◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2019111

极地钻井关键设备橡胶密封材料的优选

陈远鹏， 王志远， 孙宝江， 陈 野， 郑凯波

（中国石油大学（华东）石油工程学院，山东青岛 266580）

摘 要：极地的低温环境会使橡胶逐渐变硬甚至玻璃化从而丧失原有的弹性，易导致钻井泵、防喷器等关键钻井设备出现密封失效问题，影响正常生产并带来安全隐患。因此，需要对极地钻井关键设备所用橡胶密封材料进行优选。按照国家标准 GB/T 528—2009 和 GB/T 7759.2—2014，在 20～–50 ℃温度环境下对橡胶材料进行了单轴拉伸和压缩永久变形试验，将试验数据与多种常见超弹性本构模型进行拟合得到了模型参数，分析了这些本构模型在低温条件下的适用性；利用有限元分析软件 ABAQUS，模拟分析了–45 ℃温度下处于工作状态的 O 形橡胶密封圈的密封性能，找出了设备在低温条件下容易发生密封失效的位置。分析认为，在低温、小变形条件下，Polynomial（N=2）模型和 Ogden（N=3）模型能更准确地描述橡胶的力学性能；硅橡胶、气相胶、丁腈橡胶在极地环境（–45 ℃）下依然保持优越的密封性能，可以作为极地钻井关键设备用橡胶密封材料。低温下超弹性本构模型的分析和橡胶密封材料的优选，可为我国后续极地钻井提供理论指导与支持。

关键词：极地钻井；低温；橡胶；拉伸试验；压缩永久变形；超弹性本构模型

中图分类号：TE28^{+}1 **文献标志码：**A **文章编号：**1001–0890（2020）01–0054–07

The Optimization of Rubber Sealing Materials for Key Equipment in Polar Drilling

CHEN Yuanpeng, WANG Zhiyuan, SUN Baojiang, CHEN Ye, ZHENG Kaibo

(*School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum* (*East China*)*, Qingdao, Shandong,* 266580*, China*)

Abstract: The unique low temperature environment of polar drilling hardens rubber gradually to the point of even vitrifying it so it loses its original elasticity. This can easily cause the sealing failure of key drilling equipment, such as mud pump and BOP, which affects normal production and brings about potential safety risks. Therefore, it is necessary to optimize the rubber sealing materials used in the key equipment for polar drilling. According to the National Standards GB/T 528—2009 and GB/T 7759.2—2014, the rubber materials were subjected to uniaxial tension and compression permanent deformation tests at the temperature of 20～–50 °C, and the test data and the hyper-elastic constitutive models of several common rubbers were fitted to obtain the model parameters, so as to analyze the applicability of these constitutive models under low temperature conditions. The sealing performance of rubber O-ring at –45 °C was simulated and analyzed by using ABAQUS finite element software, and found the location of the seal failure which is easy to occur at low temperature. According to the analysis, Polynomial (N=2) model and Ogden (N=3) model can accurately describe the mechanical properties of rubber under low temperature and small deformation conditions. Silicone rubber, gas rubber and nitrile rubber can still maintain superior sealing performance under polar environments (–45 °C), so they can be used as the rubber sealing materials for key equipment of polar drilling. The analysis of rubber super-elastic constitutive model at low temperature and the optimization of rubber sealing materials can provide theoretical guidance and support for the future polar drilling of China.

Key words: polar drilling; low temperature; rubber; tensile test; compression permanent deformation; super-elastic constitutive model

随着油气资源供应趋于紧张，极地（目前仅指北极）油气的勘探开发越来越受到重视。按照文献 [1] 的统计，北极共发现油气田 463 个，待发现原油储量 120×10^{8} t，天然气资源 47×10^{12} m^{3}，油气储量占未来可采储量的 30%。我国“十三五”规划纲要要求深入开展极地大洋科学考察，同时“一带一路”促进

收稿日期：2019–04–22；**改回日期：**2019–10–09。

作者简介：陈远鹏（1993—），男，江西赣州人，2016 年毕业于中国石油大学（华东）船舶与海洋工程专业，2019 年获中国石油大学（华东）石油与天然气工程专业硕士学位，主要从事极地低温钻井密封材料的优选工作。E-mail: 18954238961@163.com。

基金项目：国家重点研发计划项目“极地冰区钻井防寒工艺技术研究”（编号：2016YFC0303408）资助。

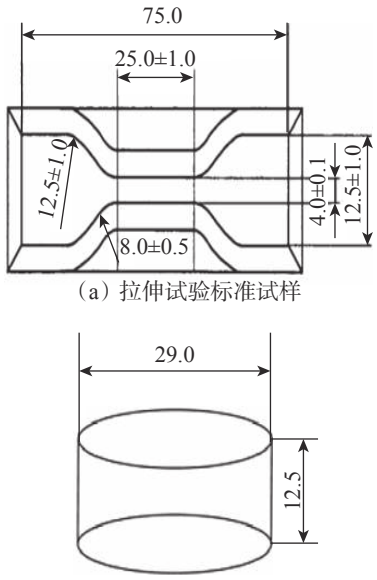
了中俄油气合作，未来我国将更多地参与北极的开发[2]。但北极地区自然环境恶劣，特别是低温环境（极限工作温度可达–45 ℃）给钻井带来了诸多挑战[3]。其中，低温环境对橡胶的力学性能影响很大，在低温状态下橡胶逐渐变硬，严重时出现玻璃化，使其丧失使用价值[4]；另外，高压钻井液经常刺坏钻井泵阀盖发生喷射泄漏，停机维修钻井泵，就会延误施工工期[5]，而当前没有可靠的极地钻井设备的橡胶密封材料优选方案。为此，笔者按照标准《硫化橡胶或热塑性橡胶　拉伸应力应变性能的测定》（GB/T 528—2009）和《硫化橡胶或热塑性橡胶　压缩永久变形的测定 第 2 部分：在低温条件下》（GB/T 7759.2—2014），在 20～–50 ℃ 温度下对橡胶材料进行了单轴拉伸和压缩永久变形试验，将试验数据与多种超弹性本构模型进行拟合，得到了模型参数，同时采用 ABAQUS 模拟分析了极地钻井设备 O 形密封圈的密封情况，综合考虑极地低温钻井工况和橡胶低温条件下的拉伸强度、拉断伸长率和压缩永久变形，优选出了硅橡胶、气相胶和丁腈橡胶 3 种密封材料。

1　低温下橡胶材料拉伸压缩试验

硅橡胶、三元乙丙橡胶、丁腈橡胶、丁苯橡胶和气相胶是使用最多、低温性能较为优异的橡胶。按照国家标准 GB/T 528—2009 和 GB/T 7759.2—2014 的要求，在 20～–50 ℃ 温度下对上述橡胶材料进行了单轴轴向拉伸和压缩永久变形试验。拉伸试验所采用的哑铃状标准试样和压缩试验所采用的圆柱体标准试样如图 1 所示（图 1 中，数值单位为 mm）。

在万能拉力试验机（温控箱）上进行单轴轴向拉伸试验，试验中夹持器移动速度为 500 mm/min，连续监测力和位移的变化值，得到相关应力与应变、力与位移试验数据。在压缩装置上进行压缩永久变形试验，试验中压缩板均匀靠拢直到达到所选压缩高度，然后将装好试样的压缩装置立即放入已达规定试验温度的低温箱中，得到变形的尺寸与原来的尺寸数据。分别改变试验温度至 20，–30，–35，–40，–45 和–50 ℃，重复进行上述拉伸和压缩试验，得到了不同温度下各橡胶材料的拉伸强度、拉断伸长率和压力释放 15 min 后的压缩永久变形率，结果如图 2、图 3 和图 4 所示。

从图 2—图 4 可以看出，在 20～–50 ℃ 范围内，气相胶、硅像胶和丁苯橡胶随着温度降低拉伸强度变化不大；硅像胶、气相胶和丁腈橡胶随着温度降



（a）拉伸试验标准试样

（b）压缩试验标准试样

图 1　橡胶材料拉伸和压缩试验标准试样

Fig. 1　Standard sample for tensile and compression test of rubber material

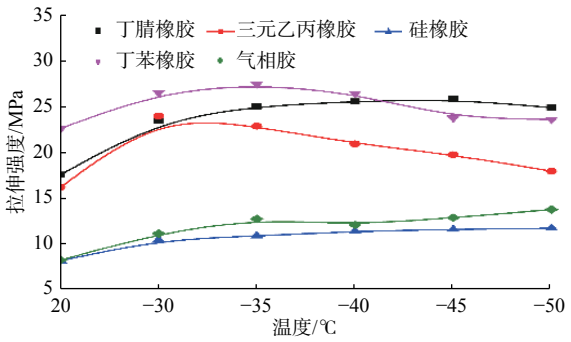


图 2　不同温度下各橡胶材料的拉伸强度

Fig. 2　Tensile strengths of each rubber material at different temperatures

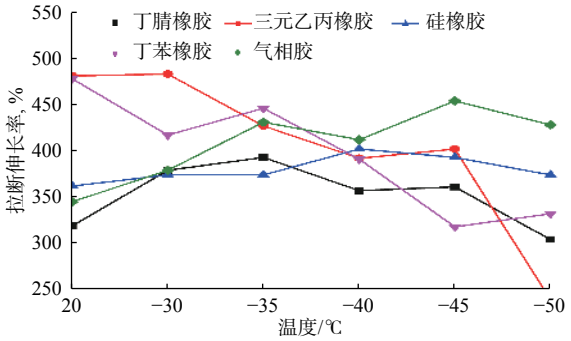


图 3　不同温度下各橡胶材料的拉断伸长率

Fig. 3　Elongation at break of each rubber material at different temperatures

低拉断伸长率变化不大；硅橡胶、丁腈橡胶和气相胶在压力释放 15 min 后的压缩永久变形率随着温

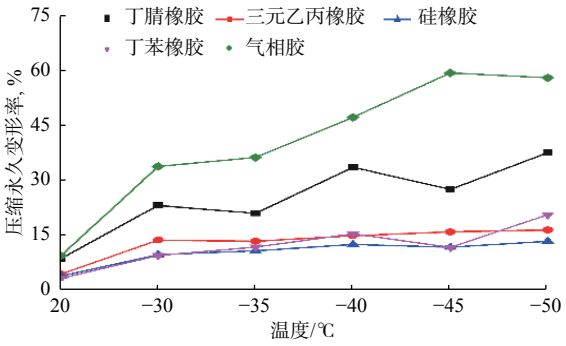


图 4　不同温度下各橡胶材料压力释放 15 min 后的压缩永久变形率

Fig. 4　Compression permanent deformation rate of each rubber material after 15 min of pressure releasing at different temperatures

度的降低变化不大。

橡胶的密封性能取决于其拉伸和压缩形变后的恢复程度。因此，结合上述试验结果，考虑极地低温钻井工况，认为硅橡胶、气相胶和丁腈橡胶的力学性能受温度影响相对较小，在环境温度−45 ℃下依然保持较好的弹性力学性能，能满足极地低温钻井设备的密封要求。

2　本构模型及其与试验数据的拟合

橡胶是一种各向同性、难压缩的超弹性材料，在工程应用中，橡胶材料玻璃化转变温度一般为−45～−60 ℃，北极地区的环境温度完全可以达到该范围[6]。随着温度降低，橡胶材料良好的弹性会逐渐减弱甚至完全丧失，导致其使用价值受到很大影响[7]。选取适合的超弹性本构模型分析研究橡胶材料及其制品在低温状态下的力学性能，既具有理论意义又有实用价值。为此，介绍了 5 种常见的超弹性本构模型，并将其与低温下橡胶拉伸试验数据拟合，优选出了适用于北极低温条件的本构模型。

2.1　常见本构模型

2.1.1　Ogden 本构模型

Ogden 模型的表达式为[8]：

$$W=\sum_{j=1}^{N}\frac{2\mu_j}{\alpha_j}(\lambda_1^2+\lambda_2^2+\lambda_3^2-3) \tag{1}$$

式中：W 为应变能函数；α_j, μ_j 为材料常数；λ_1, λ_2 和 λ_3 为 3 个主伸长比；N 为多项式的阶数。

Ogden 模型的精确度与阶数有关，精确度随阶数增大而提高，但是阶数过大又容易导致模型不收敛，综合考虑取 N=3 较为合适[8]。与其他模型相比，Ogden 模型精度较高。

2.1.2　Polynomial 本构模型

Polynomial（多项式）本构模型的表达式为[9]：

$$W=\sum_{i+j=1}^{N}C_{ij}(I_1-3)^i(I_2-3)^j+\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{D_i}(J-3)^{2i} \tag{2}$$

式中：C_{ij} 为橡胶特性参数，$i+j$=1，即 i=0 或 1 且 j=1 或 0；I_1, I_2 为 Cauchy-Green 变形张量的第一和第二基本不变量函数；D_i 决定材料是否可压缩；J 为橡胶变形后与变形前的体积比，假设橡胶材料不可压缩，取 J=1，故式中第 2 项为 0[9]。

2.1.3　Redeced Polynomial 本构模型

Redeced Polynomial（减缩多项式）本构模型的表达式为[9]：

$$W=\sum_{i=1}^{N}C_{i0}(I_1-3)^i+\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{D_i}(J-1)^{2i} \tag{3}$$

当 N=1 时，即为 Neo Hooke 本构模型，其应变能密度函数为：

$$W=C_{10}(I_1-3)+\frac{1}{D}(J-1)^2 \tag{4}$$

当 N=3 时，即为 Yeoh 本构模型，其应变能密度函数为：

$$W=\sum_{i=1}^{3}C_{i0}(I_1-3)^i+\sum_{i=1}^{3}\frac{1}{D_k}(J-1)^{2i} \tag{5}$$

式中：N, C_{i0} 和 D_k 由材料参数确定；对于不可压缩材料，J=1。

Neo Hooke 模型只有一个参数，比较简单，是最简单的超弹性材料本构模型，仅通过少量试验数据就能得到模型参数，但是其结果的精确度较差；Yeoh 模型适用于材料在各种载荷下的应变分析，适用范围较广，即使在橡胶大变形时仍旧有较好的精确度，在实际分析中应用较为普遍[9]。

2.1.4　Vander Waals 本构模型

Vander Waals 本构模型的应变能函数为[9−11]：

$$W=\mu\left\{-(\lambda_m{}^2-3)[\ln(1-\eta)+\eta]-\frac{2}{3}\alpha\left[\frac{(1-\beta)I_1+\beta I_2-3}{2}\right]^{\frac{3}{2}}\right\}+\frac{1}{D}\left(\frac{J^2-1}{2}-\ln J\right) \tag{6}$$

其中

$$\eta=\sqrt{\frac{(1-\beta)I_1+\beta I_2-3}{\lambda_m{}^2-3}} \tag{7}$$

式中：μ 为初始剪切量；α 为一个独立参数；λ_m 为极限伸长比；β 为不变的混合参数；D 为材料的不可压缩

参数。

Vander Waals 本构模型适合在具有较全面的试验数据和材料参数情况下使用[9–11]。

2.2　本构模型与试验数据的拟合

将橡胶伸长量与原长的比值定义为名义应变（工程应变）。它可以用来度量变形，也可用于定义应变势能。名义应变的表达式为：

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \tag{8}$$

式中：ε 为名义应变；L_0 为橡胶原长，mm；ΔL 为橡胶的伸长量，mm。

将橡胶试件承受的载荷与橡胶原始截面面积的比值定义为名义应力（工程应力），其表达式为：

$$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{F}{HT} \tag{9}$$

式中：σ 为名义应力，MPa；F 为载荷，N；A_0 为橡胶试件原始截面面积，mm^2；H 为橡胶试件的宽度，mm；T 为橡胶试件的厚度，mm。

以名义应变为横坐标、名义应力为纵坐标，则 Neo Hooke、Yeoh、Polynomial（N=2）、Ogden（N=3）和 Vander Waals 等 5 种模型与低温下橡胶拉伸试验数据（红色）的拟合结果如图 5 所示。

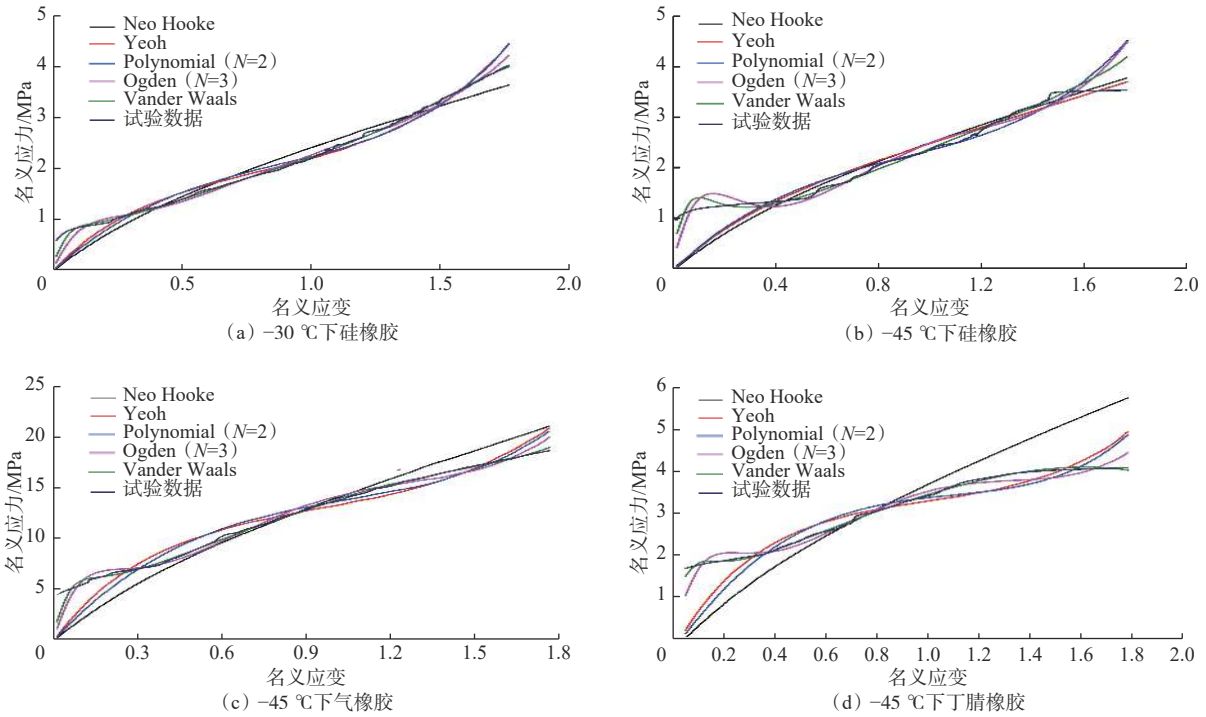


图 5　低温下各橡胶材料由不同本构模型得到的名义应力–名义应变关系曲线

Fig.5　Nominal stress and strain curve obtained by different constitutive models for each rubber material at low temperature

由图 5 可知，在低温、小变形条件下，Polynomial（N=2）模型和 Ogden（N=3）模型与橡胶试验数据的拟合效果较好，且 Ogden（N=3）模型比 Polynomial（N=2）模型的误差更小；Neo Hooke、Yeoh 和 Vander Waals 模型与试验中间数据拟合较好，而在橡胶刚拉伸和快拉断时均存在很大误差，不能很好地描述其力学性能；随着温度的降低，橡胶材料的弹性受到不同程度的影响，所有模型的误差都增大，即模型在低温下的适用性变差。

Ogden（N=3）模型和 Polynomial（N=2）模型描述低温下橡胶的力学性能误差较小，为了准确、具体地描述低温下橡胶性能，并方便进行橡胶密封情况模拟，拟合得到了不同温度下各橡胶材料的 Polynomial（N=2）模型和 Ogden（N=3）模型的模型参数，见表 1。

3　O 形橡胶密封圈的模拟分析

O 形密封圈结构简单、密封可靠，被广泛用于各种密封结构，是钻井泵、防喷器等关键钻井设备的常用配件。使用 O 形密封圈时，将其安装于密封沟槽，通过上下法兰的预压力使其变形而产生回弹力实现密封。为了分析极地钻井工况下橡胶 O 形密封圈的密封性能，并找出密封失效的位置，利用有

表 1　不同温度下 Polynomial（*N*=2）模型和 Ogden（*N*=3）模型的模型参数

Table 1　Model parameters of Polynomial (*N*=2) model and Ogden (*N*=3) model at different temperatures

温度/℃	橡胶类型	Polynomial(*N*=2)模型						Ogden(*N*=3)模型						
		模型参数					误差, %	模型参数						误差, %
		C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}		α_1	α_2	α_3	μ_1	μ_2	μ_3	
–30	硅橡胶	–9.867	12.232	0.78	–3.626	7.535	<7	1.309	–7.85	15.708	1.782	12.500	–25.000	<5
	气相胶	–23.920	29.062	1.45	–7.082	16.190	<8	2.082	–17.40	34.994	0.427	12.500	–25.000	<7
	丁腈橡胶	–32.820	39.365	2.52	–11.780	25.040	<6	3.763	–17.10	34.234	–6.964	12.500	–25.000	<5
–35	硅橡胶	–18.030	21.635	1.67	–7.767	14.980	<8	1.532	–10.60	21.250	1.682	12.500	–24.999	<6
	气相胶	–26.580	31.910	2.23	–10.620	21.160	<9	2.182	–16.90	33.969	1.122	12.500	–25.000	<7
	丁腈橡胶	–40.450	49.291	4.37	–20.020	36.850	<7	5.375	–21.70	43.498	1.888	12.500	–25.000	<6
–40	硅橡胶	–10.390	12.762	0.73	–3.538	7.770	<9	1.772	–4.61	9.218	–6.140	11.041	–22.082	<7
	气相胶	–32.860	39.851	2.34	–11.130	23.760	<9	2.670	–21.30	42.773	1.123	11.351	–22.702	<8
	丁腈橡胶	–60.650	74.301	5.17	–24.910	50.070	<8	7.804	–36.80	73.795	1.845	12.500	–24.999	<7
–45	硅橡胶	–27.550	32.531	2.10	–10.060	1.123	<10	1.123	–17.00	34.140	2.556	12.500	–25.000	<9
	气相胶	–28.630	34.667	1.91	–9.485	20.820	<9	2.383	–20.60	41.372	1.502	12.461	–24.923	<8
	丁腈橡胶	–93.300	112.320	7.38	–35.790	73.730	<9	7.952	–57.30	114.680	2.023	12.500	–25.000	<9

限元分析软件 ABAQUS，分别对–45 ℃ 温度下的硅橡胶、三元乙丙橡胶、丁腈橡胶、丁苯橡胶和气相胶 O 形密封圈的性能进行了模拟。

由于 O 形密封圈密封结构模型及其受力都是轴对称的，所以对 O 形密封圈进行有限元分析时，在 ABAQUS 软件中建立了密封圈、上下法兰的二维轴对称模型[12–13]。以硅橡胶 O 形密封圈（内径为 28.0 mm，截面直径为 3.55 mm）为例，模拟分析不同工况下密封圈的等效应力，因为等效应力最大的地方就是密封圈最容易出现损伤破坏的位置[14]，模拟分析结果如图 6 所示。

由图 6 可知，在–45 ℃ 温度下硅橡胶密封圈没有挤入密封间隙，依然保持良好的密封能力。

对比分析硅橡胶、三元乙丙橡胶、丁腈橡胶、丁苯橡胶和气相胶 O 形密封圈密封性能的模拟结果，发现硅橡胶、气相胶和丁腈橡胶的密封性能相对较好，模拟结果与拉伸、压缩试验结果一致。

进一步分析模拟结果发现：在环境温度–45 ℃ 条件下，压缩率一定时，随着工作压力升高，O 形圈最大应力增大，应力峰区位置随着压力增大也在变化；密封圈在压力作用下容易被挤入密封间隙，应力峰区位置随着压力升高向密封圈被挤入的位置移动，这说明容易发生损伤破坏的位置在密封圈和密封槽间隙部位，因此，工作压力较高时，需要在密封圈背压一侧安装挡圈，防止密封失效。

各种橡胶材料 O 形密封圈的模拟研究还发现，在环境温度–45 ℃ 条件下，密封压力一定时，随着压缩率的增加，应力峰区位置从哑铃状试样两侧向中间区域延伸，应力大小也呈现增大趋势，因此压缩率较大时容易造成应力松弛，导致 O 形密封圈永久变形，从而失去密封能力，因此在保证有效密封的条件下应选择适当的预压缩量，O 形密封圈的静密封压缩率一般取 10%～20%。

4　结　论

1）在低温、小变形条件下，Polynomial（*N*=2）模型和 Ogden（*N*=3）模型能更准确地描述橡胶力学性能，其中 Ogden（*N*=3）模型比 Polynomial（*N*=2）模型的误差更小。

2）通过试验和模拟，从拉伸强度、拉断伸长率、压缩永久变形和极地低温钻井工况等方面综合评价，认为硅橡胶、气相胶和丁腈橡胶的力学性能受温度影响相对较小，在环境温度–45 ℃ 下依然能保持较好的弹性力学性能，能满足极地钻井设备的密封要求。

3）在环境温度–45 ℃ 条件下，压缩率一定时，O 形圈最大应力随着工作压力的升高而增大，应

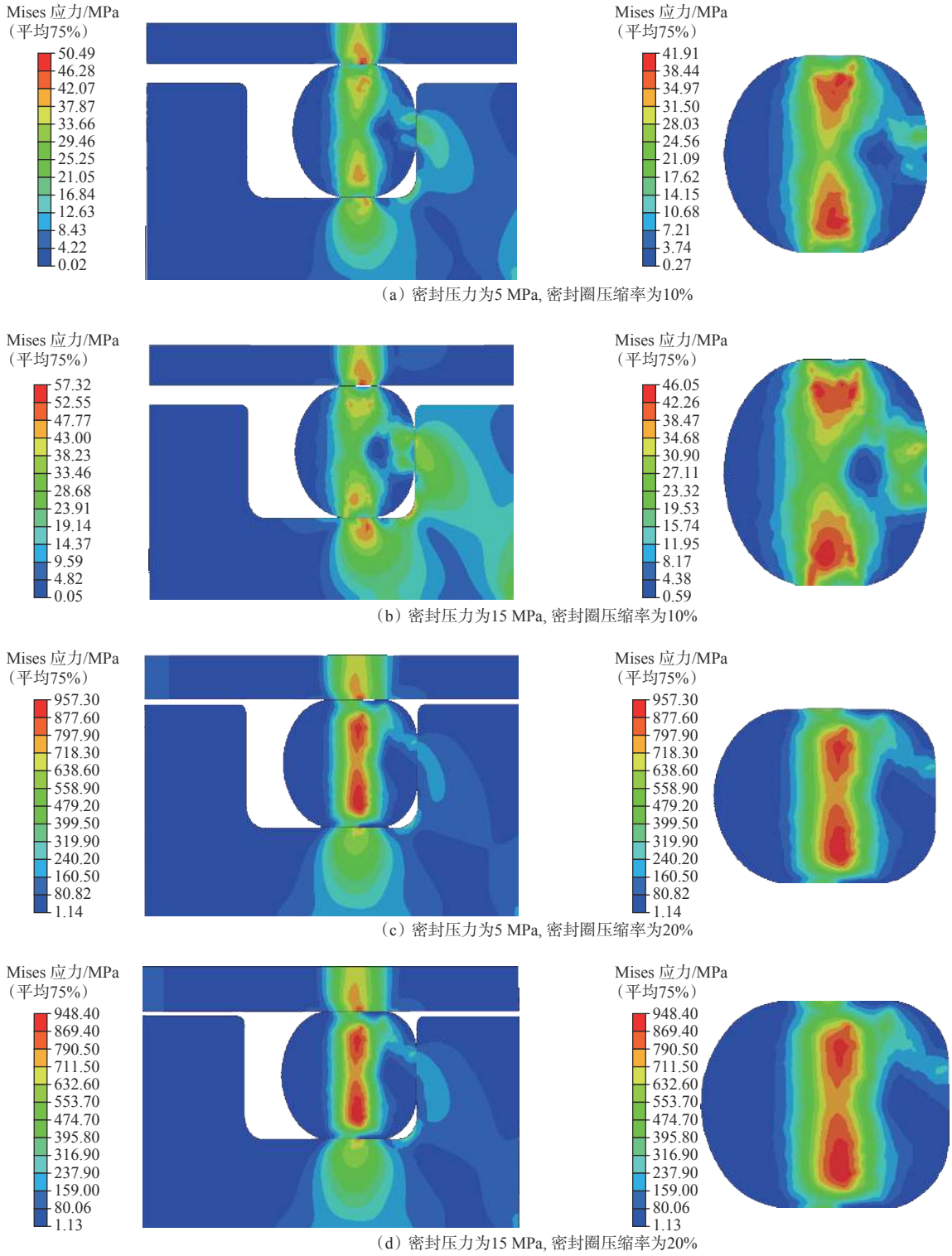


图 6　–45 °C 温度下硅橡胶 O 形密封圈的应力分布云图

Fig.6　Stress distribution cloud map of a silicone rubber O-ring at –45 °C

力峰区位置随着压力升高也在变化，密封圈和密封槽间隙部位容易发生损伤破坏，在工作压力较高时，需要在密封圈背压一侧安装挡圈，防止密封失效。

4）在环境温度–45 ℃ 条件下，压力一定时，随着压缩率的增大应力峰区位置从哑铃状两侧向中间区域延伸，应力大小也呈现增大趋势，压缩率较大时容易发生压缩永久变形，从而失去密封能力，在保证有效密封的条件下应选择适当的预压缩量，O 形圈静密封压缩率一般取 10%～20%。

参　考　文　献

References

[1] USGS. Circum-Arctic resource appraisal: estimates of undiscovered oil and gas north of the Arctic Circle[R]. USGS Fact Sheet 2008-3049, 2008.

[2] 钟琳曼. “一带一路”背景下中俄油气合作机遇分析 [J]. 江汉石油职工大学学报, 2017, 30(4): 86–89.
ZHONG Linman. Opportunities for Sino-Russia oil & gas cooperation at the background of the Belt and Road Initiative[J]. Journal of Jianghan Petroleum University of Staff and Workers, 2017, 30(4): 86–89.

[3] 杨进, 路保平. 极地冷海钻井技术挑战及关键技术 [J]. 石油钻探技术, 2017, 45(5): 1–7.
YANG Jin, LU Baoping. The challenges and key technologies of drilling in the cold water area of the Arctic[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(5): 1–7.

[4] 张文博. 阀门密封材料低温特性实验研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2012.
ZHANG Wenbo. Experimental study on low temperature characteristics of valve sealing materials[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012.

[5] 张卫军, 杨向前, 刘洪亮, 等. 钻井泵阀盖金属密封失效原因与维修方法 [J]. 石油矿场机械, 2008, 37(4): 86–87.
ZHANG Weijun, YANG Xiangqian, LIU Hongliang, et al. Failure cause of valve covers metal sealing of the drilling pump and its maintenance[J]. Oil Field Equipment, 2008, 37(4): 86–87.

[6] PUCCI E, SACCOMANDI G. A note on the agent model for rubber-like materials[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2002, 75(5): 839–852.

[7] 严永明. 低温环境下橡胶材料超弹性本构模型探究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
YAN Yongming. Study on hyperelastic constitutive modle of rubber materials under low temperture environment[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016.

[8] OGDEN R W. Nearly isotropic elastic deformations: application to rubberlike solids[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1978, 26(1): 37–57.

[9] 王国权, 刘萌, 姚艳春, 等. 不同本构模型对橡胶制品有限元法适应性研究 [J]. 力学与实践, 2013, 35(4): 40–47.
WANG Guoquan, LIU Meng, YAO Yanchun, et al. Application of different constitutive models in the nonlinear finite element method for rubber parts[J]. Mechanics in Engineering, 2013, 35(4): 40–47.

[10] 朱艳峰, 刘锋, 黄小清, 等. 橡胶材料的本构模型 [J]. 橡胶工业, 2006, 53(2): 119–125.
ZHU Yanfeng, LIU Feng, HUANG Xiaoqing, et al. Constitutive model of rubber material[J]. Rubber industry, 2006, 53(2): 119–125.

[11] 于海富, 李凡珠, 杨海波, 等. 橡胶材料非线性高弹-粘弹性本构模型 [J]. 橡胶工业, 2017, 64(12): 719–723.
YU Haifu, LI Fanzhu, YANG Haibo, et al. An nonlinear visco-hyperelastic constitutive model for carbon black filled natural rubber materials[J]. Rubber Industry, 2017, 64(12): 719–723.

[12] 钟亮, 赵俊利, 范社卫. 基于 ABAQUS 的 O 形密封圈密封性能仿真研究 [J]. 煤矿机械, 2014, 35(3): 52–54.
ZHONG Liang, ZHAO Junli, FAN Shewei. Simulation study on O-sealing sealing performance based on ABAQUS software[J]. Coal Mine Machinery, 2014, 35(3): 52–54.

[13] 谭晶, 杨卫民, 丁玉梅, 等. O 形橡胶密封圈密封性能的有限元分析 [J]. 润滑与密封, 2006, 31(9): 65–69.
TAN Jing, YANG Weimin, DING Yumei, et al. Finite element analysis of the sealing performance of O-ring seal structure[J]. Lubrication Engineering, 2006, 31(9): 65–69.

[14] 温纪宏, 陈国明, 畅元江, 等. 隔水管接头 O 形密封圈密封性能分析 [J]. 石油机械, 2013, 41(1): 45–48.
WEN Jihong, CHEN Guoming, CHANG Yuanjiang, et al. Sealability analysis of the riser joint O-ring[J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(1): 45–48.

[编辑　令文学]