

一种新型膝关节生物力学测试方法的设计与验证



王俊瑞^{1,2}, 赵智平^{3,4}, 姜程腾¹, 聂闯⁵, 时全星⁵, 刘猛¹, 顾建文⁵

1. 中国科学院大学 存济医学院 (北京 100000)
2. 成都市第二人民医院 骨外科 (成都 610000)
3. 北京航空航天大学 生物与医学工程学院 (北京 100000)
4. 吉林大学第一医院 眼科 (长春 130021)
5. 中国人民解放军战略支援部队特色医学中心 (北京 100000)

【摘要】 本研究设计一种新的结构动力学测试方法及装置,用于测试动态轴向载荷对膝关节软骨与半月板的生物力学影响。首先,使用不同力锤对空载状态下实验装置施加轴向动载荷,计算实验装置的最大加速度信噪比。然后,将实验标本分为无标本组(空载,无标本)、假标本组(加载聚丙烯标本)、牛膝关节标本组(加载牛膝关节标本),进行测试。测试结果表明,该实验装置及方法可提供稳定的轴向动载荷,且实验结果有较好的可重复性。最终结果证实,通过本研究设计的装置可以有效区分实验标本的动态特性。本研究提出的实验方法为深入研究轴向动载荷作用下膝关节结构响应的生物力学机制提供了新的途径。

【关键词】 结构动力学; 膝骨关节炎; 半月板损伤; 生物力学; 软骨损伤

Design and validation of a novel knee biomechanical test method

WANG Junrui^{1,2}, ZHAO Zhiping^{3,4}, JIANG Chengteng¹, NIE Chuang⁵, SHI Quanxing⁵, LIU Meng¹, GU Jianwen⁵

1. Savaid Medical School, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, P. R. China
2. Department of Orthopaedics, Chengdu Second People's Hospital, Chengdu 610000, P. R. China
3. School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100000, P. R. China
4. Department of Ophthalmology, First Hospital of Jilin University, Changchun 130021, P. R. China
5. PLA Strategic Support Force Characteristic Medical Center, Beijing 100000, P. R. China

Corresponding author: GU Jianwen, Email: gujianwen5000@sina.com

【Abstract】 A novel structural dynamics test method and device were designed to test the biomechanical effects of dynamic axial loading on knee cartilage and meniscus. Firstly, the maximum acceleration signal-to-noise ratio of the experimental device was calculated by applying axial dynamic load to the experimental device under unloaded condition with different force hammers. Then the experimental samples were divided into non-specimen group (no specimen loaded), sham specimen group (loaded with polypropylene samples) and bovine knee joint specimen group (loaded with bovine knee joint samples) for testing. The test results show that the experimental device and method can provide stable axial dynamic load, and the experimental results have good repeatability. The final results confirm that the dynamic characteristics of experimental samples can be distinguished effectively by this device. The experimental method proposed in this study provides a new way to further study the biomechanical mechanism of knee joint structural response under axial dynamic load.

【Key words】 Dynamics of structures; Knee osteoarthritis; Meniscal injury; Bio-mechanics; Cartilage injury

DOI: 10.7507/1001-5515.202304042

基金项目: 四川省科技厅中央引导地方项目科技发展专项 (2022ZYD0096)

通信作者: 顾建文, Email: gujianwen5000@sina.com

0 引言

膝关节软骨和半月板在胚胎学、解剖学和功能上有着密切的关系,一定程度上解释了为什么关节软骨和半月板病变常同时发生,并且在关节软骨或半月板损伤发生时,已经出现或即将出现膝关节骨关节炎(knee osteoarthritis, KOA)^[1]。

在临床治疗中,人们越来越认识到半月板损伤可引起 KOA 迅速进展。为了研究半月板损伤引起 KOA 的生物力学机制。Jones 等^[2] 基于材料实验机设计了一种对人体膝关节内侧半月板施加轴向载荷,同时测量加载过程中膝关节内侧半月板产生的环向应变的方法。该研究认为,内侧半月板在轴向载荷作用下产生的环向应变可形成环箍应力,对保持半月板承重能力非常重要。当半月板受到不同类型的损伤后,将对环箍应力产生相应的影响。Beamer 等^[3] 认为,半月板与关节软骨的有效接触使半月板产生环箍应力,当半月板损伤后,环箍应力的异常可引起 KOA 进展。Harner 等^[4] 研究认为,在内侧间室中,内侧半月板后根部撕裂导致膝关节面的峰值接触应力比完整状态下增加 25%。Riemenschneider 等^[5] 利用材料测试系统和设计的二自由度耐力计,对关节软骨的疲劳和耐力特性进行了表征。该研究认为,体外培养关节软骨表现出疲劳寿命随着载荷的减小而增加的特性,这与修复后根部撕裂可恢复胫骨关节的接触应力并减缓 KOA 进展的生物力学机制一致。

KOA 或半月板运动相关损伤中普遍存在半月板外凸^[6-7],为引起环箍应力功能丧失与膝关节早期退变的主要原因^[8-10]。Stehling 等^[11] 运用膝关节磁共振成像技术对 KOA 患者和健康对照组膝关节在负重条件下的变化进行研究后认为,在退行性疾病患者中轴向静载荷对膝关节软骨、韧带形态的影响更为明显,并且与内侧半月板外凸的增加有关。Kubota 等^[12] 开发了外侧半月板中心化手术以减轻外侧半月板的凸出,以解决外侧半月板外凸(lateral meniscus extrusion, LME)后导致的软骨关节面丧失环箍应力的保护,然而由于外侧半月板后部的接触压力和接触面积均未恢复,因而不能恢复外侧半月板后部损伤引起的环箍应力异常。

在研究 KOA 生物力学机制的体外实验中,相对于目前普遍应用的静载荷,Brill 等^[13] 在离体模型中研究轴向冲击与骨软骨损伤模式之间的关系后认为,不同程度的轴向冲击载荷造成关节软骨损伤的严重程度可分为:弹性变形、软骨下微骨折、

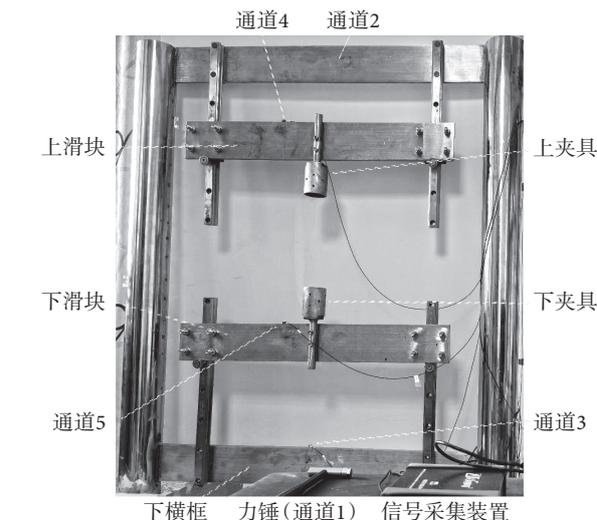


图1 实验测试系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the test system

软骨表面破裂、骨软骨宏观裂缝,并且应用动载荷可以更接近膝关节软骨与半月板损伤的力学环境。Fukuda 等^[14] 认为,应用轴向动载荷对膝关节及半月板进行生物力学研究,可以确定载荷的影响范围和关节软骨组织学损伤,而半月板在轴向动载荷的传递中起到非常重要的作用,关节软骨对载荷传递的贡献小于半月板。由此可见,运用动态轴向载荷对 KOA 发病过程进行研究,更符合膝关节软骨与半月板之间的相互作用的生物力学环境。

目前,KOA 患者病情进展过程中,关节软骨退变及半月板损伤之间的生物力学机制并未完全阐明。Danso 等^[15] 研究后认为,半月板在断裂前,具有更高的非线性和线性弹性刚度及能量吸收能力,而软骨在断裂前具有更长的非线性区域,能够承受更大的应变。由于半月板在受到轴向压力时,半月板的形变及半月板外凸中其位移对应变测量传感器的测量精度造成不可避免的影响^[2],为研究膝关节对动态轴向载荷的响应变化并寻找更为有效的检测半月板外凸的方法,本研究设计了一种新的测试方法及装置,并通过实验验证该装置测试结果的一致性,以及膝关节在轴向动载荷作用下响应的有效性,以期本研究所提的测试方法及装置能够用于研究动态轴向载荷对膝关节软骨与半月板的生物力学影响。

1 材料和方法

1.1 实验装置设计

为了对膝关节施加轴向动载荷,设计了如图1所示的实验装置。将上、下夹具分别固定于上、下

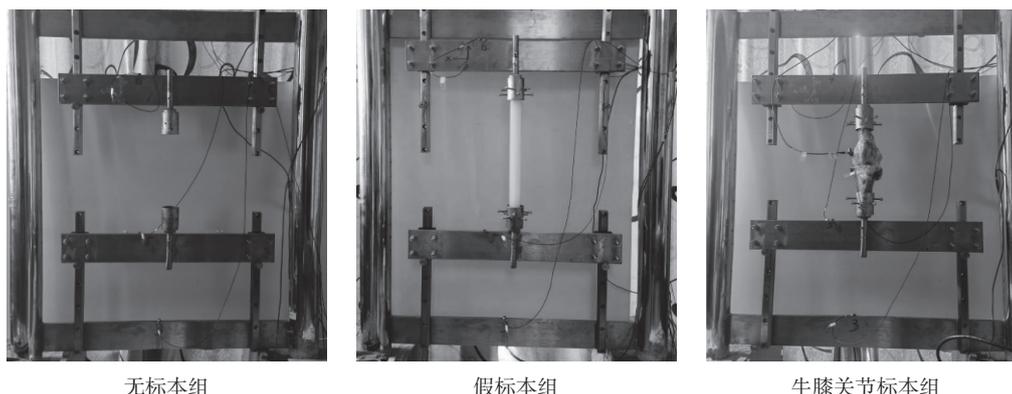


图2 测试系统稳定性验证

Fig.2 Test system stability verification

滑块,用于固定标本并使装置仅可沿垂直方向移动。上、下两部分装置分别安装于装置的上、下横框上。轴向载荷直接施加在上夹具上,以模拟沿股骨传导的轴向载荷。实验开始前,对实验装置各部分进行检查确保标本固定牢靠。该装置的优点在于可控制动载荷沿装置约束方向加载。在整个实验过程中,采用同步数字信号采集装置VK7016N(微精艺电子有限公司,中国)采集测试标本的动载荷和加速度响应信号(采样率5 kHz, 24 bit, 16通道),用于实验数据分析。

1.2 实验装置验证

1.2.1 实验装置最大加速度信噪比的测试 实验测试时,将传感器一端断开,使测量系统输入端短路,检查输出噪声范围。即,逐个通道检查是否接通和是否有通道噪声,如有,则从输出端逐级检查并排除。接通传感器,逐个检查各测点部位结构(用工具轻敲各测点),在工作站观察采集信号输出波形,以检查传感器是否正常工作。逐个检查各仪器选择量程是否正确,设置传感器灵敏度及数据保存精度等参数。

检查完成后,对空载状态下实验测试系统的最大加速度信噪比进行测试,实验装置如图1所示。首先,通过力锤(通道1)采集动载荷的大小。然后,分别于实验装置的上、下滑块及下横框上安装校准过的压电加速度计(AYDV03, FATRI-UTC, 中国),用于记录测试装置各部位加速度响应。加速度信号采集通道设置为:将一个校准过的压电加速度计(带宽1~10 kHz,灵敏度100 mV/g,范围 ± 50 g,单轴)用胶粘接在下横框上,通过通道3获取下横框的加速度响应;将一个压电加速度计(带宽1~10 kHz,灵敏度10 mV/g,范围 ± 500 g,三轴)用胶粘接在夹具的上滑块,通过通

道4获取上滑块的加速度响应;将压电加速度计(带宽1~10 kHz,灵敏度100 mV/g,范围 ± 50 g,单轴)用胶粘接在夹具的下滑块上,通过通道5获取下滑块的加速度响应。由于测试装置的运动仅限于垂直方向,因此加速度传感器的轴向设置为垂直向上。由于通道2位于上横框,无论是否加载测试样本,其响应信号均为轴向动载荷传递过程的中间环节。与实验样本更为相关的响应最终通过通道3与通道5采集,故本文未对通道2的响应信号进行分析。

1.2.2 实验装置测量结果的一致性及其有效性验证

验证实验装置稳定性及一致性时,分别对测试装置在空载及加载不同标本状态下的各部位加速度响应进行测试。按照三种不同的测试状态及标本,共分为3组:无标本组(空载,无标本)、假标本组(加载聚丙烯标本)、牛膝关节标本组(加载牛膝关节标本)。其中,牛膝关节标本组标本采用1.2.3小节所描述方法准备。如图2所示,为各测试组加载标本后实物图。用不同材料的力锤(橡胶、尼龙、铝)对测试标本施加3种不同大小的动载荷。

1.2.3 测试牛膝关节标本的准备 牛膝关节标本来自食品贸易屠宰场的成熟牛。新鲜牛膝关节于屠宰后8 h内冷藏并运至实验室。样品到达实验室后,按照标准程序排除有膝关节韧带病变的标本后,立即用液氮冷冻。

实验前4 h,将牛膝关节标本在室温下解冻。从标本中去除皮肤、皮下脂肪、肌肉和肌腱,直到关节囊。除去股骨与胫骨骨皮质上的软组织,包括关节囊边缘的骨膜。切除髌骨,注意保护关节囊、侧副韧带和前后交叉韧带的完整性,检查并确保实验所用的每个标本均没有明显的关节炎或半月板撕裂。制备实验测试用牛膝关节标本时,以膝关节

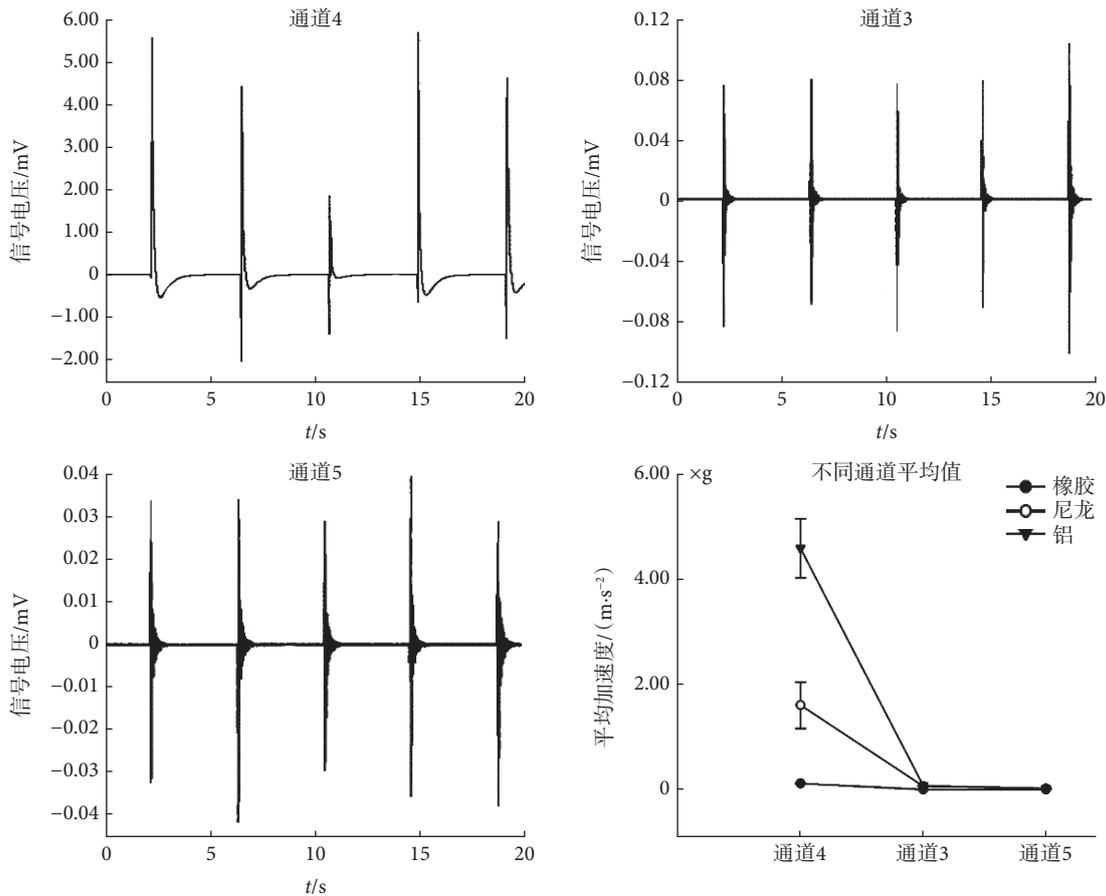


图3 实验装置加速度信噪比测试结果

Fig.3 The acceleration signal-to-noise ratio test results of the experimental device

线为中心，在距膝关节线约 20 cm 处横断股骨和胫骨。股骨横断角度设置为胫骨垂直悬挂时关节屈曲 10°。胫骨横断角度为使关节处于中立位的角度，需使股骨内侧髁和外侧髁同时接触到各自的半月板。上述定位操作完成后，调整股骨和胫骨与圆柱形夹具紧密接触。锁定夹具，并对膝关节施加轴向动载荷进行实验。

1.3 加载方式

测试实验装置的最大加速度信噪比和验证测试结果的一致性时，依次使用 3 种不同材料（橡胶、尼龙、铝）的力锤对测试标本施加不同程度动载荷，加载 5 次为一个周期，每种力锤循环进行三个周期的测试，当一种力锤的循环测试完成时，更换力锤依次重复加载测试。使用相同的方式对 3 个标本组（无标本组、假标本组、牛膝关节标本组）进行测试。记录各组采集通道数据，进行统计分析。

1.4 数据统计

对采集获得的加速度变化数据进行统计分析，用以对测试结果的一致性及其有效性进行验证。验证系统的一致性实验时，计算克朗巴哈系数 (Cron-

bach's α)，并对测试结果进行一致性分析。验证系统有效性实验时，将采集到的数据以夏皮罗-威尔克检验 (Shapiro-Wilk Test) 来评价数据的分布情况。假设正态分布时，对无标本组、假标本组、牛膝关节标本组的加速度响应数据进行方差分析和图基检验 (Tukey's Test)。

2 结果

2.1 实验装置的加速度信噪比

实验系统加速度信噪比的测定：当实验系统进入工作状态后，在空载状态下使用力锤（铝）施加动载荷，测试装置中心的加速度值，并参照振动台系统加速度信噪比计算公式，计算出测试系统的加速度信噪比 M ，如式 (1) 所示：

$$M = 20\lg \times \frac{a_{\max}}{a_0} \quad (1)$$

式中， a_{\max} 为实验系统通道 4 的最大输入加速度测值，平均值为 $(54.0 \pm 0.6) \text{ g}$ ； a_0 为实验系统未加载测试标本时系统中心通道 5 的加速度测值，平均值 $(0.045 \pm 0.012) \text{ g}$ ；平均加速度信噪比为 61.5 dB，实验装置加速度信噪比测试结果如图 3 所示。

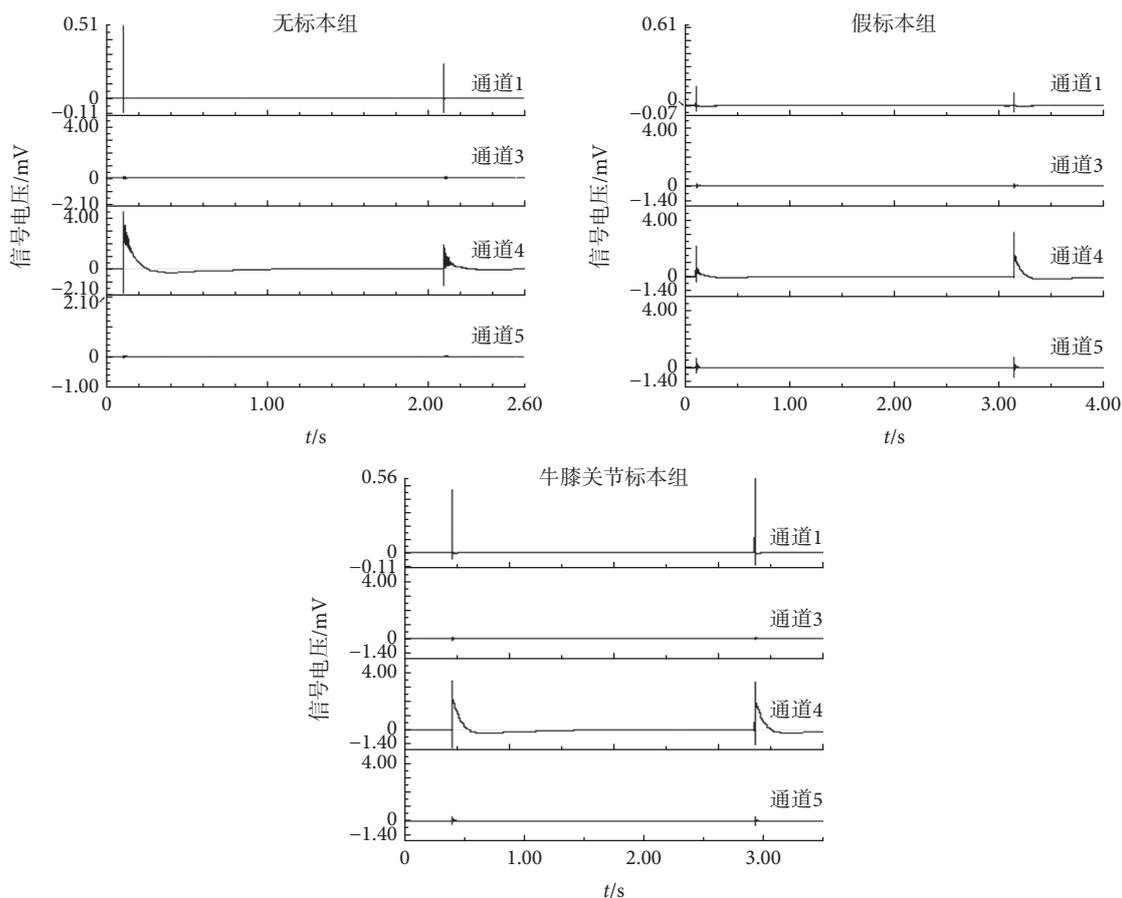


图 4 不同组加速度响应时域信号

Fig.4 Acceleration responses time domain signals of different groups

2.2 实验测试结果的一致性

不同实验组中,各通道采集的加速度响应信号电压如图 4 所示。

验证系统测试结果一致性时,实验装置的设置如图 2 所示。实验过程中所施加动载荷程度如图 5 所示,平均值分别为:橡胶力锤 (27.91 ± 0.84) N、尼龙力锤 (127.60 ± 5.35) N、铝力锤 (237.46 ± 13.14) N。使用不同力锤施加的动载荷程度在 3 个不同测试组之间差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。通过通道 3 采集到的假标本组与牛膝关节标本组动态响应差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。根据装置一致性测试数据对测试系统一致性克朗巴哈系数进行计算,如表 1 所示。

2.3 实验装置的有效性

如图 6 所示,对假标本组在不同力锤作用下通道 5 的响应进行比较,随着载荷的增加,各组间差异具有统计学意义 ($MD = 0.31 (0.18, 0.43)$, $P < 0.01$),而牛膝关节标本组中尼龙力锤、铝力锤激励下通道 5 的加速度响应平均值差异无统计学意义 ($P > 0.05$),但两组间加速度响应变化存在差异且

具有统计学意义 ($MD = 0.35 (0.25, 0.46)$, $P < 0.01$)。

3 讨论

目前,半月板损伤、半月板外凸、关节软骨损伤在 KOA 发病过程中的生物力学机制尚不明确,需要对膝关节的结构动力学特性进行深入研究^[16-18]。Dortmans 等^[19]运用结构动力学方法研究膝关节对动载荷的响应后,认为膝关节在动载荷作用下呈现非线性响应。Safaei 等^[20]认为在频率范围为 50 Hz ~ 10 kHz 和输入力低于 5 N 的范围内,人类膝关节可以被视为一个线性系统。Spahn 等^[21]认为长期低频的异常应力会导致软骨组织结构及关节软骨细胞的损伤风险更高。但由于这些结构动力学研究存在不同的研究边界条件,其结果间通用性不强,且预测膝关节动力响应存在较大困难。

本研究中,在实验装置空载状态下,通道 5 所在下滑块仅与实验装置的下框架相连接,对实验装置施加动载荷后,受到下框架作用产生加速度响应,并引起测试结果误差,如图 2 所示。通过对通

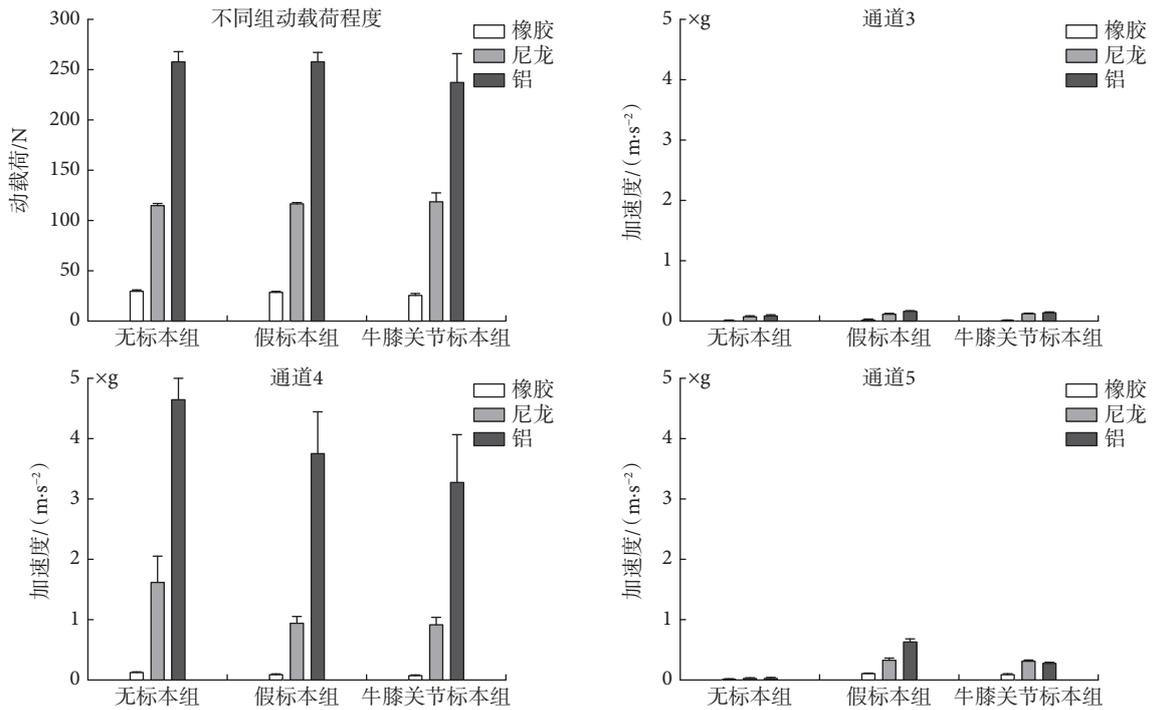


图 5 系统稳定性测试不同通道结果

Fig.5 System stability test results of different channels

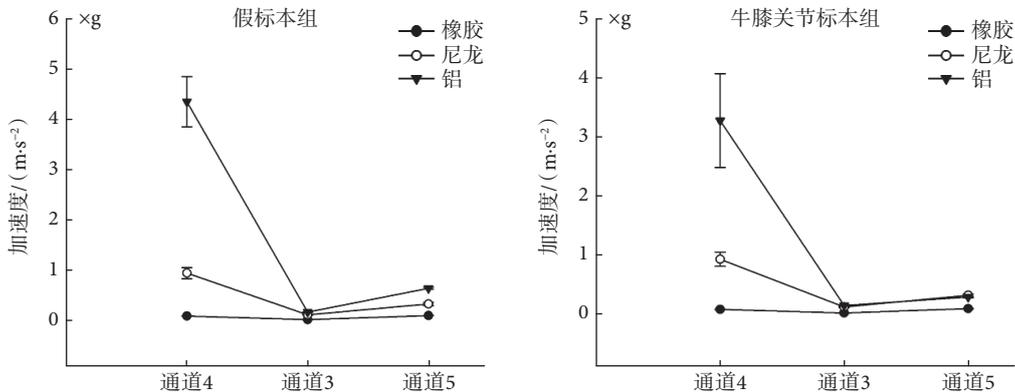


图 6 系统稳定性测试不同分组结果

Fig.6 System stability test results of different groups

道 5 的加速度信噪比进行测试, 结果显示, 实验装置空载状态下平均加速度信噪比为 61.5 dB, 表明该装置可满足加速度测试要求。如图 5 所示, 不同组动载荷程度的实验测试结果表明, 实验装置可以提供稳定轴向动载荷; 通过对实验装置通道 3 采集到的加速度响应在假标本组与牛膝关节标本组之间进行比较, 差异无统计学意义, 说明装置可提供稳定的实验环境。由于假标本组中, 聚丙烯标本为非关节结构标本, 其测试结果与牛膝关节标本在通道 5 加速度响应存在差异, 如图 6 所示, 说明实验装置可以有效区分不同实验标本在动载荷作用下的动态特性。如表 1 所示, 通过对实验装置测试

表 1 实验系统各组对不同程度动载荷响应的克朗巴哈系数

Tab.1 Cronbach's α for responses of each group to different levels of dynamic loads

组别	克朗巴哈系数		
	橡胶力锤	尼龙力锤	铝力锤
无标本组	1.000	1.000	1.000
假标本组	1.000	0.998	1.000
牛膝关节标本组	0.998	0.981	0.976

结果的克朗巴哈系数进行分析说明, 各实验组的测试结果有较高的可重复性。

KOA 的发生发展过程, 除了受到生物学因素的影响外, 与生物力学因素也息息相关, 并且两种

因素在膝关节软骨组织的损伤与修复方面是相互联系的。膝关节软骨及半月板损伤的再生与修复,可以改善膝关节功能,并可能降低骨关节炎的风险^[22]。目前大量研究以修复膝关节软骨与半月板的正常功能为目的,利用三维打印技术和药物、生长因子和干细胞的水凝胶递送系统,以及组织工程支架等多种方法来治疗或替代损伤的关节软骨与半月板^[23]。然而,膝关节软骨及半月板所处的复杂生物力学环境对各种治疗方法提出了严峻的考验^[24]。膝关节软骨组织的损伤修复及再生与生物力学异常关系紧密,纠正异常的关节力学环境,进一步研究膝关节软骨组织在运动时的生物力学特点非常重要。

4 结论

本实验为研究 KOA 患者病情进展过程中的生物力学机制,设计了一种新的用于研究动态轴向载荷对膝关节软骨与半月板的生物力学影响的测试方法及装置。通过实验对装置的最大加速度信噪比及实验结果的可重复性和有效性进行了测试,结果显示该装置加速度信噪比可满足实验要求,实验装置可以提供稳定的轴向动载荷,测试结果具有良好的—致性,并可以有效区分膝关节结构的结构动力学特性。本研究提出的新的实验方法为深入研究轴向动载荷作用下膝关节结构响应的生物力学机制提供了新的途径。

重要声明

利益冲突声明:本文全体作者均声明不存在利益冲突。

作者贡献声明:王俊瑞撰写论文初稿和修改论文,赵智平、姜程腾、刘猛负责数据采集和数据处理,聂闯、时全星负责数据分析和审校论文,顾建文指导、修改和审校论文。

参考文献

- Kopf S, Sava M P, Stärke C, *et al.* The menisci and articular cartilage: a life-long fascination. *EFORT Open Rev*, 2020, 5(10): 652-662.
- Jones R S, Keene G C, Learmonth D J, *et al.* Direct measurement of hoop strains in the intact and torn human medial meniscus. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 1996, 11(5): 295-300.
- Beamer B S, Walley K C, Okajima S, *et al.* Changes in contact area in meniscus horizontal cleavage tears subjected to repair and resection. *Arthroscopy*, 2017, 33(3): 617-624.
- Harner C D, Mauro C S, Lesniak B P, *et al.* Biomechanical consequences of a tear of the posterior root of the medial meniscus. surgical technique. *J Bone Joint Surg Am*, 2009, 91 Suppl 2: 257-270.
- Riemenschneider P E, Rose M D, Giordani M, *et al.* Compressive fatigue and endurance of juvenile bovine articular cartilage explants. *J Biomech*, 2019, 95: 109304.
- Makiev K G, Vasios I S, Georgoulas P, *et al.* Clinical significance and management of meniscal extrusion in different knee pathologies: a comprehensive review of the literature and treatment algorithm. *Knee Surg Relat Res*, 2022, 34(1): 35.
- Okazaki Y, Furumatsu T, Yamauchi T, *et al.* Medial meniscus posterior root repair restores the intra-articular volume of the medial meniscus by decreasing posteromedial extrusion at knee flexion. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2020, 28(11): 3435-3442.
- Paletta G A, Crane D M, Konicek J, *et al.* Surgical treatment of meniscal extrusion: a biomechanical study on the role of the medial meniscotibial ligaments with early clinical validation. *Orthop J Sports Med*, 2020, 8(7): 2325967120936672.
- Moon H S, Choi C H, Jung M, *et al.* Early surgical repair of medial meniscus posterior root tear minimizes the progression of meniscal extrusion: response. *Am J Sports Med*, 2021, 49(1): NP3-NP5.
- Kodama Y, Furumatsu T, Miyazawa S, *et al.* Location of the tibial tunnel aperture affects extrusion of the lateral meniscus following reconstruction of the anterior cruciate ligament. *J Orthop Res*, 2017, 35(8): 1625-1633.
- Stehling C, Souza R B, Hellio Le Graverand M P, *et al.* Loading of the knee during 3.0T MRI is associated with significantly increased medial meniscus extrusion in mild and moderate osteoarthritis. *Eur J Radiol*, 2012, 81(8): 1839-1845.
- Kubota R, Koga H, Ozeki N, *et al.* The effect of a centralization procedure for extruded lateral meniscus on load distribution in porcine knee joints at different flexion angles. *BMC Musculoskelet Disord*, 2020, 21(1): 205.
- Brill R, Wohlgemuth W A, Hempfling H, *et al.* Dynamic impact force and association with structural damage to the knee joint: an *ex-vivo* study. *Ann Anat*, 2014, 196(6): 456-463.
- Fukuda Y, Takai S, Yoshino N, *et al.* Impact load transmission of the knee joint--influence of leg alignment and the role of meniscus and articular cartilage. *Clin Biomech(Bristol, Avon)*, 2000, 15(7): 516-521.
- Danso E K, Honkanen J T, Saarakkala S, *et al.* Comparison of nonlinear mechanical properties of bovine articular cartilage and meniscus. *J Biomech*, 2014, 47(1): 200-206.
- Gajjar S M, Solanki K P, Shanmugasundaram S, *et al.* Meniscal extrusion: a narrative review. *Orthop J Sports Med*, 2021, 9(11): 23259671211043797.
- Crema M D, Nevitt M C, Guermazi A, *et al.* Progression of cartilage damage and meniscal pathology over 30 months is associated with an increase in radiographic tibiofemoral joint space narrowing in persons with knee OA--the MOST study. *Osteoarthritis Cartilage*, 2014, 22(10): 1743-1747.
- Mohamadi A, Momenzadeh K, Masoudi A, *et al.* Evolution of knowledge on meniscal biomechanics: a 40-year perspective. *BMC Musculoskelet Disord*, 2021, 22(1): 625.
- Dortmans L, Jans H, Sauren A, *et al.* Nonlinear dynamic behavior of the human knee joint--part II: time-domain analyses: effects of structural damage in postmortem experiments. *J Biomech Eng*, 1991, 113(4): 392-396.

(下转第 1199 页; Continued on Page 1199)