

两/三隧道固定对关节软骨及半月板的影响¹⁾

黄荣瑛²⁾ 郭云飞 张高龙 郑红光 卫晓东

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘要 基于正常膝关节 4 个屈曲角度 (0°, 25°, 60°, 80°) 下的磁共振 (MR) 图像数据, 建立正常/两隧道固定/三隧道固定内侧半月板移植术后的胫股关节模型. 对各屈曲角度下的 4 种模型分别施加单一轴向压载和压扭组合载荷进行有限元仿真, 得到各模型在 2 种载荷作用下的应力及位移分布. 提取关节软骨、半月板表面的等效应力以及半月板的最大位移进行对比分析, 得到内侧半月板移植术后两/三隧道固定对胫股关节中软骨及半月板的影响. 总体上讲内侧半月板移植中的三隧道固定要优于双隧道固定, 更利于胫股关节恢复正常的应力特性.

关键词 内侧半月板移植, 固定方法, 胫股关节, 有限元, 接触特性

中图分类号: R318.01 文献标识码: A DOI: 10.6052/0459-1879-12-261

引言

半月板撕裂是体育运动中常见的一种运动创伤, 老年人的半月板在退变老化的过程中也很容易撕裂^[1]. 目前, 临床上治疗半月板损伤的常用手术包括半月板修复、半月板部分切除以及半月板移植. 对于半月板损伤或半月板退变严重的患者, 通过同种异体的半月板移植术是恢复其半月板功能的主要途径^[2-3]. 同种异体的半月板移植除半月板来源困难之外, 移植术的成活率及术后关节软骨的退变是影响半月板移植术发展的关键问题. Verdonk 等^[4]对移植术者 10 年的随访结果表明内、外侧半月板移植后的累积存活率分别为 74% 和 69%, 动物实验证实了移植愈合后仍存在软骨退变^[5-6]. 相关研究表明移植半月板的匹配和固定是影响同种异体半月板移植效果的 2 个关键因素: Dienst 等^[7]经过在尸体膝上的异体内侧半月板移植试验, 认为移植半月板的大小匹配是影响胫骨平台的接触力的重要因素, 移植和原有半月板的匹配范围大约在 10% 内能被接受; Haut 等^[8]进一步的研究指出在保证接触变量的变化不超过 10% 时, 内侧/外侧半月板最大高度允差为 0.5 mm/1 mm. 在移植半月板尺寸匹配的条件下, 移植半月板前后角的固定就成为半月板移植术中的关键技术: 既要趋近未损前自身半月板的联结结构, 又要保障术后固定的可靠性. Chen 等^[9]的研究指出移植半月板前后角固定能促进半月板与关节囊的愈

合, 决定手术的成败. Haut 等^[10]根据对尸体膝的有限元分析, 提出骨块固定方法. Alhalki 等^[11], McDermott 等^[12]为验证内侧半月板移植中 3 种骨块固定方法 (前后角带骨块固定、前后角带骨块加半月板周缘缝合及从前角到后角沿半月板周缘的缝合固定) 与未损前正常膝关节运动/力学特性的差异, 进行了尸体膝的半月板移植, 认为前后角带骨块的固定更接近正常膝. Alhalki 等^[13]致力于对同种异体内侧半月板移植的研究, Verma^[14]比较了骨桥固定和双骨块固定内侧半月板移植术, 认为 2 种技术均可维持半月板的自然箍紧力. Stone 等^[15]研究了内侧半月板移植的三隧道固定技术, 应用于临床, 取得满意的短期疗效.

为揭示内侧半月板移植诱发关节退变的原因, 作者利用磁共振 (MR) 图像, 通过逆向工程软件建立了人体膝关节的 3D 模型, 应用有限元分析同种异体内侧半月板移植中两种固定方法 (两隧道与三隧道固定) 对内侧半月板重建膝关节性能的影响, 主要涉及移植内侧半月板的固定方法与关节屈曲角度及软组织表面应力之间的关系.

1 方法

1.1 建立内侧半月板移植两种膝关节模型

基于 Siemens Magnetom (sonata maestro class 1.5T) 拍摄的 4 个屈曲角度 (0°, 25°, 60°, 80°) 的健康右膝膝关节磁共振图像, 重构正常膝胫股关节屈

2012-09-25 收到第 1 稿, 2012-12-05 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金资助项目 (50975013).

2) 黄荣瑛, 副教授, 主要研究方向: 骨外科生物力学和医疗机械. E-mail: buaahry@yahoo.com.cn

曲模型, 并根据 2 种固定方法的特点来建立内侧半月板移植的股膝关节模型. 移植模型改变了内侧半月板与胫骨平台的连接及固定结构, 在满足半月板尺寸匹配的条件下, 移植关节的建模过程主要是确定移植半月板隧道的位置与方向, 具体过程如下:

两隧道固定的移植模型: 参考 Fox^[16]及 Walter 等^[17]的移植方法, 两隧道移植主要确定内侧半月板的前后角固定的隧道位置与方向, 以原内侧半月板的前后角的附着点作为移植隧道在胫骨平台上的止点位置, 前后角的隧道轴线在过胫骨髁间隆起的矢状面内与胫骨轴线间的夹角依次为 60° 和 45°. 选

取隧道直径 7 mm, 固定半月板前后角的骨块选取为 10 mm 长度, 固定骨块与隧道装配, 实现移植半月板的固定定位.

三隧道固定的移植模型: 参照 Stone 等^[15]提出的手术方法, 半月板前后角的隧道同两隧道模型, 在胫骨平台上第 3 隧道与后角隧道相距 20 mm, 并与胫骨髁间隆起与后角点连线成 60° 的位置, 选取 3 个隧道直径 4.5 mm. 三隧道固定不用骨块, 通过穿引器引导缝线连接. 为保证隧道骨壁的连接强度, 3 个隧道在胫骨前侧的出针点轴线间的最小距离必须大于等于 5 mm (如图 1).

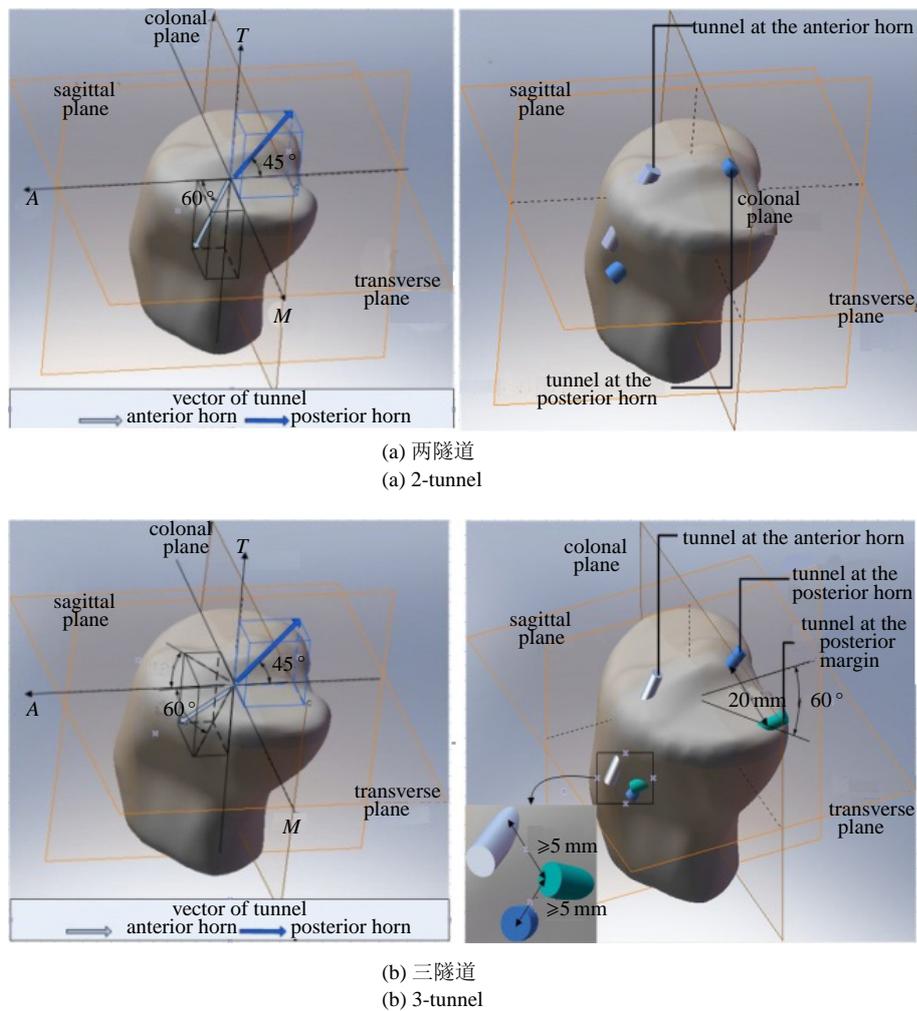


图 1 两隧道和三隧道膝关节模型

Fig. 1 2-tunnel and 3-tunnel knee models

1.2 建立内侧半月板移植的 2 种有限元模型

1.2.1 半月板移植模型的材料及联结关系定义

内侧半月板移植膝关节的有限元模型的建模过程与正常膝关节有限元建模类似^[18], 关节元素材料属性设置、连接关系及边界条件设置与文

献 [18-22] 一致. 以下对移植模型与正常模型不同之处进行说明: 在两隧道模型中需添加固定半月板前后角的骨块, 骨块的材料属性与骨组织一致; 骨块与胫骨之间定义为固联. 三隧道模型中各组织材料均与正常模型相同, 内侧半月板的前角、后角及后

部 1/3 外周缘处通过线弹性弹簧与对应骨相连接, 刚度系数小于正常模型中半月板前后角处的弹簧, 取为 1 kN/mm.

1.2.2 加载及边界条件

内侧半月板移植有限元仿真是在 ANSYS 11.0 的软件环境下实现, 施加 2 种载荷: 第 1 种为 1.2 kN 压载荷, 沿胫骨骨干轴向施加于胫骨远端面; 第 2 种为组合载荷, 除第一种载荷外, 附加 10 N·m 内旋扭矩, 垂直于胫骨远端面. 加载时, 固定股骨近端, 只保留胫骨/股骨之间沿骨干轴向的运动.

从 2 种载荷作用下的仿真结果中, 提取胫骨软骨表面的应力分布、胫骨/股骨软骨表面的最大等效应力、半月板的最大位移来分析内侧半月板移植中不同固定方法对胫股关节接触特性的影响. 此外, 为了确定固定方法对半月板不同部位应力分布的影响, 参考 Haut 等 [22] 的研究将内外侧半月板分为前/中/后 3 个区域 (如图 2), 提取不同区域的最大等效应力进行比较分析.

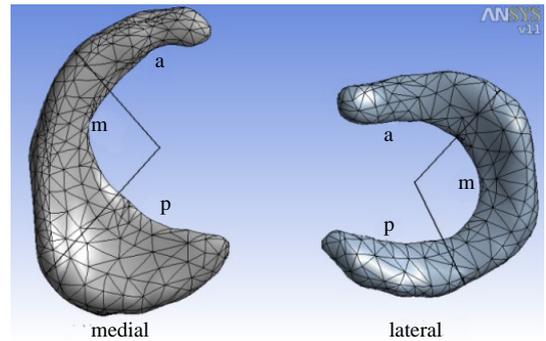


图 2 半月板的区域划分 (a: 前部, m: 中部, p: 后部)

Fig. 2 Region division of meniscus (a: anterior, m: middle, p: posterior)

2 结果

2.1 内侧半月板移植对关节软骨的影响

从 4 个屈曲角度下的正常模型、两隧道及三隧道移植模型在 2 种载荷作用下的有限元仿真结果中, 提取胫骨内外侧软骨上的 von-Mises 等效应力 (如图 3), 将相同屈曲角度下 3 个模型的应力云图中将次最大值、次最小值设为一致.

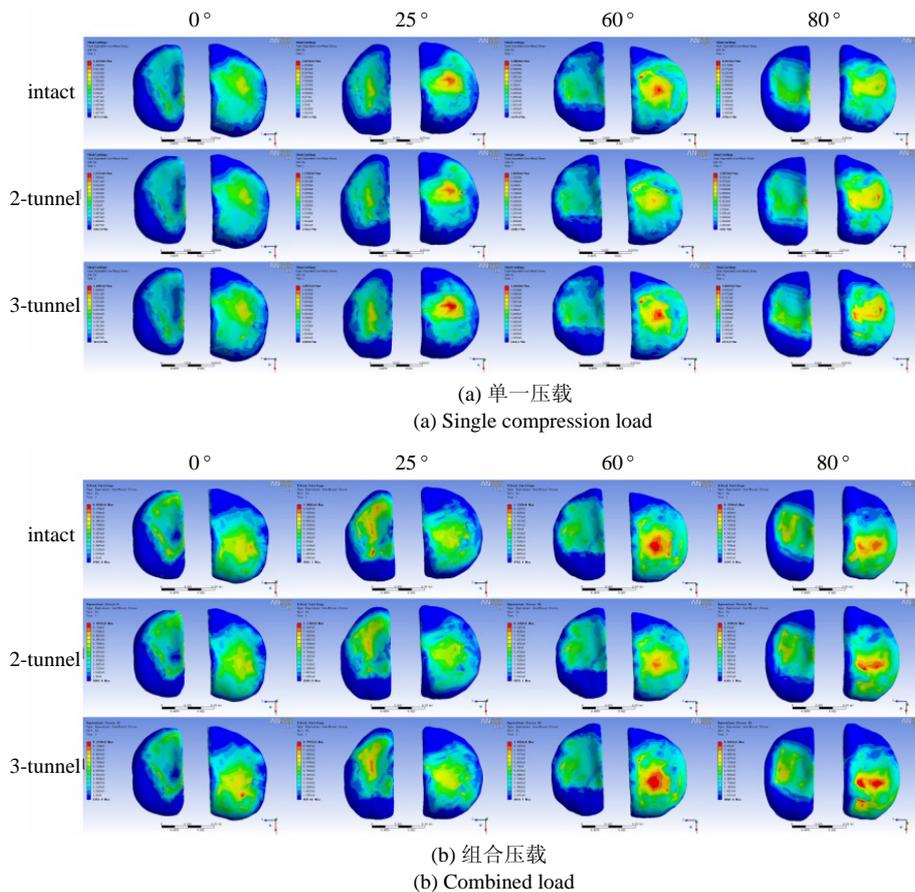


图 3 胫骨软骨上的 von-Mises 等效应力分布

Fig. 3 Von-Mises equivalent stress distribution on tibial cartilage

对于内侧胫骨软骨, 单一压载作用下: 两隧道固定使 0° 与 80° 屈曲角度下最大等效应力的位置发生变化, 三隧道固定使 25° 及 80° 的等效应力增加. 组合载荷作用下: 2 种固定方法均使 25° 及 80° 的上应力分布发生明显变化, 对 0° 与 60° 影响较弱.

对于外侧胫骨软骨, 单一压载作用下: 两隧道固定明显改变了其表面的应力分布, 且使最大等效应力的位置发生变化; 三隧道固定虽然未改变最大等效应力的位置, 但使得接触区域等效应力的值增加, 25° 和 80° 最为明显. 组合载荷作用下: 两隧道固定

改变了 4 个屈曲角度下外侧胫骨软骨上的应力分布, 三隧道固定则维持了 60° 和 80° 下正常的应力分布, 但使应力值增大. 总体上讲, 三隧道固定较两隧道固定更能恢复关节软骨上的应力分布, 尤其是外侧胫骨软骨.

为了更详细地分析内侧半月板移植中 2 种固定方法对关节软骨表面应力的影响, 从各屈曲角度下的 3 种模型的仿真结果中提取胫骨内外侧软骨及股骨软骨表面的最大等效应力值, 将移植模型中的值与正常模型进行比较, 如图 4 和 图 5 所示.

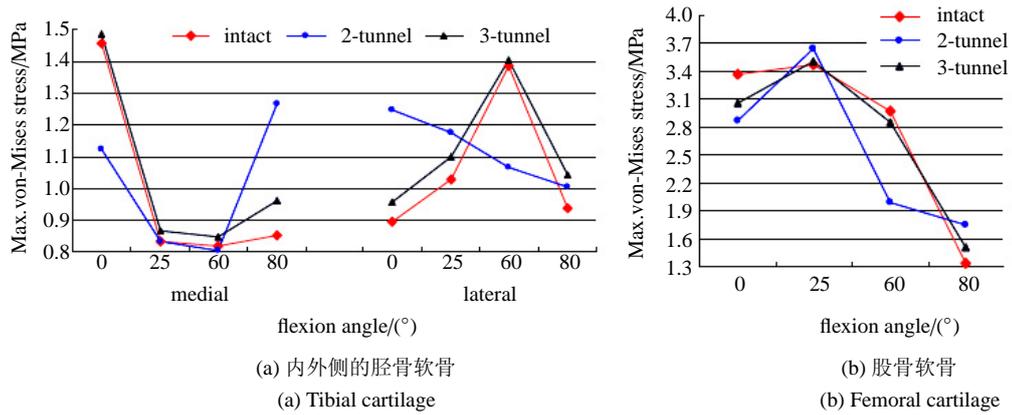


图 4 单一压载下关节软骨的最大 von-Mises 等效应力

Fig. 4 Max.von-Mises stress on articular cartilage under the single compression load

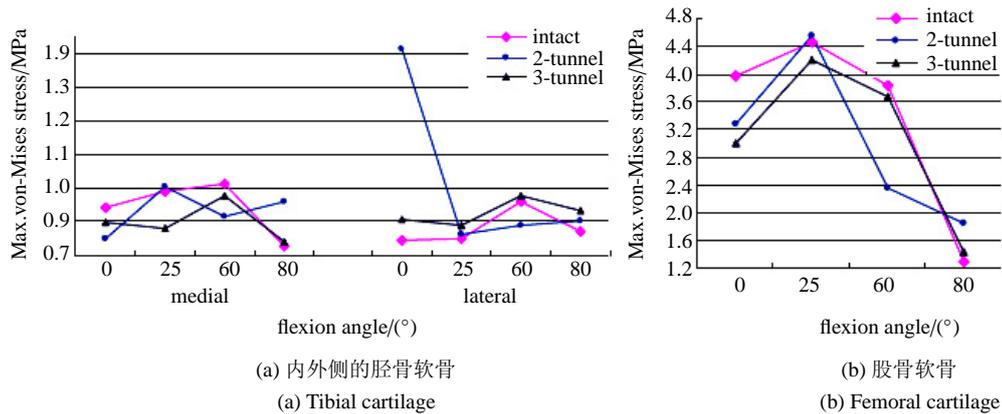


图 5 组合载荷下关节软骨最大 von-Mises 等效应力

Fig. 5 Max.von-Mises stress on articular cartilage under the combined loads

单一压载作用下(图 4): 两隧道固定对于胫骨内外侧软骨表面最大等效应力的影响较为复杂, 内侧胫骨软骨上最大等效应力的增量在 80° 屈曲角时达到最大, 为 49%, 此屈曲角下外侧的最大等效应力增加了 7%; 外侧胫骨软骨上最大等效应力的增量在伸直位时最大, 为 39%, 但此屈曲角下内侧的最大等效应力反而减小 23%. 两隧道固定对于股骨软骨上最大等效应力的影响亦较为明显, 80° 屈曲角度下最大等

等效应力增加了 31%, 60° 屈曲角时降低 33%. 对于三隧道固定, 胫骨软骨及股骨软骨上的最大等效应力在各屈曲角度下的变化趋势与正常模型中的较为一致, 虽然三隧道固定使各屈曲角度下内侧/外侧软骨上的最大等效应力值均增加, 但增量较两隧道固定的小, 80° 屈曲角下内侧/外侧最大增量为 13% 和 11%; 三隧道固定对股骨软骨表面最大等效应力的影响不明显, 只在 80° 屈曲角时变化量超过了 10%.

组合载荷作用下(图5): 两隧道固定对内侧胫骨软骨及股骨软骨表面最大等效应力的影响较明显, 内侧胫骨软骨及股骨软骨表面最大等效应力的变化量除 25° 外均超过 15%, 80° 屈曲角时增量最大, 分别为 36% 和 45%, 两隧道固定还使外侧胫骨软骨表面最大等效应力在直立位增加了 145%; 三隧道固定对内侧胫骨软骨及股骨软骨表面最大等效应力的影响较弱, 内侧胫骨软骨表面最大等效应力的变化量只在 25° 时超过 15%, 股骨软骨表面最大等效应力的变化量只在伸直位超过 15%, 三隧道固定使外侧胫骨软骨表面最大等效应力在 4 个屈曲角度下均增加, 最大增量为伸直位的 16%.

2.2 内侧半月板移植对外侧半月板的影响

从有限元仿真结果中提取外侧半月板前部、中部、后部 3 个区域的最大等效应力, 如图 6 所示. 单一压载作用下(图 6(a)): 对于各个屈曲角度的正常膝关节, 外侧半月板上的最大等效应力均出现在中部区域.

两隧道固定使 0° 屈曲角下外侧半月板上最大等效应力的位置发生变化, 出现在前部区域,

且在 0° 及 25° 时使前部最大等效应力分别上升了 164% 和 40%; 在 80° 时使后部最大等效应力上升了 37%; 而中部最大等效应力减少, 在 0° 时减少量最大为 16%. 三隧道移植未改变外侧半月板上最大等效应力的位置, 只是使 25° 屈曲角下前部的最大等效应力上升 25%, 80° 屈曲角度下前部的最大等效应力下降 32%, 除此之外各屈曲角度下 3 个区域内最大等效应力的变化量不超过 15%.

组合压扭载荷作用下(图 6(b)): 正常膝关节中外侧半月板上的最大等效应力除伸直位均出现在中部区域, 两隧道固定和三隧道固定均使(除伸直位)外侧半月板上最大等效应力的位置从中部转移到了前部. 两隧道固定使前部最大等效应力在 25° 时增加了将近 20%, 在伸直位下减少了 33%, 对中部最大等效应力影响不大, 只在伸直位下变化量超过 15%, 对后部最大等效应力影响较明显, 60° 屈曲角下增加了 30%. 三隧道固定使前部最大等效应力在伸直位和 80° 屈曲角下分别减少了 51% 和 21%, 使中部最大等效应力在 80° 屈曲角下增加了 27%, 使后部最大等效应力在 25° 屈曲角下减少了 22%.

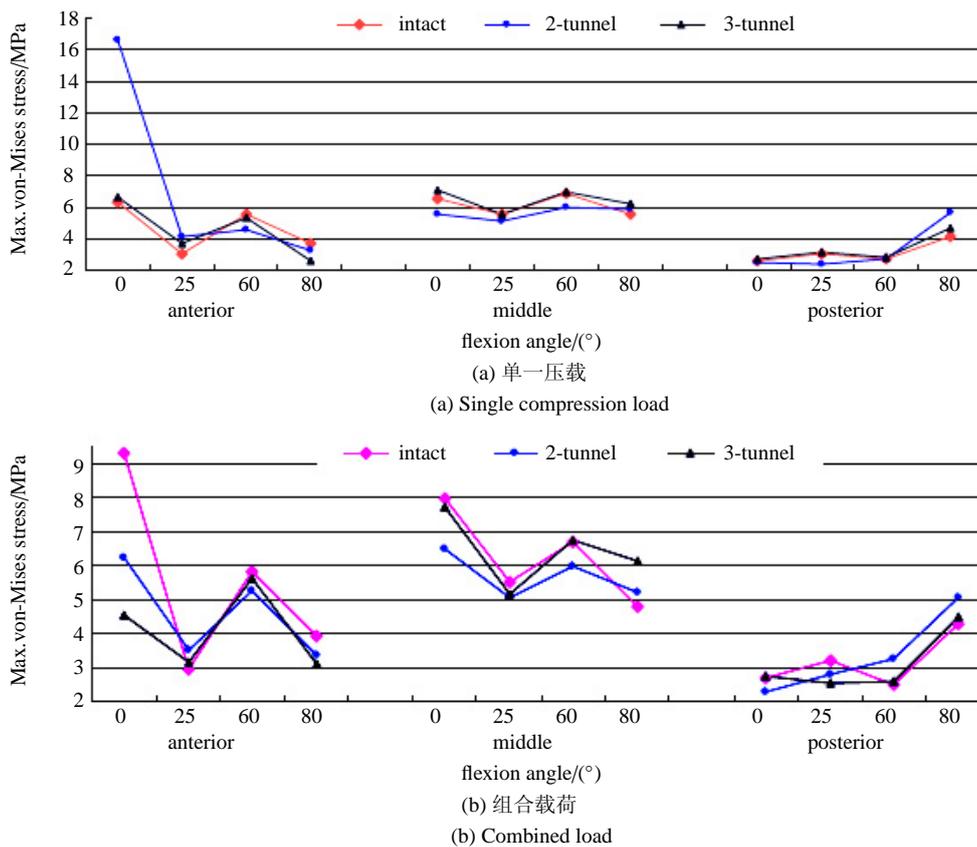


图 6 外侧半月板不同区域的最大 von-Mises 等效应力

Fig. 6 Max.von-Mises stress on different regions of lateral meniscus

从各模型的有限元仿真结果中分别提取外侧半月板在 2 种载荷作用后的最大位移量, 如图 7 所示. 对于两隧道固定, 单一压载作用时 4 个屈曲角度下的最大位移量均下降, 最大减少量为 60° 下的 11%, 组合压扭载荷作用时除 25° 屈曲角外最大位移量亦下降, 最大减少量为 60° 下的 9%, 25° 下上升 7%. 对于三隧道固定, 单一轴向压载荷作用时 4 个屈曲角度下的最大位移量均上升, 80° 时增量最大为 7.8%, 组合载荷作用时 4 个屈曲角度下的最大位移量均下降, 但减少量不大, 只是在 25° 屈曲角下达到了 6%.

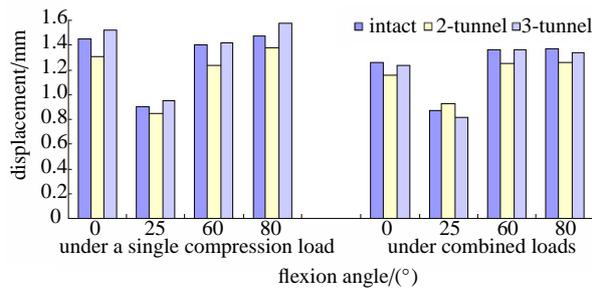


图 7 两组载荷下外侧半月板的最大位移

Fig. 7 Max. displacement of lateral meniscus under two loading cases

2.3 内侧半月板应力及位移的变化

为了考察内侧半月板移植后植入半月板表面应力的变化, 从仿真结果中提取内侧半月板前部、中部、后部 3 个区域的最大等效应力, 如图 8 所示, 其中对于两隧道移植模型, 内侧半月板前后角处连接的骨块不计入前部和后部区域.

单一压载作用下 (图 8(a)): 对于各屈曲角度下的正常膝关节, 内侧半月板上最大等效应力均出现在前部区域. 两隧道固定未改变内侧半月板上最大等效应力的位置, 但使最大等效应力的值明显增加, 最大增量为 60° 时的 182%, 80° 时的增量最少但也将近 40%; 中部和后部区域内最大等效应力的变化方向相同, 0° 和 25° 均上升, 60° 和 80° 均下降, 其中在 25° 下增加量最大, 为 26% 和 27%, 80° 下减少量最大, 为 42% 和 45%. 三隧道固定使 4 个屈曲角度下内侧半月板上最大等效应力的位置均发生变化, 0°, 25°, 60° 时最大等效应力出现在中部区域, 80° 时出现在后部区域; 前部的最大等效应力在 25°, 60°, 80° 时均下降, 在 60° 减少量最大, 为 63%, 0° 时略微增加; 中部的最大等效应力比 60° 时下降 13%,

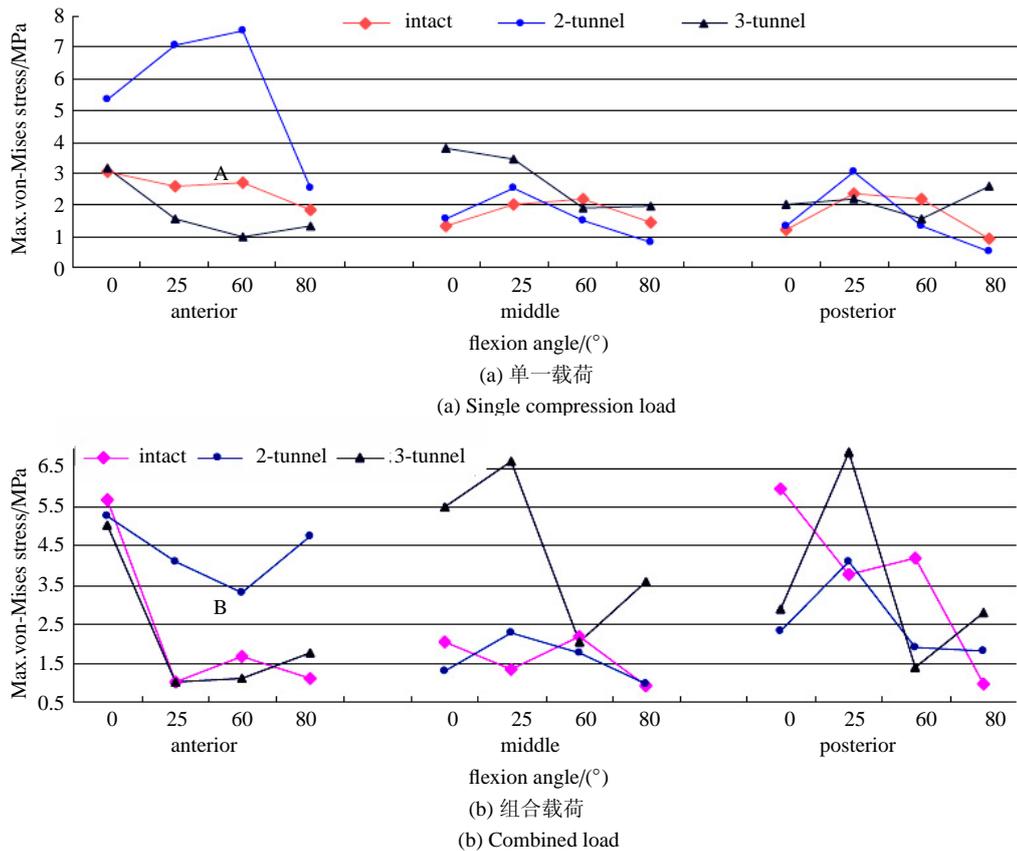


图 8 内侧半月板不同区域的最大 von-Mises 等效应力

Fig. 8 Max.von-Mises stress on different regions of medial meniscus

其余角度均增加, 0° 时的增量最大, 为 184%; 后部的最大等效应力在 0° 和 80° 下均增加, 其余 2 个屈曲角度下均下降, 最大增量为 80° 下的 179%, 最大减少量为 60° 时的 28%. 另外, 从 4 个屈曲角度下两隧道移植模型的仿真结果中得到内侧半月板前后角骨块表面的等效应力的分布, 可知骨块上最大等效应力均出现在与半月板前后角的连接处, 且后角骨块上的最大等效应力较前角的大, 在 25° 时最大, 为 22.636 MPa, 此屈曲角度下前角骨块上最大等效应力亦达到最大, 为 17.4 MPa.

组合载荷作用下(图 8(b)): 正常膝关节中内侧半月板上最大等效应力出现在后部区域, 两隧道固定和三隧道固定均改变了内侧半月板上最大等效应力的位置. 从图中可以看到, 两隧道固定使最大等效应力的位置从后部转移到前部, 从而使前部区域内最大等效应力增加明显, 25° 和 80° 屈曲角下增量高达 300%, 60° 下也增加了 1 倍左右; 对中部区域内最大等效应力的影响相对较弱, 25° 屈曲角下增加了 69%; 对后部区域应力的影响也较为明显, 除 25° 屈曲角外最大等效应力的变化量均超过了 50%. 三隧道固定使最大等效应力的位置从后部转移到中部, 使中部区域内最大等效应力明显增加, 0° , 25° , 80° 下增量分别高达 170%, 393%, 280%; 对前部区域内最大等效应力的影响较小, 80° 屈曲角下增加了 60%; 使后部区域内的最大等效应力发生明显变化, 最大增量为 80° 下的 192%, 最大减少量为 60° 下的 67%.

从仿真结果中提取内侧半月板在 2 种载荷作用后的最大位移量, 如图 9 所示. 移植半月板采用两隧道固定后, 单一压载作用时 4 个屈曲角度下内侧半月板的最大位移量均增加, 除 25° 外增量都较大, 在 60° 时最大, 为 37%; 组合载荷作用时除伸直位外最大位移量均增加, 最大增量为 25° 时的 192%. 三隧道法固定移植内侧半月板后, 单一压载作用时最大位移量在 25° 下减少 11%, 其余屈曲角度下增加, 最大增量为 80° 时为 64%; 组合载荷作用时内侧半月板的最大位移量在 4 个屈曲角度下均增加, 80° 时增量为 80%, 25° 时高达 203%.

3 讨论

本文重建了 4 个屈曲角度 (0° , 25° , 60° , 80°) 下人体正常膝关节的有限元模型, 并基于正常模型建立了 2 种内侧半月板移植的模型: 两隧道固定和

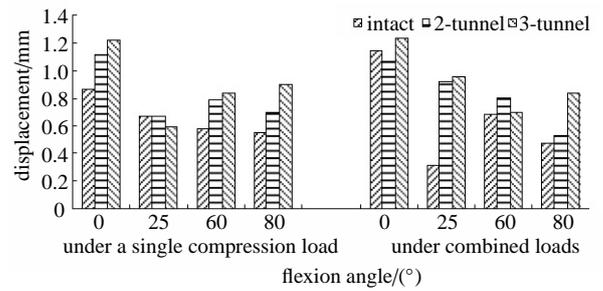


图 9 两种载荷下内侧半月板的最大位移

Fig. 9 Max. displacement of medial meniscus under two loading cases

三隧道固定. 施加 2 种载荷后, 将移植模型中关节软骨及半月板的接触特性与正常模型进行比较, 从而来评价 2 种固定方法的优劣.

Huang 等^[23]认为在评价半月板移植物对接触压力的影响时, 施加的压载荷应较高, 使用较低的轴向压载荷会高估移植物的作用, 其研究结果显示尽管 1.2 kN 轴向压载荷下胫股关节的接触特性没有完全恢复到正常关节的水平, 但与半月板切除的关节相比更接近正常. 一些学者对尸体膝关节施加单一轴向载荷来研究半月板移植对关节接触特性的影响, 较少使用其他种类的载荷来评价, 但是半月板撕裂常由于关节旋转时受到的扭矩所致, 因此本文除轴向压载荷外还施加了压扭组合载荷.

在 1.2 kN 轴向压载荷作用下, 对正常胫股关节模型中内侧半月板上最大等效应力为 3.02 MPa, Zielinska 等^[24]在相同加载条件下获得的值为 4.7 MPa, Pena 等^[25]在 1.15 kN 轴向力作用下得到的内侧半月板板上平均接触应力为 2.9 MPa, 结果差异可能是由于 Zielinska 等^[24]的模型中将 4 条韧带作为非线性弹簧处理, 而 Pena 等在有限元计算时将半月板视为各向同性材料. 对于使用两隧道固定的同种异体内侧半月板移植, 本文得到的结果是会使内侧胫骨软骨上的最大等效应力在 80° 时上升 49%, 其余屈曲角度反而有所下降. Alhalki 等^[13]利用 10 具尸体进行实验研究, 得到的结果为内侧半月板前后角带骨块的移植使胫骨平台内侧上的最大应力在 4 个屈曲角度 0° , 15° , 30° , 45° 下平均上升了 17%, 而部分尸体模型在 45° 屈曲角下得到的数据是上升量高达 60%, 在 15° 屈曲角时出现下降. Verma 等^[14]使用 8 具尸体在 0° 和 30° 屈曲角下进行轴向加载实验, 结果显示前后角带骨块的内侧半月板使 0° 屈曲角下胫骨平台内侧最大应力上升 13%, 使内侧半月板上峰值应力上升 45%, 本文两隧道模型中内侧半月板上最大等效应力上升 70%. 尸体研究得到的结果虽然在绝

对值上与本文仿真结果有所差别, 但变化趋势基本上相一致。

由于自制俯卧式膝关节屈曲支撑装置的最大调节角度(95°)及MR设备拍摄清晰图像时的磁感应范围的限制, 本文仅拍摄了0°~80°的MR图像, 还无法讨论不同固定方法的半月板移植术对高屈曲角的力学特性影响, 拟在后续工作进行研究与补充。此外, 本文的MR图像是在无负载自由屈曲的情况下拍摄获得的, 虽然在有限元分析时按照受试者的体重及特点以1.2kN的轴向负荷施加载荷, 仍与人体真实自重负荷有差异, 但其仿真结果及分析仍反映了半月板移植术中固定法对膝关节屈曲力学特性影响的特点, 不失对改进手术的指导价值。

目前, 关于内侧半月板移植的研究, 多从胫骨平台内侧接触变量的变化来评价移植效果, 较少考虑胫骨外侧软骨及股骨软骨上应力的变化。本文研究了内侧半月板移植的2种固定方法对胫骨外侧软骨及股骨软骨最大等效应力的影响, 还对半月板表面的应力分布及半月板在不同载荷作用下的位移进行了比较分析。与两隧道固定相比三隧道固定更能使关节软骨及外侧半月板的接触特性恢复到正常。该研究结果有望为临床上选择合理的手术方式提供帮助, 并为同种异体半月板移植术改进及发展提供一些数据参考。

参 考 文 献

- DiCarlo EF. Pathology of the Meniscus, in *Knee Meniscus-Basic and Clinical Foundations*. New York: Raven Press, 1992. 117-130
- Patrick E, Greis MD. Meniscal injury: II. Management. *Journal of American Academy of Orthopaedic Surgeons*, 2002, 10(3): 177-187
- Boyd KT, Myers PT. Meniscus preservation; rationale, repair techniques and results. *Knee*, 2003, 10(1):1-11
- Verdonk PC, Demufie A, Almqvist KF, et al. Transplantation of viable meniscal allograft. Survivorship analysis and clinical outcome of one hundred cases. *Journal of Bone and Joint Surgery(Am)*, 2006, 87(4): 715-724
- Kuhn JE, Wojtys EM. Allograft meniscus transplantation. *Clinics in Sports Medicine*, 1996, 15: 537-556
- Mikic ZD, Brankov MZ, Tubic MV, et al. Transplantation of fresh-frozen menisci: An experimental study in dogs. *Arthroscopy*, 1997, 13: 579-583
- Dienst M, Greis PE, Ellis BJ, et al. Effect of lateral meniscal allograft sizing on contact mechanics of the lateral tibia: Plateau: An experimental study in human cadaveric knee joints. *The American Journal of Sports Medicine*, 2007, 35: 34-42
- Haut Donahue TL, Hull ML, Rashid MM, et al. The sensitivity of tibiofemoral contact pressure to the size and shape of the lateral and medial menisci. *Journal of Orthopaedic Research*, 2004, 22: 807-814
- Chen MI, Branch TP, Hutton WC. It important to secure the horns during lateral meniscal transplantation-A cadaveric study. *Arthroscopy*, 1996, 12(2): 174-81
- Haut T L, Hulla DML. How the stiffness of meniscal attachments and meniscal material properties affect tibio-femoral contact pressure computed using a validated finite element model of the human knee joint. *Journal of Biomechanics*, 2003, 36(1): 19-34
- Alhalki MM, Howell SM, Hull ML. How three methods for fixing a medial meniscal autograft affect tibial contact mechanics. *The American Journal of Sports Medicine*, 1999, 27: 320-328
- McDermott I D, Lie DTT. The effects of lateral meniscal allograft transplantation techniques on tibio-femoral contact pressures. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 2008, 16(6): 553-560
- Alhalki MM, Hull ML, Howell SM. Contact mechanics of the medial tibial plateau after implantation of a medial meniscal allograft-a human cadaveric study. *The American Journal of Sports Medicine*, 28(3): 370-376
- Verma NN, Kolb E. The effects of medial meniscal transplantation techniques on intra-articular contact pressures. *The Journal of Knee Surgery*, 2008, 21(1): 20-26
- Stone K R, Walgenbach A W. Meniscal allografting: The three-tunnel. *Technique Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic and Related Surgery*, 2003, 19(4): 426-430
- Fox JA. Bone plug technique for meniscal transplantation. *Operative Techniques in Sports Medicine*, 2003, 11(2): 161-169
- Walter R, Shelton MD. Meniscus allograft transplantation. *Operative Techniques in Sports Medicine*, 2007, 15(2): 81-85
- 徐强, 黄荣瑛, 许勇刚等. ACL移植术初始力对股膝关节接触性能的影响. *工程力学*, 2010, 29(2): 205-211 (Xu Qiang, Huang Rongying, Xu Yonggang, et al. Effects of the initial force of grafts on the contact characteristic of the tibio-femoral joint after ACL reconstruction. *Engineering Mechanics*, 2010, 29(2): 205-211 (in Chinese))
- 黄荣瑛, 徐强, 许勇刚等. ACL单束/双束重建对股膝关节应力分布影响. *工程力学*, 2010, 28(8): 240-247 (Huang Rongying, Xu Qiang, Xu Yonggang, et al. Effects of the anterior cruciate ligament reconstructions on the stress distribution of the tibio-femoral joint. *Engineering Mechanics*, 2010, 28(8): 240-247 (in Chinese))
- Armstrong CG, Lai WM, Mow VC. An analysis of the unconfined compression of articular cartilage. *Journal of Biomechanical Engineering*, 1984, 106(2): 165-173
- Pena E, Calvo B, Martinez MA, et al. A three-dimensional finite element analysis of the combined behavior of ligaments and menisci in the healthy human knee joint. *Journal of Biomechanics*, 2006, 39(9): 1686-1701
- Haut Donahue TL, Hull ML, Rashid MM, et al. A finite element model of the human knee joint for the study of Tibio-Femoral contact. *Journal of Biomechanical Engineering*, 2002, 124(3): 273-280
- Huang A, Hull ML, Howell SM. The level of compressive load affects conclusions from statistical analyses to determine whether a lateral meniscal autograft restores tibial contact pressure to normal: A study in human cadaveric knees. *Journal of Orthopaedic Research*, 2003, 21(3): 459-464

24 Zielinska B, Donahue TL. 3D finite element model of meniscectomy: changes in joint contact behavior. *Journal of Biomedical Engineering*, 2006, 128(1): 115-123

25 Pena E, Calvo B, Martinez MA, et al. Finite element analysis of the effect of meniscal tears and meniscectomies on human knee biomechanics. *Clinical Biomechanics*, 2005, 20(5): 498-507

(责任编辑: 刘希国)

EFFECTS OF 2-TUNNEL AND 3-TUNNEL FIXATION ON BIOMECHANICS OF TIBIOFEMORAL JOINT¹⁾

Huang Rongying²⁾ Guo Yunfei Zhang Gaolong Zheng Hongguang Wei Xiaodong
(Department of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract Based on MR images of normal human knee at four flexion angles(0°, 25°, 60°, 80°), we built 3D finite element models of the normal tibiofemoral joint and two medial meniscus transplantation models (2-tunnel fixation and 3-tunnel fixation). Two kinds of loads (a single compressive load, the combined loads of compressive load and internal rotation torque) were applied to models in the finite element simulation, and the stress and displacement distribution were extracted from all models. We compared the von-Mises equivalent stress of articular cartilage and meniscus and the displacement of meniscus in transplantation models with those in the normal model, respectively. We concluded that the 3-tunnel fixation was superior to 2-tunnel fixation, and 3-tunnel fixation can restore the tibiofemoral joint function better.

Key words medial meniscus allograft transplantation, fixation methods, finite element, tibiofemoral joint, contact characteristics

Received 25 September 2012, revised 5 December 2012.

1) The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (50975013).

2) Huang Rongying, associate professor, research interests: biomechanics and medical devices. E-mail: buaahry@yahoo.com.cn.