

# 砂粒形状对丁腈橡胶在含砂原油中磨损的影响及其力学行为

吕晓仁<sup>1</sup> 陈骥驰<sup>2</sup> 乔赫廷<sup>1</sup> 王世杰<sup>1</sup>

1 沈阳工业大学机械工程学院 沈阳 110870

2 东北大学机械工程与自动化学院 沈阳 110819

**摘要** 研究了丁腈橡胶在含砂原油介质中的摩擦磨损行为,分析了在磨损过程中不同形状砂粒的力学行为,并观测和分析了橡胶磨痕表面的形貌和元素的含量。结果表明:在原油介质中加入砂粒,使丁腈橡胶的摩擦系数和磨损量有所增大。在试验载荷范围内圆形砂粒的运动方式以滚动为主,对橡胶表面产生研磨式磨粒磨损。而尖形砂粒在95 N后其运动方式由滚动变为滑动,橡胶的磨损机理转变为切削式磨粒磨损。砂粒平动加速度和转动加速度的研究结果,证实了不同形状砂粒在载荷作用下的运动方式及其对磨损机理的影响。

**关键词** 无机非金属材料,磨粒磨损,丁腈橡胶,砂粒,力学行为,原油介质

中图分类号 TH117

文章编号 1005-3093(2018)01-0065-08

## Effect of Shape of Sand Grains on Wear of Nitrile Butadiene Rubber in Crude Oil with Sand and their Mechanical Behavior

LV Xiaoren<sup>1</sup>, CHEN Jichi<sup>2</sup>, QIAO Heting<sup>1</sup>, WANG Shijie<sup>1</sup>

1 School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China

2 School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China

Correspondent: LV Xiaoren, Tel:(024)25496678, E-mail: xrlvsut@126.com

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50875178), Liaoning BaiQianWan Talents Program (No. 2015(48)), Outstanding Young Scholars Growth Plan of Colleges and Universities in Liaoning Province (No. LJQ2015080)

Manuscript received 2016-12-05; in revised form 2017-04-10

**ABSTRACT** Friction and wear behavior of nitrile butadiene rubber in crude oil with sand was investigated by the reciprocating wear tester, while the movement of sand grains of different shapes during the wear process was also studied. Morphology and chemical composition of the worn surface of rubber were characterized by stereo microscope and field emission scanning electron microscope. The results show that the frictional coefficient and wear loss of the rubber in crude oil increased with the addition of sand. The main movement model of round-shaped sand grains was rolling within the desired range of load, and the grinding abrasive wear was generated on the rubber surface. The movement model of sharp sand grains changed from rolling to sliding when the applied load was above 95 N, and correspondingly the wear mechanism of rubber transformed into cutting abrasive wear. The above observed variation of movement model of different shaped sand grains by varying applied load and its effect on the wear mechanism of rubber was further confirmed by the research result on the mechanical behavior related with translational acceleration and rotational acceleration of sand grains.

**KEY WORDS** inorganic non-metallic materials, abrasive wear, nitrile rubber, sand, mechanical behavior, crude oil

资助项目 国家自然科学基金(50875178),辽宁省百千万人才工程培养经费资助(2015(48))和辽宁省高等学校杰出青年学者成长计划(LJQ2015080)

收稿日期 2016-12-05 定稿日期 2017-04-10

作者简介 吕晓仁,男,1979年生,博士

通讯作者 吕晓仁,副教授, xrlvsut@126.com,研究方向为材料摩擦学

DOI 10.11901/1005.3093.2016.668

橡胶与金属配副的料浆输送设备,如螺杆泵中的橡胶定子与金属转子、涡轮钻具的橡胶止推轴承以及螺杆混输泵的金属螺杆与橡胶衬套等,在石油开采和矿山钻探中有广泛的应用<sup>[1]</sup>。由于输送的料浆是含有多种固相粒子的腐蚀性液体,橡胶材料不断受到固体粒子的磨削以及液体介质的侵蚀而极易磨损,使其使役性能大大降低<sup>[2-4]</sup>。为了提高橡胶材料的使役性能,人们研发新的橡胶材料或对原有橡胶材料进行改性处理,并研究其力学和摩擦学等性能。张嗣伟等研究了丁腈橡胶的湿磨粒磨损行为,分析了磨损过程中砂粒的受力情况,为研究橡胶在三体磨粒磨损状态下的磨损机理提供了理论依据<sup>[5,6]</sup>。在无磨损状态下液体介质中的砂粒处于无约束状态,当砂粒参与磨损时其滚动或滑动的运动方式直接影响橡胶的磨损进程,也影响料浆输送设备的使用寿命。因此掌握实际磨损工况下砂粒的运动方式成为研究橡胶三体湿磨粒磨损机理的重点<sup>[7]</sup>。鉴于此,本文以螺杆泵橡胶定子与金属转子配副为研究对象,选用丁腈橡胶为定子材料、含不同形状砂粒的原油为料浆介质,采用往复式磨损试验机研究丁腈橡胶在含砂原油介质中的摩擦磨损行为,分析橡胶磨损中砂粒的运行方式,并分析验证不同形状砂粒在载荷作用下的运动方式及其对磨损机理的影响。

## 1 实验方法

试验用橡胶材料为N41丁腈橡胶,基本配方及其质量份数为:N41 100,氧化锌8,改性剂12,防老剂D5,硫化剂3,高耐磨炭黑110,焦油4,促进剂TMTD 4,硬脂酸4。采用开放式混炼机和平板式硫化机制备橡胶试样,硫化的压力、温度和时间由台湾高铁生产的硫化仪确定。丁腈橡胶采用一次硫化方法制备,压力为15 MPa,温度为170℃,时间为10 min。硫化后试样尺寸为40 mm×25 mm×6 mm,硬度为70 Shore A左右。

某油田的原油,已进行除砂除水处理。在原油介质中加入的砂粒为白刚玉( $Al_2O_3$ ),莫氏硬度9.0,平均直径为0.85 mm。砂粒形状有圆形和尖形两种,表面形貌如图1所示。圆形砂粒的圆度为0.40~0.60,尖形砂粒的圆度为0.03~0.15。

橡胶在含砂原油介质中的摩擦磨损试验,在自行设计的往复式磨损试验机上进行,采用环-块线接触方式,试验装置的示意图如图2所示。为了便于金属环固定在夹具中,将直径30 mm厚13 mm的金属环切割成如图2中所示的形状。金属环表面材质

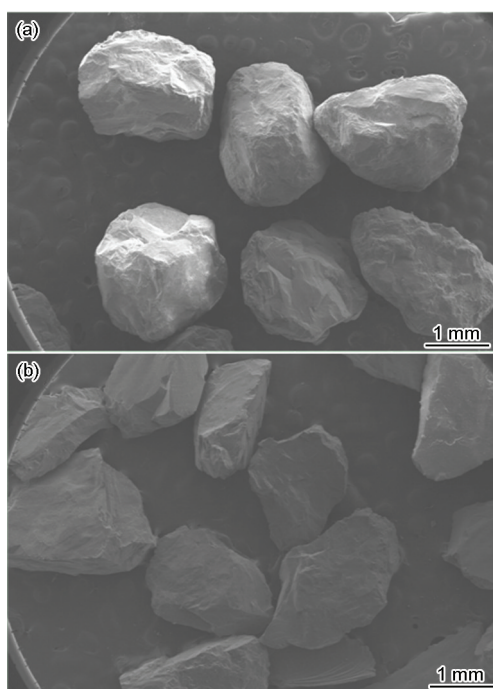


图1 圆形和尖形砂粒的形貌

Fig.1 Morphology of round (a) and sharp (b) sand

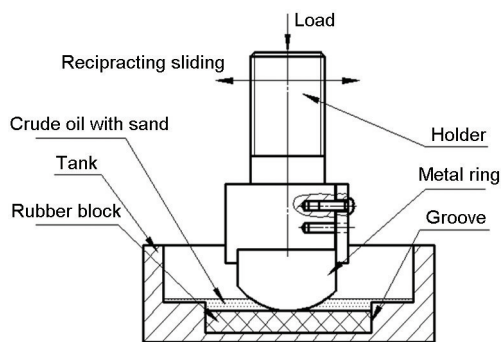


图2 试验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of experimental apparatus

为镀铬的45#钢,表面硬度和表面粗糙度分别为HRC 56和Ra 0.25  $\mu\text{m}$ 。为了使往复运动过程中砂粒能与金属环多次接触,试验槽中凹槽的深度略大于橡胶块的厚度。金属环在往复运动过程中不断碾压或推移砂粒,对橡胶表面产生磨损比较严重,而对金属环本身的损伤较小,因此本文不考虑金属环的磨损问题。

丁腈橡胶在含砂原油介质中的试验参数为:温度25℃,往复行程25 mm,频率1Hz,砂粒浓度(按质量分数)10%,磨损时间3 h。结合螺杆泵的实际运行工况及转子偏心、振动等特殊情况,确定载荷分别为10 N、20 N、30 N、55 N、95 N、120 N和155 N<sup>[8]</sup>。摩擦系数在橡胶稳态磨损时采集。试验结束后将试样置于超声波振荡器中先后用煤油、丙酮、酒精和蒸馏水进行清洗,最后在100℃的恒温箱中烘干20 min。

橡胶磨损前后的质量采用精度为0.1 mg的电子天平测量。磨损试验结果为3次试验的平均值。

使用VHX-1000C数码显微系统观察磨痕表面的体式形貌,用HITACHISU8010N场发射扫描电镜观测磨痕表面的微观形貌和元素含量。

## 2 结果和讨论

### 2.1 橡胶在含砂原油介质中的磨损试验

**2.1.1 摩擦系数** 图3给出了丁腈橡胶试样在含砂(尖形、圆形)原油介质中稳态磨损时摩擦系数随载荷的变化曲线。由图3可知,在原油介质中添加砂粒后,丁腈橡胶的摩擦系数有所增大。在未加砂粒的原油介质中磨损时,橡胶的摩擦系数主要由原油介质分子之间的内摩擦决定,摩擦系数较低。而在含砂原油介质中磨损时橡胶的摩擦系数将主要由砂粒在材料表面的运动方式决定,因此其摩擦系数比在原油介质中的大。圆形砂粒在摩擦过程中易滚动,尖形砂粒则主要以滑动为主,橡胶表面受到的剪切后者大于前者,在相同的载荷下橡胶在含尖形砂粒原油介质中的摩擦系数大于含圆形砂粒原油介质<sup>[9]</sup>。从图3还可以看出,丁腈橡胶在三种液体介质中的摩擦系数均随着载荷的增加逐渐降低,当载荷增加到60 N后摩擦系数趋于稳定。由于橡胶具有粘弹性,载荷的增加使橡胶与金属对磨副之间接触面积大幅度增加,橡胶与金属之间的摩擦由混合润滑逐渐向边界润滑发展,摩擦系数逐渐降低<sup>[10]</sup>。同时,载荷的增大使摩擦产生的热量增加,原油介质粘度降低,也使摩擦系数有所降低。

**2.1.2 磨损量** 由于橡胶材料发生粘弹性变形,在磨损过程中砂粒可能被金属环碾压,也可能跟随金属环一起向前运动,导致橡胶不同的磨损行为。图4给出了丁腈橡胶试样在含砂(尖形、圆形)原油介质中磨损后磨损量随载荷的变化曲线。在相同载荷情况下,砂粒的加入使丁腈橡胶在原油介质中磨损量增加。圆形砂粒易发生滚动或碾压,对橡胶表面产生的微观切削较弱;而尖形砂粒表面有多个切削刃,在磨损过程中对橡胶表面容易产生啮合阻力和微观切削,使材料的表面损伤<sup>[9]</sup>,因此,丁腈橡胶在含尖形砂粒原油介质中的磨损量大于含圆形砂粒的原油介质。丁腈橡胶在含圆形砂粒和未加砂粒的原油介质中的磨损量几乎随着载荷成线性增大,表明在试验载荷范围内磨损机理未发生改变。而在含尖形砂粒原油介质中,当载荷超过95 N后磨损量与载荷的斜率急剧上升,表明磨损机理发生了改变。

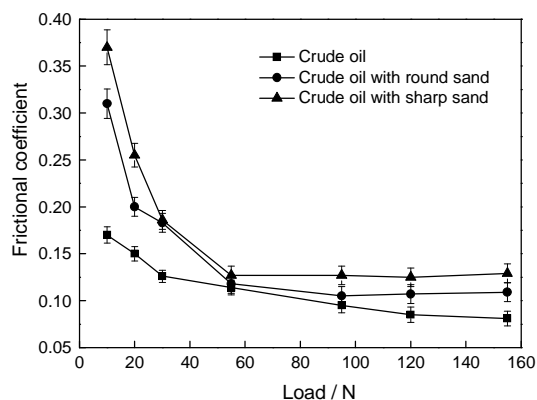


图3 丁腈橡胶在含砂原油介质中摩擦系数与载荷的关系

Fig.3 Variation of frictional coefficient of NBR with load under the condition of crude oil containing sand

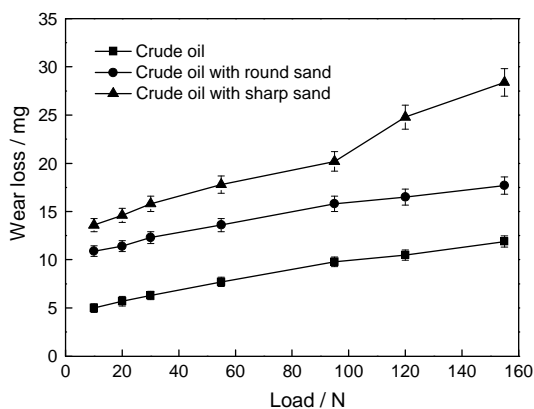


图4 丁腈橡胶在含砂原油介质中磨损量与载荷的关系  
Fig.4 Variation of wear loss of NBR with load under condition of crude oil containing sand

**2.1.3 磨痕分析** 为了更好地反映和解释橡胶在含砂原油介质中的磨损机理及砂粒的运动方式,观察了橡胶的磨痕表面形貌。图5给出了丁腈橡胶在含砂原油介质中经不同载荷磨损后磨痕的表面体视形貌。从图5可以看出,在试验载荷范围内砂粒的运动方式有滑动也有滚动,载荷的大小决定以滚动还是以滑动为主。

在载荷低于155 N、含圆形砂粒原油介质中磨损后的磨痕表面,除了有轻微的犁沟外,主要以大量无规则的划痕和碾压坑为主。这表明,在磨损过程中圆形砂粒的运动方式主要是以滚动和碾压为主,发生研磨式磨粒磨损<sup>[11]</sup>。从图5b, d和f可以看出,随着载荷的增加砂粒对表面产生的滚动和碾压逐渐加大,表面破坏程度逐渐增加,磨损量逐渐加大。当载荷达到155 N时磨痕表面发生了改变,主要以犁削为主。这表明,在高载下圆形砂粒的运动方式由滚动和碾压变为滑动,发生了凿削式磨粒磨损<sup>[11]</sup>。

对于含尖形砂粒的原油介质,由滚动和碾压变



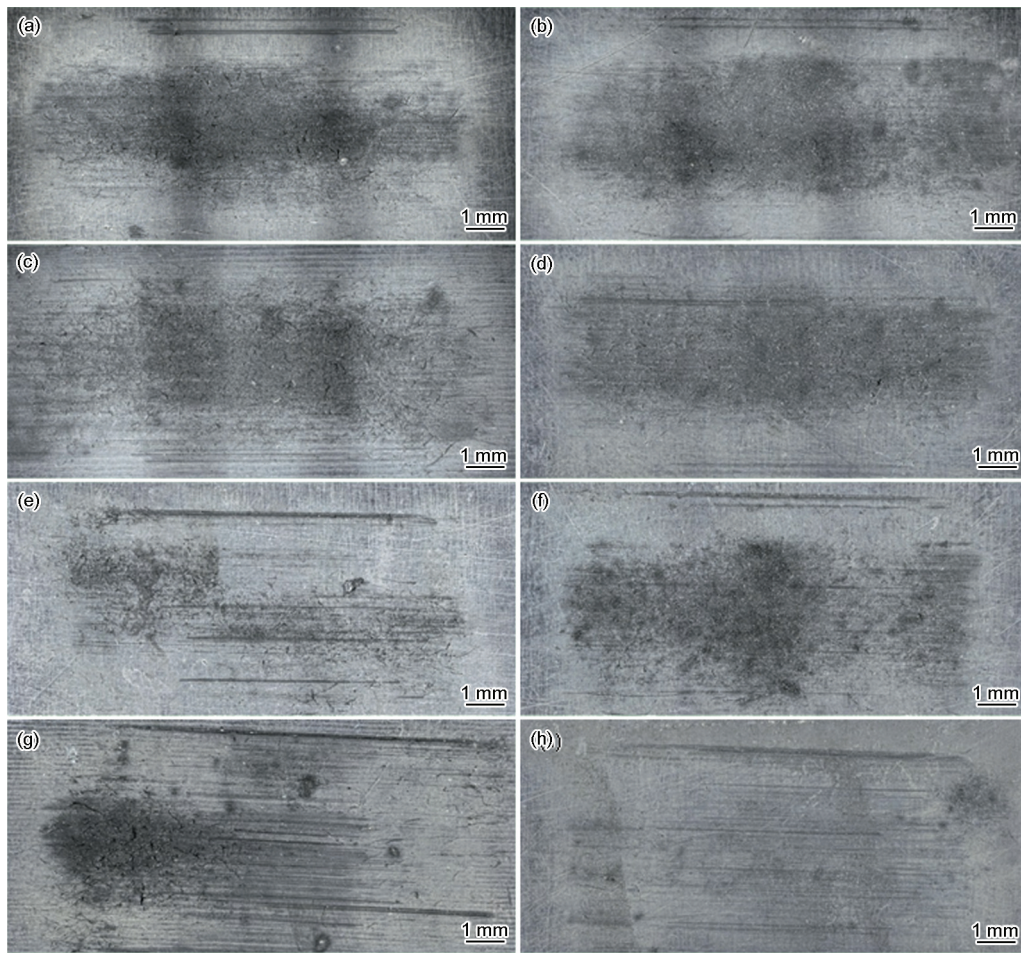


图5 丁腈橡胶在含砂原油介质中磨损后磨痕表面的体式形貌

Fig.5 Stereoscopic morphologies of worn surface of NBR in crude oil with sand (a) sharp sand, 20 N (b) round sand, 20 N (c) sharp sand, 55 N (d) round sand, 55 N (e) sharp sand, 95 N (f) round sand, 95 N (g) sharp sand, 155 N (h) round sand, 155 N

为滑动,即由研磨式磨粒磨损转变为凿削式磨粒磨损的临界载荷变为95 N。载荷低于95 N时尖形砂粒切削刃对橡胶表面微观犁削和嵌入的程度大于圆形砂粒,表面出现的宏观裂纹明显多于圆形砂粒。当载荷超过95 N时磨痕表面出现明显的犁沟,犁沟的宽度和深度明显大于圆形砂粒,表明尖形砂粒对橡胶的滑动损伤远大于圆形砂粒。

图6给出了丁腈橡胶经20 N和55 N磨损后磨痕形貌的SEM照片。从图6明显可见,尖形砂粒对橡胶表面的划伤和碾压的深度明显大于圆形砂粒,直接证实了上述的摩擦磨损试验以及宏观磨痕体式形貌的结果。由于在滚动和碾压过程中砂粒运动方向的不确定性,橡胶表面的犁沟也不规则,杂乱无章。同时,随着载荷的增加砂粒对表面切削作用加强,对材料表面的损伤程度增加。

表1给出了图6磨痕表面的C元素相对含量。可以看出,表面C元素相对含量随着载荷的增加而逐渐减少,同时尖形砂粒造成材料表面C元素相对

含量减少的幅度大于圆形砂粒。C元素相对百分含量的减少,表明分子链发生了断裂。由于机械作用,砂粒在材料表面滚动和滑动时材料表面的分子链来不及松弛,应力波来不及连续地向前传播,使橡胶表层产生较强的应力场,因而使很小体积内的分子链段上承受着较大的应力<sup>[9]</sup>。当应力足够大时分子链共价键键角形变增加,键强度变弱,分子键的原子间距离增大,使分子链断裂。由于尖形砂粒对橡胶表面的剪切力大于圆形砂粒,在材料表面产生的应力场大于圆形砂粒,使分子链的断裂多于圆形砂粒。因此,尖形砂粒对材料的损伤大于圆形砂粒。

在橡胶的磨损过程中材料表面既受到法向压力,又受到横向剪切力。法向压力使橡胶发生粘弹性变形,而横向剪切力对表层造成损伤,导致材料流失发生磨损。当砂粒的运动方式为滚动和碾压时橡胶表面受到的剪切力很小,主要承受法向压力。由于橡胶具有良好的粘弹性具有容砂能力,砂粒对材料表面的损伤较弱,主要发生研磨式磨粒磨损。当



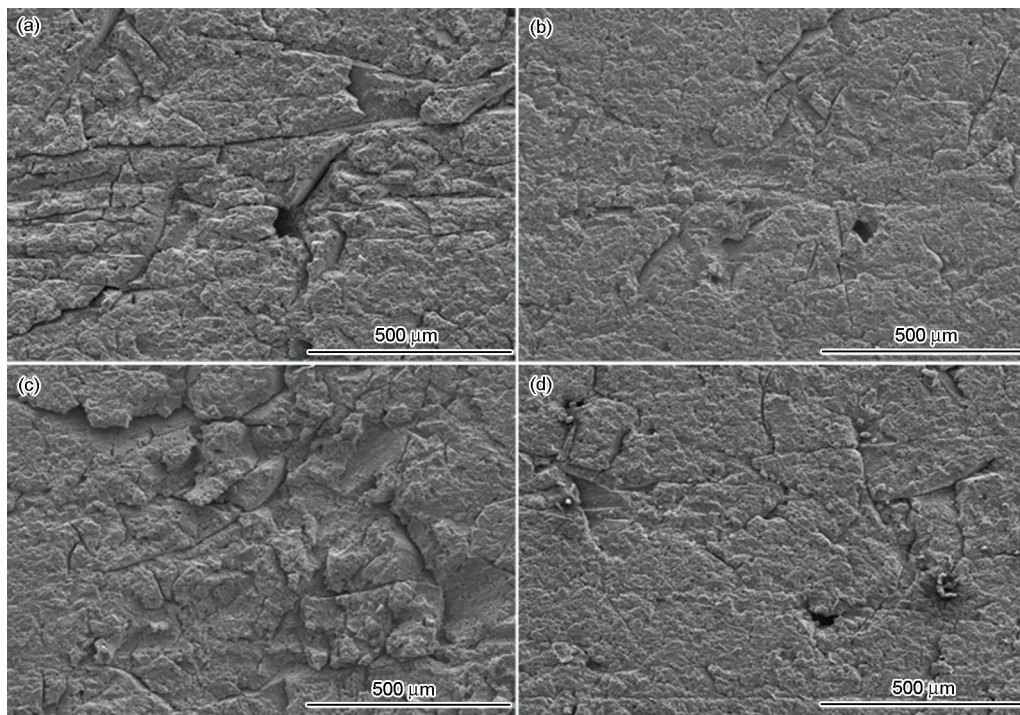


图6 丁腈橡胶在含砂原油介质中磨损后磨痕表面的SEM形貌

Fig.6 SEM morphologies of worn surface of NBR in crude oil with sand (a) sharp sand, 20 N (b) round sand, 20 N (c) sharp sand, 55 N (d) round sand, 55 N

表1 磨损前后NBR表面C元素的相对百分含量  
Table 1 Relative C element percentage content on NBR surface before and after the wear experiment

Medium	0	20 N	55 N
Crude oil with round sand	83.98	76.33	75.15
Crude oil with sharp sand		74.82	73.81

砂粒的运动方式为滑动时发生粘弹性变形的材料表层在横向剪切力作用下容易发生橡胶分子链的断裂。同时,在滑动挤压过程中润滑状态缺失造成边界润滑,发生凿削式磨粒磨损,造成磨损量增加。由于尖形砂粒对橡胶表面的嵌入的深度远大于圆形砂粒,在相同的载荷下发生更严重的凿削式磨粒磨损。

## 2.2 在磨损过程中砂粒运动方式力学行为

为了证实橡胶在含砂原油介质中摩擦磨损试验的研究结果,对两种典型砂粒(圆形、尖形)在磨损过程中的运动方式进行了力学分析。基于砂粒尺度为毫米量级,根据宏观理论力学分析砂粒与金属环在碰撞接触时的力学行为与运动方式。为了得到简单直观的分析结果,并与试验结果进行比较,本文判断砂粒的运动方式(滚动、滑动)转化为比较砂粒上合理参考点的两种加速度(转动加速度、平动加速度)的大小。当砂粒与金属环接触碰撞时,如果砂粒上

参考点的转动加速度大于平动加速度,则砂粒的运动方式为滚动;反之,砂粒的运动方式为滑动。同时,在计算模型中充分考虑丁腈橡胶表面承载所引起的粘弹性变形,引入了金属环嵌入丁腈橡胶表面的深度与载荷之间的函数关系。

2.2.1 金属环压入橡胶表面的深度 橡胶为粘弹性体,当表面受到一定的载荷时发生压缩变形。图7给出了丁腈橡胶表面承受载荷时金属环压入深度的变化曲线。由图7可以看出,金属环压入深度基本与载荷成线性关系,与文献[12]的结果基本相同。经过数据拟合,载荷与压入深度的关系为

$$h = 0.039L \quad (1)$$

式中  $h$  为金属环压入橡胶表面的深度(mm);  $L$  为橡胶承受的载荷(N)。

2.2.2 尖形砂粒力学行为分析 尖形砂粒力学理论分析几何模型,如图8所示。图8a给出了尖形砂粒接触示意图,图中  $H$  为金属环圆心到橡胶表面的距离,  $R$  为金属环半径,尖形砂粒(简化为等腰直角三角形)高为  $r$ ,金属环圆心与尖形砂粒顶点的连线与竖直方向形成的夹角为  $\beta$ 。由已知的几何条件可知

$$\begin{aligned} H &= R - h \\ H &= R - 0.039W \\ \beta &= \arccos\left(\frac{H-r}{R}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

假定砂粒的质量为  $m$ , 滚阻系数为  $\delta$ , 金属环与橡胶表面, 金属环与尖形砂粒, 尖形砂粒与橡胶表面的摩擦角均为  $\alpha$ 。根据摩擦力的性质(遵循动摩

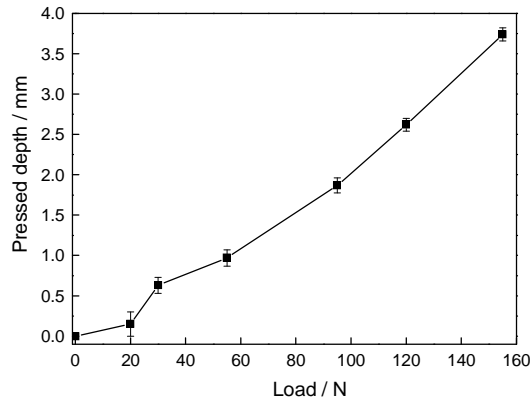


图7 丁腈橡胶表面承受载荷时金属环压入深度的变化  
Fig.7 Variation in indentation depth of metal ring with the load on NBR rubber surface

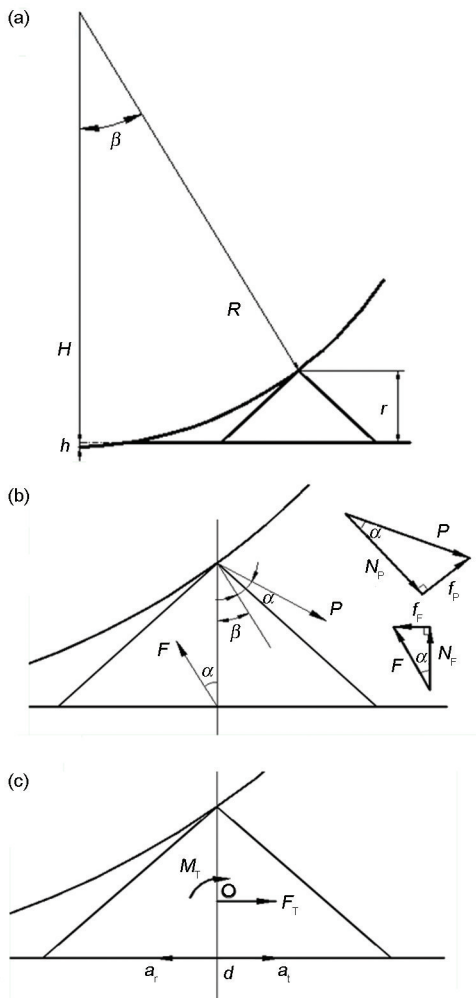


图8 尖形砂粒力学理论分析几何模型  
Fig.8 Geometric model of mechanical analysis of sharp sand (a) contact schematic diagram (b) force schematic diagram (c) simplified force schematic diagram

擦角规律)确定图8b中各个几何角度。金属环对尖形砂粒作用力合力  $P$  的方向与垂直方向之间的夹角为  $\beta + \alpha$ , 其力可分解为正压力  $N_p$  (与竖直方向成  $\beta$ ) 与摩擦力  $f_p$  (垂直于  $N_p$ , 大小可表示为  $f_p = \tan \alpha N_p$ ), 方向如图8b所示; 橡胶表面对砂粒作用力合力  $F$  的方向与竖直方向呈  $\alpha$ , 其力可分解为正压力  $N_F$  (竖直方向) 与摩擦力  $f_F$  (垂直于  $N_F$ , 大小可表示为  $f_F = \tan \alpha N_F$ )。由于砂粒在原油介质中运动, 竖直方向的运动可以忽略, 即砂粒在垂直方向的加速度为0, 因此  $P$  与  $F$  在竖直方向的分量大小相等方向相反。  $P$  与  $F$  的大小分别为

$$P = \frac{1}{\cos \alpha} N_p$$

$$F = \frac{\cos(\beta + \alpha)}{\cos^2 \alpha} N_p$$

基于平面力系简化的原理, 以砂粒的质心  $o$  为力系简化中心(图8c), 则砂粒受到的合力  $F_T$  (方向为水平) 大小为

$$F_T = \frac{N_p}{\cos \alpha} (\sin(\beta + \alpha) - \cos(\beta + \alpha) \tan \alpha) \quad (3)$$

砂粒受到合力矩  $M_T$  大小为

$$M_T = \frac{N_p r}{\cos \alpha} \left( \frac{2}{3} \sin(\beta + \alpha) + \frac{1}{3} \tan \alpha \cos(\beta + \alpha) - \cos(\beta + \alpha) \frac{\delta}{r} \right) \quad (4)$$

砂粒质心水平加速度  $a$  大小为

$$a = \frac{N_p}{m \cos \alpha} (\sin(\beta + \alpha) - \cos(\beta + \alpha) \tan \alpha) \quad (5)$$

转动角加速度  $\omega'$  为

$$\omega' = \frac{N_p}{m \cos \alpha} \frac{4.5 \left( \frac{2}{3} \sin(\beta + \alpha) + \frac{1}{3} \tan \alpha \cos(\beta + \alpha) - \cos(\beta + \alpha) \frac{\delta}{r} \right)}{r} \quad (6)$$

基于平面运动原理(图8c), 以砂粒与橡胶接触点  $d$  为参考点, 碰撞接触时的加速度  $a_d$  可分为由滑动产生的加速度  $a_i$  (水平向右), 由转动产生的加速度  $a_r$  (水平向左), 因此参考点  $d$  的合成加速度为

$$a_d = a_i - a_r$$

其中

$$a_i = a$$

$$a_r = \frac{1}{3} \omega' r$$

考虑到丁腈橡胶承载大小对参考点  $d$  的  $\frac{a_i}{a_r}$  的影响, 即载荷对砂粒运动方式的影响, 列式为

$$\frac{a_i}{a_r} = \frac{3a}{\omega' r} = \frac{2 \left( \frac{2}{3} \sin(\beta + \alpha) + \frac{1}{3} \tan \alpha \cos(\beta + \alpha) - \cos(\beta + \alpha) \frac{\delta}{r} \right)}{3(\sin(\beta + \alpha) - \tan \alpha \cos(\beta + \alpha))} \quad (7)$$

其中  $a_d > 0$ , 即  $\frac{a_t}{a_r} > 1$  表示  $d$  点向右运动, 砂粒运动方式以滑动为主;  $a_d < 0$ , 即  $\frac{a_t}{a_r} < 1$  表示  $d$  点向左运动, 砂粒运动方式以滚动为主。

随着载荷的增加金属环与尖形砂粒的接触方式由原来金属环与砂粒尖点直接接触转变为金属环与砂粒侧边接触, 如图 9 所示。  $\beta$  角的大小改变为  $\frac{\pi}{4} + \alpha$ 。

相应地,  $\frac{a_t}{a_r}$  的列式转变为

$$\frac{a_t}{a_r} = \frac{3a}{\omega r} = \frac{2\left[\left(h - \frac{2}{3}\right)\sin\left(\frac{\pi}{4} + \alpha\right) + (1-h)\cos\left(\frac{\pi}{4} + \alpha\right) + \frac{1}{3}\tan\alpha\cos\left(\frac{\pi}{4} + \alpha\right) - \cos\left(\frac{\pi}{4} + \alpha\right)\frac{\delta}{r}\right]}{3\left[\sin\left(\frac{\pi}{4} + \alpha\right) - \tan\alpha\cos\left(\frac{\pi}{4} + \alpha\right)\right]} \quad (8)$$

2.2.3 圆形砂粒的力学分析 圆形砂粒力学理论分析几何模型, 如图 10 所示。由于与尖形砂粒受力原理相同, 通过相似的推导可得圆形砂粒底端参考点  $d$  的平动加速度与转动加速度的比值为

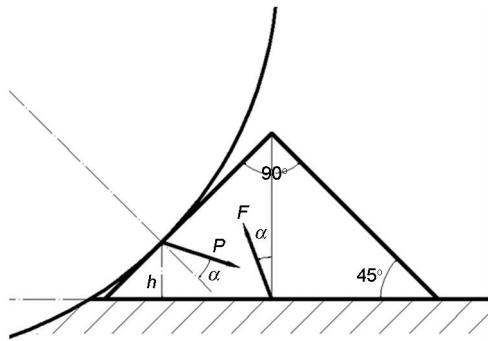


图 9 在大载荷作用下尖形砂粒的接触示意图  
Fig.9 Contact schematic diagram of sharp sand of contact

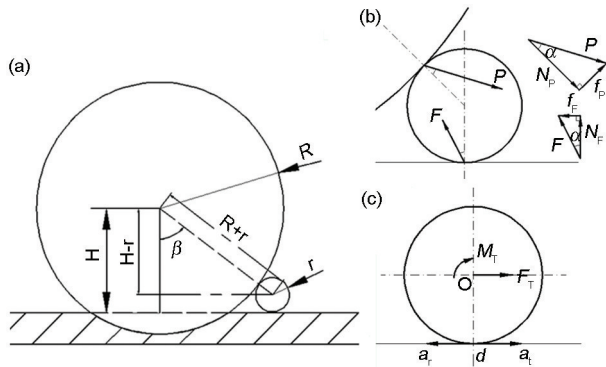


图 10 圆形砂粒力学理论分析几何模型  
Fig.10 Geometric model of mechanical analysis of round sand (a) contact schematic diagram (b) force schematic diagram (c) simplified force schematic diagram

$$\frac{a_t}{a_r} = \frac{a}{\omega' r} = \frac{\sin\alpha + \cos(\beta + \alpha)\tan\alpha - \cos(\beta + \alpha)\frac{\delta}{r}}{2(\sin(\beta + \alpha) - \cos(\beta + \alpha)\tan\alpha)} \quad (9)$$

2.3 理论分析与实验结果的比较

图 11 给出了砂粒滑动加速度与滚动加速度比值随载荷的变化曲线。尖形砂粒在载荷小于 90 N 时滚动加速度占主导地位, 而当载荷大于 90 N 后滑动加速度占主导地位, 而且滑动加速度与滚动加速度的比值急剧增加; 与尖形砂粒相比, 加速度当载荷增加到 140 N 时圆形砂粒滑动才占主导地位。这与图 4 中磨损量随载荷的变化规律基本吻合。试验和力学分析的比较, 较好地证实了砂粒在原油中磨损的运动方式及其对磨损机理的影响。需要补充的是, 从公式(7), (8)和(9)中可以看到, 加速度比值是  $\beta$  的非线性函数, 即加速度比值是载荷  $L$  的非线性函数。而如图 11 所示, 加速度比值是  $L$  近似线性的函数。其主要原因是, 在本文载荷变动范围内  $\beta$  变化非常小, 因此加速度比值与载荷范围内呈现近似线性变化规律。同时, 图 11a 中出现拐点的原因是, 载荷增大导致金属环与尖形砂粒的接触方式改变, 从图 8 转变为图 9。

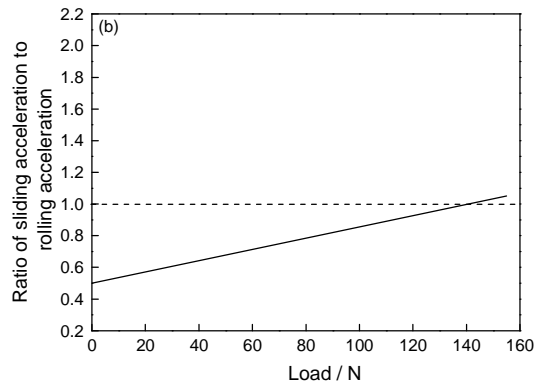
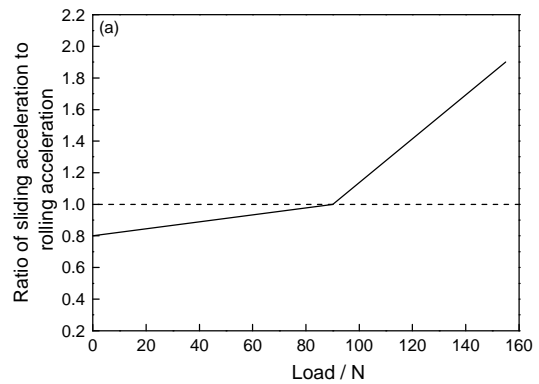


图 11 砂粒的滑动加速度与滚动加速度比值随载荷变化  
Fig.11 Variation in ratio of sliding acceleration and rolling acceleration with load of sand (a) Sharp sand (b) Round sand



### 3 结论

(1) 原油介质中的砂粒使丁腈橡胶的摩擦系数和磨损量均增大,含圆形砂粒的原油介质其磨损量几乎随着载荷线性增长,而对于含尖形砂粒原油介质载荷超过95 N后磨损量急剧上升。

(2) 在本文的试验载荷范围内圆形砂粒的运动以滚动为主,发生研磨式磨粒磨损;而尖形砂粒在大载荷作用下由小载荷时的滚动变为滑动,磨损机理转变为凿削式磨粒磨损。

(3) 在滑动过程中橡胶表面受到的剪切作用致使分子链断裂,对磨副的滑动挤压致使润滑状态缺失,磨损量急剧增加。

(4) 砂粒平动加速度和转动加速度力学行为的研究结果,证实了在载荷作用下不同形状砂粒的运动方式及其对磨损机理的影响。

#### 参考文献

- [1] Müller-Link D, Rohlfing G, Spelter H. Twin screw pumps help improving oil recovery in mature fields and transfer heavy crude oil over long distances [J]. Oil Gas Eur. Mag., 2009, 35(3): 127
- [2] Zheng X P, Shen X M, Li G, et al. Friction and wear characteristics of acrylonitrile-butadiene rubber under hard particles condition [J]. J. Mater. Eng., 2015, 43(10): 79  
(郑金鹏, 沈明学, 厉 淦等. 丁腈橡胶在硬质颗粒环境下的摩擦磨损特性 [J]. 材料工程, 2015, 43(10): 79)
- [3] Mofidi M, Prakash B. The influence of lubrication on two-body abrasive wear of sealing elastomers under reciprocating sliding conditions [J]. J. Elastom. Plast., 2011, 43(1): 19
- [4] Shen M X, Zheng J P, Meng X K, et al. Influence of  $Al_2O_3$  particles on the friction and wear behaviors of nitrile rubber against 316L stainless steel [J]. J. Zhejiang Univ. Sci. A (Appl. Phys. & Eng.), 2015, 16(2): 151
- [5] Yao B, Zhou H, Yang Z C, et al. Studies of liner wear mechanism of single-screw pump for transporting the coal water slurry [J]. Lubr. Eng., 1999, 37(1): 4  
(姚 斌, 周 海, 杨兆春等. 输送水煤浆的单螺杆泵定子磨损机理分析 [J]. 润滑与密封, 1999, 37(1): 4)
- [6] Yang Z C, Zhou H, Yao B, et al. Studies of friction and wear of NBR under wet coal [J]. Lubr. Eng., 2000, 22(1): 4  
(杨兆春, 周 海, 姚 斌等. 湿煤粉条件下丁腈橡胶摩擦磨损规律的研究 [J]. 润滑与密封, 2000, 22(1): 4)
- [7] Farfan-Cabrera L I, Gallardo-Hernandez E A, Pascual-Francisco J B, et al. Experimental method for wear assessment of sealing elastomers [J]. Polym. Test., 2016, 53: 116
- [8] Tang Q, Xu J, Zhu C C, et al. Design and optimization of tooth profile in three-screw pump, J. Adv. Manuf. Syst. 2008, 7(1): 95
- [9] Zhang S W. Wear principles of rubber [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998  
(张嗣伟. 橡胶磨损原理 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1998)
- [10] Wen S Z, Huang P. Principles of Tribology(Third Edition) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008  
(温诗铸, 黄 平. 摩擦学原理(第三版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008)
- [11] Liu J J. Wear principles of material and its wear resistance [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993  
(刘家浚. 材料磨损原理及其耐磨性 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1993)
- [12] Liu H L. Analysis and experimental study on contact deformation of tire and ground [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012  
(柳和玲. 轮胎地面接触变形分析与试验研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012)

(责任编辑:黄 青)