

文章编号: 1004-7220(2023)06-1254-06

肩关节典型运动分析

黄逸飞¹, 朱俊俊¹, 董双鹏², 马金竹², 张述², 华子恺¹

(1. 上海大学 机电工程与自动化学院, 国家药品监督管理局无源植入器械质量评价重点实验室, 上海 200072;

2. 国家药品监督管理局天津市医疗器械检测中心 国家药品监督管理局无源植入器械质量评价重点实验室, 天津 300384)

摘要: 肩关节置换术是治疗肩关节疾病最有效的方法之一。术后短期内人工肩关节存活率高, 患者恢复效果好, 但长期而言, 人工肩关节磨损产生的无菌性松动会大大增加手术失败的机率。肩关节结构复杂、典型运动不明确, 目前国际上仍未公布人工肩关节的磨损试验标准。因此, 需要研究、分析总结出肩关节的生物力学环境并建立相应的运动曲线, 为人工肩关节磨损试验方案及标准的制定提供依据。本文基于人体肩关节活动规律, 采用日常活动 (activities of daily living, ADL) 量表将肩关节活动能力划分为基本或躯体日常生活活动能力 (basic or physical activities of daily living, BADL or PADL) 和工具性日常生活活动能力 (instrumental activities of daily living, IADL), 并对其中几种特定运动规律建立了肩关节运动曲线。本文研究结果为人工肩关节磨损试验方案及标准的制定奠定了基础。

关键词: 肩关节; 关节磨损; 典型运动; 日常生活活动

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.06.030

Analysis on Typical Motion of Shoulder Joint

HUANG Yifei¹, ZHU Junjun¹, DONG Shuangpeng², MA Jinzhu², ZHANG Shu², HUA Zikai¹

(1. NMPA Key Laboratory for Quality Evaluation of Non-active Implant Devices, School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. NMPA Key Laboratory for Quality Evaluation of Non-active Implant Devices, NMPA Supervision and Testing Center for Medical Devices of Tianjin, Tianjin 300384, China)

Abstract: Shoulder arthroplasty surgery is one of the most effective method for treating shoulder joint diseases. In short term, the survival rate of the artificial shoulder joint is high, and the recovery effect of the patient is good, but in long term, the aseptic loosening caused by the wear and tear of the artificial shoulder joint will greatly increase the chance of surgical failure. Due to the complex structure and unclear typical motion of the shoulder joint, the wear test standards for artificial shoulder joints have not yet been published internationally. Therefore, it is necessary to study, analyze and summarize the biomechanical environment of the shoulder joint and establish corresponding motion curves, so as to provide references for the development of artificial shoulder joint wear test scheme and standards. Based on human shoulder joint activity rules, the shoulder joint activity ability can be divided into basic or physical activity of daily living (BADL or PADL) and instrumental activity of daily living (IADL) by using the activities of daily living (ADL) scale. In this study, shoulder joint motion curves for several specific motion rules were established. The results lay foundation for the establishment of wear test scheme and standard of artificial shoulder joint.

Key words: shoulder joint; joint wear; typical motion; activities of daily living (ADL)

收稿日期: 2023-03-07; 修回日期: 2023-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62203287)

通信作者: 华子恺, 副研究员, E-mail: zikai_hua@shu.edu.cn

肩关节是人体最为重要的关节之一,是上肢最大的关节,具有关节结构复杂、活动范围大且容易出现运动性损伤的特点^[1]。肩关节包括臂上部、腋窝、胸前区及肩胛骨所在的背部区域等身体很大的一部分。然而,随着高龄化人群的增多,各类肩关节的疾病发病率显著增高,如盂肱关节骨关节炎、肩袖损伤以及肱骨近端复杂骨折等。针对这些疾病的治疗,人工肩关节、肩袖补片、带线锚钉等大量的修复与替代的植入物应运而生,成为骨科、运动医学科等在肩关节治疗时的一个主要手段。

然而,较髌膝关节而言,肩关节所承担的运动种类更多、生物力学环境更复杂。肩关节运动不仅受到肱骨头及关节盂解剖学大小、形状的影响,而且还受肩袖功能以及肌肉力量和肌肉平衡的制约。在人工肩关节置换术中,要选择解剖形状合适的假体增强肩关节稳定性,避免对肩袖、肌肉功能造成伤害,影响术后患者肩关节运动恢复^[2]。人工肩关节植入体内之后形成新的生物摩擦副,处于复杂的人体运行环境当中,同时承受拉力、压力、扭转和界面剪切力以及疲劳、磨损、腐蚀的综合作用,长时间的使用必然会导致植入物的磨损甚至失效^[3-5]。并且由于肩关节结构复杂、活动范围大、患者对生活质量要求高等因素,无论实施数量还是长期置换效果均不如髌、膝关节置换术。

从人体整体结构看,下肢主要承担承重和移动作用,主要以运动性动作为主;而上肢主要承担工具类作用,以功能性动作为主,典型运动不明确,所以至今仍未出现诸如髌、膝关节步行的典型运动的磨损标准^[6]。因此,对于肩关节植入产品的开发,急需研究、分析总结出肩关节的典型生物力学环境并且建立相应的运动曲线。

1 肩关节典型运动大类划分

肩关节典型运动以人日常生活活动(activities of daily living, ADL)量表作为划分依据。ADL是指人们在每日生活中,为了照顾自己的衣食住行,保持个人卫生整洁和进行独立的社区活动所必须的一系列基本活动,涵盖了个体在家庭、工作机构、管理自己的能力、在经济上、社会上和职业上合理安排自己生活方式的能力^[7]。

ADL可分为基本或躯体日常生活活动能力(basic or physical activities of daily living, BADL or PADL)和工具性日常生活活动能力(instrumental activities of daily living, IADL)两种,二者的区别如表1所示。

表1 PADL与IADL区别

Tab. 1 Differences between PADL and IADL

| 项目 | PADL | IADL |
|--------|---------|-------------|
| 反应运动能力 | 粗大的运动功能 | 精细的运动功能 |
| 内容 | 以躯体功能为主 | 含躯体、言语、认知功能 |
| 适用对象 | 较重的残疾患者 | 较轻的残疾患者 |
| 应用范围 | 医疗机构 | 社区、常用于调查 |
| 敏感性 | 低 | 高 |

其中,PADL分为两种:①个人自理类,包括穿衣、进食、修饰、如厕、沐浴;②躯体活动类,包括坐下、站起、步行、上下楼、推轮椅。而IADL则包括乘车、驾车、社交、打扫、做饭、打字、写信等高级运动。

以肩关节为例,可以通过ADL量表,将肩关节的典型运动划分为3类:①肩关节基本运动,即能够满足人日常生活需要的一系列肩关节运动。根据目前使用较为广泛的Barthel index肩关节功能评定量表,将7个运动纳入了肩关节日常生活活动能力评定标准,分别为穿上衣、梳头、翻衣领、系围裙、使用手纸、擦对侧腋窝、系腰带;②肩关节进阶运动,能够满足单人的日常行为活动,如乘车、驾车、做饭、写字等;③肩关节的高级运动,以与他人社交互动为主,如握手、拥抱、打球等。

2 肩关节典型运动研究

肩关节典型运动的研究主要通过通过对几种典型的肩关节运动,分析肩胛盂接触力以及全肩关节运动规律,这为建立人工肩关节磨损测试方案提供了良好基础。

Anglin等^[8]通过对受试者进行5种肩关节基本运动:用手臂从椅子上站起/坐下,用拐杖行走,双手举起5 kg箱子到肩高,单手举起10 kg箱子,记录受试者的躯干角、手臂角以及载荷,通过生物力学模型计算出肩胛盂内的平均接触压力(见表2)。

Gronley等^[9]利用VICON运动系统,以脊髓损伤导致四肢瘫痪男性患者为研究对象,记录其进行梳头、喝水、伸手开灯、触摸会阴4种运动时肩关节

表2 5种肩关节基本运动的肩胛盂接触应力

Tab. 2 Scapular glenoid contact stress in 5 basic shoulder activities

| 肩关节运动 | 平均接触应力/BW | 接触应力范围/BW |
|----------------|-----------|-----------|
| 用手臂从椅子上站起 | 1.8 | 0.5~4.3 |
| 用手臂从椅子上坐下 | 1.3 | 0.3~4.1 |
| 用拐杖行走 | 1.7 | 0.4~3.2 |
| 双手举起5 kg 箱子到肩高 | 1.8 | 1.5~2.3 |
| 单手举起10 kg 箱子 | 2.4 | 1.0~4.3 |

注:BW 为人体体重。

肌电图。结果表明,在前3种运动中,12块肩部肌肉中大多数肌肉的肌电图相似;而在触摸会阴过程

表3 10种肩关节日常活动^[10]Tab. 3 10 shoulder joint daily activities^[10]

| 序号 | 活动 | 适用范围 | 序号 | 活动 | 适用范围 |
|----|------------|------|----|----------------|------|
| 1 | 伸向对侧腋窝 | 卫生 | 6 | 用杯子喝水 | 进食 |
| 2 | 伸向对侧脖子 | 卫生 | 7 | 接电话 | 日常活动 |
| 3 | 伸向头的侧面和后脑勺 | 卫生 | 8 | 洗脸 | 卫生 |
| 4 | 用手抓食 | 进食 | 9 | 拿起0.5 kg 物品到肩高 | 日常活动 |
| 5 | 用勺子吃饭 | 进食 | 10 | 举起0.5 kg 物品到头高 | 日常活动 |

Andel 等^[11]基于三维运动学进行肩关节运动分析,选择了4项具有代表性的日常活动,得到手腕、肘部、肩部和肩胛骨的运动规律。这4项日常活动分别为:①伸向对肩(可代表靠近对侧肩膀的所有活动);②手对嘴/喝水(还包括进食和接触面部);③梳头;④手伸向后面口袋(包括伸向背部

表4 8种肩关节日常活动^[12]Tab. 4 Eight shoulder joint daily activities^[12]

| 序号 | 活动 | 适用范围 | 序号 | 活动 | 适用范围 |
|----|--------|------|----|----------------|------|
| 1 | 梳头 | 卫生 | 5 | 拿起10 kg 物品 | 日常活动 |
| 2 | 单手驾驶 | 日常活动 | 6 | 拿起杯子喝水并放回 | 进食 |
| 3 | 双手驾驶 | 日常活动 | 7 | 向腰前方放置2 kg 物体 | 日常活动 |
| 4 | 钉头顶的钉子 | 日常活动 | 8 | 向头部前方放置2 kg 物体 | 日常活动 |

Aizawa 等^[13]使用电磁三维跟踪系统测量了健康成年人在16项日常活动中上肢关节的三维运动范围(range of motion, ROM),使用关节角度的新定义和回归分析,根据任务完成时的关节角度,显示每个运动所需的ROM。16项日常活动如表5所示。

Bruttel 等^[14]对骨关节炎患者、全肩关节置换术患者以及健康人的4种不同日常活动(会阴护理、

中,三角肌后部和肩胛下肌的活动占主导地位。

Murray 等^[10]研究了肩关节10种不同日常活动,并将其简单进行分类(见表3)。并且,该研究还测量每项任务肩关节以及肘关节的接触力以及运动规律。结果表明,10种活动中,肩关节屈曲范围为 $14.7^{\circ} \sim 111.9^{\circ}$,最大及最小屈曲角均发生在举起0.5 kg 物品到头高时;肩关节外展范围为 $-20.1^{\circ} \sim 39.7^{\circ}$,最大外展角发生在举起0.5 kg 物品到头高时,最小外展角发生在伸向对侧脖子时;肩关节内旋范围为 $18.7^{\circ} \sim 85.9^{\circ}$,最大内旋角发生在伸向对侧腋窝时,最小内旋角发生在举起0.5 kg 物品到头高时。

以及会阴护理)。在梳头时,肱骨头的角度最高接近 100° ,而其余3项活动仅在 70° 以下。

Westerhoff 等^[12]使用遥测肩关节植入物在体内测量8项日常活动中的平均接触力(见表4)。结果表明,在第8项活动中,放下物体时肩关节的接触力最大。

清洗腋窝、梳头、从书架上取书)进行三维运动分析,对比全肩关节置换术后患者肩关节日常活动能力。结果显示,与盂肱骨关节炎患者相比,全肩关节置换患者的肩关节运动角度得到改善(见图1)。

此外,Runciman 等^[15]模拟了人在锻炼过程中肩关节的接触应力(俯卧撑、引体向上),Dan 等^[16]模拟了使用手钻时的肩关节接触应力,显然这些活动较基本活动复杂,属于肩关节的进阶功能。

表 5 16种肩关节日常活动^[13]

Tab. 5 Sixteen shoulder joint daily activities^[13]

| 序号 | 活动 | 适用范围 | 序号 | 活动 | 适用范围 | 序号 | 活动 | 适用范围 |
|----|---------|------|----|----------|------|----|----------|------|
| 1 | 触摸同侧腋窝 | 卫生 | 7 | 触摸会阴 | 卫生 | 13 | 梳头 | 卫生 |
| 2 | 触摸对侧腋窝 | 卫生 | 8 | 触摸背部 | 日常活动 | 14 | 用勺子吃饭 | 进食 |
| 3 | 触摸嘴 | 日常活动 | 9 | 在脖子上扣紧纽扣 | 穿衣 | 15 | 把水倒进玻璃杯里 | 进食 |
| 4 | 触摸同侧耳朵 | 卫生 | 10 | 在肚脐处扣紧纽扣 | 穿衣 | 16 | 玻璃杯喝水 | 进食 |
| 5 | 摸触摸对侧耳朵 | 卫生 | 11 | 清洁面部 | 卫生 | | | |
| 6 | 触摸额头 | 日常活动 | 12 | 戴上项链 | 修饰 | | | |

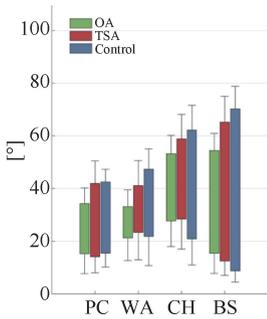


图 1 孟肱提升高度^[14]

Fig. 1 Lifting height of glenoid humerus^[14]

注:OA、TSA、Control 分别为骨关节炎患者、全肩关节置换术患者、健康对照组;PC、WA、CH、BS 分别为会阴护理、清洗腋窝、梳头、从书架上取书。

3 肩关节典型运动曲线建立

人工肩关节的摩擦磨损性能,是目前研究的重点。由于肩关节结构和功能的特殊性,肩关节的典型运动过多,故无法以一种运动代表人工肩关节的

磨损运动。对于肩关节置换术患者,至少需要保证能够完成日常生活中肩关节的基本运动。

以往对于肩关节典型运动曲线的研究主要以上肢的运动范围 ROM 为主,其中包含了肩关节、肘关节以及腕关节的活动范围。Andel 等^[11]选用 4 种肩关节日常活动,通过 3 个摄像头对 LED 标记进行立体摄影进行测量,获得 3 个关节 6 种运动(手部内旋、腕屈曲、肘屈曲、肱骨头提升、肩胛骨侧翻、肱骨头旋转)的运动曲线(见图 2)。

Westerhoff 等^[12]改进了肩关节植入物,将 6 个应变计和 1 个九通道遥测装置布置在植入物颈部,在 4 名患者手术中植入,术后研究了 8 种肩关节日常活动,获取这 8 种日常活动中孟肱关节接触力的曲线。其中,梳头活动中孟肱关节的接触力曲线如图 3 所示。

Smith 等^[17-19]提出了肩关节磨损专用曲线“杯到嘴”(mug to mouth),用以作为肩关节磨损试验机的运行曲线,第 2 年研发出一款肩关节磨损试验

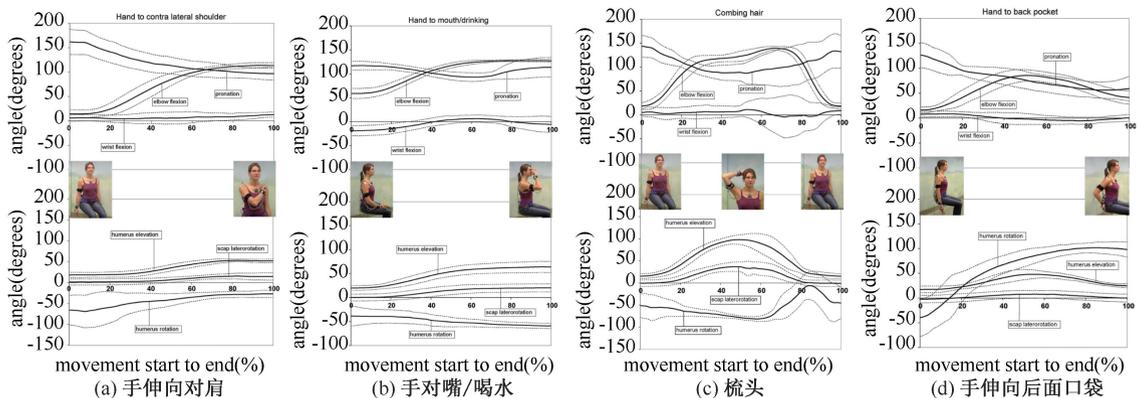


图 2 4种运动曲线^[11]

Fig. 2 Four motion curves^[11] (a) Hand to contra lateral shoulder, (b) Hand to mouth/drinking, (c) Combing hair, (d) Hand to back pocket

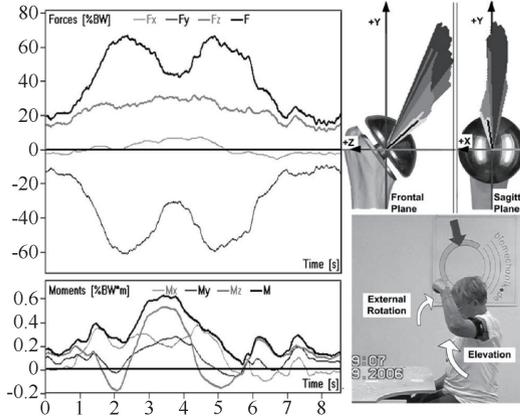


图3 梳头过程中盂肱关节接触力^[12]

Fig.3 Contact force of glenohumeral joint during combing^[12]

注:BW 为人体体重。

机,以“杯到嘴”作为测试曲线,从 Johnson 等^[9] 研究中优化提取出的举起 0.5 kg 物品到头高(lifting of a 0.5 kg mass to head height)曲线作为试运行曲线,以此进行肩关节磨损试验,测试及试运行曲线见图4。

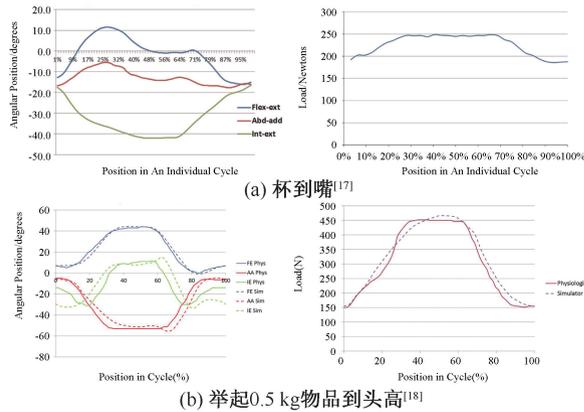


图4 两种运动曲线

Fig.4 Two motion curves (a) Mug to mouth^[17], (b) Lifting of a 0.5 kg mass to head height^[18]

注:Flex-ext(FE)、Abd-add(AA)、Int-ext(IE)分别为屈曲-伸展、外展-内收、内旋-外旋;Phys、Sim分别为生理曲线和设备运行曲线。

肩关节典型运动曲线可以通过提取点的坐标,再进行数据拟合,即可得到肩关节外展内收、屈曲伸展以及内旋外旋的运动函数。以“杯到嘴”运动中的外展-内收曲线为例,通过 WebPlotDigitizer 软件,横坐标间隔为 2 将整个曲线提取出 50 个点的坐标,导入到 Matlab 中,采用 4 阶傅里叶函数进行拟合,

得到函数曲线(见图 5)。结果表明,拟合精度 $R^2 = 0.995$ 。

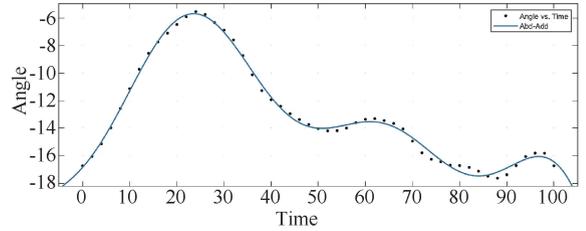


图5 “杯对嘴”运动中的外展-内收曲线拟合示例

Fig.5 Example of extrapolation adduction curve fitting in "mug to mouth" motion

注:Abd、Add 分别为外展、内收。

4 结论

根据 ADL 日常活动量表,以及目前肩关节运动研究结果,其典型运动可分为 3 个大类:基本运动,如进食、穿衣、洗澡等;进阶运动,如驾车、运动等;高级运动,如握手、拥抱等。

在肩关节运动的研究中,学者大多对梳头、进食、伸向对侧腋窝、抬起物体到头高等运动进行较为深入的研究,并且有部分运动已经得到了肩关节的运动规律,可以考虑作为肩关节的典型运动加入到人工肩关节磨损试验中。

对于建立肩关节典型运动曲线的建立,可以采用摄像机、X 线等对肩关节关键位置的运动情况进行记录,作出肩关节角度运动曲线^[20];可通过软件进行仿真分析或者通过植入物中安装应变计进行肩关节运动过程中载荷的测量,进而形成加载曲线。最后,可以通过数据处理软件,将得到的曲线采用函数拟合,拟合精度达到足够要求,即可将此函数表达式作为肩关节的典型运动函数。

参考文献:

[1] 薛庆云,信原克哉. 肩部投掷运动的生物力学研究[J]. 医用生物力学, 1995, 10(1): 35-39.
XUE QY, XIN YKZ. The biomechanics of baseball pitching of shoulder [J]. J Med Biomech, 1995, 10(1): 35-39.

[2] 唐康来. 人工肩关节置换的进展及手术技巧[J]. 中华肩肘外科电子杂志, 2015, 3(3): 192.

[3] 刘星星. 人工肩关节的模拟试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.

[4] WIRTH MA, KLOTZ C, DEFFENBAUGH DL, et al. Cross-

- linked glenoid prosthesis: A wear comparison to conventional glenoid prosthesis with wear particulate analysis [J]. *J Shoulder Elbow Surg*, 2009, 18(1): 130-137.
- [5] MANSAT M, EGAN J. The biomechanics of the glenohumeral articulation and implications for prosthetic design [M]//POITOUT DG, ed. *Biomechanics and biomaterials in orthopedics*. USA: Springer, 2004: 387-396.
- [6] BANCI L, MEOLI A, HINTNER M, *et al.* Wear performance of inverted non-conforming bearings in anatomic total shoulder arthroplasty [J]. *Shoulder Elbow*, 2019, 12(1 Suppl): 40-52.
- [7] REICHMAN H, BOAS J, MACMAHON D, *et al.* Efficacy of combining levodopa with entacapone on quality of life and activities of daily living in patients experiencing wearing-off type fluctuations [J]. *Acta Neurol Scand*, 2010, 111(1): 21-28.
- [8] ANGLIN C, WYSS UP, PICHORA DR. Glenohumeral contact forces [J]. *P I Mech Eng H*, 2000, 214(6): 637-644.
- [9] GRONLEY J, NEWSAM CJ, MULROY SJ, *et al.* Electromyographic and kinematic analysis of the shoulder during four activities of daily living in men with C6 tetraplegia [J]. *J Rehabil Res Dev*, 2022, 37(4): 423-432.
- [10] MURRAY IA, JOHNSON GR. A study of the external forces and moments at the shoulder and elbow while performing every day tasks [J]. *Clin Biomech*, 2004, 19(6): 586-594.
- [11] VAN ANDER CJ, WOLTERBEEK N, DOORENBOSCH CAM, *et al.* Complete 3D kinematics of upper extremity functional tasks [J]. *Gait Posture*, 2008, 27(1): 120-127.
- [12] WESTERHOFF P, GRAICHEN F, BENDER A, *et al.* *In vivo* measurement of shoulder joint loads during activities of daily living [J]. *J Biomech*, 2009, 42(12): 1840-1849.
- [13] AIZAWA J, MASUDA T, KOYAMA T, *et al.* Three-dimensional motion of the upper extremity joints during various activities of daily living [J]. *J Biomech*, 2010, 43(15): 2915-2922.
- [14] BRUTTEL H, SPRANZ DM, BÜLHOFF M, *et al.* Comparison of glenohumeral and humerothoracic range of motion in healthy controls, osteoarthritic patients and patients after total shoulder arthroplasty performing different activities of daily living [J]. *Gait Posture*, 2019, 71: 20-25.
- [15] RUNCIMAN RJ. *Biomechanical model of the shoulder joint* [D]. Glasgow: University of Strathclyde, 1993.
- [16] DAN K, BO P. Towards a model for force predictions in the human shoulder [J]. *J Biomech*, 1992, 25(2): 189-199.
- [17] SMITH SL, LI BL, BUNIYA A, *et al.* *In vitro* wear testing of a contemporary design of reverse shoulder prosthesis [J]. *J Biomech*, 2015, 48(12): 3072-3079.
- [18] SMITH SL, LI L, JOYCE TJ. Engineering of a multi-station shoulder simulator [J]. *P I Mech Eng H*, 2016, 230(5): 470-480.
- [19] SMITH SL, KENNARD E, JOYCE TJ. Shoulder simulator wear test of five contemporary total shoulder prostheses with three axes of rotation and sliding motion [J]. *Biotribology*, 2018, 13: 36-41.
- [20] 袁施挺, 竺思远, 谷雪莲, 等. 正常国人盂肱关节在不同手臂抬高平面的运动学研究 [J]. *医用生物力学*, 2022, 37(2): 317-322.
- YUAN ST, ZHU SY, GU XL, *et al.* Kinematics study of glenohumeral joint at different arm elevation planes in normal Chinese [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(2): 317-322.