

- duct stones: a comparison with ERCP and clinical follow-up[J]. Dig Surg, 2003, 20(1): 32-37.
- [21] Sakai Y, Tsuyuguchi T, Ishihara T, et al. Is ERCP really necessary in case of suspected spontaneous passage of bile duct stones[J]. World J Gastroenterol, 2009, 15(26): 3283-3287.
- [22] Choi JY, Kim MJ, Lee JM, et al. Hilar cholangiocarcinoma: role of preoperative imaging with sonography, MDCT, MRI, and direct cholangiography[J]. AJR, 2008, 191(5): 1448-1457.
- [23] Sainani NI, Catalano OA, Holalkere NS, et al. Cholangiocarcinoma: current and novel imaging techniques[J]. Radiographics, 2008, 28(5): 1263-1287.
- [24] Hirohashi S, Hirohashi R, Uchida H, et al. MR cholangiopancreatography and MR urography: improved enhancement with a negative oral contrast agent[J]. Radiology, 1997, 203(1): 281-285.
- [25] 陈燕萍, 张雪林, 成官迅, 等. 口服钆喷替酸葡甲胺溶液行 MR 胰胆管成像的初步临床应用[J]. 中华放射学杂志, 2003, 37(1): 75-79.
- [26] Sakai Y, Tsuyuguchi T, Yukisawa S, et al. Magnetic resonance cholangiopancreatography: potential usefulness of dehydrocholic acid administration in the evaluation of biliary disease[J]. Hepatol gastroenterol, 2008, 55(82/83): 323-328.
- [27] Neri E, Boraschi P, Braccini G, et al. MR virtual endoscopy of the pancreaticobiliary tract: a feasible technique[J]. Abdom Imaging, 1999, 24(3): 289-291.

(本文编辑 刘璐)

[文章编号] 1000-2200(2011)05-0539-03

· 综述 ·

## 三维有限元法在椎体成形术力学研究中的应用进展

雷丙俊, 牛国旗

[关键词] 脊柱; 力学研究; 有限元法; 综述

[中国图书资料分类号] R 323.4 [文献标识码] A

有限元法又称有限元素法(finite element method, FEM), 是一种有效的离散化数值计算方法, 把一个复杂的弹性物体看成是由无限个质点组成的集合体, 用这种离散化的有限单元模型代替原有物体。1974 年 Belytschkot 等<sup>[1]</sup>首先将 FEM 应用于脊柱力学研究。椎体成形术是一种采用经皮穿刺的方法将骨水泥注射到病变的椎体内的技术。而将 FEM 应用于经皮椎体成形术是在 20 世纪 90 年代后期开始建立成熟的脊柱运动节段三维有限元模型, 并完成了多项模拟实验的研究<sup>[2]</sup>。随着有限元技术的发展和椎体成形术在世界各地的广泛应用, 作为椎体成形术生物力学研究重要方法之一, 推动着椎体成形术生物力学研究更深入发展。由于椎体成形术的治疗原理、远期疗效、并发症均与其生物力学密切相关, 其生物力学引起广泛的关注<sup>[3]</sup>。本文就 FEM 在椎体成形术的生物力学研究进展作一综述。

### 1 三维 FEM 模拟骨水泥灌注恢复椎体强度和刚度相关研究

1.1 量和填充方式对椎体强度和刚度的影响 椎体的强度指椎体在发生塌陷之前所能承受的最大应力。刚度指椎体在外力作用下抵抗变形的能力。椎体成形术后椎体的强度和刚度在一定范围内随着骨水泥量的增加, 椎体的强度和刚度随之增加, Yan 等<sup>[4]</sup>建立有限元模型, 按注入骨水泥量占椎体容积分为 2 组(8.6%~11.4%、13.1%~22.8%)。结

果椎体的强度和刚度随着骨水泥量的增加而增加, 且强度的增加较刚度增加明显。因此认为骨水泥在椎体内填充方式对椎体的强度和刚度起到决定作用。然而也有学者<sup>[5]</sup>通过模拟椎体成形术聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)骨水泥填充, 填充量分别是 1.5 ml、5 ml, 选取椎体内五个部位为进针点, 根据流体动力学原理模拟 PMMA 在椎体内流动, 力学测定发现随着 PMMA 量的增加椎体的强度和刚度增加; 但同一容量骨水泥变化不同穿刺部位强度和刚度的变化无明显差异( $P > 0.05$ )。也有学者<sup>[6]</sup>用三维有限元法模拟早期退变椎间盘和正常椎间盘, 对骨质疏松性压缩性骨折行椎体成形术 PMMA 骨水泥灌注, 术后检测应力变化, 结果 2 组椎体强度均可以恢复到损伤前水平, 椎体的刚度部分恢复。早期退变椎间盘对运动节段的强度和刚度未见影响。

1.2 椎体强化后椎体的应力分布 由于椎体成形术中骨水泥填充后, 高强度的骨水泥固化使骨水泥及其周围应力明显增高, 从而改变了椎体内应力分布。Nan 等<sup>[7]</sup>三维有限元模型, 在载荷下观察有限元模型的应力、应变的分布变化, 发现在前弯力矩下, 椎体成形术后椎体的最大应力应变值较术前无明显变化, 但应力应变分布都有了明显的改变, 骨水泥附近明显增高, 高应力值出现在腰椎前部, 表示前部受到较大的应力导致变形。因此通过 FEM 的模拟研究, 认为骨水泥能在一定程度上恢复椎体单元的强度和刚度。也有学者<sup>[8]</sup>通过 Von mises stress 研究椎体内应力变化, Von mises stress 是一种等效应力, 用应力等值线来表示椎体内部的应力分布情况, 可以清晰描述出整个椎体中的变化, 从而使分析人员可以快速的确定椎体中的危险区域, 是实体生物力学不易检

[收稿日期] 2010-12-13

[作者单位] 蚌埠医学院第一附属医院 骨科, 安徽 蚌埠 233004

[作者简介] 雷丙俊(1975-), 男, 硕士研究生。

测的。三维 FEM 模拟研究表明负重和骨折类型是影响强化椎体和骨水泥最大 Von mises stress 最重要因素,骨水泥的弹性模量、松质骨、骨折部位、骨水泥的量是影响强化椎体最大 Von mises stress 的一般影响因素,而骨水泥的量和匀称性没有影响最大的 Von mises stress。有学者<sup>[9]</sup>对运动节段强度、刚度及 Von mises stress 变化进行研究,发现 PVP 术后椎体的强度和刚度均明显恢复,运动节段的 Von mises stress 明显降低,很好地恢复了椎体的稳定性。

**1.3 骨密度和骨水泥充填量对椎体的力学影响** 椎体骨密度的大小与椎体强度和椎体发生骨折强度密切相关,随着骨密度的降低而所需骨水泥相应逐渐增多。但椎体成形术中骨水泥渗漏率随着骨水泥量的增加而增多,导致并发症的发生,所以在手术时应尽量使用小剂量的骨水泥。重度骨质疏松椎体需要 20% 椎体容量(5 ml) PMMA 骨水泥,预防性强化可以很好地恢复椎体的强度和刚度;而轻中度骨质疏松椎体需要 5% 椎体容量 PMMA 骨水泥(1 ~ 3.5 ml)<sup>[10]</sup>。有学者<sup>[11]</sup>认为骨水泥的弹性模量的变化对椎体恢复损伤前的强度所需骨水泥量没有明显变化,但随着椎体弹性模量的降低椎体恢复损伤前的强度所需骨水泥量逐渐增加。因此临床中骨质疏松性骨折患者术前检测骨密度对术中所需骨水泥的量有一定的指导意义。

## 2 三维 FEM 模拟椎体成形术对相邻椎体、椎间盘力学影响

椎间盘可以承受并分散负荷,同时能制约过多活动,椎体压缩荷载通过终板作用于椎间盘的髓核和纤维环,髓核内部产生的液压使纤维环有向外膨胀的趋势。椎体骨水泥强化后终板出现不同大小的形态学变化,增加了髓核内的应力,从而对邻近节段产生不同程度影响。FEM 可以精确模拟椎体强化后终板和椎间盘应力应变情况。FEM 模拟研究发现,椎体成形术后终板下的骨水泥具有相当于垂直柱的作用,由此减少了椎体终板的生理凹陷,邻近椎体终板向内凸约 17%,使上下终板向外变形,髓核内压力升高(19%),增加相邻椎体的应力,易导致相邻椎体骨折<sup>[12-13]</sup>。也有学者<sup>[14-15]</sup>模拟椎体成形术后研究表明,随着 PMMA 量的增加,强化椎体下终板内凸明显减少,椎间盘的应力明显增高,相邻椎间盘髓核内压力增高达 59%,邻近椎体松质骨达到屈服点面积明显增加,从而改变了运动节段的应力分布,从而易导致邻近节段骨折的发生。但是也有学者<sup>[16-17]</sup>持不同意见,认为椎体终板中部的应力较术前增加,为应力集中部位,在持续应力作用下,该部位骨折的可能性增加,但注入较小剂量的骨水泥(T12,注入 4 ml),椎体成形术后相邻椎体终板的应力无明显增加,认为椎体强化过度将导致相邻椎体骨折发生率增加,但若注入较小剂量的骨水泥,则不足以增加相邻椎体的骨折危险,因此认为临近椎体的骨折是骨质疏松的自然病程。国内外学者<sup>[18-19]</sup>模拟椎体成形术时也有同时把竖脊肌加以模拟,因为竖脊肌为背肌中最长、最大的肌,纵列于躯干的背面,脊柱两侧的沟内,对维持脊柱的稳定性具有重要作用,研究发现竖脊肌肌力在 PVP、椎体后凸成形术后

应力分别增加约 200%、55%,椎间盘应力分别增加约 60%、20%,同时发现骨折上面身体重心代偿性前移,使重力弯矩和竖脊肌力增大,造成椎体和椎间盘承载明显增加,而骨水泥强化的影响相对较小,因此认为椎体重心前移或者椎体是否恢复骨折前高度是导致邻近节段骨折的决定性因素。陆声等<sup>[20]</sup>建立 FEM 模型,模拟骨水泥在椎体内的不同分布特点,结果不同骨水泥的量对邻近椎体生物力学的影响不大,但骨水泥分布不均匀和骨水泥在椎间隙的渗漏导致邻近椎体的终板应力增加,这可能是邻近椎体骨折的原因,因此建议进行椎体成形手术时骨水泥均匀分布,并避免渗漏到椎间隙。目前椎体成形术中,即使椎体得到合适强化,又不导致对邻近节段影响的骨水泥用量国内外还没有统一标准。

## 3 三维 FEM 模拟单侧与双侧行椎体成形术的生物力学比较

单侧与双侧行椎体成形术是指经皮穿刺,由单侧或双侧椎弓根入路到达椎体前方,然后进行骨水泥灌注椎体强化,是椎体成形术中两种常用的穿刺方法。但大多数学者主张经双侧椎弓根入路行椎体成形术,可以使骨水泥在椎体内弥散更均匀,对邻近节段应力影响减小。研究发现<sup>[21-22]</sup>,单侧注入骨水泥与双侧注入骨水泥病椎终板的应力不同,但两者在植入同一容量下差异无统计学意义( $P > 0.05$ )。手术前后对邻近椎体的应力影响不大。Liebschner 等<sup>[23]</sup>建立 FEM 模型,模拟椎体成形术 PMMA 骨水泥灌注(1 ~ 7 cm<sup>3</sup>),模拟不同负重和骨水泥不同空间分布情况下对椎体的影响,发现椎体单侧承重可引起脊柱不稳,其程度与骨水泥的填充量呈正比。单侧较双侧注射更明显地出现椎体从注射侧向未注射侧的相对运动。而且随着骨水泥填充量的增加,单侧注射出现的脊柱侧凸程度也随之加重,导致脊柱不稳。Long 等<sup>[24-25]</sup>建立 FEM 模型,检测发现单侧椎体灌注较双侧有较大的应力和应变。椎间盘出现应力集中现象,椎体的中部和相邻椎体的中上部,出现应力集中现象,椎体成形术单侧分布较双侧分布有较大的应力。他们还采用单侧入路退针法注射实施椎体成形术,通过轴向压缩负载,进行生物力学对比分析,发现退针注射法注射骨水泥,较传统的一次性固定点注射法有更好的生物力学分布。

## 4 三维 FEM 模拟椎体成形术填充材料的生物力学性能比较

作为临床上填充材料在力学上应具备以下特点<sup>[26]</sup>:(1)即时维持加固椎体的强度;(2)填充材料的刚度及屈服强度应尽可能与椎体骨接近;(3)材料的力学性能可以长期维持。临床常用的填充材料有 PMMA、磷酸钙骨水泥(CPC)及少数松质骨粒和生物陶瓷材料等。有学者<sup>[27]</sup>对 PMMA 骨水泥和松质骨粒灌注进行模拟,通过等量(23%椎体容积) PMMA 骨水泥和松质骨粒灌注,测定两种材料在压缩、拉伸及侧屈情况下椎体的应力变化,结果两种材料均可以很好地恢复椎体的强度和刚度,它们均对邻近椎间盘和邻近椎体的应力影响很小( $P > 0.05$ )。但治疗节段椎体增强区域的应力增加和应力分布变化明显,松质骨粒的增强对恢复治疗节段内部的应

力水平要优于 PMMA。与 PMMA 相比, CPC 能减少成形椎体和相邻椎体之间的应力梯度, 可能减少椎体退变和相邻椎体骨折的机会。但是目前还没有找到理想的骨填充材料。

近十几年来, 随着 X 线、CT、MRI 及计算机技术的日益普及, FEM 的发展, 尤其是三维有限元的应用, 使其可以对人体脊柱包括椎体及其附件等立体结构进行相对精确的模拟, 模拟椎体成形术骨水泥强化结果亦与实体实验结果相吻合, 可以模拟各种填充方式下脊柱动力学、运动学、椎间盘内部的应力应变及邻近节段的力学变化, 故在椎体成形术力学研究方面已广泛应用。但是, 由于目前所建立的 FEM 模型其形态结构与人体实际仍存在一定差异, FEM 在模拟人体脊柱时仍有许多问题亟待解决。相信随着计算机技术和新的 FEM 软件的不断开发, FEM 在脊柱生物力学的研究前景将会更加广阔。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] Belytschko T, Kulak RF, Schultz AB, *et al.* Finite element stress analysis of an intervertebral disc [ J ]. *Biomechanics*, 1974, 7 ( 3 ) : 277 - 285.
- [ 2 ] Cao KD, Grimm MJ, Yang KH. Load sharing within a human lumbar vertebral body using the finite element method [ J ]. *Spine*, 2001, 26 ( 12 ) : E253 - E260.
- [ 3 ] Furtado N, Oakland RJ, Wilcox RK, *et al.* A biomechanical investigation of vertebroplasty in osteoporotic compression fractures and in prophylactic vertebral reinforcement [ J ]. *Spine*, 2007, 32 ( 17 ) : 480 - 487.
- [ 4 ] Yan C, Dieter P, Mathieu C, *et al.* Cement distribution, volume, and compliance in vertebroplasty: some answers from an anatomy-based nonlinear finite element study [ J ]. *Spine*, 2008, 33 ( 16 ) : 1722 - 1730.
- [ 5 ] Teo J, Wang SC, Teoh SH. Preliminary study on biomechanics of vertebroplasty [ J ]. *Spine*, 2007, 32 ( 12 ) : 1320 - 1328.
- [ 6 ] Kosmopoulos V, Keller TS, Schizas C. Early stage disc degeneration does not have an appreciable affect on stiffness and load transfer following vertebroplasty and kyphoplasty [ J ]. *Eur Spine*, 2009, 18 ( 1 ) : 59 - 68.
- [ 7 ] Nan WS, Li HY, Tian X, *et al.* Vertebral mechanics under flexion before vertebroplasty: a visualized analysis [ J ]. *CRTER*, 2008, 12 ( 19 ) : 7641 - 7644.
- [ 8 ] Rohlmann A, Boustani HN, Bergmann G, *et al.* A probabilistic finite element analysis of the stresses in the augmented vertebral body after vertebroplasty [ J ]. *Eur Spine*, 2010, 19 ( 9 ) : 1585 - 1595.
- [ 9 ] Chen X, Li HY, Yang XJ. A finite element model based on medical image for evaluating biomechanical stability of percutaneous vertebroplasty [ J ]. *CRTER*, 2007, 11 ( 9 ) : 1796 - 1800.
- [ 10 ] Sun K, BSc Michael A, Liebschner K. Biomechanics of prophylactic vertebral reinforcement [ J ]. *Spine*, 2004, 29 ( 13 ) : 1428 - 1435.
- [ 11 ] Kosmopoulos V, Keller TS. Damagebased finite-element vertebroplasty simulations [ J ]. *Eur Spine*, 2004, 13 ( 7 ) : 617 - 625.
- [ 12 ] Baroud G, Nemes J, Heini P, *et al.* Load shift of the intervertebral disc after vertebroplasty: a finite-element study [ J ]. *Eur Spine*, 2003, 12 ( 4 ) : 421 - 426.
- [ 13 ] Polikeit A, Nohe LP, Ferguson SJ. The effect of cement augmentation on the load transfer in an osteoporotic functional spinal unit: finite element analysis [ J ]. *Spine*, 2003, 28 ( 10 ) : 991 - 996.
- [ 14 ] Wilcox RK. The biomechanical effect of vertebroplasty on the adjacent vertebral body: a finite element study [ J ]. *Engineer Med*, 2006, 220 ( 4 ) : 565 - 572.
- [ 15 ] Keller TS, Kosmopoulos V, Lieberman IH, *et al.* Vertebroplasty and kyphoplasty affect vertebral motion segment stiffness and stress distributions [ J ]. *Spine*, 2005, 30 ( 11 ) : 1258 - 1265.
- [ 16 ] 徐晖, 李健, 程立明, 等. 椎体成形术后相邻椎体终板应力变化的有限元分析 [ J ]. *中国临床解剖学杂志*, 2005, 23 ( 3 ) : 307 - 312.
- [ 17 ] Villarraga ML, Bellezza AJ, Harrigan TP, *et al.* The biomechanical effects of kyphoplasty on treated and adjacent nontreated vertebral bodies [ J ]. *J Spinal Disord Tech*, 2005, 18 ( 1 ) : 84 - 91.
- [ 18 ] Rohlmann A, Zander Z, Bergmann G. Spinal loads after osteoporotic vertebral fractures treated by vertebroplasty or kyphoplasty [ J ]. *Eur Spine*, 2006, 15 ( 8 ) : 1255 - 1264.
- [ 19 ] 关海山, 陈晨, 冯皓宇, 等. 椎体成形术和椎体后凸成形术对邻近椎体椎间盘的生物力学影响 [ J ]. *中国药物与临床*, 2008, 8 ( 9 ) : 705 - 707.
- [ 20 ] 陆声, 徐永清, 张美超, 等. 骨质疏松椎体增强后对相邻椎体生物力学影响的有限元研究 [ J ]. *中华创伤骨科杂志*, 2006, 8 ( 9 ) : 864 - 867.
- [ 21 ] 方国芳, 靳安民, 林荔军, 等. 有限元分析法对椎体成形术的力学评价 [ J ]. *中国骨质疏松杂志*, 2008, 14 ( 2 ) : 98 - 100.
- [ 22 ] 简志训, 陈政行, 林建宇, 等. 椎体成形术中不同骨水泥容量及位置的生物力学评估 [ J ]. *中华创伤骨科杂志*, 2005, 7 ( 10 ) : 903 - 907.
- [ 23 ] Liebschner Michael AK, Rosenberg WS, Keaveny TM. Effects of bone cement volume and distribution on vertebral stiffness after vertebroplasty [ J ]. *Spine*, 26 ( 14 ) : 1547 - 1554.
- [ 24 ] Long QL, Mi SJ, Li HY. Biomechanical changes following vertebroplasty by unilateral or bilateral approach: finite element analysis [ J ]. *J Clin Rehabil Tissue Eng Research*, 2009, 13 ( 22 ) : 4277 - 4280.
- [ 25 ] Long QL, Mi SJ. Biomechanical changes between needle withdrawal and fixation point injection bone cement vertebral plasty using finite element method [ J ]. *J Clin Rehabil Tissue Eng Research*, 2009, 13 ( 48 ) : 9429 - 9432.
- [ 26 ] Li CZ, Guo JY, Li JW, *et al.* The biomechanical effects of osteoporosis vertebral augmentation with cancellous bone granules or bone cement on treated and adjacent nontreated vertebral bodies: a finite element evaluation [ J ]. *Clin Biomech*, 2010, 25 ( 2 ) : 166 - 172.
- [ 27 ] 余斌峰, 杨国敬, 吴立军, 等. 骨质疏松椎体经皮骨移植增强的有限元研究 [ J ]. *中国临床解剖学杂志*, 2009, 27 ( 2 ) : 220 - 223.

( 本文编辑 姚仁斌 )