

# 煤矿用浓缩液与橡胶相容性研究

白飞飞<sup>1,2</sup>,王玉超<sup>1,2</sup>,侯建涛<sup>1,2</sup>,赵昕楠<sup>1,2</sup>

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 矿用油品分院,北京 100013; 2. 煤炭资源开采与环境保护国家重点实验室,北京 100013)

**摘要:**为解决因橡胶密封失效而导致煤矿液压支架立柱和千斤顶泄漏的问题,开展了煤矿用浓缩液与橡胶相容性的研究。重点考察了不同种类添加剂的润滑性及其对丁腈橡胶和聚氨酯橡胶的影响。通过测试浸泡后橡胶的体积、硬度、拉伸强度和拉断伸长率,来判断浓缩液与橡胶材料的相容性。试验结果表明:复配的改性植物油Ⅰ和Ⅱ有良好的协同润滑性,质量分数为1%时,最大无卡咬负荷 $P_B$ 值达745 N;浓缩液主要添加剂对丁腈橡胶的影响大于对聚氨酯橡胶的影响;改性植物油Ⅰ和三乙醇胺对橡胶相容性的影响较大,原因在于它们含的极性基团较多,对橡胶的渗透能力较强。

**关键词:**浓缩液;丁腈橡胶;聚氨酯橡胶;相容性

中图分类号:TD35 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2016)03-0106-06

## Study on compatibility between mine concentrated liquid and rubber

Bai Feifei<sup>1,2</sup>, Wang Yuchao<sup>1,2</sup>, Hou Jiantao<sup>1,2</sup>, Zhao Xinnan<sup>1,2</sup>

(1. Mine Oil Products Branch, Coal Science and Technology Research Institute Company Limited, Beijing 100013, China;

2. National Key Lab of Coal Resource Mining and Environment Protection, Beijing 100013, China)

**Abstract:** In order to solve leakage problems of hydraulic powered support legs and hydraulic jacks caused by failure of rubber seal in the coal mine, a study on compatibility between the mine concentrated liquid and the rubber was conducted and the paper investigated lubricity of different type additives and the influences to nitrile butadiene rubber and polyurethane rubber. With test and measurement of the volume, hardness, tensile strength and breaking elongation rate of rubber after the immersion, the compatibility between the mine concentrated liquid and the rubber material was judged. The test results showed that composition modified plant oil I and II both had an excellent collaborative lubricity. When the quality fraction was 1%,  $P_B$  value of the max nonseizure load was 745 N. The main additives of the concentrated liquid would have higher influence to the nitrile butadiene rubber than the polyurethane rubber. The modified plant oil I and triethanolamine would be highly affected to the rubber compatibility, because both of them had many polar groups and would have high permeability to the rubber.

**Key words:** concentrated liquid; nitrile butadiene rubber; polyurethane rubber; compatibility

## 0 引言

煤矿井下液压支架系统常见的跑冒滴漏现象,很大部分与设备的密封性不好有关。密封的好坏除了与密封件自身的材质、密封件的安装工艺<sup>[1]</sup>、设备加工接触面的粗糙度和加工时设备中残存的金属碎屑等因素有关外<sup>[2]</sup>,还与液压传动介质的润滑性能密切相关<sup>[3]</sup>。煤矿用密封圈的材质具有多样性,有聚氨酯<sup>[4]</sup>、丁腈橡胶、聚四氟乙烯、氟橡胶<sup>[5]</sup>等,

其中聚氨酯和丁腈橡胶为液压支架系统的主密封材料。因此,笔者特选取了在煤矿应用范围广、使用频率高的丁腈橡胶和聚氨酯橡胶进行试验<sup>[6]</sup>。浓缩液的润滑性好,设备接触处的密封件就不容易因摩擦力过大而撕裂或磨损<sup>[7]</sup>,密封件能更好地起到密封性能,确保液压传动压力的准确性,保障支架动作的灵活和精准性能<sup>[5]</sup>。浓缩液润滑性与加入到其中的润滑剂有很大关系;润滑添加剂有矿物油类、改性植物油类、合成酯类和纳米尺度的自润滑石墨

收稿日期:2015-09-22;责任编辑:赵瑞 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2016.03.021

基金项目:煤炭科学研究总院基础研究基金资助项目(2012JC10)

作者简介:白飞飞(1986—),男,安徽亳州人,硕士。Tel:18001163926 E-mail:bjxbff999888@163.com

引用格式:白飞飞,王玉超,侯建涛,等.煤矿用浓缩液与橡胶相容性研究[J].煤炭科学技术,2016,44(3):106-111.

Bai Feifei, Wang Yuchao, Hou Jiantao, et al. Study on compatibility between mine concentrated liquid and rubber [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 106-111.

烯<sup>[8]</sup>等; 为了提高浓缩液的环境友好性能, 浓缩液的润滑添加剂通常选用容易生物降解的改性植物油类<sup>[9-12]</sup>; 通常采用测定润滑剂的最大无卡咬负荷  $P_B$  来衡量添加剂的润滑性; 在同等条件下, 添加剂的  $P_B$  值越高, 其润滑性就越好。对煤矿液压支架而言, 矿用浓缩液主要起润滑、防锈和防腐蚀的作用, 同时兼有一定的防冻性能; 在配方中起上述作用的添加剂含量也相对大些, 因此笔者侧重考察润滑剂的润滑性及润滑剂、防锈剂和防腐蚀添加剂与橡胶材料的相容性。通过浓缩液对橡胶材料体积变化率、硬度变化、拉伸强度和拉断伸长率<sup>[5, 13-14]</sup>的影响, 可判断出浓缩液与橡胶材料是否相容。

## 1 试验

### 1.1 试验设备及材料

试验所用仪器设备如下: WGP-400 隔水式电热恒温培养箱控温范围 5~80 °C; GZX-9076 电热鼓风干燥箱控温范围 5~300 °C; AL204 分析天平最大称量 210 g, 最小称量 0.01 g, 天平检定分度  $e = 0.001$  g, 实际分度  $d = 0.0001$  g; XHB-50 标准橡胶硬度计测试范围 28~100 IRHD; MS-10J 四球摩擦试验机轴向加载范围 98~9 800 N, 标准钢球直径 12.7 mm; WDW-100 微机控制电子万能试验机试验力测量范围 2~100 kN。

橡胶密封件的选取与接触面粗糙程度、周围温度和压力有关, 接触面粗糙部位选择硬度低的密封材料, 压力高的部位采用硬度高的密封材料, 可以避免密封件过度变形和被挤出, 硬度具有随使用温度升高而降低的趋势, 所以实际选用时, 宜选用适用温度范围宽的橡胶材料<sup>[15]</sup>; 动态密封尤其重视耐磨性的考察, 一般材料的硬度越高耐磨性越好。

橡胶密封件的拉伸强度具有随温度升高而下降的特点, 所以选择密封件时, 必须考虑其耐温范围和高温高压下的机械强度。拉伸强度过低, 橡胶件容易发生应力松弛甚至永久变形, 导致密封失效; 拉伸强度过高, 橡胶件的材质要求和加工工艺都要有显著提高<sup>[15]</sup>。因此, 在进行产品配方调制和选择密封件时, 应对密封材质的综合因素进行考察。

试验所用橡胶材料是根据神东矿区和淮南矿区矿方技术员提供的资料, 参考橡胶和煤矿行业的相关标准, 委托西北橡胶塑料研究设计院定做的试验用密封材料, 试验用橡胶材料参数见表 1。

表 1 试验用橡胶材料参数

Table 1 Rubber materials parameters in the experiment

材料	胶料	胶号	硬度/IRHD	长×宽×高/(mm×mm×mm)	参考标准
聚氨酯橡胶	M614	P95	90	50×25×5	MT 76—2011 GB/T 528—1998
丁腈橡胶	料 3	P907	45	50×25×5	GB/T 2941—2006 GB/T 14832—2008

注: 聚氨酯橡胶和丁腈橡胶均为哑铃状 2 型。

### 1.2 试验过程

1) 用去离子水将添加剂分别配制成质量分数为 1% 的试液, 按 GB/T 3142 润滑剂承载能力测定法(四球法) 的试验方法和步骤, 分别测定试液的  $P_B$  值。

2) 因 MT 76—2011 仅对丁腈橡胶进行考察, 所以优先考察添加剂对丁腈橡胶的影响, 用去离子水将添加剂分别配制成质量分数为 1% 的试液, 按 MT 76—2011 规定的试验方法和步骤, 测定浸泡后橡胶的体积变化。

3) 在添加剂单因素考察的基础上, 调整液压支架浓缩液配方, 以改性植物油 I、改性植物油 II、乙二醇和三乙醇胺为变量, 采用控制单一变量的办法, 配制出不同配方的浓缩液, 再将浓缩液分别配制成质量分数为 5% 的稀释液。考察了上述 4 种添加剂以及配方改进前后的浓缩液, 对橡胶材料拉伸强度和拉断伸长率的影响。

4) 对浸泡前试片的参数进行测定, 按照 GB/T 14832—2008 规定的试验方法和步骤, 测定试件分别在空气中和水中的质量  $m_1$ 、 $m_2$  以及浸泡前试片的硬度  $H_1$ ; 按照 GB/T 528—2009 规定的试验方法和步骤, 测定浸泡前试片的拉伸强度  $T_1$  和拉断伸长率  $L_1$ 。

5) 根据 MT 76—2011 标准的要求, 分别将 2 种不同材质的橡胶试件浸泡在上述配好的稀释液中, 放入(70±2) °C 的恒温箱中持续浸泡 168 h。

6) 浸泡完毕, 取出试件, 对浸泡后试件的参数进行测定, 按 GB/T 14832—2008 规定的试验方法和步骤, 测定试件分别在空气中和水中的质量  $m_3$ 、 $m_4$  以及浸泡后试片的硬度  $H_2$ ; 按照 GB/T 1690—2010 规定的试验方法和步骤, 测定浸泡后试片的拉伸强度  $T_2$  和拉断伸长率  $L_2$ 。

7) 计算体积变化率  $\Delta V_{100}$ 、硬度变化值  $\Delta H$ 、拉伸强度变化率  $\Delta T_{100}$  和拉断伸长率变化率  $\Delta L_{100}$ 。计算式如下:

$$\Delta V_{100} = \frac{(m_3 - m_4) - (m_1 - m_2)}{m_1 - m_2} \times 100\% \quad (1)$$

$$\Delta H = H_2 - H_1 \quad (2)$$

$$\Delta T_{100} = \frac{T_2 - T_1}{T_1} \times 100\% \quad (3)$$

$$\Delta L_{100} = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \times 100\% \quad (4)$$

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 添加剂的润滑性能测试

用去离子水将不同添加剂分别配制成质量分数为1%的试液,并对不同添加剂单独或协同作用下的润滑性进行了比较 $P_B$ 值见表2。

表2 不同添加剂单独或协同作用下的润滑性

Table 2 Lubricity under action of individual or cooperative for different additives

添加剂	结构特点	$P_B/N$
CA5	改性18碳羧酸2	510
CA7	改性18碳羧酸1	647
CA5+CA7(1:2)	—	745
CA5+CA7(1:1)	—	696
CA5+CA7(2:1)	—	745
CA10	改性18碳羧酸3	431
CA13	11碳二元酸酯	196
CA16	12碳二元酸酯	274
CA17	12碳一元酸酯	431
CA19	6碳多元酸酯	196
CA30	8碳一元酸酯	294
CA70	改性18碳酰胺	745
CA80	16碳酰胺	333

注:括号内数据为质量比。

由表2可知,在12个碳原子以上的添加剂具有良好的润滑性,且随着碳原子数的增加,润滑性增强。添加剂CA5(改性植物油II)、CA7(改性植物油I)、CA10和CA70具有较好润滑能力;CA7相对CA5增加了酯基和其他极性基团,润滑成膜能力增强,故其润滑性较CA5好;CA5和CA7具有优异的协同润滑性,该性能与成膜时添加剂分子在接触面的排列顺序有关。比较CA16和CA17的 $P_B$ 值,发现相同碳原子碳链二元酸酯的润滑性低于一元酸酯,原因在于二元酸酯官能团位置分布不当,成膜时空间位阻较大,润滑能力降低。非离子表面活性剂CA80因酰胺键存在,其润滑性较CA17有所下降,可能与酰胺键和酯键形成润滑膜的难易有关,而CA70因其通过化学改性,增加了烷基链,所以其润滑性得到了显著提高。

### 2.2 添加剂单因素对丁腈橡胶的影响

用去离子水将不同添加剂分别配制成质量分数为1%的试液,考察了添加剂单因素对丁腈橡胶的体积变化率的影响,结果见表3。

由表3可知,具有润滑作用的添加剂对丁腈橡胶体积的影响较大,降凝剂、防腐剂和醇胺类缓冲剂对丁腈橡胶体积影响相对较小,如CA11(乙二醇)、CA4、CA25和CA1(三乙醇胺);羧酸酯类添加剂对丁腈橡胶体积的影响较羧酸皂类大;相同碳原子数的二元酸皂类对丁腈橡胶体积的影响较一元酸皂大。添加剂含有的碳原子和亲油性基团数越多,其润滑和防锈效果相对较好,但其对丁腈橡胶体积的

表3 添加剂单因素对丁腈橡胶体积变化率的影响

Table 3 Single additive influence on NBR volume change rate

添加剂	结构特点	作用	$\Delta V_1 / \%$	添加剂	结构特点	作用	$\Delta V_1 / \%$
CA1	醇胺类	缓冲	3.31	CA15	12碳二元酸皂	润滑、乳化	3.34
CA3	6碳多元酸	缓冲	3.92	CA16	12碳二元酸酯	润滑、防锈	2.94
CA4	多元醇1	降凝	3.26	CA17	12碳的一元酸酯	润滑	3.22
CA5	改性18碳羧酸2	润滑、乳化	3.05	CA18	12碳一元酸皂	润滑、乳化	2.04
CA6	18碳一元酸酯	润滑、防锈	5.31	CA19	6碳多元酸酯	防锈	3.14
CA7	改性18碳羧酸1	润滑、防锈	9.30	CA20	8碳羧酸皂	乳化	2.82
CA8	18碳羧酸皂1	润滑、乳化	3.68	CA21	改性12碳二元酸酯	润滑、防锈	3.46
CA9	18碳羧酸皂2	润滑、乳化	2.89	CA22	改性12碳二元酸皂	润滑、乳化	4.26
CA10	改性18碳羧酸3	润滑、乳化、防锈	4.81	CA23	7碳羧酸皂	乳化	4.88
CA11	多元醇2	降凝	3.29	CA24	有机酸盐1	乳化	2.88
CA13	11碳二元酸酯	防锈	3.27	CA25	有机酸盐2	防腐	2.78
CA14	11碳二元酸皂	润滑、乳化	2.89	—	—	—	—

注:  $\Delta V_1$  为丁腈橡胶体积变化率。

影响越大,如CA7和CA6;同为十八碳的CA5、CA8

和CA9具有润滑和乳化的作用,其对丁腈橡胶体积

影响相对较小,原因可能是它们碳链上没有很强的极性基团。在配方调制过程中必须控制好添加剂的用量,类似于CA7对丁腈橡胶相容性影响较大的表面活性剂在配方中添加量不宜过多。

### 2.3 体积变化率

用单一添加剂置换浓缩液基础配方中等量的水进行试验。按照MT 76标准规定的方法和步骤进行测试,图中显示0的浓度对应基础配方中各物质的浓度。

因改性植物油I的溶解度有限,当质量分数超

过10%以后,其在溶液中的分散性受到影响,直接影响产品外观,所以投加含量不再增加。改性植物油II的溶解度较改性植物油I大,其添加量需考虑到整个体系的平衡和现场的水质状况。乙二醇在浓缩液中主要起降凝作用,其溶解度大,添加量随着季节变化而变化。三乙醇胺具有稳定体系和协同防锈的作用,其溶解度大,但综合考虑其他性能和原料成本,所以每种原材料的使用量必须控制在一定范围内。主要原材料质量分数变化对橡胶体积的影响如图1所示。

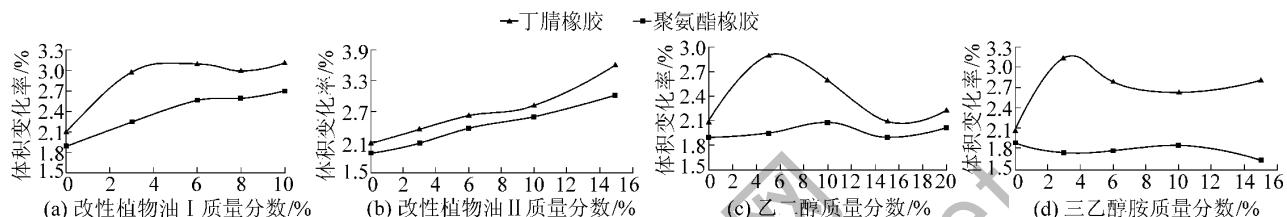


图1 主要原材料质量分数变化对橡胶体积的影响

Fig. 1 Variation of the main raw materials content influence on rubber volume

由图1可知,在研究的4种主要原材料质量分数变化范围内,浸泡后2种橡胶的体积均表现为膨胀,其中对丁腈橡胶的影响较聚氨酯橡胶大,说明了聚氨酯橡胶耐介质渗透的性能要优于丁腈橡胶;图1a和图1b显示橡胶体积变化率基本随着改性植物油I和II质量分数的增高而增大,在植物油I质量分数达到5%以后,体积变化率的增加趋势逐渐变缓;当植物油II的质量分数在0~15%变化时,在10%以前表现为等步调增加,10%以后丁腈橡胶的增长幅度较聚氨酯大;由图1c可知,当乙二醇的质量分数从0~20%变化时,丁腈橡胶的体积变化率呈先增大后减小再增大的趋势,聚氨酯橡胶的体积变化率基本保持稳定,在1.88%上下略微波动;由图1d可知,当三乙醇胺的质量分数从0~15%变化时,丁腈橡胶的体积变化率呈先增大后减小再增大的趋势,聚氨酯橡胶的体积变化率呈先减小后增大再减小的趋势,但整体在1.88%上下略微波动。

由图1可知,在研究的4种主要原材料质量分数变化范围内,2种橡胶的体积膨胀率均符合MT 76—2011的标准规定,即在(70±2)℃的质量分数5%浓缩液稀释液中持续浸泡168 h后,密封件体积膨胀率不大于6%,且不允许收缩。

### 2.4 硬度变化

主要原材料质量分数变化对橡胶硬度的影响如图2所示,由图2可知,在研究的4种主要原材料质量分数变化范围内,浸泡后2种橡胶的硬度均增加,硬度变化均随着各种原材料质量分数的增高而增大,其中对丁腈橡胶的影响较聚氨酯橡胶大,说明聚氨酯橡胶抗变形能力比丁腈橡胶强;图2a、图2b和图2c显示2种橡胶硬度变化的增长幅度基本一致,图2d显示丁腈橡胶硬度变化的增长幅度较聚氨酯橡胶大;图2c和图2d显示随着乙二醇和三乙醇胺质量分数的增加,2种橡胶硬度变化均表现出较好的线性关系。

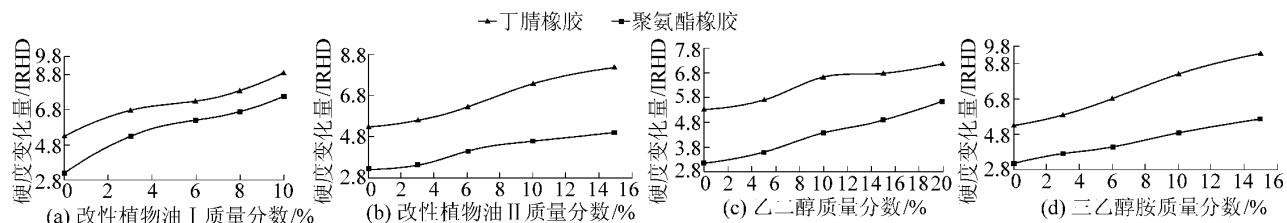


图2 主要原材料质量分数变化对橡胶硬度的影响

Fig. 2 Variation of the main raw materials content influence on rubber hardness

由图2可知,在研究的4种主要原料质量分数变化范围内,聚氨酯橡胶的硬度变化均符合GB 14832—2008标准中硬度变化 $\pm 8$  IRHD的规定;由图2a知,在改性植物油I的质量分数为10%时,丁腈橡胶硬度变化为8.9 IRHD,不符合标准规定;由图2b知,在改性植物油II的质量分数为15%时,丁腈橡胶硬度变化为8.2 IRHD,不符合标准规定;由图2d知,当三乙醇胺的质量分数为10%和15%时,丁腈橡胶硬度变化分别为8.2和9.4 IRHD,不符合标准规定。

比较图2a和图2b可知,在加入相同质量分数的改性植物油I和改性植物油II的条件下,改性植物油I对2种橡胶硬度的影响较改性植物油II大,如同为6%的情况下,改性植物油I对2种橡胶硬度变化的增幅比改性植物油II大1 IRHD左右。从图2可知,当4种主要原料投加含量相同时(如同为10%),对2种橡胶硬度的影响顺序为改性植物油I(聚氨酯7.6 IRHD)>三乙醇胺(聚氨酯4.9 IRHD)>改性植物油II(聚氨酯4.6 IRHD)>乙二醇(聚氨酯4.4 IRHD)。

## 2.5 拉伸强度变化率

按照GB/T 528—2009规定的试验方法和步骤,测定浸泡前丁腈橡胶和聚氨酯橡胶的拉伸强度分别为18.7和55.0 MPa,浸泡后数据处理结果见表4。

表4 不同试液对密封材质拉伸强度变化率的影响

Table 4 Different experimental solution influence on the variation of the seal material tensile strength

密封 材质	拉伸强度变化率/%						
	浓缩 液 I	浓缩 液 II	改性植 物油 II	改性植 物油 I	三乙 醇胺	乙二醇	改进后 浓缩液
							改进后 浓缩液
丁腈橡胶	5.4	2.7	2.7	-0.5	6.4	2.1	3.7
聚氨酯橡胶	-41.6	-38.0	-31.5	-35.3	-38.0	-25.8	-36.4

表4中数据显示不同试液对丁腈橡胶材料的拉伸强度影响较聚氨酯橡胶材料小,丁腈橡胶拉伸强度变化率符合GB/T 14832—2008规定的拉伸强度变化率不大于20%的要求,国内目前尚无标准对聚氨酯橡胶拉伸强度的变化率给予限定;发现各类浓缩液对聚氨酯橡胶材料的拉伸强度影响顺序为浓缩液I>浓缩液II>改进后浓缩液;4种主要原料对聚氨酯的影响顺序为三乙醇胺>改性植物油I>改性植物油II>乙二醇;4种主要原料对丁腈橡胶拉伸强度的影响顺序为三乙醇胺>改性植物油II>乙二醇>改性植物

油I。

## 2.6 拉断伸长率变化率

按照GB/T 528—2009规定的试验方法和步骤,测定浸泡前丁腈橡胶和聚氨酯橡胶的拉断伸长率分别为3.37%和5.7%。浸泡后数据处理结果见表5。由表5可知,不同试液对丁腈橡胶材料拉断伸长率的影响较聚氨酯橡胶材料小;浓缩液I、浓缩液II和改进的浓缩液,其对丁腈橡胶和聚氨酯橡胶材料拉断伸长率的影响顺序均为浓缩液I>浓缩液II>改进后浓缩液;4种主要原料对聚氨酯的影响顺序为三乙醇胺>改性植物油II≈改性植物油I>乙二醇;4种主要原料对丁腈橡胶拉断伸长率的影响顺序为改性植物油I>三乙醇胺>乙二醇>改性植物油II;同一种添加剂对不同橡胶材料的影响程度不同,说明了这与橡胶材料的组成有一定关系,从不同配方浓缩液和不同添加剂对拉伸强度的影响,可以发现混合后的添加剂有些表现出协同效应,使得整体性能增强,有些混合后使得部分性能下降。以上现象说明在调制浓缩液配方时,必须严格控制各种原材料的比例,使得浓缩液整体性能满足橡胶密封性能要求,否则会造成橡胶材料使用寿命的缩短。

表5 不同试液对密封材质拉断伸长率变化率的影响

Table 5 Different experimental solution influence on the variation of the seal material tensile elongation rate

密封 材质	拉断伸长率变化率/%						
	浓缩 液 I	浓缩 液 II	改性植 物油 II	改性植 物油 I	三乙 醇胺	乙二醇	改进后 浓缩液
丁腈橡胶	6.5	4.2	-1.2	3.9	3.6	2.1	-0.3
聚氨酯橡胶	14.4	14.2	15.4	15.3	16.5	13.3	9.8

## 3 结 论

1) 添加剂单独润滑性和体积变化率测试表明,添加剂含碳原子和油性基团数越多,其润滑性越好,但其对丁腈橡胶体积的影响也变大,如CA7。

2) 对同一种橡胶而言,改性植物油I较改性植物油II对橡胶的影响大,原因是植物油I含有的极性基团较多,对橡胶的渗透能力较强。

3) 从体积变化和硬度变化来看,浓缩液添加剂对丁腈橡胶的影响较聚氨酯橡胶大,当部分添加剂达到一定浓度时,丁腈橡胶的体积变化不符合MT 76—2011的要求,硬度变化不符合GB/T 14832—2008的要求。

4) 对于配方中占比大的三乙醇胺和乙二醇而

言,三乙醇胺对2种橡胶材料的影响较乙二醇大,原因除在于三乙醇胺的极性比乙二醇的极性大,三乙醇胺在橡胶交联反应中起加速活化的作用,更容易与2种橡胶材料作用。

5) 橡胶的体积和硬度变化数据显示,聚氨酯橡胶与浓缩液具有良好的相容性,而拉伸强度和拉断伸长率的数据显示丁腈橡胶与浓缩液具有良好的相容性;因此在进行配方调制时,应综合考虑密封材质的影响,合理控制各种原材料的用量。

#### 参考文献(References):

- [1] 田立忠.矿井液压支架静密封漏液问题分析及解决办法[J].煤炭技术,2013,32(8):55-56.  
Tian Lizhong. Static seal leakage problem analysis and solving measures of mine hydraulic support [J]. Coal Technology, 2013, 32 ( 8 ) : 55-56.
- [2] 张晓峰,薛永强,艾伟.大型露天设备跑冒滴漏的综合整治[J].露天采矿技术,2008(3):37-38.  
Zhang Xiaofeng ,Xue Yongqiang ,Ai Wei. Large-scale open-pit mining equipment comprehensive treatment of leak [J]. Opencast Mining Technology ,2008( 3 ) : 37-38.
- [3] Mark Draper. Hydraulic fluids: a new generation [J]. World Pumps , 2011( 12 ) : 40-41.
- [4] 陈艳.聚醚聚氨酯密封件在液压支架上的应用[J].煤矿机械,2010,31(2):165-166.  
Cheng Yan. Polyether polyurethane seal on application of hydraulic support [J]. Coal Mine Machinery ,2010,31( 2 ) : 165-166.
- [5] 韩恒文,李勇.ATF的橡胶相容性评价方法与评定标准[J].润滑油与燃料,2010,20(1):6-10.  
Han Hengwen ,Li Yong. ATF rubber compatibility evaluation methods and evaluation criteria [J]. Lubes & Fuels ,2010 ,20( 1 ) : 6-10.
- [6] 杨成龙,杜勇,王玉超.水基液压液与密封材料相容性试验研究[J].煤炭科学技术,2010,38(11):108-111.  
Yang Chenglong ,Du Yong ,Wang Yuchao. Study on compatibility experiment between water base hydraulic liquid and seal material [J]. Coal Science and Technology ,2010 ,38( 11 ) : 108-111.
- [7] 许振兴.关于液压橡胶密封件的性能与维护[J].科技信息,2013(15):120.  
Xu Zhenxing. Performance and maintenance of hydraulic rubber seals [J]. Science & Technology Information ,2013( 15 ) : 120.
- [8] Diana Berman ,Ali Erdemir ,Anirudha V. Sumant. Graphene: a new emerging lubricant [J]. Materials Today ,2014 ,17( 1 ) : 31-42.
- [9] 许海霞,王义民,姚元书,等.新型合成液压支架用浓缩液的研究[J].煤炭学报,2004,29(4):487-491.  
Xu Haixia ,Wang Yimin ,Yao Yuanshu ,et al. Study on the newly type of synthetically concentrate hydraulic fluid used in powered support [J]. Journal of China Coal Society ,2004 ,29( 4 ) : 487-491.
- [10] 苗继军,刘波,马壮,等.电液控制系统液压支架专用浓缩液的研究[J].煤矿机械,2013,34(4):53-55.  
Miao Jijun ,Liu Bo ,Ma Zhuang ,et al. Research on special concentrated liquid by electro-hydraulic control system hydraulic support [J]. Coal Mine Machinery ,2013 ,34( 4 ) : 53-55.
- [11] 韩勇,杜勇,王玉超,等.环保型矿用浓缩液的研究与应用[J].煤炭科学技术,2009,37(6):119-122.  
Han Yong ,Du Yong ,Wang Yuchao ,et al. Research and application of environmental mine concentrated liquid [J]. Coal Science and Technology ,2009 ,37( 6 ) : 119-122.
- [12] Ponnekanti Nagendramma ,Savita Kaul. Development of ecofriendly/biodegradable lubricants: an overview [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews ,2012 ,16( 1 ) : 764-774.
- [13] 杨明,熊春华,吴福丽,等.地面装备用液压油与橡胶密封材料的相容性考察[J].润滑油,2012,27(2):10-13.  
Yang Ming ,Xiong Chunhua ,Wu Fuli ,et al. Investigation on the compatibility of hydraulic fluid used for ground equipments with elastomer seals [J]. Lubricating Oil ,2012 ,27( 2 ) : 10-13.
- [14] 吴福丽,杨传富,崔海涛,等.润滑油橡胶相容性的研究[J].润滑与密封,2011,36(5):92-96.  
Wu Fuli ,Yang Chuanfu ,Cui Haitao ,et al. The study on elastomer compatibility of lubricants [J]. Lubrication Engineering ,2011 ,36 ( 5 ) : 92-96.
- [15] 李学伟.煤矿液压支架用进口材质密封及其失效性分析[J].煤矿机械,2013,34(6):203-205.  
Li Xuewei. Imported materials sealed and its failure analysis of coal mine hydraulic support [J]. Coal Mine Machinery ,2013 ,34 ( 6 ) : 203-205.