

文章编号: 1004-7220(2023)06-1134-05

# 前交叉韧带重建术后关节粘连患者在体胫股关节运动学分析

范帅<sup>1#</sup>, 张玲<sup>2#</sup>, 蔡斌<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学医学院附属第九人民医院 康复医学科, 上海 200011; 2. 上海体育大学 运动健康学院, 上海 200438)

**摘要:**目的 定量分析前交叉韧带重建(anterior cruciate ligament reconstruction, ACLR)术后关节粘连患者在体胫股关节6自由度的运动学特征。方法 纳入15例ACLR术后关节粘连患者和15例健康受试者,运用便携式膝关节三维运动分析系统采集受试者负重屈膝和非负重屈膝时胫股相对于股骨的运动轨迹,获取胫股关节6自由度的运动学数据。结果 与健康人相比,负重屈膝30°、45°、60°和75°时,膝关节粘连患者患侧胫骨内旋角度明显减少( $P<0.001$ );负重屈膝30°和45°时,膝关节粘连患者患侧胫骨相对于股骨的外翻角度较健康人明显减小( $P<0.05$ )。非负重屈膝75°时,膝关节粘连患者患侧胫骨内移距离较健康人明显减少( $P<0.05$ )。结论 关节粘连限制了胫骨相对于股骨的旋转和内外移,对于胫骨相对于股骨的前后移动影响不大。因此,临床上应该利用各种治疗手段松解胫骨内外侧沟的粘连和外侧副韧带挛缩,解决旋转和内外移动受限的问题,以最大程度恢复膝关节功能。

**关键词:** 膝关节; 关节粘连; 运动捕捉; 胫股关节; 运动学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.06.012

## *In-vivo* Kinematics of the Tibiofemoral Joint in Patients with Arthrofibrosis after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction

FAN Shuai<sup>1#</sup>, ZHANG Ling<sup>2#</sup>, CAI Bin<sup>1</sup>

(1. Department of Rehabilitation Medicine, Shanghai Ninth People's Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200011, China; 2. School of Exercise and Health, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China)

**Abstract: Objective** To quantitatively analyze the *in-vivo* kinematics of the tibiofemoral joint in patients with arthrofibrosis after anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR) surgery. **Methods** Fifteen patients with arthrofibrosis after ACLR and 15 healthy subjects were included in the study. The tibiofemoral motion trajectories relative to the femur during weightbearing and non-weightbearing knee flexion of the subjects were collected by using a portable three-dimensional (3D) knee motion analysis system, and kinematic data of the tibiofemoral joint with 6 degrees of freedom (6 DOF) were obtained. **Results** Compared with healthy subjects, the internal tibial rotation was significantly decreased in patients with arthrofibrosis under 30°, 45°, 60° and 75° weightbearing knee flexion ( $P<0.001$ ), and the tibial valgus was significantly decreased in patients with arthrofibrosis under 30° and 45° weightbearing knee flexion ( $P<0.05$ ). The internal tibial displacement in patients with arthrofibrosis was

收稿日期: 2023-02-05; 修回日期: 2023-02-21

基金项目: 上海市科委项医学创新研究项目(21Y11903400), 上海交通大学数字医学教育部工程研究中心医工交叉研究种子基金(20210403)

通信作者: 蔡斌, 主任医师, 硕士生导师, E-mail: shrehab@163.com

#为共同第一作者

significantly smaller than that in healthy subjects under  $75^\circ$  non-weightbearing knee flexion ( $P < 0.05$ ).  
**Conclusions** Knee arthrofibrosis limits the rotation and internal displacement of the tibia, but has little impact on the anterior and posterior displacement of the tibia relative to the femur. Therefore, in clinical practice, various treatments should be used to release the adhesion in the medial and lateral femoral grooves and the contracture of the lateral collateral ligaments, address the limitation in rotation and displacement movement, so as to restore knee function to the fullest extent.

**Key words:** knee joint; arthrofibrosis; motion capture; tibiofemoral joint; kinematics

关节粘连是前交叉韧带重建 (anterior cruciate ligament reconstruction, ACLR) 术后严重的并发症, 国外近 10 年报道的发生率为 2% ~ 5%<sup>[1-2]</sup>。膝关节粘连造成的功能障碍不仅会影响患者步行、下蹲、上下楼梯等日常生活功能, 还会给患者造成巨大的心理创伤<sup>[3]</sup>。

物理检查发现, 膝关节粘连患者普遍存在股四头肌萎缩、膝前痛、胫股关节运动学异常等症状<sup>[4-6]</sup>。此外, 膝关节粘连远期最严重的后果是创伤性骨关节炎 (osteoarthritis, OA) 的发生<sup>[6]</sup>。临床研究证明了 ACLR 术后关节粘连会增加患者发生 OA 的风险。一项长达 20 年的临床随访结果显示, ACLR 术后关节粘连患者 OA 发生风险是 ACLR 术后未发生关节粘连患者的 2~4 倍<sup>[7]</sup>。大量研究提示, 膝关节运动学异常是导致 OA 发生的重要因素<sup>[8-10]</sup>。因此, 全面评估 ACLR 术后关节粘连患者膝关节的运动学特性, 对于揭示膝关节粘连异常的运动学规律以及制定康复方案具有重要的临床意义。

临床现有的功能评估或检查方法包括手法检查、膝关节活动度 (range of motion, ROM) 测量, 以及 CT/MRI 等影像学 and 关节镜检查。临床上, 手法检查和 ROM 测量仅限于评估准静态、非生理负重条件下膝关节功能; 影像学检查存在辐射; 关节镜检查则存在创伤等缺点。近年来, 应用光学运动捕捉系统客观测量在体膝关节运动学逐渐成为研究热点<sup>[11-12]</sup>。本研究应用便携式膝关节三维运动分析系统, 获取并对比 ACLR 术后关节粘连患者和健康受试者胫股关节 6 自由度 (6 degrees of freedom, 6DOF) 运动学差异, 探讨膝关节粘连患者异常的运动学特征, 为临床康复提供指导。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究对象

招募 15 例 ACLR 术后关节粘连患者 (男 13 名,

女 2 名) 和 15 例健康受试者 (男 9 名, 女 6 名)。所有受试者的基本信息见表 1。使用关节量角器测量膝关节主动 ROM, 患者仰卧位, 固定臂位于股骨中线, 移动臂位于胫骨中线, 轴心位于膝关节中心外侧, 要求受试者最大屈膝和伸膝。测试结果表明, 膝关节粘连患者主动屈膝角度为  $83.7^\circ \pm 13.2^\circ$  ( $75^\circ \sim 100^\circ$ ), 伸膝角度为  $4.8^\circ \pm 5.5^\circ$  ( $0^\circ \sim 10^\circ$ )。

表 1 两组受试者基本信息

Tab. 1 Basic data for two groups of subjects

参数	膝关节粘连组 (n=15)	健康受试组 (n=15)	P
男/女	13/2	9/6	—
年龄/岁	27.3±4.7	25.1±4.3	0.165
身高/cm	175.5±5.2	168.9±7.7	0.015
体质量/kg	72.1±8.1	62.8±7.1	0.004
BMI/(kg·m <sup>-2</sup> )	23.6±2.9	22.1±1.9	0.097
病程/周	9.7±3.1	—	—
屈膝角度/(°)	83.7±13.2	138.1±3.5	<0.001
伸直角度/(°)	4.8±5.5	-2.7±2.2	<0.001
Lysholm 评分	60.6±11.4	92.3±5.6	0.032

膝关节粘连组纳入标准: 年龄 18~45 岁, 性别不限; 单束 ACLR 术后 6~24 周; 患膝主动屈曲小于  $110^\circ$  或/和伸直受限大于  $5^\circ$ <sup>[13]</sup>; 对侧膝关节无损伤史和手术史; 能自主完成实验动作任务。排除标准: 移植物错位重建; 患膝合并下肢其他关节 (髌或踝) 损伤; 患膝合并其他韧带损伤; 存在影响下肢功能的其他疾病; 肌张力异常或关节挛缩所致的关节活动受限。健康受试者既往及目前膝关节 ROM 正常, 没有膝关节不适, 没有下肢及其他肌肉骨骼病史及手术史, 所有健康受试者膝关节 Lysholm 评分大于 90 分。所有膝关节粘连患者在纳入研究前均接受过常规的物理治疗。本研究获得上海交通大学医学院附属第九人民医院伦理委员会批准, 所有受试者均签署知情同意书。

### 1.2 试验方案

1.2.1 实验仪器及测试流程 利用便携式光学运

动捕捉系统(Opti-knee<sup>®</sup>,上海逸动医学科技有限公司)采集膝关节粘连患者患侧和健康受试者优势腿的膝关节运动学数据。前期已有研究完成了该便携系统的精度验证,角度精度允差不超过 $2^\circ$ ,位移精度允差不超过 $2\text{ mm}$ <sup>[14]</sup>。通过红外反光标记在皮肤不同粘贴位置的可重复性研究显示,膝关节6DOF运动曲线的位移标准差为 $1.3\text{ mm}$ ,角度标准差 $0.9^\circ$ 。既往研究显示,该系统在膝关节6DOF运动学评估中,测试者内部以及测试者之间的重测信度均良好<sup>[15]</sup>。

1名测试经验丰富的研究人员参与运动学数据采集和分析。Opti-knee运动捕捉系统通过红外立体照相机以 $60\text{ Hz}$ 捕捉频率追踪刚体的三维运动轨迹,以获得胫骨相对于股骨的6DOF运动学数据。

① 测试前,嘱每个受试者中立位站在水平地面上,充分暴露下肢,用弹力绷带将两个带有红外反光标记的刚体分别绑在受试者的股骨和胫骨上[见图1(a)]。② 骨性特征点标定:测试人员用1个带有红外反光标记的手持式探针分别定位7个骨性标志点(股骨大转子、胫骨外侧髁、胫骨内侧髁、胫骨外侧平台、胫骨内侧平台、内踝、外踝),标定时避免遮挡标定器上的反光标记以防止信号丢失。③ 热身运动:测试前给予每位受试者 $5\text{ min}$ 热身和 $3\text{ min}$ 熟悉试验动作的时间。④ 负重屈膝运动学数据采集:测试起始受试者双腿自然分开直立位站立,脚尖朝前,双侧下肢处于膝关节最大伸直位并均匀负重。测试时受试者不允许使用任何辅助工具,屈膝下蹲过程中双侧膝关节不允许超过脚尖,维持重心始终位于脚跟后侧。受试者接受口头指令,双侧下肢逐渐屈膝至最大屈膝角度,受试者选

择自觉舒适的速度完成测试动作[见图1(b)]。⑤ 非负重屈膝运动学数据采集:测试起始受试者舒适坐位,双足离开地面,双膝关节露出椅面,被测试下肢起始处于膝关节最大伸直位,受试者接受口头指令,被测试下肢逐渐屈膝至最大屈膝角度[见图1(c)]。

**1.2.2 运动学数据处理和分析** 依据国际生物力学协会建立标准的膝关节局部坐标系<sup>[16]</sup>。通过红外反光标记和骨性解剖标志点之间的三维空间关系,分别建立胫骨和股骨的坐标系,进而获得胫骨相对于股骨的6DOF运动学数据,并利用该系统相应的软件实现实时胫股关节6DOF运动学数据的运算分析。股骨内、外上髁连线中点定义为股骨坐标原点,股骨内外髁连线作为股骨坐标内外轴( $z$ 轴);以股骨内、外上髁和股骨长轴形成的平面在股骨坐标原点作1条垂线作为股骨坐标前后轴( $x$ 轴);于股骨坐标原点作1条垂线分别垂直于内外轴和前后轴作为股骨坐标的远近轴( $y$ 轴)。同理,胫骨内外侧平台连线中点定义为胫骨坐标原点,胫骨平台内外侧连线为胫骨坐标的内外轴( $z$ 轴);以胫骨内外侧平台和胫骨长轴形成的平面在胫骨坐标原点作1条垂线作为胫骨坐标的前后轴( $x$ 轴);于胫骨坐标原点作1条垂线分别垂直于内外轴和前后轴作为胫骨坐标的远近轴( $y$ 轴)。当受试者进行负重屈膝和非负重屈膝运动时,通过红外照相机实时追踪红外反光标记点的运动,可获得胫骨相对于股骨的6DOF运动学数据,包括沿着坐标系 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴3个方向的平移(前后移、内外移和远近移)和围绕 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴3个方向的转动(前屈/后伸、内翻/外翻和内旋/外旋)。由于不同膝关节粘连患者患膝关节ROM不一致,本研究最终分析屈膝 $15^\circ\sim 75^\circ$ 两组受试者胫股关节6DOF运动学。

### 1.3 统计学分析

对计量资料进行正态性检验,若符合正态分布,以平均数 $\pm$ 标准差表示;不符合正态分布的计量资料用中位数描述。采用独立样本 $t$ 检验分析两组受试者的基本信息;采用两因素重复测量方差分析比较两组受试者不同屈膝角度下胫股关节6DOF运动学数据差异,数据以平均数 $\pm$ 标准差的形式表示。若组别和屈膝角度的交互作用对胫股关节6DOF运动学的影响有统计学意义,需分别对组别和屈膝角



图1 实验测试流程

Fig. 1 Test procedure (a) Binding rigid body and calibrating markers, (b) Weightbearing knee flexion, (c) Non-weight-bearing knee flexion

度进行单独效应的检验。采用独立样本  $t$  检验比较不同屈膝角度下两组受试者胫股关节运动学的组间差异。利用皮尔逊相关分析研究不同负重条件下膝关节 6DOF 运动学数据之间的相关性。采用 SPSS 22.0 统计学软件,  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 负重屈膝时胫股关节 6DOF 运动学

负重屈膝时,屈膝角度的交互作用对胫骨相对于股骨旋转角度的影响有统计学意义 ( $F = 9.452, P < 0.001$ )。随着屈膝角度增加,两组受试者胫骨相对于股骨的内旋角度依次较前显著增加 ( $P < 0.05$ )。屈膝  $30^\circ (2.2^\circ \pm 2.3^\circ \text{ vs } 5.5^\circ \pm 3.2^\circ, P < 0.001)$ 、 $45^\circ (4.7^\circ \pm 3.5^\circ \text{ vs } 8.2^\circ \pm 5.2^\circ, P < 0.001)$ 、 $60^\circ (6.4^\circ \pm 4.1^\circ \text{ vs } 10.7^\circ \pm 4.8^\circ, P < 0.001)$  和  $75^\circ (8.3^\circ \pm 2.7^\circ \text{ vs } 12.3^\circ \pm 4.0^\circ, P < 0.001)$  时,膝关节粘连患者患侧胫骨相对于股骨的内旋角度较健康人明显减小 [见图 2(a)]。

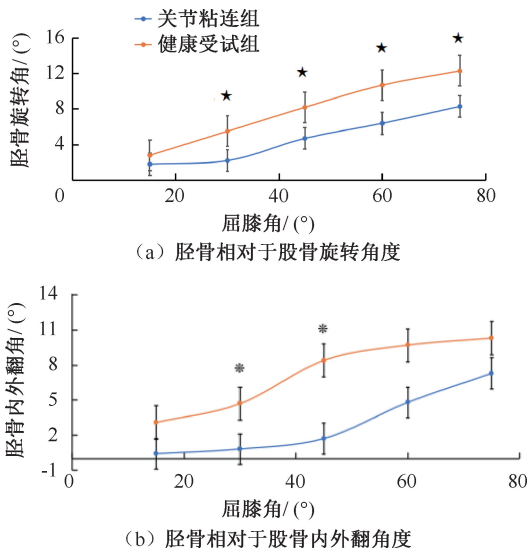


图2 负重屈膝时胫骨相对于股骨旋转和内外翻角度比较  
 Fig. 2 Comparison of tibial rotation and valgus relative to the femur under weightbearing knee flexion

(a) Tibial rotation relative to the femur, (b) Tibial valgus relative to the femur

注:内旋(+),外旋(-);外翻(+),内翻(-);\*表示两组胫骨旋转角度比较,  $P < 0.05$ ; \*表示两组胫骨外翻角度比较,  $P < 0.05$ 。

屈膝角度的交互作用对胫骨相对于股骨的外翻角度的影响有统计学意义 ( $F = 3.346, P =$

$0.032$ )。随着屈膝角度增加,两组受试者胫骨相对于股骨的外翻角度逐渐增加。屈膝  $30^\circ (0.4^\circ \pm 1.3^\circ \text{ vs } 4.7^\circ \pm 2.8^\circ, P = 0.002)$  和  $45^\circ (1.7^\circ \pm 2.5^\circ \text{ vs } 8.4^\circ \pm 4.2^\circ, P = 0.028)$  时,膝关节粘连患者患侧胫骨相对于股骨的外翻角度较健康人明显减小 [见图 2(b)]。

### 2.2 非负重屈膝时胫股关节 6DOF 运动学

非负重屈膝时,屈膝角度的交互作用对胫骨相对于股骨内外移动距离的影响有统计学意义 ( $F = 7.434, P < 0.001$ )。屈膝  $15^\circ \sim 75^\circ$ , 两组受试者胫骨相对于股骨的内移距离逐渐增加。屈膝  $75^\circ$  时,膝关节粘连患者患侧胫骨相对于股骨的内移距离 [ $(1.3 \pm 1.9) \text{ mm}$ ] 较健康人 [ $(4.7 \pm 2.2) \text{ mm}$ ] 明显减少 ( $P = 0.045$ ), 见图 3。

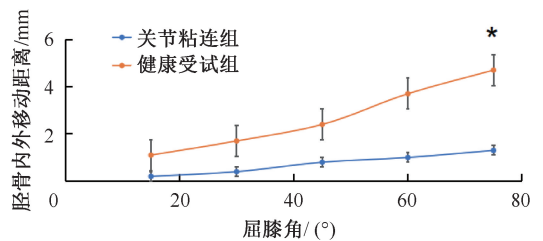


图3 非负重屈膝时胫骨相对于股骨内外移动距离比较  
 Fig. 3 Comparison of tibial mediolateral translation relative to the femur under non-weightbearing knee flexion

注:内移(+),外移(-);\*表示两组胫骨内移距离比较,  $P < 0.05$ 。

### 2.3 不同负重条件下膝关节 6DOF 运动学的相关性

不同负重条件下,膝关节各自由度运动学数据的皮尔逊相关性值均小于 0.5, 显著性  $P$  值均大于 0.5, 不同负重条件下膝关节 6DOF 运动学无显著性相关。

## 3 讨论

本研究采用 Opti-knee 便携式运动捕捉系统测量负重屈膝和非负重屈膝时 ACLR 术后关节粘连患者患侧和健康人优势腿胫股关节 6DOF 运动学差异。结果表明,在可动范围内,随着屈膝角度增加,两组受试者胫骨均相对于股骨向后、向内和向上移动,向内旋以及向外翻。本文结果显示,负重屈膝时,在可动范围内,与健康人相比,随着屈膝角度增加,膝关节粘连患者患侧胫骨内旋和外翻角度明显减少;非负重屈膝时,在可动范围内,与健康人相

比,随着屈膝角度增加,膝关节粘连患者患侧胫骨内移距离减少。

膝关节粘连患者胫骨内旋和外翻角度减少,原因可能是股骨内外侧沟粘连限制了胫骨与股骨之间的旋转<sup>[17-18]</sup>。这一研究发现提示,在指导临床处理膝关节粘连患者时,需要聚焦于松解股骨内外侧沟粘连,解决股骨和胫骨之间旋转受限的问题,以最大程度恢复膝关节功能性 ROM 和正常的运动学。与健康人相比,膝关节粘连患者患侧胫骨相对于股骨向内移动受限,提示临床上物理治疗师利用胫股关节松动术改善冠状面上胫骨的移动距离。此外,胫骨内移距离减少可能是由于外侧副韧带挛缩所致,手法松解外侧副韧带有助于恢复胫骨相对于股骨的相互滑动,以改善胫骨的内移距离<sup>[19-20]</sup>。既往运动学研究结果显示,膝关节异常的运动学会导致远期创伤性 OA 的发生<sup>[21]</sup>。及时松解膝关节内和周围组织的粘连组织,不仅可以改善膝关节的运动学,恢复膝关节 ROM,最终降低关节粘连患者出现膝关节 OA 的可能性<sup>[22]</sup>。

对膝关节粘连患者的运动学评估可以指导临床制定科学的康复训练计划,有利于恢复 ACLR 术后关节粘连患者的膝关节功能以及改善远期治疗结果。本研究的局限性如下:① 缺乏对髌股关节运动学及膝关节软骨接触特征的评估,未来研究需要关注 ACLR 术后关节粘连患者髌股关节运动学的改变,以及膝关节粘连对关节软骨接触特征的影响;② 本研究中两组受试者身高、体质量存在差异,BMI 无组间差异,推测原因是两组受试者男女比例不一致,膝关节粘连组男性患者比例远高于健康组。然而不同性别之间膝关节运动学可能存在差异,未来研究还需要探究性别因素对膝关节粘连患者运动学的影响。

## 参考文献:

[1] SANDERS TL, KREMERS HM, BRYAN AJ, *et al.* Procedural intervention for arthrofibrosis after ACL reconstruction: Trends over two decades [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2017, 25(2): 532-537.

[2] EKHTIARI S, HORNER NS, DE SA D, *et al.* Arthrofibrosis after ACL reconstruction is best treated in a step-wise approach with early recognition and intervention: A systematic review [J]. *Knee Surg Sports Traumatol*

*Arthrosc*, 2017, 35(9): 327-335.

[3] 刘丽琨,蔡斌,岳冰,等.前交叉韧带重建术后关节粘连患者的综合物理治疗 30 例报告[J].*中国骨与关节杂志*, 2016, 6(10): 743-746.

[4] MIKULA JD, SLETTE EL, DAHL KD, *et al.* Intraarticular arthrofibrosis of the knee alters patellofemoral contact biomechanics [J]. *J Exp Orthop*, 2017, 4(1): 40-47.

[5] MAURO CS, IRRGANG JJ, WILLIAMS BA, *et al.* Loss of extension following anterior cruciate ligament reconstruction: Analysis of incidence and etiology using IKDC criteria [J]. *Arthroscopy*, 2008, 24(2): 146-153.

[6] WORSHAM J, LOWE WR, COPA D, *et al.* Subsequent surgery for loss of motion after anterior cruciate ligament reconstruction does not influence function at 2 years: A matched case-control analysis [J]. *Am J Sport Med*, 2019, 47(11): 2550-2556.

[7] DONALD K, SHELBOURNE, RODNEY W, *et al.* Results of anterior cruciate ligament reconstruction with patellar tendon autografts: Objective factors associated with the development of osteoarthritis at 20 to 33 years after surgery [J]. *Am J Sport Med*, 2017, 22(5): 218-222.

[8] 张玲,蔡宗远,王少白,等.前交叉韧带重建术后膝关节运动分析研究进展[J].*医用生物力学*, 2020, 35(2): 240-246.

ZHANG L, CAI ZY, WANG SB, *et al.* Progress in knee joint motion analysis after anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *J Med Biomech*, 35(2): 240-246.

[9] TITCHENAL MR, WILLIAMS AA, CHEHAB EF, *et al.* Cartilage subsurface changes to magnetic resonance imaging UTE-T2 \* 2 years after anterior cruciate ligament reconstruction correlate with walking mechanics associated with knee osteoarthritis [J]. *Am J Sport Med*, 2018, 46(3): 565-572.

[10] WEBSTER KE, MCCLELLAND JA, PALAZZOLO SE, *et al.* Gender differences in the knee adduction moment after anterior cruciate ligament reconstruction surgery [J]. *Br J Sport Med*, 2012, 46(5): 355-359.

[11] 徐小涵,陆怡,马文韬,等.单腿着陆时下肢肌肉激活模式与膝关节运动学之间的关系及性别差异[J].*医用生物力学*, 2021, 36(S1): 36.

[12] ZAMPELI F, TERZIDIS I, ESPREGUEIRA-MENDES J, *et al.* Restoring tibiofemoral alignment during ACL reconstruction results in better knee biomechanics [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2018, 26(5): 1367-1374.

[13] KALSON DN, BORTHWICK DL, MANN D, *et al.* International consensus on the definition and classification of fibrosis of the knee joint [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 2016, 98B(11): 1479-1487.