文章编号:1004-7220(2022)06-1006-08

# 眼外肌黏附行为对眼球运动的影响

何 静<sup>1#</sup>, 高志鹏<sup>1#</sup>, 张晨曦<sup>1</sup>, 杨佳瑾<sup>1</sup>, 郭红梅<sup>1,2</sup>, 李晓娜<sup>1</sup>, 张 锦<sup>1</sup> (1. 太原理工大学 生物医学工程学院, 太原 030024; 2. 山西医科大学第三医院(山西白求恩医院 山西医学科学院 同济山西医院), 太原 030032)

摘要:目的 研究眼外肌黏附行为对眼球运动的影响。方法 用3种不同尺寸钢性球形压头对暴露在空气中不同时间下的离体眼外肌进行压痕-分离实验,研究眼外肌的黏附行为。结合 JKR 理论和眼球运动模型分析眼外肌与巩膜之间黏附作用在眼球运动过程中对维持眼球平衡的贡献。结果 离体眼外肌肌外膜的黏附力随暴露在空气中时间的延长而减小。除暴露 1 h 外,黏附力在其他暴露时间下不受压头尺寸的影响。实验黏附力与 JKR 理论计算的理论黏附力有较好的一致性。眼球外转过程中,眼外肌与巩膜之间的黏附力和外直肌主动力随外转角度增大而增大。黏附力矩随外转角度呈指数型上升,并且占阻力矩、被动力矩和黏附力矩总和的比例也越来越大。结论 离体眼外肌肌外膜暴露在空气中时间的长短对其黏附特性有显著影响。JKR 理论能较好描述眼外肌与巩膜之间的黏附作用。该黏附作用在眼球运动中参与维持眼球的平衡,对调节眼球运动有一定的贡献。研究结果可为斜视等眼球运动相关疾病的研究提供理论依据。

关键词: 眼外肌; 眼球运动; 肌外膜; 压痕-分离实验; 巩膜

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A **DOI**: 10.16156/j.1004-7220.2022.06.005

## Effects of Adhesion Behavior of Extraocular Muscles on Eye Motion

HE Jing<sup>1#</sup>, GAO Zhipeng<sup>1#</sup>, ZHANG Chenxi<sup>1</sup>, YANG Jiajin<sup>1</sup>, GUO Hongmei<sup>1,2</sup>, LI Xiaona<sup>1</sup>. ZHANG Jin<sup>2</sup>

(1. College of Biomedical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Third Hospital of Shanxi Medical University (Shanxi Bethune Hospital, Shanxi Academy of Medical Sciences, Tongji Shanxi Hospital), Taiyuan 030032, China)

Abstract: Objective To investigate the effect of adhesion behavior of the extraocular muscle (EOM) on eye motion. Methods The pull-off test was carried out on EOM in vitro exposed to the air in different time periods using steel spherical indenters with three different sizes, and adhesion behavior of the EOM was studied. Then contribution of the adhesion between EOM and sclera to maintain eye balance during eye motion was analyzed by combination with the JKR theory. Results The adhesion force of the epimysium of EOM in vitro decreased with the increase of exposure time. Except for the case of 1-hour exposure time, the adhesion force was not affected by the indenter size at other exposure time. The experimental adhesion force was in good agreement with the theoretical adhesion force calculated by the JKR theory. The adhesion force between EOM and sclera, as well as the active force of lateral rectus muscle increased with the abduction angle increasing. The adhesion moment

收稿日期:2022-03-29; 修回日期:2022-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(11802196,31800789,12072218,12172243)

通信作者:郭红梅, 讲师, E-mail: guohongmei@tyut.edu.cn

#为共同第一作者

increased exponentially with the abduction angle, and accounted for an increasing proportion of the sum of resistance moment, passive moment and adhesion moment. Conclusions The duration of exposure to the air had a significant effect on adhesion properties of the epimysium of EOM *in vitro*. The adhesion interaction between sclera and EOM could be preferably described by the JKR theory. The adhesion interaction between EOM and sclera participated in maintaining balance of the eyeball and made certain contributions in regulating eye motion. The results in this study can provide theoretical foundation for researches of disorders related to eye motion such as strabismus.

Key words: extraocular muscle (EOM); eye motion; epimysium; pull-off test; sclera

眼眶组织中共有 6 条眼外肌(extraocular muscle, EOM),包括 4 条直肌和两条斜肌,主要控制眼球运动<sup>[1]</sup>。研究发现,眼外肌通过协同和拮抗机制维持眼球的动态平衡<sup>[1-3]</sup>。实际上,每条眼外肌的一部分与巩膜紧密接触,或包裹在眼球周围。在眼球运动过程中,眼外肌和巩膜之间的黏附行为因为反复出现的接触-分离切换动作而不断发生。因此,研究眼外肌的黏附力有助于更好了解与眼球运动相关的生物力学行为。

眼球转动的角度与眼外肌包裹眼球的接触弧的长度成正比。眼外肌和巩膜之间的接触面积经常随着眼球运动而变化,相应的接触弧长也随之发生改变。而眼外肌和巩膜具有黏弹性特征,接触区域会不可避免地发生黏附作用。然而,在分析眼球运动时,鲜有研究考虑黏附因素。由于严重缺乏与眼球运动相关的眼眶组织的实验数据,学者们常常采用数学优化的方法分析眼球运动<sup>[4-10]</sup>。相比之下,针对眼外肌黏附行为的研究可以弥补这方面的不足。近年来,诸如强度、模量和韧性等与眼外肌力学性能有关的研究已有报道<sup>[11-14]</sup>。然而,关于眼外肌黏附行为及其对眼球运动影响的研究很少。

压痕-分离实验(pull-off test)主要包括从微观到宏观各种尺度的实验,通常用于考察软组织的表面接触能力<sup>[15-17]</sup>。相关的研究主要是基于 JKR 理论,该理论由 Johnson、Kendall 和 Roberts 于 1971 年提出,可以用来描述两个弹性体之间的黏附行为<sup>[18-20]</sup>。球形压头常用于解决软组织几何形状中固有的不对称问题<sup>[21-22]</sup>。基于压痕原理,压痕-分离实验常用于测量如人面部皮肤<sup>[23]</sup>和角膜<sup>[24]</sup>等软组织的黏附行为。

本文通过压痕-分离实验确定眼外肌的黏附行

为。通过分析实验数据,得到眼外肌肌外膜的黏附特性;并利用 JKR 理论,推导出眼球运动模型中眼外肌和巩膜之间的黏附作用[18],进而得到这种黏附作用对眼球运动的贡献。

## 1 材料与方法

#### 1.1 单轴拉伸实验

实验材料是从当地屠宰场收集到的死亡 1 h 新鲜猪眼球及其眼外肌,猪龄为  $6 \sim 7$  月。样本置于生理盐水中,温度保持在 4 % 左右。使用 Instron 5544 材料试样机(Instron 公司,美国) 对样品进行测试,最大荷载为 5 N。本文对 13 条眼外肌试样进行单轴拉伸试验,长×宽×厚为(27.86±3.9)  $mm\times(4.91\pm1.27)$   $mm\times(2.80\pm0.35)$  mm。为了保证组织响应的可重复性,对试样以 2 mm/min 速度进行 7 次预循环加载和卸载(载荷不超过 0.1 N)。然后,以 5 mm/min 加载速度对试样进行单轴拉伸至 1 N 的载荷。名义应力  $\sigma$ 、应变  $\varepsilon$  的计算公式为:

$$\sigma = F_c/C_0$$

$$\varepsilon = (X - X_0)/X_0$$

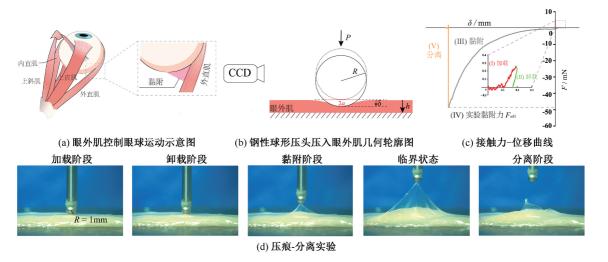
式中: $F_c$ 为夹头对眼外肌施加的外力; $C_0$ 为眼外肌试样的横截面积;X为在拉伸过程中眼外肌试样的长度; $X_0$ 为眼外肌试样拉伸前上下夹头之间的距离。将相同条件下的所有应力-应变曲线取平均值作为最终结果。

#### 1.2 压痕-分离实验

在生理上,眼外肌包裹着巩膜[见图 1(a)]。因为眼外肌和巩膜都是具有黏弹性的生物软组织,故黏附力不能被忽略。进行实验前,在室温下用剪刀和镊子将眼外肌剪下,并将其制成长×宽×厚为27 mm×9 mm×3 mm 条带。然后,在室温下进行压痕-分离实验,测量眼外肌表面的黏附行为。本实验

采用 Instron 5544 材料试样机(Instron 公司,美国),最大荷载为 5 N。分别使用自制的半径为 0.5、1、2 mm 钢性球形压头(弹性模量约为 200 GPa)对眼外肌进行 1.0 mm/min 压痕-分离实验。使用电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)(DP71,Olympus 公司,日本)进行图像采集。球形压头压入眼外肌条带的压入深度设为 0.2 mm,然后立即与条带分离。实验中对每个眼外肌样本的中间区域进行测量,且每个样本只测量 1 次。每个样本的测量时间为 2~5 min,在眼外肌与压头完全分离为止。由于生物软组织受环境温度与湿度的影响较大,眼

外肌暴露在空气中的时长是影响眼外肌表面黏附力的主要因素之一。为此,将眼外肌分为 4 组进行实验,分别是将从生理盐水中拿出的眼外肌暴露在空气中 15、30、45、60 min,然后对上述 4 种情况下的眼外肌条带进行压痕-分离测试,分析在不同暴露时间下眼外肌表面黏附力的变化。压头半径 R=0.5 mm,暴露时间分别为 15、30、45、60 min 时,样本数分别为 17、20、16、15 个;压头半径 R=1 mm,暴露时间分别为 15、30、45、60 min 时,样本数分别为 16、16、15 个;压头半径 R=2 mm,暴露时间分别为 15、30、45、60 min 时,样本数分别为 17、16、16、17 个。



#### 图 1 眼外肌黏附行为

Fig. 1 Adhesion behavior of EOMs (a) Schematic for EOMs controlling eye motion, (b) Geometrical profile of steel spherical punch indenting the EOM, (c) Contact force-displacement curve, (d) Pull-off test

注:图 1(b)中,虚线和实线分别代表压入前和后的压头。R为球形压头半径,P为向下施加的载荷,h为眼外肌厚度, $\delta$ 为压入位移,a为 CCD实验图像测得的接触半径。图 1(d)中,加载阶段,钢性球形压头压入眼外肌至一定深度;卸载阶段,接触力逐渐减小到 0,黏附阶段,钢性球形压头逐渐拉起肌外膜;临界状态,接触力达到峰值,根据参考文献 [23] 的定义,实验黏附力取最大接触力;分离阶段,压头与眼外肌完全分离。

### 1.3 理论分析

1.3.1 眼外肌肌外膜黏附 功和黏附 力分析 本文 研究球体和平面之间的接触问题,即 1 个钢性小球 压入眼外肌平面[见图 1(b)]。接触力(F)与压痕 位移(δ)的数据曲线揭示了加载、卸载、黏附、临界和分离 5 个阶段[见图 1(c)、(d)]。根据 JKR 理论<sup>[18,25]</sup>,压痕-分离实验中眼外肌的肌外膜和压头接触部分的黏附力为:

$$F_{\rm ad1} = \frac{4E_1^* a_1^3}{3R} - \sqrt{8\gamma \pi E_1^* a_1^3} \tag{1}$$

式中:R 为压头半径; $\gamma$  为黏附功,  $\gamma = B/(\pi a_0^2)$ ,

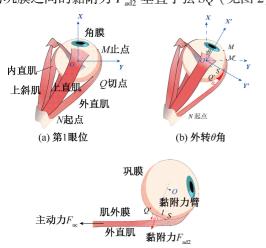
B 为图 1(c) 中眼外肌压痕-分离曲线在横轴之下的部分与横轴之间围成的面积,  $a_0$  为 F=0 时刻相对应的接触半径, 由接触力 F=0 的接触图像计算, 可以得到黏附功  $\gamma$  (单位: mN/mm);  $a_1$  为球形压头与眼外肌肌外膜临界状态 [见图 1(d)] 的接触半径,可利用 CCD 所得实验图像(圆形)进行测量;  $E_1^* = E_1/(1-\nu^2)$ ,  $E_1$  为眼外肌肌外膜的弹性模量,可通过体外单轴拉伸实验测得,  $E_1^*$  为有效弹性模量, 泊松比  $\nu=0.47$ 。

1.3.2 眼外肌与巩膜黏附作用分析 在眼球运动 过程中,眼外肌肌外膜与巩膜分离,并伴有黏附现象的 发生,类似于球面与平面的接触,仍然使用 JKR 理论来进行求解。则巩膜与眼外肌之间的黏附力为[18,25]:

$$F_{\text{ad2}} = \frac{4E_2^* a_2^3}{3R} - \sqrt{8\gamma \pi E_2^* a_2^3}$$
 (2)

式中: $a_2$  为外直肌与巩膜分离时黏附区域的弧长对应的弦长(l) 的 1/2,由于眼球转动不同角度,黏附区域的接触弧长不一样,故  $a_2$  是变化的;眼球半径  $R_e$  = 12. 43 mm; $\gamma$  为黏附功,与式(1) 中的黏附功相同; $1/E_2^* = (1-\nu^2)/E_1 + (1-\nu^2)/E_2$ , $E_2$  为巩膜的弹性模量, $E_2$  = 0. 6 MPa<sup>[26]</sup>。

以眼球外转为例,当外直肌主动收缩时,眼球外转。眼球外转过程中,外直肌主动收缩力和内直肌被动力对于维持眼球的力学平衡起主要作用 $^{[8]}$ 。因此,本文主要计算内直肌被动力矩 $(M_{pa})$ 和外直肌主动力矩 $(M_{ac})$ 。根据本课题组先前的研究 $^{[6-7,9]}$ ,建立眼球运动时眼外肌关键点之间的几何关系和眼球运动平衡方程。眼球运动中黏附区域为运动前后切点间的区域,故 JKR 模型中眼外肌与巩膜之间的接触直径为切点间弧长对应的弦(l),眼外肌与巩膜之间的黏附力 $F_{ad2}$ 垂直于弦SQ'(见图2)。



(c) 巩膜和眼外肌之间黏附作用示意图

#### 图 2 黏附力调节眼球运动

Fig. 2 Adhesion regulates the eye motion (a) Primary position, (b) Abduction  $\theta$ , (c) Illustration for adhesion interaction between the sclera and the EOM

注:图 2(a)中,在眼球第 1 注视位建立参考坐标系 XOY, O 为眼球中心,M、N、Q 分别为外直肌的止点、起点、切点;图 2(b) 中,X'OY' 为当前位置,其中 M 和 Q 随眼球外转  $\theta$  变换为 M' 和 Q' ,S 为新的切点,分离角  $\alpha$  为外直肌与巩膜(红色区域) 黏附相互作用的角度;图 2(c) 中,红色箭头表示巩膜和眼外肌之间黏附作用。

眼球在内直肌被动力矩 $(M_{pa})$ 、外直肌主动力矩 $(M_{ae})$ 、眼外肌和巩膜黏附力矩 $(M_{ad})$ 及其余眼眶组织的阻力矩 $(M_{t})$ 作用下保持平衡,相应的平衡方程如下:

$$M_{\rm ac} - M_{\rm ad} - M_{\rm pa} - M_{\rm t} = 0 \tag{3}$$

根据相关文献[6],眼球运动中各条眼外肌被动力公式为:

$$F_{\rm pa} = b \frac{A_0}{L_0^3} \Delta L^3 + c \frac{A_0}{L_0^2} \Delta L^2 + d \frac{A_0}{L_0} \Delta L \tag{4}$$

本文主要求解内直肌被动力。其中,内直肌横截面积  $A_0$  = 17.39 mm²,初始长度  $L_0$  = 39.42 mm;  $\Delta L = L - L_0$ , L 为眼球转动相应角度后内直肌长度; b 、c 和 d 为常数, b = 23.86, c = 8.43, d = 0.787。

阻力矩  $M_{\rm t} = 12.43\theta K_{\rm t} R_{\rm e}^{[27]}$ ,限制刚度  $K_{\rm t} = 1.245 \, {\rm mN/(°)}^{[27]}$ 。 $M_{\rm pa} = F_{\rm pa} \times R_{\rm e}$ , $M_{\rm ac} = F_{\rm ac} \times R_{\rm e}$ , $M_{\rm ad} = (F_{\rm ad} \times l)/6$ ;其中, $F_{\rm ac}$  为外直肌主动力。

#### 1.4 数据分析

数据以均值±标准差表示。使用 SPSS 24.0 软件的单因素方差分析(ANOVA)进行 LSD 检验,进行相应的统计分析。P<0.05表示差异具有统计学意义。

## 2 结果

#### 2.1 眼外肌肌外膜黏附功和黏附力的分析

本文应用与界面黏附力相关的 JKR 理论 [18] 分析眼外肌肌外膜的黏附行为。通过体外单轴拉伸实验测得眼外肌生理阶段的弹性模量  $E_1$  约为 31 kPa。将黏附功 $\gamma$  和  $E_1$  的实验数据代入式(1),得到眼外肌黏附力  $F_{adl}$  的相关计算数据。结果表明,暴露在空气中的时间长短显著影响肌外膜的黏附行为(见图 3)。随着眼外肌暴露在空气中时间越长, $\gamma$  和  $F_{adl}$  逐渐出现减小的趋势。以 R=1 mm 压头为例, $\gamma$  从暴露 15 min 时的 68 mN/mm 下降到暴露 1 h 的 3 mN/mm,减少超过 95% (P<0.001)。同一尺寸压头下,相应的  $F_{adl}$  从 ~ 36 mN 变化到~3 mN,下降了 90%以上(P<0.001)。

黏附功  $\gamma$  和  $F_{\rm adl}$  对钢性压头尺寸具有不同的响应(见图 4)。在相同的暴露时间下, $\gamma$  表现出明显的尺度效应,通过亚毫米尺寸的压头获得的  $\gamma$  远高于毫米尺寸的压头获得的  $\gamma(P<0.001)$ 。暴露 1 h,R=0.5 mm 压头下的  $\gamma(\sim 18 \text{ mN/mm})$  约为

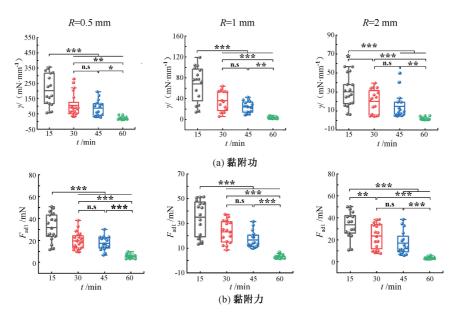


图 3 眼外肌肌外膜的黏附功和黏附力

Fig. 3 Work of adhesion and adhesion force for the epimysium of EOM (a) Work of adhesion, (b) Adhesion force

注: \*P<0.05, \*\*P<0.01, \*\*\*P<0.001; n.s 表示 P>0.05。

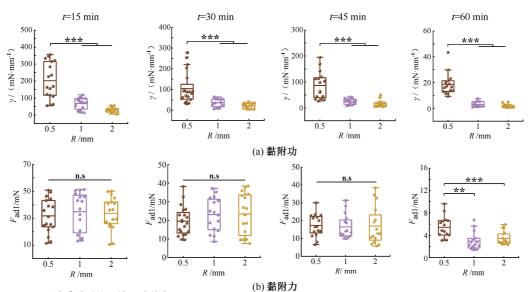


图 4 肌外膜黏附作用的尺寸效应

**Fig. 4 Scale effect of the epimysium adhesion** (a) Work of adhesion, (b) Adhesion force 注: \*\*\*P<0.01, \*\*\*\*P<0.001; n. s 表示 P>0.05。

R=1 mm 压头下  $\gamma$ (~3 mN/mm)的 6 倍。然而,除了眼外肌肌外膜暴露 1 h 外, $F_{\rm adl}$  在其他组没有尺寸效应。

本文通过压痕-分离实验得到眼外肌肌外膜黏附力的实验值。本文根据 JKR 理论[见式(1)]计算出眼外肌肌外膜黏附力的理论值。结果显示,

实验值和理论值之间有较好的一致性,表明 JKR 理论适用于对眼外肌肌外膜的黏附力进行分析 (见图 5)。

### 2.2 眼外肌与巩膜黏附作用的分析

结果表明,眼外肌与巩膜之间的分离角是眼球外转角的单次递增函数[见图 6(a)]。黏附力和外

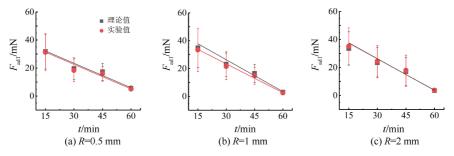


图 5 眼外肌肌外膜黏附力实验值和理论值的比较

Fig. 5 Comparisons between the adhesion force of the EOM epimysium of EOM obtained from the experiment and theory (a) R = 0.5 mm, (b) R = 1 mm, (c) R = 2 mm

直肌主动力随眼球外转角度逐渐增大[见图 6 (b)],并且黏附力变化幅度比主动动力大。随着外转角度的增大,黏附力矩呈指数型上升,拟合函数为 $M_{\rm nd2} = 0.32e^{\theta/20} - 0.43(N \cdot {\rm mm})[见图 6(c)]。$ 

并且黏附力矩占阻力矩、被动力矩和黏附力矩总和 的比例也越来越大,眼球每多转 5°,比例上升 2% ~ 3% [见图 6(d)],说明随着眼球外转角度的增大, 黏附力矩对维持眼球平衡的贡献逐渐增大。

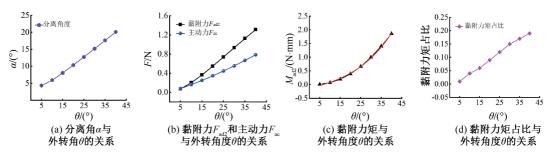


图 6 理论分析结果

Fig. 6 Theoretical analysis results (a) Relationship of separation angle  $\alpha$  with the abduction angle  $\theta$ , (b) Relationship of adhesion force  $F_{ad2}$  and the active force  $F_{ac}$  with the abduction angle  $\theta$ , (c) Relationship of adhesion torque with the abduction angle  $\theta$ , (d) Relationship of proportion of adhesion torque with the abduction angle  $\theta$ 

## 3 讨论

本文通过压痕-分离实验,证明了眼外肌肌外膜存在着明显的黏附行为,并结合 JKR 理论分析了眼外肌与巩膜之间的黏附作用在眼球运动过程中对维持眼球平衡的贡献<sup>[9,18]</sup>。在眼球运动过程中,由于眼外肌和巩膜具有黏弹性特性,它们之间不可避免地发生黏附作用<sup>[28]</sup>。研究发现,相关的黏附作用主要由包绕肌纤维的肌外膜黏附变形造成,提示可以从新的角度理解眼球运动。然而,一直以来这种黏附作用却被忽视。

温度、湿度和几何形状是影响软组织生物力学性能的关键因素<sup>[29-30]</sup>。本文通过实验研究表明,离体眼外肌肌外膜暴露在空气中时间的长短对其黏附性有显著的影响(见图 3、4)。研究表明,临床医

师做眼外肌手术的时间约为  $30 \text{ min}^{[31]}$ 。因此,本文选取压头半径 R=1 mm 并且暴露时间为 30 min 时相应的黏附功的实验数据,对眼外肌和巩膜之间的黏附力进行计算。

在解剖学上, 巩膜局部被部分眼外肌包裹<sup>[1]</sup>。在眼球运动过程中, 眼外肌与巩膜之间会出现包裹和分离的现象, 这与两者之间存在的黏附行为有关。眼球外转时, 眼外肌与巩膜之间的分离角随眼球外转角度的增大逐渐增大[见图 6(a)], 该结果与之前的研究结果一致<sup>[32]</sup>。Collins 等<sup>[33]</sup>通过人体实验发现, 右眼外转 15°时, 外直肌的主动力为316.5 mN; 右眼外转 30°时, 外直肌的主动力为487.4 mN。本文结合 JKR 理论计算出的外直肌主动力[见图 6(b)], 在这两种转角时分别为250.6、554.4 mN, 与 Collins 等<sup>[33]</sup>的研究结果处于同一数

量级,且数值相差不大,验证了本文眼外肌主动力 计算结果的合理性,也间接证明 JKR 理论能较好地 描述巩膜与眼外肌之间的黏附作用。本文研究结 果表明,眼外肌肌外膜与巩膜之间存在黏附作用, 这种黏附作用在眼球运动过程中对维持眼球的平 衡起一定的作用。黏附力矩占阻力矩、被动力矩和 黏附力矩总和的比例随眼球外转角度的增大而增 大[见图 6(d)],说明随着眼球外转角度的增大,黏 附作用对维持眼球平衡的贡献逐渐增大。

本文存在如下的局限性:① 由于人体组织难以 获得,故利用从猪眼上获得的参数对人体的眼球运 动模型进行分析。② JKR 理论中的压头是各向同 性材料,而眼球内容物较多,本文对这部分进行了 简化。③ 黏附力与两个接触物体的界面属性有关, 眼外肌与巩膜之间的黏附力较难测得,故本研究采 用钢性球形压头测量眼外肌的黏附性能。此外,在 本文的黏附实验中,钢球与眼外肌脱黏时,眼外肌 与肌外膜产生了分离[见图 1(d)]。这种情况下, 用 JKR 模型处理也会带来误差。实际上,在体眼外 肌与巩膜的黏附区还存在有体液和脂肪等组织,这 些都会影响到黏附功。因此,后续拟在体液环境 下,采用包裹巩膜的压头对眼外肌进行压痕-分离实 验,以获得与生理状态相近的眼外肌与巩膜的黏附 特性,为建立更为精确的眼球运动模型提供理论支 持。④ 眼外肌沿长度与厚度方向的弹性模量明显 不同。但由于厚度方向的弹性模量很难测得,故本 文在进行理论分析时, 眼外肌厚度方向的弹性模量 采用体外单轴拉伸实验测得的眼外肌生理阶段的 弹性模量代替。

## 4 结论

离体眼外肌肌外膜暴露在空气中时间的长短 对其黏附特性有显著影响。JKR 理论能较好地描述 巩膜与眼外肌之间的黏附作用。该黏附作用在眼 球运动中参与维持眼球的平衡,对调节眼球运动有 一定的贡献。本文研究结果可为斜视等眼球运动 相关疾病的研究提供理论依据。

#### 参考文献:

[ 1 ] HORN AKE, STRAKA H. Functional organization of extraocular motoneurons and eye muscles [ J ]. Annu Rev

- Vis Sci, 2021, 7: 793-825.
- [ 2 ] FELDMAN AG, ZHANG L. Eye and head movements and vestibulo-ocular reflex in the context of indirect, referent control of motor actions [ J]. J Neurophysiol, 2020, 124 (1): 115-133.
- [ 3 ] SPARKS DL. The brainstem control of saccadic eye movements [ J ]. Nat Rev Neurosci, 2002, 3 (12): 952-964.
- [4] ISKANDER J, HOSSNY M, NAHAVANDI S, et al. An ocular biomechanic model for dynamic simulation of different eye movements [J]. J Biomech, 2018, 71: 208-216.
- [ 5 ] ISKANDER J, HOSSNY M. Measuring the likelihood of VR visual fatigue through ocular biomechanics [ J]. Displays, 2021, 70: 1-9.
- [ 6 ] GAO Z, GUO H, CHEN W. Initial tension of the human extraocular muscles in the primary eye position [ J ]. J Theor Biol, 2014, 353; 78-83.
- [7] GUO H, GAO Z, CHEN W. Contractile force of human extraocular muscle: A theoretical analysis [J]. Appl Bionics Biomech, 2016: 1-8.
- [8] GUO H, GAO Z, HAN B, *et al.* In vivo experimental study on the resistance and stiffness of orbital suspension tissues with/without the extraocular muscles [J]. Biomed Eng Online, 2019, 18(1): 1-11.
- [9] 陈维毅, 孙秀珍. 眼耳鼻咽喉生物力学[M]. 上海: 上海交通 大学出版社, 2017; 109-121.
- [10] ROBINSON DA. A quantitative analysis of extraocular muscle cooperation and squint [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 1975, 14(11): 801-825.
- [11] MCLOON LK, VICENTE A, FITZPATRICK KR, et al. Composition, architecture, and functional implications of the connective tissue network of the extraocular muscles [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2018, 59(1): 322-329.
- [12] 郭红梅, 高志鹏, 陈维毅. 离体狐眼外肌被动行为的超弹性分析[J]. 医用生物力学, 2017, 32(1): 27-31. GUO HM, GAO ZP, CHEN WY. Hyperelastic analysis for the passive behavior of fox extraocular muscles *in vitro* [J]. J Med Biomech, 2017, 32(1): 27-31.
- [13] SIERRA M, ORTILLÉS Á, MIANA-MENA FJ, et al. Effect of cryopreserved amniotic membrane on the mechanical properties of skeletal muscle after strabismus surgery in rabbits [J]. Curr Eye Res, 2018, 43(2): 193-199.
- [14] YOO L, REED J, SHIN A, et al. Atomic force microscopy determination of Young's modulus of bovine extra-ocular tendon fiber bundles [J]. J Biomech, 2014, 47(8): 1899-1903.
- [15] KALYANAM S, TOOHEY KS, INSANA MF. Modeling

- biphasic hydrogels under spherical indentation: Application to soft tissues [J]. Mech Mater, 2021, 161: 1-16.
- [16] LI Z, TOFANGCHI A, STAVINS RA, *et al.* A portable pen-sized instrumentation to measure stiffness of soft tissues *in vivo* [J]. Sci Rep., 2021, 11(1): 1-11.
- [17] NEGISHI T, ITO K, KAMONO A, et al. Strain-rate dependence of viscous properties of the plantar soft tissue identified by a spherical indentation test [J]. J Mech Behav Biomed, 2020, 102; 1-6.
- [18] JOHNSON KL, KENDALL K, ROBERTS AD. Surface energy and the contact of elastic solids [J]. Proc R Soc Lond, 1971, 324 (1558): 301-313.
- [19] KENDALL K. The adhesion and surface energy of elastic solids [J]. J Phys D Appl Phys, 1971, 4(8): 1186-1195.
- [20] KENDALL K. Thin-film peeling-the elastic term [J]. J Phys D Appl Phys, 1975, 8(13): 1449-1452.
- [21] GU Z, LI S, ZHANG F, *et al.* Understanding surface adhesion in nature: A peeling model [J]. Adv Sci, 2016, 3(7): 1-13.
- [22] PIERRAT B, MACMANUS B, MURPHY G, et al. Indentation of heterogene ous soft tissue: Local constitutive parameter mapping using an inverse method and an automated rig [J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2018, 78: 515-528.
- [23] DAI AN, HE W, WANG SB, *et al.* In vivo adhesive behavior of human facial skin by a modified indentation test [J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2019, 92; 172-178.
- [24] ZHU D, LIU Y, GILBERT JL. Micromechanical measurement of adhesion of dehydrating silicone hydrogel

- contact lenses to corneal tissue [J]. Acta Biomater, 2021, 127: 242-251.
- [25] JAGOTA A, HUI CY. Adhesion, friction, and compliance of bio-mimetic and bio-inspired structured interfaces [J]. Mat Sci Eng R, 2011, 72(12): 253-292.
- [26] 范雨田, 陈凌峰, 高志鹏, 等. 巩膜的区域性力学性能研究 [J]. 医用生物力学, 2020, 35(2): 178-183. FAN YT, CHEN LF, GAO ZP, *et al.* Regional mechanical properties of the sclera [J]. J Med Biomech, 2020, 35 (2): 178-183.
- [27] 郭红梅. 基于眼外肌本构模型的眼球运动建模及临床应用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [28] WATSON PG, YOUNG RD. Scleral structure, organisation and disease. A review [J]. Exp Eye Res, 2004, 78(3): 609-623.
- [29] CHEN K, ROWLEY AP, WEILAND JD. Elastic properties of porcine ocular posterior soft tissues [J]. J Biomed Mater Res A, 2010, 93(2): 634-645.
- [30] 陈亮宇, 赵婧, 何泽栋, 等. 水含量对骨组织生物摩擦学行为的 影响 [J]. 生物医学工程学杂志, 2016, 33(3); 466-472.
- [31] NELSON LB. Topical anesthesia in strabismus surgery: A review of 101 cases [ J ]. J Pediatr Ophthalmol Strabismus, 2009, 46(4): 218-222.
- [32] CLARK RA, DEMER JL. The Effect of Axial Length on Extraocular Muscle Leverage [J]. Am J Ophthalmol, 2020, 216: 186-192.
- [33] COLLINS CC. Orbital mechanics [M]//BACH-Y-RITA P, COLLINS CC, HYDE JE, (eds). The control of eye movements. New York: Academic Press, 1971: 283-325.