

·康复工程·

# 小腿截肢患者残端应力的三维有限元动态分析\*

贾晓红<sup>1</sup> 张明<sup>2</sup> 王人成<sup>1</sup> 金德闻<sup>1</sup>

**摘要** 目的:研究接受腔/残肢界面应力分布特征,为假肢优化设计提供基础。方法:基于核磁共振图像,获得小腿截肢患者残端和假肢几何特征,建立三维非线性有限元模型,通过比较站立状态和行走过程中的界面应力,研究动态载荷对界面压力的影响。结果:界面压力主要分布在髌韧带、胫骨内外侧和腓窝区,一个平地正常速度行走的步态周期内,残肢界面的最大平均正压力是单腿站立状态下的1.15倍,最大平均切应力是单腿站立状态的1.4倍。结论:动态载荷使残肢和接受腔之间的界面应力增大,行走过程的动态影响不宜忽略。

**关键词** 假肢接受腔;界面应力;有限元分析;动态载荷

**3D finite element dynamic analysis of interface stress at residual limb of a trans-tibial amputee/JIA Xiaohong,Zhang Ming,WANG Rencheng,et al//Chinese Journal of Rehabilitation Medicine,2004,19(5):334—336**

**Abstract Objective:**A quantitative understanding of the interface stress distribution between prosthetic socket and residual limb is fundamental for an optimal design of artificial limb. **Method:** The geometry of residual limb and prosthesis was obtained based on MR images, a 3D nonlinear finite element(FE)model was developed.The interface stresses were compared between walking and standing state, and the effect of dynamic loads of interface stress was investigated.**Result:**Interface stress was mainly distributed at patella tendon,lateral tibia,media tibia and popliteal pit regions,and the average peak interface pressure during walking was 1.15 times as the one with single-leg standing, and the shear stress was 1.4 times. **Conclusion:**Interface stress between the residual limb and prosthetic socket increases due to the dynamic loads.The dynamic effects during walking can't be ignored.

**Author's address** Dept. of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing, 100084

**Key words** prosthetic socket; interface stress; finite element analysis; dynamic loads

战争、疾病、意外等使全世界截肢患者多达约600万人,截肢康复成为一个日益严重的社会问题和经济负担。安装假肢是截肢患者恢复活动能力和外观的主要康复手段。随着社会发展,对假肢性能的要求越来越高。截肢患者肢体残端与接受腔的接触界面是人体和假肢之间载荷传递的唯一通道,由于残端软组织不适合承重,研究接触界面的应力大小与分布,不仅是假肢设计的基础,也是假肢性能评价的重要指标。

从上个世纪80年代末以来,有限元方法广泛用于假肢设计。国内外学者建立了一系列有限元模型,研究残肢/接受腔界面应力<sup>[1-2]</sup>。但是这些模型在几何建模和外载模拟方面还存在一些问题<sup>[3-4]</sup>,而且主要局限于界面正压力的研究,关于切应力的报道较少。本文以小腿截肢患者为例,建立了三维非线性有限元模型,基于步态实验获得的患者行走过程中运动学和动力学特性参数,分析不同情况下残肢的界面应力。研究结果将为假肢设计提供理论基础。

## 1 模型和计算方法

### 1.1 研究对象

一例56岁男性小腿截肢患者自愿参加了研究,该患者身高158cm,体重81kg,有5年以上使用PTB接受腔和SACH脚的经验。该患者身体健康,无其他神经、骨骼和肌肉病史和残肢并发症。

### 1.2 有限元模型

残肢由骨、肌肉、脂肪、皮肤等组成,结构复杂。基于核磁共振扫描图像(MRI),并通过软件MIMICS对股骨、胫骨、腓骨和髌骨以及软组织进行了三维重构。残肢外表面轮廓是接受腔修型的基础,利用软件Shape Maker,对髌韧带承重区、腓窝区、胫骨内外侧进行了2.5—7mm的刮削,对腓骨端、腓骨头、胫骨端和胫骨脊进行了1.5—7mm的增补。软衬套的外表面和接受腔的内表面具有相同的形状,热塑加工成形,两者壁厚取4mm。见图1。

图1是基于残肢和假肢真实几何结构建立的三维非线性有限元模型。在初步计算中,所有结构材料都假定为均匀、线弹性、各向同性。骨、软组织、软衬

\*国家自然科学基金(50305013)和香港RGC(PolyU5200/02E)资助项目

1 清华大学精仪系,北京,100084

2 香港理工大学复康科技中心

作者简介:贾晓红,女,博士,副教授

收稿日期:2003-06-27

套、接受腔的杨氏模量分别为 10GPa、200kPa、380kPa 和 1500MPa, 骨和接受腔的 Poisson 比为 0.3, 软衬套的 Poisson 比为 0.39, 而由于软组织为近似不可压缩材料, Poisson 比取 0.49。残肢与软衬套之间的摩擦系数为 0.5。

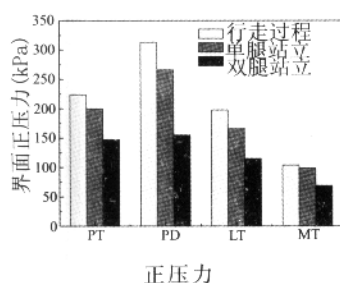


图1 三维非线性残肢界面应力分析有限元模型

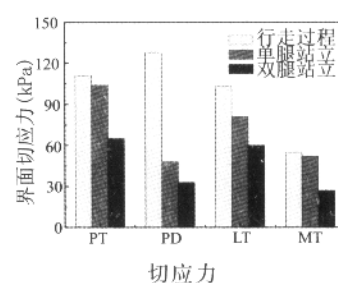
### 1.3 计算方法

本文在残肢与接受腔接触界面建立了自动面-面接触模型, 来模拟残肢和接受腔之间的摩擦和滑动。该接触面是一个不规则三维曲面, 表面粗糙且不均匀, 在外载作用下系统边界处于不可预测的状态, 待定边界使系统产生强非线性响应。另外由于残肢的软组织属于近似不可压缩材料, 受力后产生的大变形也会导致系统非线性。所以计算中还必须考虑几何非线性因素。

有限元分析分为两个步骤进行, 第一步模拟假肢穿入过程, 没有外力作用, 只计算接受腔修型引起的预应力。第二步在保持第一步计算所得应力和变形的基础上, 在膝关节上施加外载, 分析残肢界面应力的大小和分布特征。膝关节外载通过步态试验获得<sup>[5]</sup>。



正压力



切应力

图3 行走过程和站立状态下的界面正压力比较

运动过程中残肢/接受腔界面接触应力较大的原因主要是, 行走过程由于惯性载荷的作用, 使得动态载荷大于静态载荷; 但是由于系统的非线性和各个方向外载之间的相互耦合, 外载和接触应力之间并不是一个严格的线性比例关系。切应力与正压力具有不同的变化规律, 是因为切应力主要由界面摩擦产生, 不仅和正压力的大小有关, 还和界面的摩擦系数及接触状态有关。

## 2 残肢界面应力分析结果与讨论

采用有限元软件 Abaqus6.3, 对假肢穿入过程、站立状态、行走过程中的残肢界面应力进行了仿真计算。在假肢穿入过程, 虽然没有外载作用, 但是由于存在接受腔修型, 所以残肢界面会产生如图 2 所示的预应力。结果由等压线表示, 相邻两条线之间的压力差是 21kPa。可以看出, 最大压力为 166kPa, 位于髌韧带区 (PT), 其它较大的压力则分布在腓窝区 (PD)、胫骨外侧 (LT) 和胫骨内侧 (MT), 大小分别为 116、90 和 52 KPa。这几个位置都是适合承重区, 而其他压力敏感区压力则很小。行走过程中任意时刻的界面应力具有类似的分布模式, 大小随着外载和下肢位姿变化而变化。

比较四个主要承重区行走过程中的最大应力和单腿站立、双腿站立时的静态应力, 可以得出图 3 所示的结果。可以看出: 行走过程中的界面应力明显高于两种站立状态下静力分析的结果。将四个区域的应力取平均值, 行走过程最大正压力的平均值为单腿站立状态的 1.15 倍, 是双腿站立状态的 1.73 倍; 而行走过程最大切应力的平均值为单腿站立状态的 1.4 倍, 是双腿站立状态的 2.2 倍。

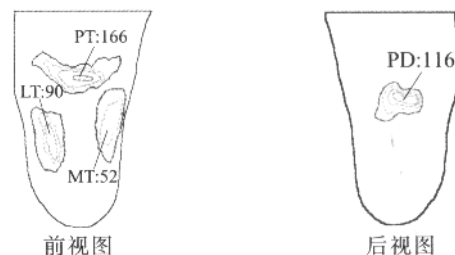


图2 残肢界面预应力分布图

## 3 结论

本文以小腿截肢患者为研究对象, 建立了残肢/接受腔三维非线性有限元模型, 分析了残肢界面应力大小和分布特征, 并对站立状态和行走过程的界面压力进行了比较。可以看出: ①残肢界面应力主要分布在髌韧带、胫骨内外侧和腓窝区, 其它敏感区应力很小; ②动态分析和静态分析结果存在较大差异, 行走过程中最大界面压力的平均值比单腿站立时增大 15%, 切应力则增大 40%, 动态载荷的影响不可

忽略。

本文为探索残肢/接受腔界面生物力学特性提供了一个理论基础,研究结果表明建立动态模型对进一步精确预测残肢界面应力分布是非常必要的。

参考文献

[1] Sanders JE, Daly CH. Normal and shear stresses on a residual limb in a prosthetic socket during ambulation: comparison of finite element results with experimental measurements[J]. J Rehab Res Dev, 1993, 30: 191-204.

[2] Zachariah SG, Sanders JE. Interface mechanics in lower-limb external prosthetics: A review of finite element models[J]. IEEE Trans Rehabil Eng, 1996, 4(4): 288-302.  
[3] Silver-Thron MB, Childress DS. Generic, geometric finite element analysis of the transtibial residual limb and prosthetic socket[J]. J Rehab Res Dev, 1997, 34: 171-186.  
[4] Zhang M, Mak AFT, Roberts VC. Finite element modeling of a residual lower-limb in a prosthetic socket: A survey of the development in the first decade [J]. Med Eng Phys, 1998, 20: 360-373.  
[5] Jia XH, Zhang M. Dynamic effects on interface mechanics of residual limb/prosthetic socket system [C]. International society of biomechanics XIX congress, Dunedin, New Zealand, 2003.

·经验交流·

青少年颈椎病的临床观察

王宝琴<sup>1</sup>

1 临床资料

研究对象为我们于2001年6月—2002年6月在门诊观察到青少年颈椎病患者51例,男性27例,女性24例;年龄7—18岁,平均年龄15.5岁;病程最长3年,最短1个月,平均病程约1年半。其中5例与外伤有关。临床症状一般表现为颈肩背部酸痛、沉重感,疲劳后加重。可伴有头晕、头痛、恶心、心悸,严重时可有呕吐、记忆力下降、精神注意力不易集中,时常落枕,上肢麻木等。

2 诊断标准

符合1994年第四届全国颈椎病会议所确定的颈椎病定义。符合颈椎病患者常见症状与体征。体格检查:颈部僵硬感,旋颈试验阳性。臂丛神经牵拉试验可见阳性。影像学检查:X光表现为生理曲度变直或反折。个别病人可出现颈椎排列不齐。MRI可表现为部分椎间盘膨出或突出。

3 方法与结果

疗效标准:治疗后症状全部消失为痊愈。平日无症状疲劳后偶感不适为显效。治疗后症状明显减轻为有效。治疗前后无变化为无效。

在候诊室备有宣教手册,护理人员应耐心向患者及家长介绍颈椎的解剖及功能。讲明端正姿势的重要性。不同年龄段的青少年应当使用适合于本年龄段使用的课桌及椅子。一次伏案时间不要过长,以1小时为宜。注意日常生活中的保健锻炼。同时还要注意睡眠时枕头的高度,枕头适宜的高度为6cm,过高或过低均可造成生理曲度改变。只有坚持正确的坐位学习、游戏,正确的卧位休息,才能达到保护颈椎关节的目的。治疗采用天台佛慈公司生产的低频脉冲电流治疗法,配合中药透入疗法。脉冲为尖波,频率为95次/min,磁场强度为0.08T。所用药物选用活血通络类中药辨证化裁。51例青少年颈椎病患者经3个月治疗效果如下:痊愈25例,占总数49%;显效17例,占总数33%;有效9例,占总数18%。

4 讨论

青少年颈椎病是指在青少年年龄阶段发生的颈椎病。我们根据临床观察青少年颈椎病的发生率呈上升趋势且逐年递增。但青少年颈椎病往往被社会所忽视。部分青少年颈椎病由于症状轻,而不被本人及家长所重视。社会上隐藏着一大批青少年颈椎病患者。随着生长发育骨骼定型,青少年颈椎病发病率逐渐升高。即使青少年时期不发病,但到成年人时其生活能力会有所下降,影响生活质量,造成家庭及社会负担。所以,青少年颈椎病应在社会各方面包括家庭、学校、医院等均要引起重视。

青少年颈椎病部分患者可出现有类小儿多动症现象。患儿易出现上课时注意力不集中,东张西望,不断摇头、扭动等。其原因主要是患儿颈项部支撑力量不足,长时间站立或坐位看书、写字时,项部肌肉易疲劳,患儿会不自觉地通过头项部活动来缓解颈项部的不适。由于儿童的心理发育不成熟,当在转动颈项部时,注意力就随着眼睛、耳朵的移动而不自觉的离开黑板、书本等,表现为注意力涣散、多动。当合并有颈椎关节损伤时,渐有挤眼、努嘴、点头等异常动作<sup>[1]</sup>。此异动是一种不自主性的,是由于颈椎病所致。患者活动后感到轻松。随着治疗,症状可逐渐缓解恢复正常。李忠权从临床症状上对青少年颈椎功能与儿童异动的关系进行了研究<sup>[2]</sup>。

致谢:衷心感谢刘道矩教授对研究工作给予的指导。

参考文献

[1] 李春梅,张舒玲.新生儿易发生损伤性颈椎病[C].中国康复医学会颈椎病学会论文汇编,山东,1996.  
[2] 李忠权,龚树辉,张国平,等.儿童颈椎功能不良与儿童异动征[C].中国康复医学会第七次全国颈椎病学术会,广州,2002,11.

1 天津第一中心医院东院,300011  
作者简介:王宝琴,女,副主任护师  
收稿日期:2003-10-06