

· 研究原著 ·

文章编号 1000-2790(2007)02-0143-03

椎体模型内模拟注射 PMMA 的流动及分布规律

刘绪立¹, 雷伟¹, 郑金², 李国君², 于海龙¹ (¹第四军医大学西京医院全军骨科研究所, 陕西 西安 710033, ²西安交通大学能源与动力工程学院流体力学教研室, 陕西 西安 710049)

Law of PMMA flowing and distributing in the vertebra by computer modeling

LIU Xu-Li¹, LEI Wei¹, ZHENG Jin², LI Guo-Jun², YU Hai-Long¹

¹PLA Institute of Orthopaedics, Xijing Hospital, Fourth Military Medical University, Xi'an 710033, China, ²Department of Fluid Mechanics, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

【Abstract】AIM: To investigate the law that PMMA (polymethylmethacrylate) flows and distributes in the vertebra so as to lay the operational theoretical foundation for the clinical work of percutaneous vertebroplasty. **METHODS**: Based on the structural characteristics and parameters of the healthy adult vertebra, a vertebral model of porous media was made by the computer software and the law that silicone oil with a viscosity matching that of PMMA flew and distributed in the model was calculated and analyzed by means of hydrodynamics and numeric modeling. **RESULTS**: The silicone oil distributed in a circle-like shape on each plane in the vertebral model, and the largest amount was on the planes through the injection point. The volume fraction of the silicone oil decreased from the center of planes to outward on each plane. **CONCLUSION**: The law that PMMA flows and distributes in the vertebral model was to spread in all directions in a circle-like shape on the planes through the injection point as a centre and it finally became a ball-like shape as a whole.

【Keywords】 vertebroplasty; polymethyl methacrylate; porous media; vertebral model

【摘要】目的: 探寻骨水泥在椎体内的流动及分布规律, 为临床椎体成形术提供操作的理论基础。方法: 根据正常成人椎体的结构特性和参数运用计算机软件构建相应的多孔介质的椎体模型, 并运用流体力学的方法进行数值模拟和分析与骨水泥粘度相当的硅油在椎体模型中的流动及分布规律。结果: 硅油在模拟的椎体模型内的各个平面上呈类圆形分布, 位于通过注射点的平面面积最大, 在每个平面上从中心向外,

硅油的体积分数逐渐降低。结论: 模拟骨水泥在椎体内的流动分布规律, 以注射点为圆心, 在经过注射点的各个平面上, 向各个方向呈类圆形流动分布, 成为一个类球体的结构。

【关键词】椎体成形术; 聚甲基异丁烯酸; 多孔介质; 椎体模型
【中图分类号】 R681 **【文献标识码】** A

0 引言

经皮椎体成形术是目前治疗椎体病变(如高危骨质疏松椎体、骨质疏松导致的椎体骨折、椎体肿瘤等)较为常用、有效的方法之一。尽管经皮椎体成形术有常规严格的手术操作程序, 但临床尚有诸多并发症发生, 其中较为严重且常见的并发症为骨水泥的渗漏, 对骨水泥注入过程中其流动分布规律的认识不清楚是导致该并发症发生的关键因素之一。模拟研究骨水泥在正常椎体模型内的流动分布规律, 为椎体成形术的操作提供基础理论依据, 为临床相关治疗提供指导。

1 材料和方法

1.1 材料 试验用椎体来源于解剖室 2 具青年男尸(年龄 23 岁和 32 岁)的胸腰段椎体共 3 个, 所有标本经 x 线前后方向和侧向检查排除椎体的病变。经过 950 mL/L 乙醇脱脂后, 标明标记后存于 -20℃ 冰柜中待用。试验选用与骨水泥粘度相当的标准 10 万粘度的硅油(美国道康宁公司)作为模拟注射用的流体。

1.2 方法

1.2.1 模型数据的获取 把 3 个脱脂的椎体切成小块, 每个椎体分别取其中 1 块烘干, 行扫描电镜检测, 测量其孔隙率和孔隙的平均直径大小, 孔隙率值约为 70%~80%。再根据文献资料, 取 75%^[1], 平均孔径约为(0.90±0.22) mm。根据五个正常人的腰椎 EBT 资料, 运用 mimics 软件进行腰椎三维重建, 取腰椎体外形数据平均值模拟椎体外形(不包括附件)。

1.2.2 计算机模型 根据椎体的内部结构特点, 计算机所采用的模型为非稳态不可压缩的粘性层流在多孔介质中的流动模型, 模型的外周模拟为固体壁面, 内部为多孔介质填充的类椭圆柱体。运用 Fluent

收稿日期 2006-04-18; 接受日期 2006-10-08

通讯作者: 雷伟, Email: leiwei@fmmu.edu.cn

作者简介: 刘绪立, 硕士, 医师, Tel: 13474105729 Email: lxhyxl@fmmu.edu.cn

软件对流体流动过程进行数值模拟,运用 Euler 方法对流体的运动过程进行分析。

1.2.3 模拟注射的方法 取模拟的椎体模型的后壁为进针部位、以椎体的物理中心点为注射的出口,该出口为速度进口,都给一个恒定的速度 0.045837 m/s 模拟注射 10 万粘度的硅油。取水平面的中心截面和上下对称的两个水平截面、纵行截面的中心截面和左右对称的两个纵行截面(图 1)来模拟和分析硅油在椎体模型内的流动及分布情况。实验以椎体的物理中心点为原点,椎体类椭圆体的长轴轴为 Y 轴、短轴为 X 轴、纵向轴为 Z 轴建立的三维坐标系来进行分析。

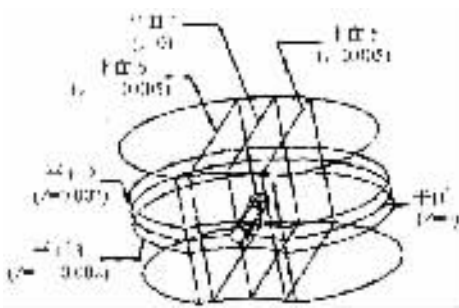


图 1 椎体的空间三维结构图以及所用到的截面位置图

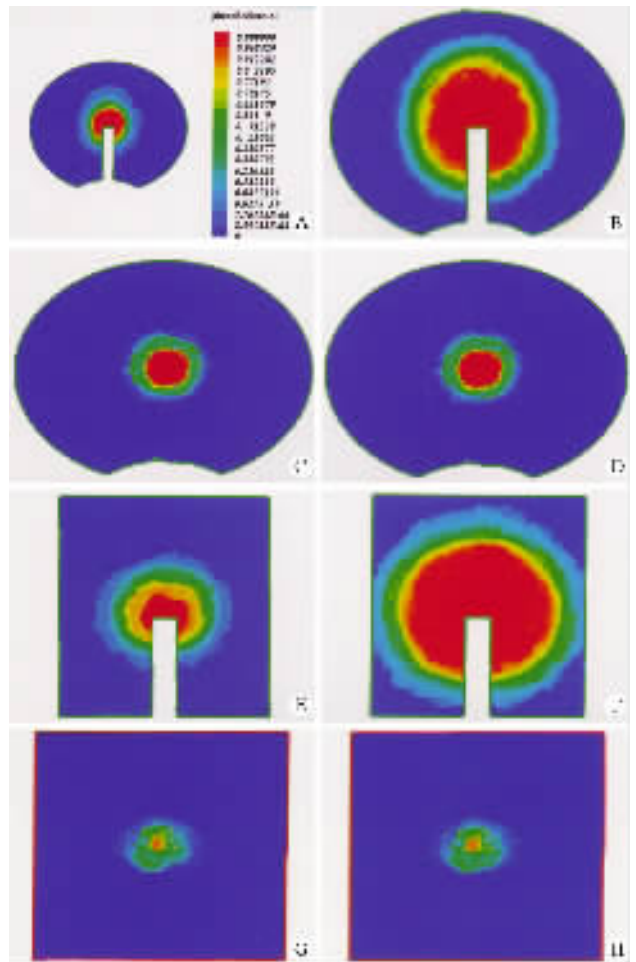
2 结果

2.1 椎体水平截面的分布 随着硅油的逐渐注入,

① 在中心水平截面上,硅油以注射点为圆心在水平面上呈类圆形向周围流动分布;同一时刻,从圆心向周围,硅油的体积浓度逐渐降低(图 2A, B; 图用不同的颜色表示不同的体积浓度,下同)。② 在非中心水平截面上,硅油以通过注射点的中心水平截面的垂直轴与该截面的交点为圆心,呈类圆形向周围流动分布;同一时刻,从圆心向周围硅油的体积浓度逐渐降低(图 2C, D)。③ 根据硅油分布面积曲线图(图 3),在同一个时刻,两个对称的非中心水平截面上的硅油分布面积相同,过中心注射点水平截面上的硅油分布面积最大。

2.2 椎体纵行截面的分布 随着硅油的逐渐注入,

① 在中心纵行截面上,硅油以注射点为圆心在水平面上呈类圆形向周围流动分布;同一时刻,从圆心向周围,硅油的体积浓度逐渐降低(图 2E, F)。② 在非中心纵行截面上,硅油以通过注射点的中心纵行截面的垂直轴与该截面的交点为圆心,呈类圆形向周围流动分布;同一时刻,从圆心向周围硅油的体积浓度逐渐降低(图 2G, H)。③ 根据硅油分布面积曲线图(图 4),在同一个时刻,两个对称的非中心纵行截面上的硅油分布面积相同,通过中心注射点的纵行截面的硅油分布面积最大。



A ($z=0$) $t=1 \text{ s}$ 椎体水平中心; B ($z=0$) $t=7 \text{ s}$ 椎体水平中心; C ($z=0.002$) $t=1 \text{ s}$ 椎体水平中心上; D ($z=-0.002$) $t=1 \text{ s}$ 椎体水平中心下; E ($y=0$) $t=1 \text{ s}$ 椎体纵行中心; F ($y=0$) $t=7 \text{ s}$ 椎体纵行中心; G ($y=0.05$) $t=1 \text{ s}$ 椎体纵行中心右侧方; H ($y=-0.05$) $t=1 \text{ s}$ 椎体纵行中心左侧方。

图 2 截面流动分布图

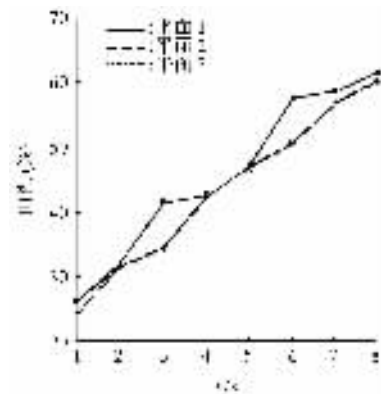


图 3 水平三个截面上硅油扩散区域变化

3 讨论

前面实验已经完成了在新鲜的干椎体标本上进行硅油注射的研究,但是只能观察到其物理过程的分布结果,其动态的物理流动分布过程不能观察到,无

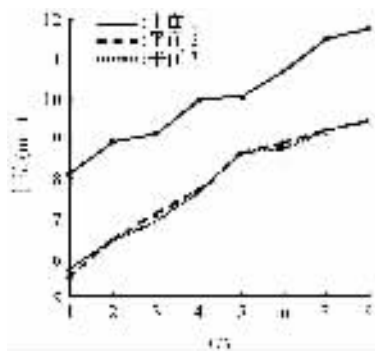


图4 纵行三个截面上硅油扩散区域变化

法对其流动及分布规律做定性的准确描述。因而采用计算机软件对椎体进行模拟,构建椎体的多孔介质模型。然后运用 Fluent 软件对流体流动过程进行数值模拟、Euler 方法对流体的运动进行分析。椎体内部是由固态的骨小梁和孔隙组成的结构,椎体内骨小梁体积所占的比例比较小(约 0.25)^[1],所以可以把它看成多孔介质。

因骨水泥相对于剪切率是非线性的流体,在应用流体力学方法求解其流动及分布规律的时候,其粘度不稳定,会使其流动及分布规律难以计算^[3]。在此初步的研究过程中只需考虑流体分布,不涉及传热,在计算过程中影响流体分布的主要参数为孔隙率和渗透性以及流体的粘度,所以试验选用与骨水泥的粘度相匹配的 10 万标准粘度硅油作为注射流体来代替骨水泥做研究。且硅油物性稳定、具有常数牛顿粘度、粘度相对温度变化稳定、相对于椎体二者的渗透性相似^[4-5]。

椎体的内部的渗透性和扩散率在水平方向和纵行方向上的差别不是很大,在同一数量级上^[4],因此在模拟计算过程中将椎体内部考虑为各项同性材料。对于一般的流体来说,不论是工程计算还是物理分析都将其看作连续介质,这是流体力学的基本原理和基本假设^[6]。由于硅油粘度很大,经计算在较短的注射时间内重力作用的影响可以忽略,当连续介质在各项同性的物质中流动时,在各个空间和时间上的流动特性相似。根据数值模拟计算分析,椎体模型内的孔隙,在未注入硅油以前是由空气占据,其时模型内的硅油体积分数均为零,图中用蓝色表示。当开始注入硅油以后,由于硅油与空气不发生任何反应,硅油开始占据空气原来占据的位置,空气在硅油的推动力下开始向各个方向流动。硅油在椎体内的各个空间和时间上的流动特性相似,因而硅油在椎体内以注射点

为圆心呈类圆形向周围流动。随着注射的继续,中心体积分数接近 1,然后硅油逐渐扩张,周围的体积分数也逐渐增加。

从两个流动分布情况表可以看出,在同一个时刻,中心平面的分布面积最大,分别向周围面积逐渐减小,且与中心平面对称的平面上的面积分布趋势相同。图 3 跟总体规律不符合的地方,因为分析的平面取的特别的靠近,在工程计算的误差容许的范围之内,总体的趋势仍然是反映了这个规律。因而得到模拟骨水泥在椎体内的流动分布规律:以注射点为圆心,在经过注射点的各个平面上,向各个方向呈类圆形流动分布,成为一个类球体的结构。

实验做的是一个连续的过程,图片选第 1 秒和第 7 秒,而忽略中间图片,目的是为了达到表达其流动分布的趋势。

这样,根据试验得到的模拟骨水泥的定性流动及分布规律,可以为椎体成形术的手术操作提供一定的理论指导,达到比较满意的效果,同时减少渗漏等并发症。但是实验只是对里面充满空气的新鲜干椎体进行模拟计算分析。活体椎体内部是充满血液和骨髓的,并且血液是在流动的,实际的椎体是具有可能渗漏的孔隙的,一个固定的可能渗漏的孔隙就是椎体后壁的静脉孔。这就需要进一步的做工作,对椎体的结构达到更准确的模拟,从而可以计算出骨水泥在椎体内的定量分布规律,可以为临床的工作提供更精确可靠的指导,做到在不渗漏的情况下尽可能多的去充满椎体,达到尽可能满意的效果。

【参考文献】

- [1] Lu WW, Zhao F, Luk KDK, et al. Controllable porosity hydroxyapatite ceramics as spine cage: Fabrication and properties evaluation [J]. J Mater Sci Mater Med, 2003, 14: 1039-1046.
- [2] 徐宝山, 唐天驷. 椎体成形术的现状与发展方向 [J]. 中华骨科杂志, 2001, 21(8): 502-504.
- [3] 陈懋章. 粘性流体动力学基础 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 27-28.
- [4] Barouda G, Falkb R, Crookshank M, et al. Experimental and theoretical investigation of directional permeability of human vertebral cancellous bone for cement infiltration [J]. J Biomech, 2004, 37: 189-196.
- [5] Barouda G, Falkb R, Crookshank M, et al. How to determine the permeability for cement infiltration of osteoporotic cancellous bone [J]. Med Eng Phys, 2003, 25: 283-288.
- [6] 张鸣远, 景思睿. 流体力学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 1-6.