的关键指标之一, 其对封隔器在井下坐封的安全性、稳定性以及使用寿命都有着重要的影响^[10]。根据



(a) 部分膨胀



(b) 完全膨胀

图4 封隔器扩张过程模拟结果

Fig. 4 Simulation results of packer expansion process

储气库注采井结构参数,取套管内径 $D_1=157.1$ mm,确定波纹骨架的中心圆半径 $R_2=34$ mm,采用正弦型面式的柔和曲面,其函数表达式为 $y=3\sin 1.5x$,如图1(c)所示。具体结构尺寸如下,波纹数 $n=51$ 个, $AC=\pi/2$ mm, $BC=3$ mm, $l_{AB}=\int_0^{\pi/2} \sin 1.5x ds$,波纹截面总长 $z=4 \times n \times AB$ 。计算得出 $z > \pi D_1$,因此该波纹骨架满足超膨胀要求。

为了明确波纹骨架中波纹高度和波纹宽度对封隔器密封性能的影响,对不同正弦型面的波纹结构进行补充分析。考虑到波纹数量过多时,一方面会因波纹密集,导致加工成型困难;另一方面在膨胀过程中波纹容易刺穿胶筒,导致密封失效。因此对 $y=4\sin x$ 与 $y=3\sin x$ 两种不同正弦型面进行相同工况下的套管所受应力仿真分析,以确定波纹骨架结构的最优参数。

从图5所示的结果可以看出,当型面为 $y=4\sin x$

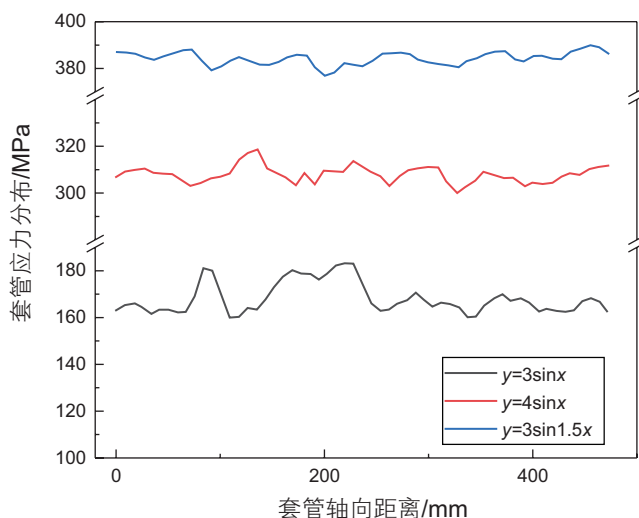


图5 坐封状态套管所受应力曲线

Fig. 5 Stress curve of casing under set condition

时,应力较大,变化趋势较平缓,锚定坐封效果优于 $y=3\sin x$ 型面。但选用此型面时,波纹高度较高,易产生永久变形,导致回弹性变差,同时导致胶筒厚度增加,极易产生局部应力集中,影响密封效果。因此选用 $y=3\sin 1.5x$ 型面,应力分布更加平稳,钢骨架与套管未达到其屈服强度,无塑性变形,锚定力稳定,坐封效果良好。

3.2 密封胶筒参数优选

图6所示为密封胶筒在20 MPa坐封压力下膨胀至完全密封的应变云图。从图中可以看出,胶筒变形较均匀,没有出现过度压缩变形的区域,说明波纹骨架对胶筒内壁损伤较小,相较于传统叠层钢片封隔器,可有效避免钢骨架刺穿胶筒的行为。此外,上、中、下3个胶筒的最大形变量均为40 mm左右,拉伸伸长率约为100%,未超过300%的聚氨酯断裂伸长率极限^[15],满足膨胀尺寸要求。

图7所示为胶筒外侧等效应力分布曲线,从图中可以看出胶筒外侧应力较小,两侧均匀对称。中胶筒应力波动范围小,在10~45 MPa之间。上、下胶筒外侧所受应力较大,在密封的同时可以兼顾一定的锚定作用,应力范围在15~90 MPa之间。三胶筒所受等效应力皆小于硫化后的材料拉伸强度120 MPa^[16],安全系数 $S > 1.2$,密封性能稳定。

中胶筒厚度是影响封隔器密封性能的关键因素之一。胶筒厚度过小可能会导致膨胀断裂。而胶筒厚度过大不仅会在膨胀时产生材料不良接触的问题,而且在封隔器上提下放的操作过程中,胶筒与套管之间还可能发生刮碰,甚至导致胶筒脱落。因此选取胶筒最大外径为82 mm、84 mm、86 mm、88 mm,仿真至胶筒完全膨胀,如图8所示。结果显示,4种不同厚度

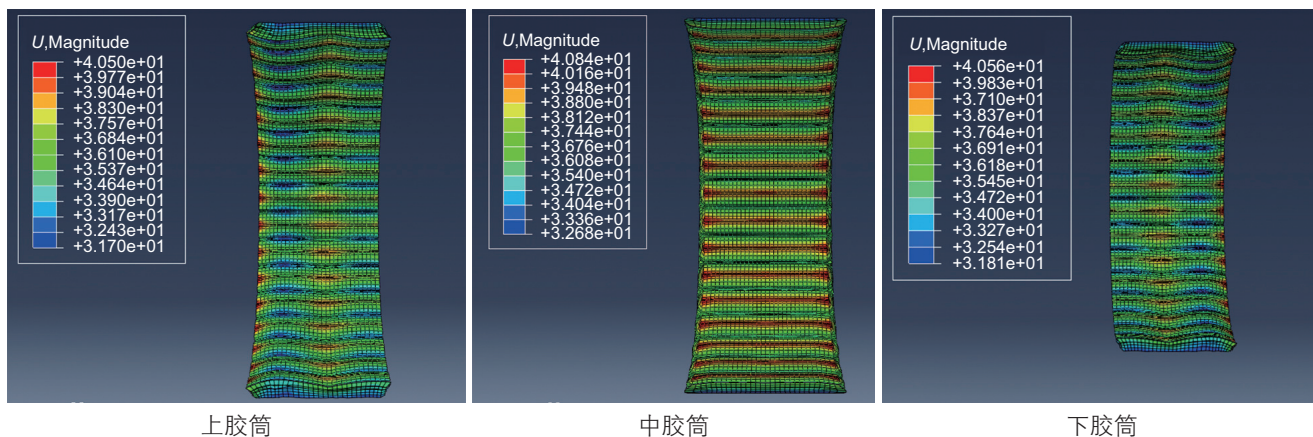


图6 上、中、下胶筒完全膨胀应变云图

Fig. 6 Cloud image of complete expansion of the upper, middle and lower rubber cylinder

的中胶筒形变基本一致，胶筒膨胀过程较稳定。

对比分析中胶筒外侧应力，得到其应力变化曲线，如图9所示。当胶筒外径在82 mm到86 mm之间时，随着胶筒厚度的增加，所受应力减小，应力变化较为规律。但胶筒外径为88 mm时，应力最大值出现在胶筒中段，说明胶筒过厚会造成局部应力集中，可能会造成封隔器密封失效。在86 mm外径下，应力变

化波动较大，密封效果较差。82 mm外径的胶筒应力变化约为4 MPa，而84 mm外径的胶筒应力变化范围在2 MPa以内，各长度区间内的应力分布更加均匀。因此，胶筒外径为84 mm时更适用于封隔器超膨胀密封。

3.3 坐封性能分析

封隔器在实际使用过程中，井下工作环境极其复

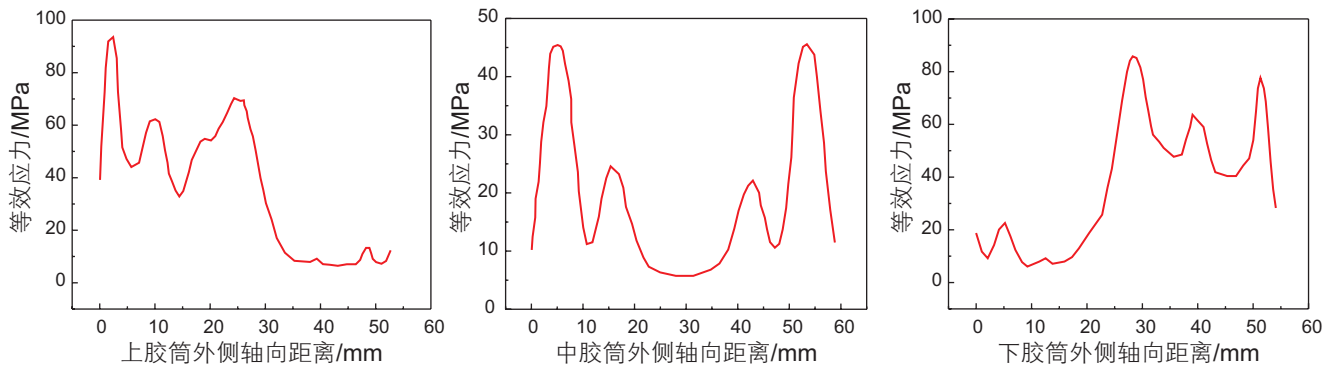


图7 上、中、下胶筒外侧等效应力

Fig. 7 Equivalent stress on the outside of the upper, middle and lower rubber cylinder

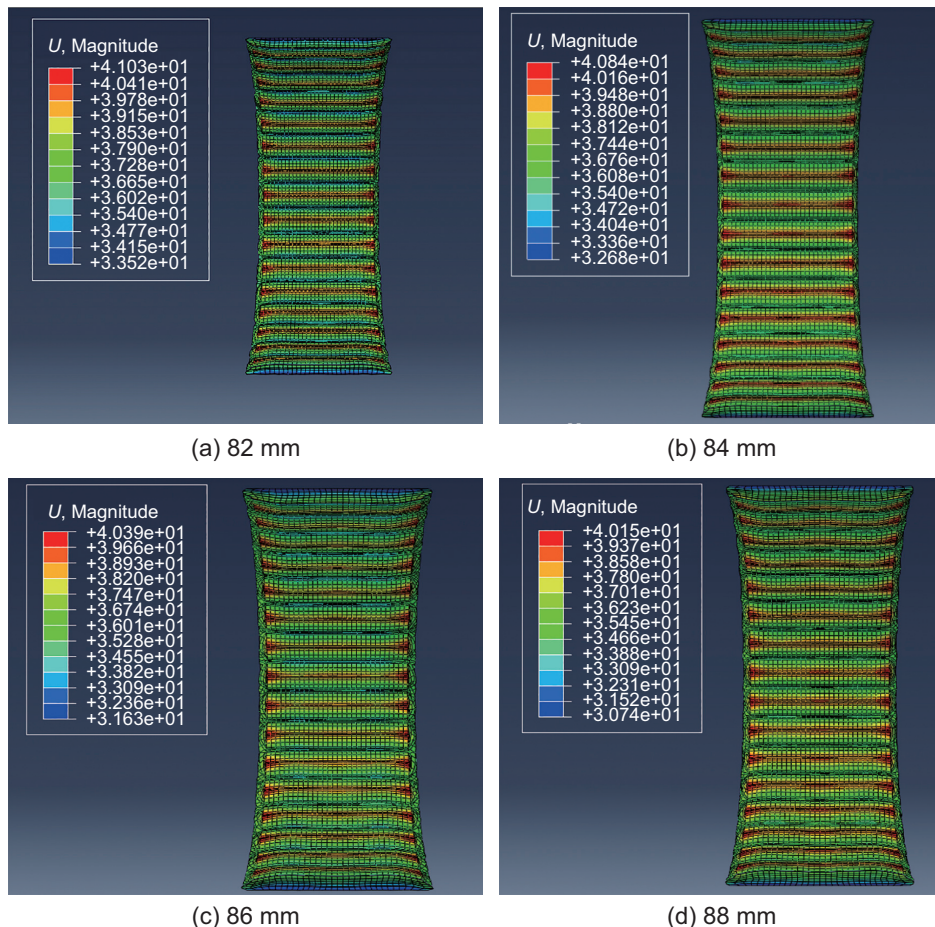


图8 不同厚度中胶筒应变云图

Fig. 8 Strain cloud diagram of middle rubber cylinder with different thickness

杂, 因此开展封隔器在 16 MPa、18 MPa、20 MPa、22 MPa、24 MPa 不同周向内压的坐封性能研究。在套管内壁设定接触应力路径, 如图 10(a) 和 (b) 所示, 分析不同内压对过油管封隔器的密封性能的影响。图 10(c) 所示为提取的接触应力分布曲线。从图中可以看出, 应力曲线较均匀, 无明显应力集中现象, 波

纹骨架结构受力均匀。当内压在 16~24 MPa 时, 其轴向平均应力随内压增大而增大, 应力范围分布在 10~38 MPa。结果表明, 所设计的超膨胀波纹骨架封隔器可以较好地满足不同工况的承压需求, 可以为过油管封隔器结构设计提供参考。

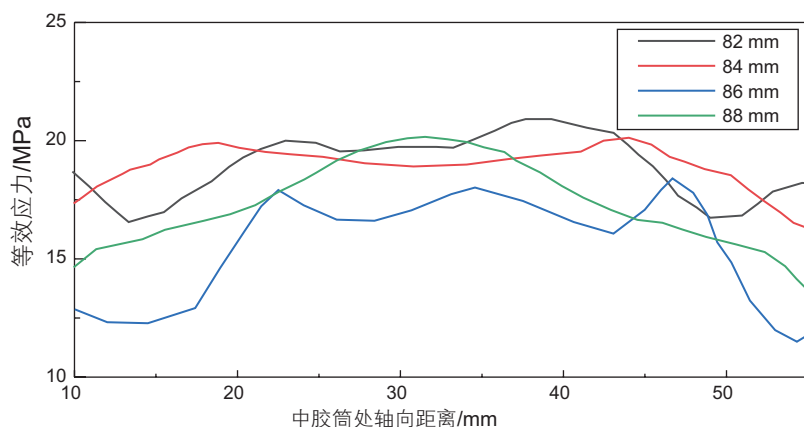


图 9 不同厚度中胶筒处应力曲线

Fig. 9 Stress curves of middle rubber cylinder with different thickness

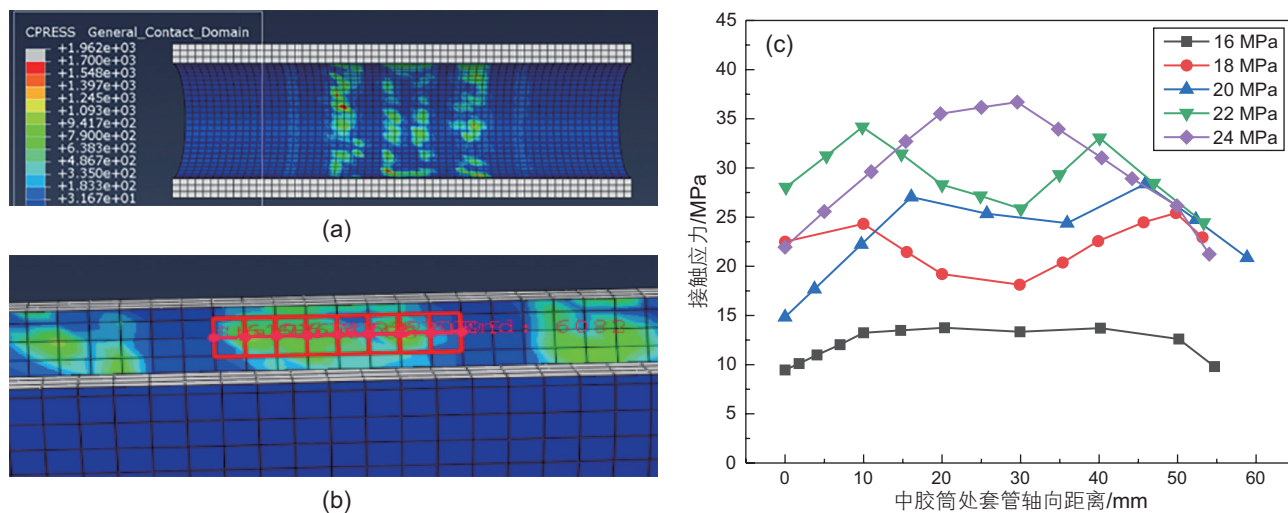


图 10 套管所受接触应力云图及中胶筒处应力分布曲线

Fig. 10 Contact stress cloud diagram of casing and stress distribution curves at the middle rubber cylinder

4 结论

针对储气库超膨胀密封技术不足的问题, 创新性设计了超膨胀波纹骨架过油管封隔器, 验证了超膨胀密封行为的可行性, 优选了关键部件的尺寸参数。本文的主要结论如下:

(1) 针对储气库用过 4-1/2 油管密封 7 寸套管的超膨胀密封技术问题, 设计了一种超膨胀波纹骨架过油

管封隔器, 确定了波纹骨架、三胶筒结构及关键部件的尺寸参数, 模拟仿真了封隔器的坐封膨胀过程。

(2) 确定了波纹曲面截面表达式为 $y=3\sin 1.5x$, 封隔器整体应力变化平缓, 可有效减少应力集中, 坐封性能良好。

(3) 为进一步提高封隔器的密封性能, 通过仿真分析, 得出了外胶筒的最优外径为 84 mm。分析了不同坐封内压条件下的封隔器受力状态, 结果表明封隔器胶筒与套管之间受力均匀, 可实现良好坐封。

参考文献

- [1] 张刚雄, 李彬, 郑得文, 等. 中国地下储气库业务面临的挑战及对策建议[J]. 天然气工业, 2017, 37(01): 153–159. [ZHANG G X, LI B, ZHENG D W, et al. Challenges to and proposals for underground gas storage(UGS) business in China [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37 (01): 153–159.]
- [2] 张光华. 中石化地下储气库建设现状及发展建议[J]. 天然气工业, 2018, 38(08): 112–118. [ZHANG G H. Underground gas storage of Sinopec: Construction status analysis and development proposals[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38 (08): 112–118.]
- [3] JONES A S . An experimental study of the thermomechanical response of elastomers undergoing scission and crosslinking at high temperatures[D]. University of Michigan. 2003.
- [4] 陈晓媛, 左家强, 王景瑞, 等. 应用过油管膨胀技术堵水[J]. 国外油田工程, 2007, 192(11): 35–38. [CHEN X Y, ZUO J Q, WANG J R, et al. Applied tubing expansion technology for water plugging [J]. Foreign Oilfield Engineering, 2007192 (11): 35–38.]
- [5] 刘友, 马龙. 过油管封隔器技术研究及应用现状[J]. 西部探矿工程, 2014, 26(05): 60–62. [LIU Y, MA L. Research and application status of tubing packer technology [J]. Western Exploration Engineering, 2014, 26 (05): 60–62.]
- [6] 韩佳隽. 过油管封隔器胶筒膨胀分析与结构优化[D]. 长江大学, 2021. [HAN J J. Expansion analysis and structure optimization of through-tubing packer [D]. Yangtze University, 2021.]
- [7] 马力. 扩张式封隔器胶筒力学行为数值模拟研究及改进[D]. 西安石油大学, 2017. [MA L. Research and improvement on numerical simulation of mechanical behavior of dilated packer cartridge[D]. Xi 'an Shiyou University, 2017.]
- [8] 宁宇航. 过油管封隔器结构设计及仿真分析[D]. 西安理工大学, 2016. [NING Y H. Structural design and simulation analysis of through-tubing packer[D]. Xi'an University of Technology, 2016.]
- [9] 刘传刚, 王世强, 马认琦, 等. 海上热采耐高温三胶筒结构封隔器设计及性能评价[J]. 钻采工艺, 2022, 45(06): 118–122. [LIU C G, WANG S Q, MA R Q, et al. Design and performance evaluation of a tri-tubing for thermal packer with high temperature resistance in offshore wells[J]. Drilling and Production Technology, 2022, 45 (06): 118–122.]
- [10] 王瑞, 孙浩, 余波, 等. K344 波纹状钢骨架封隔器结构优化[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2021, 41(04): 58–62. [WANG R, SUN H , YU B, et al. Structural optimization of K344 corrugated steel frame packer [J]. Journal of Liaoning Petrochemical University, 2021, 41 (04): 58–62.]
- [11] 王智勇, 刘军严, 朱帅, 等. 封隔器胶筒非线性仿真及性能评价[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(03): 112–116. [WANG Z Y, LIU J Y, ZHU S, et al. Nonlinear simulation and performance evaluation of packer rubber [J]. Mechanical Manufacturing and Automation, 2023, 52 (03): 112–116.]
- [12] 王兰文, 盛选禹. 封隔器的加压扩张分析与结构优化[J]. 机械制造, 2019, 57(09): 50–54. [WANG L W, SHENG X Y. Pressurized expansion analysis and structural optimization of packer[J]. Mechanical Manufacturing, 2019, 57(09): 50–54.]
- [13] 伍伟. 基于橡胶超粘弹特性的封隔器胶筒密封性能研究[D]. 西南石油大学, 2018. [WU W. Research on sealing performance of packer rubber cartridge based on rubber super viscoelastic characteristics[D]. Southwest Petroleum University, 2018.]
- [14] 徐俊峰, 罗远新, 王传瑶. 新型封隔器胶筒橡胶本构模型选择及结构参数优化[J]. 制造业自动化, 2019, 41(01): 53–56+82. [XU J F, LUO Y X, WANG C Y. Rubber constitutive model selection and structural parameters optimization of the new packer [J]. Manufacturing Automation, 2019, 41 (01): 53–56+82.]
- [15] SOORGE M H . A numerical study on differential pressure needed for ball pig motion in pipelines based on nonlinear hyperelastic material model[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 59: 466–472.
- [16] 程大勇. 大膨胀量封隔器的设计及其力学模型的研究[D]. 陕西科技大学, 2012. [CHENG D Y. Design of the packer with the large expansion and research on the mechanical model[D]. Shaanxi University of Science and Technology, 2012.]

(编辑 马桂霞)

第一作者: 张政 (1994 年—), 博士, 讲师, 主要从事能源装备特种密封与防护技术研究, z.zheng@cup.edu.cn。

通讯作者: 郭岩宝 (1982 年—), 博士, 教授, 主要从事石油机械/装备失效与风险评价、智能井下工具等方面的研究工作, gyb@cup.edu.cn。