

超高温高压完井组块密封的研制

陈同骁

(中海油能源发展股份有限公司, 天津 300450)

摘要: 组块密封作为完井工程中的保持井筒完整性、实现井下资源分层开采的重要工具, 其工作的可靠性与稳定性不言而喻。在超高温高压油气田中, 对于组块密封的耐温性、耐压性要求更高, 该方面研究在国内少有涉及。本文通过新型耐高温气密材料的开发、组块密封结构设计, 结合结构仿真与试验, 研制形成多个尺寸系列耐温 204 °C、耐压 10 000 psi 的完井组块密封工具, 为我国超高温高压油气田开发提供了国产化工具支持。

关键词: 超高温高压; 油气田; 完井工具; 组块密封

中图分类号: TQ336.42

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2024)05-0041-06

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2024.05.010

0 绪论

组块密封结构作为油气田分层开采的重要工具, 其工作可靠性和稳定性对井下高效生产至关重要, 组块密封结构在井下依靠外侧橡胶件与密封筒内壁相配合形成轴向密封, 起到隔绝产层、分层开采或维持井筒完整性的作用, 其工作原理如图 1 所示。车家琪^[1]等人针对预置管柱气动式排水采气工艺, 设计了一种用于封隔井底积液和产期通道的插入组块密封方案, 但其主要着重于组块密封的结构优化, 密封材料采用 HNBR 材料, 不适用于超高温高压油气井的开发; 吴赛赛^[2]等人设计了 4 种组块密封结构, 实现了常温 and 高温下 45 MPa 的压差密封, 但是相较于 10 000 psi (68.9 MPa) 的高压密封还尚有差距; 程文佳^[3]等人设计了一种带有 1 mm 退让槽的组块密封, 并采用了 4 道矩形密封圈粘接结构, 解决了组块密封在密封筒内反复拖动带来的磨损问题, 但不涉及超高温高压; 左凯^[4]等人基于参数化建模方法, 利用有限元分析进行了组块密封关键影响因素分析, 并基于分析结果自主设计了组块密封工具, 但受于材料所限, 工具并未应用于超高温高压油气田开发。

综上所述, 国内对完井组块密封的研究多关注在其结构设计、密封影响参数研究、失效分析方面, 在适用于超高温高压的组块密封方面研究较少, 因此本文针对超高温高压油气开采井况, 通过解决耐高温密封材料限制, 开展超高温高压组块密封的研制。

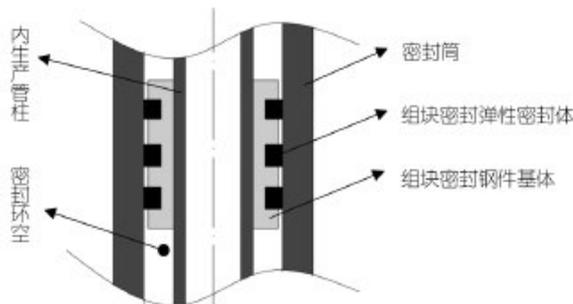


图 1 组块密封工作原理

1 耐高温密封材料的开发

油气井的密封材料因井况不同, 常常需要满足耐高温、耐高压、耐腐蚀等工况要求, 对其性能要求较高。在目前油气行业内, 橡胶材料通常作为密封材料使用, 材质主要有丁腈橡胶、氢化丁腈橡胶、氟橡胶、全氟醚橡胶和四丙氟橡胶。其中, 四丙氟橡胶的耐高温性能较好, 性能稳定, 原因在于其采用了氟原子屏蔽 C—C 主链的形式, 保证了主链的稳定性; 同时 C—F 键键能较大, 稳定性高。因此本研究拟采用四丙氟橡胶作为主要组块密封弹性材料, 通过配方增强技术进行补强, 形成耐高温高压气密的新型特种橡胶材料。

碳纳米管(图 2)是一种准一维纳米材料, 具有

作者简介: 陈同骁(1990—), 男, 现主要从事海上完井工程监督及管理工作。

收稿日期: 2024-01-22

长径比高、比表面积高的特点，结构稳定，能有效补强材料的力学性能和导热性能，近几年已经成为受到行业极大管柱的配方补强碳材料之一^[5]。而现市面上常见的碳纳米管一般有4种规格（如表1），不同的长径比、比表面积与聚合物的界面结合程度不同，其补强效果也有较大差别，因此进行不同规格补强的混炼胶试样试制，通过测试优选最优补强性能的碳纳米管规格。

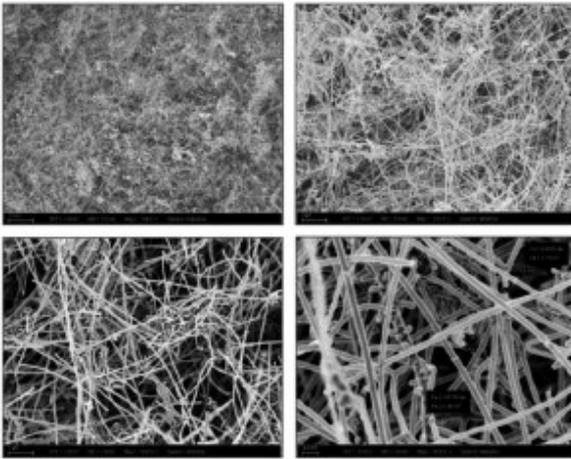


图2 碳纳米管微观结构

表1 碳纳米管规格^[6]

碳纳米管型号	内径/nm	长度/ μm	比表面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	纯度/%
GT-200	12~15	0.5~5	280	96
GT-300	12~15	3~12	230	96
GT-400	25~30	2~8	200	98
GT-600	50~60	2~8	100	95

1.1 不同规格碳纳米管增强的性能对比

对使用不同规格的碳纳米管形成的混炼胶使用门尼黏度计、拉伸测试器、硬度计等进行物化性能测试，对比性能进行优选，四种不同规格碳纳米管混炼胶的性能如图3所示。

由图3分析可得，碳纳米管规格不同，对混炼胶的物化性能具有一定的影响，在门尼黏度上，碳纳米管的比表面积减小后，门尼黏度呈先增大后减小的趋势，推测可能的原因是当比表面积增大时，碳纳米管与四丙氟橡胶的接触面积逐渐增大，两者形成的界面力也将增大，限制橡胶大分子链的运动，导致流动性降低。门尼黏度在GT-300规格出现峰值，原因可能是GT-300比表面积虽然小于GT-200，但是其长度大于GT-200，碳纳米管更容易与橡胶大分子链缠结，其长度的影响导致该处出现较大的峰值。

在拉伸强度方面，使用GT-600配方补强的橡胶

试样拉伸强度最高，原因可能为GT-600的碳纳米管内径最大，这使得碳纳米管更易于在橡胶中均匀的分散，而当内径缩小时，碳纳米管较细，更易形成结团，导致受力不均匀。

在断裂伸长率方面，GT-300与GT-400断裂伸长率较低，原因是其较大的比表面积与长度限制了橡胶分子链，导致整体的柔顺性低。而GT-200的长度较短，分子链伸长时受到的阻碍较小，断裂伸长率较高。GT-600断裂伸长率的升高则与其管径较大有关。

硬度方面，GT-200碳纳米管补强试样硬度最低，GT-300最高，可见管长的增加有利于界面结合力的提升。

通过橡胶各类性能的对比，性能最佳点赋予4分，最低赋予1分，通过得分相加（表2），GT-300规格碳纳米管的综合性能为最好的，因此选择GT-300规格碳纳米管最为填充补强材料。

表2 各规格碳纳米管性能得分表

性能指标	得分			
	GT-200	GT-300	GT-400	GT-600
规格				
门尼黏度	3	4	2	1
拉伸强度	1	3	2	4
断裂伸长率	4	2	1	3
硬度(邵A)	1	4	3	2
总计	9	13	8	10

1.2 碳纳米管与炭黑比对橡胶复合材料性能的影响

橡胶材料常用的填料是炭黑、白炭黑，而碳纳米管是近年来新兴的补强性能杰出的一种^[7]，碳纳米管的虽然性能优异，而高聚物中只填充碳纳米管时，各方面性能并不理想，所以碳纳米管需要与其他填料混合使用。本研究以AFLAS氟橡胶材料邵尔A硬度70标准配方为基础，更改不同的碳纳米管与炭黑比例组合，比例组合情况如表3，门尼黏度测试结果如表4。

表3 碳纳米管与炭黑比例

比例	0	1:1	1:2	1:2.5	1:3	1:3.5	1:4	1:5	1:6
碳纳米管/份	0	5	5	5	5	5	5	5	5
炭黑/份	40	35	30	27.5	25	22.5	20	15	10

表4 不同比例碳纳米管与炭黑混炼胶的门尼黏度检测结果

比例	0	1:1	1:2	1:2.5	1:3	1:3.5	1:4	1:5	1:6
门尼黏度	57.21	82.10	71.76	67.47	63.51	64.49	59.74	54.34	51.57

通过表4结果可知，除去未添加碳纳米管的试样，其他试样的门尼黏度随着碳纳米管的比例上升而降低，

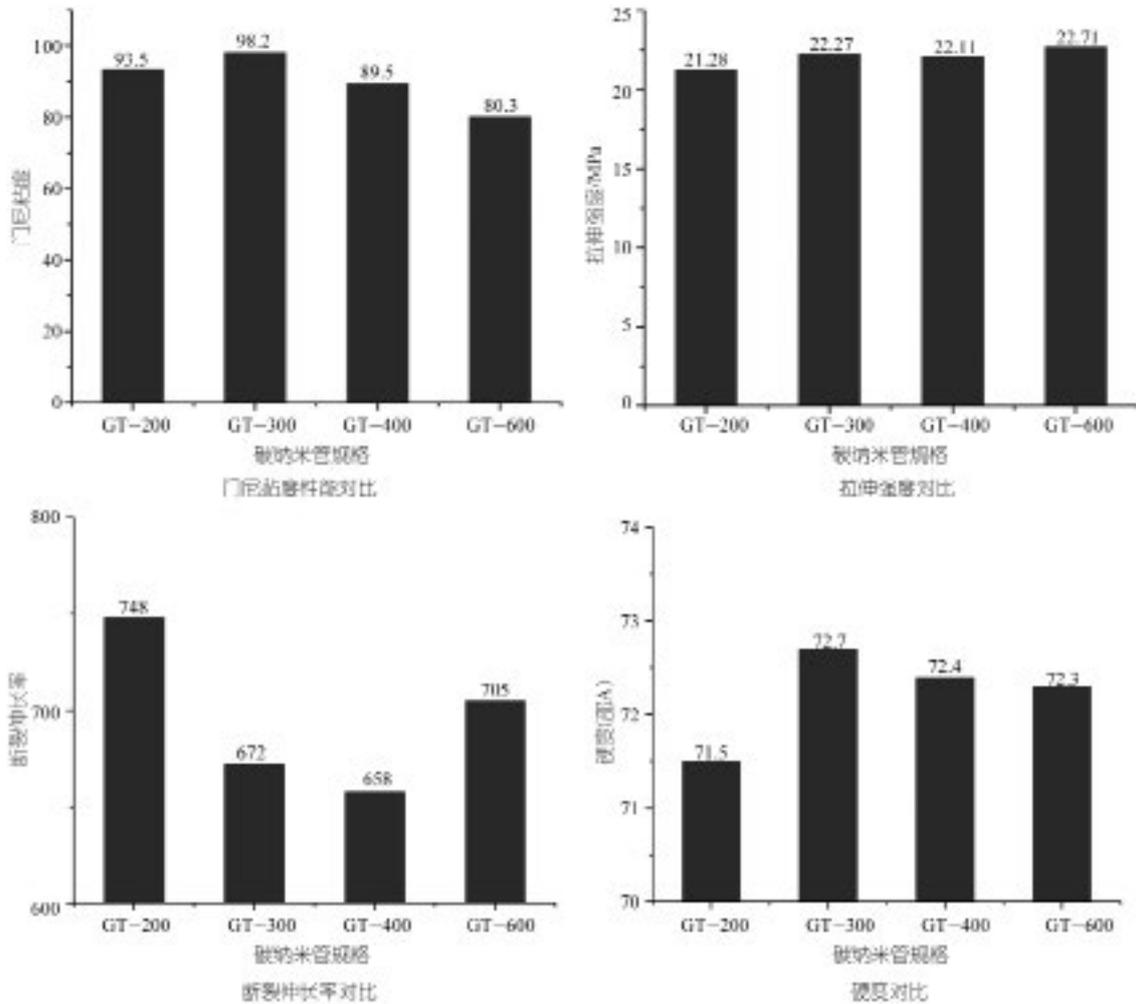


图3 添加4种不同规格的混炼胶物化性能对比

炭黑的比例降低导致与炭黑的结合胶逐渐减少，橡胶大分子链受到的限制降低，因此试样的综合性能降低，对各试样进行拉伸性能测试，结果如图4所示。

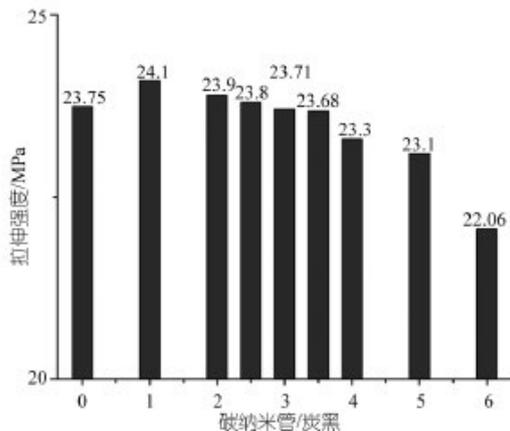


图4 不同碳纳米管/炭黑配比拉伸强度

如图所示，除没有添加碳纳米管的橡胶，橡胶的拉伸强度随填料比例的增大而减小，比例为1:1的橡胶力学性能最高。对不同配比的混炼胶试样进行断裂伸长率与硬度变化测试，测试结果如图5。

如图所示，除添加碳纳米管为0的橡胶外，随着碳纳米管比例的上升，断裂伸长率呈上升趋势，其原因在于随填料比例的增大，填料总量减少，碳纳米管与炭黑对橡胶分子链的限制程度也降低，所以断裂伸长率升高，而填料与橡胶形成的物理交联点也减少，补强作用减弱，所以其他力学性能逐渐下降。

因此，当使用碳纳米管代替等量炭黑时，橡胶的总体性能最优。综上所述，本文采用1:1碳纳米管/炭黑比例、GT300类型碳纳米管作为采用四丙氟橡胶配方补强方案，研制的耐高温特种橡胶材料配合金属基体，形成超高温高压完井组块密封。

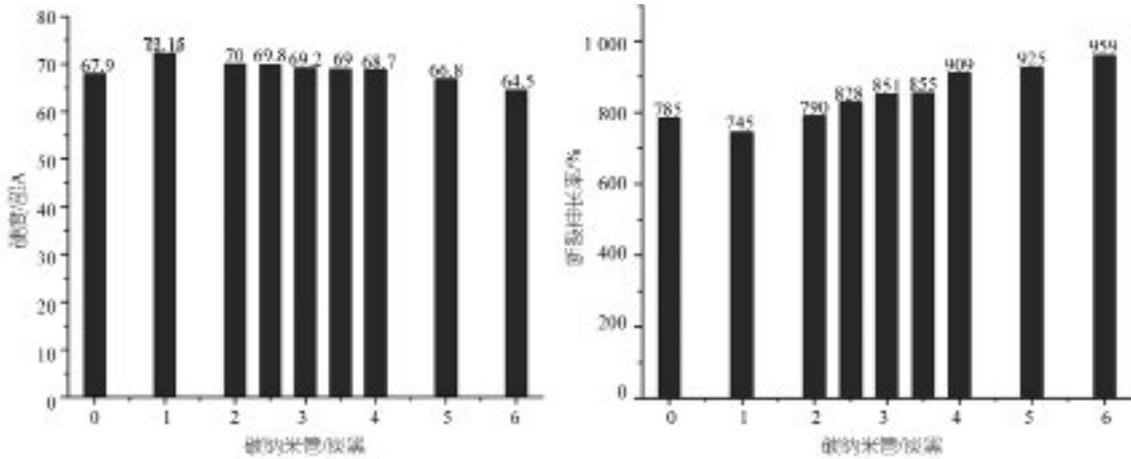


图 5 不同碳纳米管 / 炭黑配比硬度 / 断裂伸长率变化曲线

2 超高温高压组块密封仿真分析

通过大量双轴拉伸测试 (如图 6), 得到该特种橡

胶本构模型参数, 此过程本文不进行赘述。

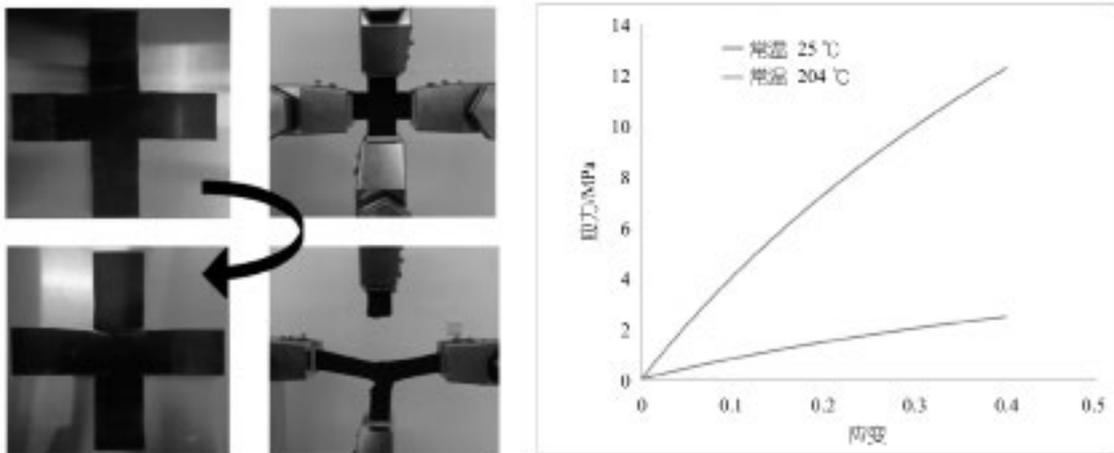


图 6 特种橡胶本构模型参数确定

本文有限元分析以 3.88 in 规格组块密封为例 (如图 7), 各个密封环的过盈量为 0.2 mm, 密封结构通过过盈配合形成初始接触应力, 之后在 10 000 psi (68.9 MPa) 液压载荷下橡胶材料进一步被压缩, 从而提高和保持接触应力。

根据实际工况对其边界条件进行设置, 为了更直观地展示橡胶的接触应力, 且考虑到金属密封环骨架在实际工作过程中几乎不产生变形, 本次分析将密封环骨架设置为刚体。同时考虑到密封环在实际使用过程中可以分为两个步骤, 第一个步骤为密封环插入密封筒后, 密封环由于与密封筒之间的过盈配合产生一个接触力; 第二个步骤为密封环插入密封后, 通过间隙对密封环环空施加 10 000 psi (68.9 MPa) 的环空



图 7 组块密封模型

压力。因此在有限元分析中，设置两个分析步分别加载，经过结构尺寸优化，模拟结果如图 8 所示。

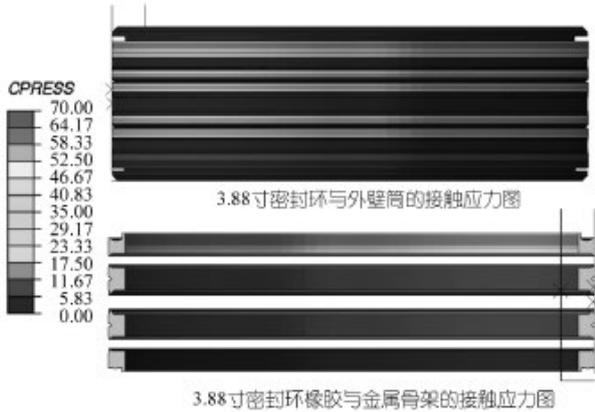


图 8 组块密封有限元分析结果

从组块密封结构有限元分析结构来看，装配的接触应力主要是橡胶与外金属套管之间相互挤压形成，由于密封压力对上部橡胶的挤压，最大的接触应力在组块密封结构的加载区域与外金属套管接触的区域，橡胶变形相对较小，呈现一个椭圆弧形。组块密封结构的接触应力幅值达到 70 MPa 左右，能够在压差为 10 000 psi 工况下正常工作。

3 超高温高压组块密封试制与测试

3.1 模具设计

组块密封单元属于带金属镶件型橡胶制品，设计模具采用注压式模具结构（如图 9），与注压机配合使用。注压成型过程中，模具处于受压锁死状态，使模具封闭状态良好，成品具有较好的橡胶与金属保粘强度。

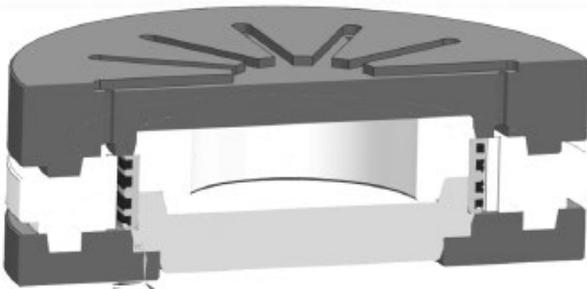


图 9 组块密封模具设计

3.2 组块密封性能测试

组块密封性能测试工装设计如图 10，将一对组块密封（以 3.88 in 为例）装到密封轴轴肩处，通过两端锁环固定位置；在外部 3.88 in 密封筒中间处开进气通

孔，两侧开出气通孔，出气孔连结气泡计数器，测试装置放置加热箱整体加热，测试标准依据气泡“零”泄露标准，测试结果曲线如图 11。

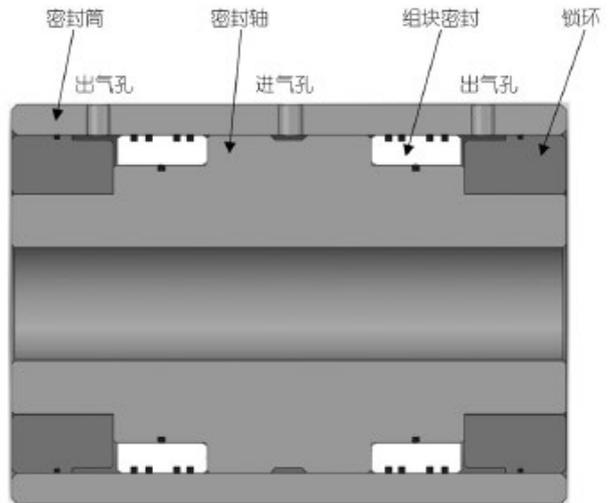


图 10 组块密封测试工装

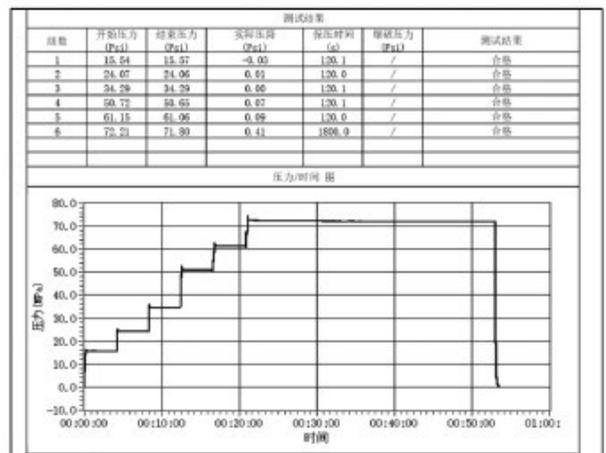


图 11 组块密封测试结果曲线

3.88 in 组块密封在 204 °C 条件下承压 70 MPa 气体密封测试，经压力反转及温度循环，连续 15 min 稳压时间内无气泡溢出；测试结束后，样机取出如图 12 所示，组块密封除有轻微挤伤外，未产生明显的气爆损伤；综合判定，该组块密封达到超高温高压标准使用要求。

4 结论

(1) 碳纳米管在超高温高压情况下对四丙氟橡胶的补强作用明显，能够有效的提升材料的物化性能。

(2) 不同规格的碳纳米管、不同的碳纳米管 / 炭



图 12 3.88 in 组块密封单元试验前后对比

黑对比对补强效果影响较大，通过优选不同规格的碳纳米管和不同碳纳米管 / 炭黑配比，可实现四丙氟橡胶性能的综合提升。

(3) 通过使用碳纳米管补强的四丙氟橡胶制成的组块密封成功实现了 204 °C、10 000 psi 的超高温高压气密，达到了在超高温高压油气田的使用要求，具

有实际工程应用价值。

参考文献：

- [1] 车家琪, 王早祥, 张砚雯, 等. 致密砂岩气田插入模块密封的设计分析与优化 [C]. 国际石油石化技术会议, 2019.
- [2] 吴赛赛. 模块密封结构优选与优化 [D]. 中国石油大学 (华东) 2018.
- [3] 程文佳, 徐凤祥, 高彦才, 等. 模块密封关键技术与试验研究 [J]. 石油机械, 2018,46(01),56-60.
- [4] 左凯, 鞠少栋, 马认琦, 等. 海上完井防砂模块密封密封性能研究 [J]. 钻采工艺, 2014,37(3),71-74.
- [5] 孙永涛, 卢道胜, 刘练, 等. 氟橡胶纳米复合材料的应用进展 [J]. 中国塑料, 2022,36(12),167-174.
- [6] 高江珊. 碳纳米管 / 橡胶复合材料的性能研究 [D]. 青岛科技大学, 2017.
- [7] 董社霞, 葛垣, 刘明泰, 等. 碳纳米管 / 炭黑增强四丙氟橡胶复合材料的性能 [J]. 弹性体, 2022,32(04),47-51.

Development of ultra high temperature and high pressure completion block seals

Chen Tongxiao

(CNOOC Energy Development Co. LTD., Tianjin 300450, China)

Abstract: As an important tool for maintaining wellbore integrity and achieving layered exploitation of underground resources in well completion engineering, the reliability and stability of block sealing work are self-evident. In ultra-high temperature and high pressure oil and gas fields, higher requirements are placed on the temperature and pressure resistance of block seals, and there is little research in this area in China. This article develops multiple size series of well completion block sealing tools through the development of new high-temperature resistant airtight materials, the design of block sealing structures, and the combination of structural simulation and experiments. This series of tools has a temperature resistance of 204 °C and a pressure resistance of 10000 psi, providing domestic tool support for the development of ultra-high temperature and high pressure oil and gas fields in China.

Key words: ultra-high temperature and high pressure; oil and gas fields; completion tools; block sealing

(R-03)

《橡塑技术与装备》投稿邮箱: crte@chinarppte.com

欢迎投稿, 欢迎订阅, 欢迎惠登广告