

封隔器胶筒快速参数化建模方法研究

张紫檀 各文祥 明洋 张文杰 王钰影

中石化胜利油田分公司, 中国·山东 东营 257000

摘要: 高含水期油田分层注水开发中, 封隔器胶筒的密封性能直接决定注水管柱的运行可靠性。传统胶筒仿真建模依赖人工操作商用有限元软件, 存在建模周期长、成本高、操作门槛高、设计与仿真脱节的问题, 且多针对单一规格建模, 系列化适配性较差。本文提出一种封隔器胶筒快速参数化建模方法, 通过构建系列化参数模型、材料数据库, 结合快速网格生成及参数自诊断技术, 实现胶筒标准化、高精度快速建模。结果表明, 该方法仿真结果与传统人工建模相比符合率在 90% 以上, 大幅缩短建模周期, 可为分层注水封隔器的快速迭代设计提供高效技术支撑。

关键词: 封隔器胶筒; 参数化建模; 自诊断

Research on Rapid Parametric Modeling Method for Packers' Rubber Sleeves

Zhang Zitan, Ge Wenxiang, Ming Yang, Zhang Wenjie, Wang Yuying

Sinopec Shengli Oilfield Branch, China Shandong Dongying 257000

Abstract: In the layered water injection development of high water cut oil fields, the sealing performance of the packer rubber cylinder directly determines the operational reliability of the water injection string. Traditional rubber cylinder simulation modeling relies on manual operation of commercial finite element software, which has problems such as long modeling cycle, high cost, high operating threshold, and disconnection between design and simulation. Moreover, it mostly models a single specification and has poor serial adaptability. This article proposes a fast parametric modeling method for packer rubber cylinders. By constructing a series of parameter models and material databases, combined with fast grid generation and parameter self diagnosis technology, standardized, high-precision and fast modeling of rubber cylinders can be achieved. The results show that the simulation results of this method have a conformity rate of over 90% compared to traditional manual modeling, significantly reducing the modeling cycle and providing efficient technical support for the rapid iterative design of layered water injection packers.

Keywords: Packer rubber cylinder; Parametric modeling; Self-diagnosis

0 引言

我国多数油田已进入高含水开发阶段, 分层注水是抑制高渗层水窜、补充低渗层能量、提升采收率的核心技术。封隔器作为分层注水管柱的关键工具, 其密封部件胶筒的性能直接影响注水效果。现场统计数据表明, 约 60% 的分层注水工况异常由胶筒密封失效引发, 部分井段管柱实际使用寿命较设计值缩短 30% 以上, 大幅增加了油田运维成本。

现阶段胶筒仿真分析多依托商用有限元软件开展人工建模计算, 传统建模方式存在明显短板。室内物理试验虽可验证胶筒宏观性能, 但试验周期长、成本高, 难以获取内部微观力学响应; 而常规有限元建模模式通用性差, 多针对单一规格胶筒建模, 规格替换需重复建设参, 重复性工作量大、建模效率低。同时, 现有建模体系缺乏标准

化材料与工况参数库, 橡胶本构参数多依靠经验取值, 并下载荷工况估算随意性强, 导致仿真模型一致性差、计算结果与现场实际偏差较大, 难以满足系列化胶筒快速仿真分析与迭代设计需求。

针对上述建模效率低、参数体系不规范、网格质量可控性差等问题, 本文建立一套封隔器胶筒快速参数化建模方法。通过构建系列化参数化模型、标准化材料数据库, 结合快速网格生成与自诊断技术, 实现不同规格胶筒的标准化、高精度快速建模, 有效解决传统人工建模重复性强、仿真精度不稳定的问题, 为分层注水封隔器胶筒的快速建模与仿真分析提供技术支撑。

1 参数化模型的建立

为实现胶筒快速参数化建模, 需研究不同布局、结构与规格的胶筒特征, 建立多参数、系列化的参数化模型,

为有限元仿真提供标准化的模型基础。

1.1 胶筒参数化模型

群众通过对油田常用封隔器胶筒进行实物剖切拆解，明确了内部钢丝－帘布复合增强骨架的层间排布方式（图 1）。基于二维工程图纸与实物剖切测绘数据，构建了包含橡胶主体、金属端环、压环以及增强用钢丝、帘布的全结构三维模型（图 2）。



图1 胶筒断面图

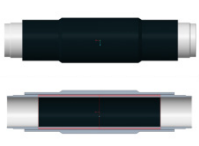


图2 胶筒模型图

提取胶筒长度、内径、外径等关键尺寸并进行参数化定义，系统梳理并形成了涵盖八种常用规格的系列化胶筒模型库（图 3），可实现不同规格胶筒的快速调用与尺寸迭代。

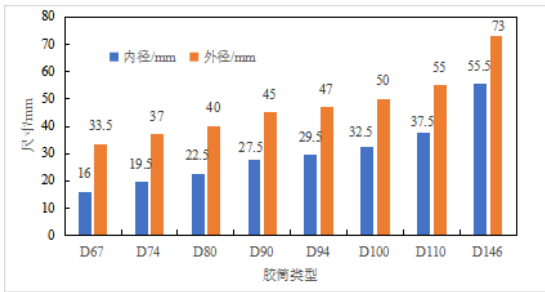


图3 系列化胶筒模型库

综合国内油田常规胶筒的行业标准化规范与工程应用经验，划定了各核心参数的工程合理调整区间（表 1），为后续胶筒的系列化结构优化设计提供了基础支撑。

表1 胶筒主要参数及其调整范围

尺寸参数	最小值	最大值	备注
套管内径/mm	76	159	
胶筒直径/mm	67	146	
胶筒内直径/mm	32	111	
胶筒长度/mm	220	300	非约束段
钢丝层数/层	1	2	
钢丝位置/mm	17	54.5	相对中心位置
钢丝直径/mm	1	1.7	
钢丝间距/mm	1	10	
帘布层数/层	1	5	
帘布位置/mm	17	54.5	相对中心位置
帘布纤维方向/°	0	15	
纤维直径/mm	0.5	1	
纤维间距/mm	0.5	2	

1.2 材料数据库建立

材料参数的准确性是保证有限元仿真精度的核心基础，胶筒所用材料以橡胶、复合钢丝（铜合金与钢材的复合结构）、纤维及 45 号钢为主。为满足不同材料、温度并况的准确模拟分析，构建了标准化的材料性能数据库。

针对胶筒常用的 75、80、90 三种硬度等级的橡胶材料，首先整理了现有不同配方橡胶材料的力学试验数据，结合室内测试数据，借助有限元分析软件 ABAQUS 的材料数据处理功能，对测试获得的应力－应变曲线数据进行了拟合处理（图 4），将其转化为 ABAQUS 可直接调用的橡胶材料本构模型参数（表 2），为后续有限元模型中橡胶材料的精准定义提供了数据支撑。

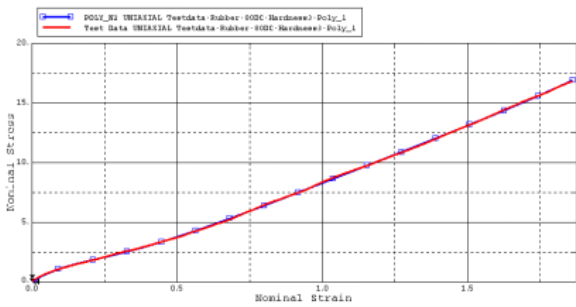


图4 橡胶材料实验曲线与拟合曲线对比

表2 橡胶材料参数

	温度(℃)	C10	C01	C20	C11	C02
硬度75丁腈橡胶	50	-3.84	5.38	0.07	-0.36	2.27
硬度75丁腈橡胶	60	-3.47	4.81	0.09	-0.43	2.32
硬度75丁腈橡胶	70	-3.96	5.36	0.07	-0.36	2.29
硬度75丁腈橡胶	80	-2.47	3.61	0.06	-0.32	1.83
硬度75丁腈橡胶	90	-1.36	2.35	0.09	-0.40	1.52
硬度75丁腈橡胶	100	-0.07	1.31	-0.08	0.47	0.11
硬度80丁腈橡胶	80	-13.05	16.64	0.36	-2.14	7.78
硬度90丁腈橡胶	100	-8.42	11.33	0.52	-2.61	7.11

纤维材料参数参考轮胎行业通用标准规格：单根承载力为 215.6 N，直径 0.65 mm，对应截面积 0.332 mm²，计算得单根抗拉强度为 650 MPa。45 号钢的力学性能参数采用国家行业标准规定值，确保与通用工程材料特性一致。钢丝为铜丝与钢丝的复合结构，通过室内测试数据可知，其最大承载力大于 900 N；针对直径 1.27 mm 的该类复合钢丝，计算得其截面积为 1.266 mm²，据此推导等效最大抗拉强度大于 710 MPa，除橡胶外的其余材料力学性能参数汇总见表 3。

表3 橡胶以外其他材料参数

材料	弹性模量(MPa)	泊松比	抗拉强度 (MPa)
45号钢	2.1 × 10 ⁵	0.3	600
钢丝	1.82 × 10 ⁵	0.3	710
帘布纤维	1.0256 × 10 ⁴	0.4	650

2 快速网格生成与自诊断技术

传统有限元建模需手动绘制几何、划分网格，重复操作多，效率低，且质量难控。为此本文通过网格生成算法，结合网格模型单元质量自诊断与控制策略，实现网格模型的一键生成，逐顶逐单元检查保障计算的稳定性与精度。

2.1 基础模型的建立

通过轴对称模型简化三维复杂结构，降低计算维度与求解成本；同时对模型圆角、接触面等细节进行适度简化，在保证计算精度的前提下提升建模效率，避免冗余细节增加计算负担。

前述参数化模型的建立已研究了各型胶筒的尺寸和结构，确立了参数的相互关系及调整要求。通过定义胶筒核心控制参数，关联胶筒主要尺寸，当直接修改参数（尺寸、材料）后模型相应结构自动更新，同步自动计算模型节点坐标，最终完成胶筒断面基础模型的构建，胶筒基础模型图见图 5。

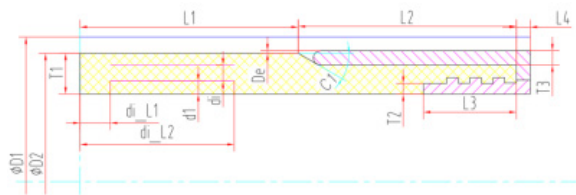


图5 胶筒基础模型图

基于参数化基础模型，整体统一采用四边形等参单元划分，相较于三角形单元，其节点连续性更好，可精准捕捉胶筒大变形过程中的应力梯度变化，同时对橡胶基体、钢丝、帘布、金属构件等复合结构采用共节点处理，保证整体结构传力路径连续，有效降低仿真计算误差，网格划分示意图见图 6。

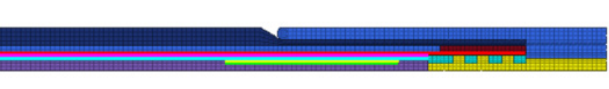


图6 网格划分示意图

2.2 网格划分算法与自诊断技术

为解决参数迭代调整过程中网格质量劣化问题，采用全局离散方法对基础模型进行处理，可确保模型参数在较大范围内调整时，仍能维持较好的网格质量，其网格划分算法基本过程见图 7：



图7 网格划分基本过程

首先投影关键特征点，根据网格尺寸投影关键特征点，以此控制网格质量；其次搜索 X 和 Y 截面，过滤并排序所有坐标点，形成 X 和 Y 截面集合；接着特征线分类，依据特征线与 X 轴的夹角，将其分为端面线和表面线；随后离散特征线，循环计算逐截面间的离散点数，完成特征线段的离散；之后合并部件节点，筛选删除重复坐标并对特征线节点进行编号；最后离散部件，根据 Y 轴节点数沿 X 轴逐层离散部件，最终实现模型的高效、高质量网格划分。

为严控网格质量、保障计算稳定性，构建多指标单元自诊断体系，选取纵横比、单元内角、雅可比行列式、偏斜度、锥度比五项核心评价指标，各指标合理取值范围与临界值见表 4，引入网格质量评价指标，通过动态调整网格尺寸，严格限制低质量单元的占比，进一步保障计算结果的稳定性与可靠性，为后续仿真分析提供高质量网格基础。

表4 自诊断参数与控制策略

检查顶点	计算方法	可接受范围	临界值
纵横比	最长边与最短边比值	≤ 10	> 15
内角	向量点积求夹角	$\geq 15^\circ, \leq 160^\circ$	$< 10^\circ, > 170^\circ$
雅可比行列式	等参变换矩阵的行列式	> 0.6	≤ 0.2
偏斜度	对角线夹角	$< 30^\circ$	$> 70^\circ$
锥度比	对边中点连线的正交性	< 0.5	> 0.7

该网格生成与自诊断方法兼顾建模效率与仿真精度，1 万级单元模型可实现快速响应刷新，最大可支撑 100 万级单元精细化建模，能够满足不同规格胶筒、复杂井下工况的高精度仿真需求，为胶筒标准化参数化仿真分析提供了稳定可靠的模型基础。

3 快速参数化建模方法验证

基于封隔器胶筒的快速参数化建模方法，对常用 68mm、74mm、90mm、100mm、110mm 这五种尺寸胶筒进行快速参数化建模，设定工况为内压 20MPa，温度 80℃，借助有限元分析软件 ABAQUS 分别对 5 种胶筒进行分析计算，和原传统方法有限元分析结果进行对比，以验证本方法的精度，传统方式建立的实体模型与本文建立的轴对称模型见图 8 和图 9。

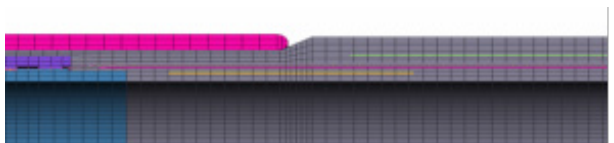


图8 传统方式-实体模型

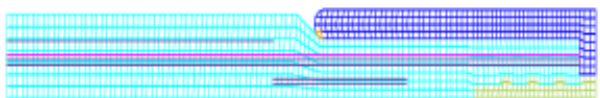


图9 本文-轴对称模型

通过有限元分析 ABAQUS 开展仿真计算, 输出胶筒与套管的接触压力、胶筒内部钢丝应力、帘布应力与橡胶应变, 输出结果见图 10-13。

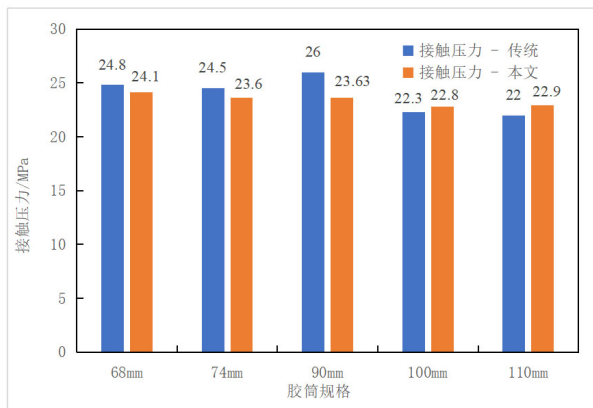


图10 接触压力指标对比

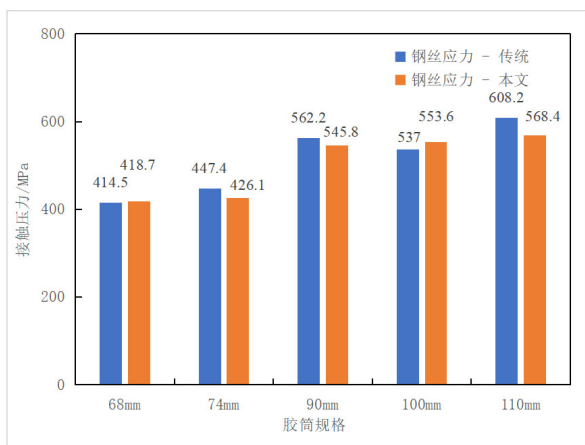


图11 钢丝应力指标对比

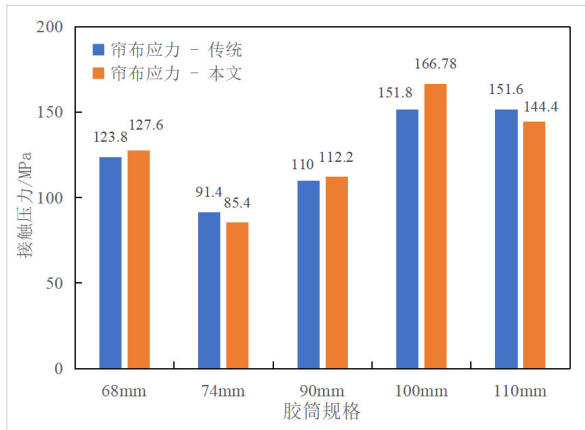


图12 帘布应力指标对比

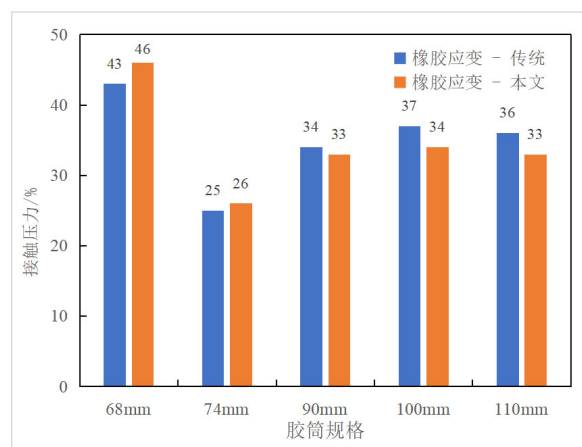


图13 橡胶应变指标对比

与传统人工建模仿真结果开展多指标对比验证, 由对比结果可见, 5 类胶筒模型的各力学指标相对最大误差分别为接触压力 9.1%、钢丝应力 6.5%、帘布应力 9.9%、橡胶应变 7.5%, 全部指标计算误差控制在 10% 以内, 两种建模方法计算结果一致性良好, 验证了本文快速参数化建模方法的计算精度, 证明了本文快速参数化建模方法具有良好的计算准确性与工程适用性。

4 结语

(1) 整合胶筒系列化参数化模型与标准化材料数据库, 划定了各核心结构尺寸的合理取值区间, 结合快速网格生成与参数自诊断技术, 建立了一套适用于分层注水封隔器胶筒的快速参数化建模方法体系。

(2) 运用该建模体系完成了 5 种规格胶筒结构仿真模型的快速构建, 与传统人工建模计算结果对比实际符合率在 90% 以上, 证实该快速参数化建模方法计算精度良好, 可大幅缩短建模周期。

参考文献:

- [1] 刘合, 裴晓含, 贾德利等. 第四代分层注水技术内涵、应用与展望[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(4): 608-614+637.
 - [2] 许霞, 于桂杰, 范晓鹏. 封隔器密封性能的有限元计算及优化设计[J]. 价值工程, 2025, 44(22): 108-110.
 - [3] 窦益华, 杨浩, 李明飞等. 水力扩张式封隔器胶筒力学性能有限元分析[J]. 油气井测试, 2016, 25(2): 6-9+75.
- 作者简介: 张紫檀 (1990.08-), 男, 汉族, 山东东营人, 硕研, 中级, 现任胜利油田石油工程技术研究院注水所责任师, 研究方向: 水井井下工具研发。