

重度骨质疏松腰椎中椎弓根螺钉稳定性与骨水泥注射剂量的相关性

刘 达¹, 谢庆云¹, 张 波¹, 康 夏¹, 王财儒¹, 周江军², 潘显明¹, 雷 伟³, 郑 伟¹

(1 成都军区总医院骨科 610083 成都市; 2 南京军区第 184 医院骨科 335000 鹰潭市;

3 第四军医大学西京医院骨科 710032 西安市)

【摘要】目的:比较重度骨质疏松腰椎中不同剂量骨水泥强化椎弓根螺钉的稳定性,分析螺钉稳定性与骨水泥剂量间的相关关系及初步探索注射 PMMA 的合适剂量。**方法:**18 个新鲜腰椎标本来自 4 具新鲜尸体(男性 1 名和女性 3 名,平均年龄 65 ± 9 岁),测量各椎体的骨密度(bone mineral density, BMD)后将 18 个腰椎标本的 36 侧椎弓根随机分为 6 个实验组(A~F 组)。相同方法制备钉道后,从 A 组到 F 组中,依次向钉道内注入 0ml、1.0ml、1.5ml、2.0ml、2.5ml、3.0ml PMMA 后拧入普通椎弓根螺钉。待骨水泥硬化后进行 X 线检查观察螺钉周围骨水泥的分布情况,随后进行轴向拔出实验并测量最大轴向拔出力(the maximum axial pullout strength, Fmax)。采用单因素方差分析和 LSD 检验比较各组中的 BMD 和 Fmax 的差异。Fmax 和 PMMA 剂量之间进行相关性分析。**结果:**所有腰椎的 BMD 均小于 $0.6\text{g}/\text{cm}^2$, T 值均小于 -3.5, 根据 WHO 的标准均诊断为重度骨质疏松椎体,各组中 BMD 之间的差异无统计学意义($P=0.799$)。A 组中,螺钉周围未见任何 PMMA; B~F 组中, PMMA 相对均匀地分布于螺钉周围的骨质中。所有腰椎中螺钉位置良好,均未见明显 PMMA 渗漏。A~F 组的 Fmax 分别为 $358.50\pm 86.00\text{N}$ 、 $442.67\pm 96.02\text{N}$ 、 $532.00\pm 103.18\text{N}$ 、 $740.67\pm 120.90\text{N}$ 、 $841.50\pm 133.42\text{N}$ 和 $1111.50\pm 158.57\text{N}$ 。与 A 组相比, B~F 组的 Fmax 的提高程度分别为 23.48%、48.40%、106.60%、134.73% 和 210.04%。A 组和 B 组之间, B 组和 C 组之间, E 组和 F 组之间 Fmax 的差异均不具有统计学意义($P=0.230$, $P=0.203$, $P=0.152$), 其余各组间的差异均具有统计学意义($P<0.05$)。Fmax 与 PMMA 剂量之间存在显著的正相关关系(Pearson 相关系数 $r=0.877$, $P<0.05$)。**结论:**PMMA 可以提高重度骨质疏松腰椎中椎弓根螺钉的稳定性,螺钉稳定性与 PMMA 剂量成显著的正相关关系。在一定范围内,注射 PMMA 和增加 PMMA 的剂量并不能显著增加螺钉的稳定性。生物力学研究表明,重度骨质疏松腰椎中提高螺钉稳定性时注射 PMMA 的合适剂量是 3ml。

【关键词】 重度骨质疏松; 腰椎; 椎弓根螺钉; 骨水泥; 最大轴向拔出力

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2015.04.13

中图分类号: R681.5, R687.3 文献标识码: A 文章编号: 1004-406X(2015)-04-0355-06

Study on the relationship between stability of pedicle screw and injected volume of polymethylmethacrylate in severe osteoporotic lumbar vertebrae/LIU Da, XIE Qingyun, ZHANG Bo, et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2015, 25(6): 355-360

【Abstract】Objectives: To compare the stabilities of pedicle screw augmented with different volumes of polymethylmethacrylate(PMMA) in severe osteoporotic lumbar vertebrae, and to investigate the relationship between screw stability and volume of PMMA in severe osteoporotic lumbar vertebrae. **Methods:** Eighteen lumbar vertebrae were obtained from four fresh-frozen human cadaveric spines (1 male and 3 female specimens with an average of 65 ± 9 years old). Thirty-six pedicles from eighteen lumbar vertebrae were randomly divided into six groups(group A to group F) after measurement of bone mineral density(BMD) of all samples. A pilot hole was prepared in advance by using the same method in all samples. Then, the pilot hole was filled with different volume of PMMA(0ml, 1.0ml, 1.5ml, 2.0ml, 2.5ml, 3.0ml) followed by insertion of screw in group A, B, C, D, E and F, respectively. After that, X-ray and axial pullout test were performed in all groups, and the maxi-

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(81301606);成都军区总医院院管课题资助项目(2013YG-B015)

第一作者简介:男(1982-),主治医师,医学博士,研究方向:脊柱外科

电话:(028)86570628 E-mail:liuda313@163.com

通讯作者:郑伟 E-mail:zhengweicn@sohu.com

imum axial pullout strength(Fmax) was measured. The one-way ANOVA and LSD test were used to detect the differences on BMD and Fmax among six groups. Relationship between Fmax and the volume of PMMA was assessed by using linear regression analysis. **Results:** All BMD values were less than $0.6\text{g}/\text{cm}^2$ and all T values were less than -3.5 , therefore, all samples in six groups were diagnosed with severe osteoporotic lumbar vertebrae according to World Health Organization definition. There was no significant difference in BMD among six groups ($P=0.799$). No PMMA was found around screw in group A. PMMA was found evenly wrapping up screw in group B-F. No malposition of screw and leakage of PMMA were found in all lumbar vertebrae. The maximum axial pullout strength (Fmax) in group A-F was $358.50\pm 86.00\text{N}$, $442.67\pm 96.02\text{N}$, $532.00\pm 103.18\text{N}$, $740.67\pm 120.90\text{N}$, $841.50\pm 133.42\text{N}$ and $1111.50\pm 158.57\text{N}$, respectively. Fmax in group B-F increased 23.48%, 48.40%, 106.60%, 134.73% and 210.04% respectively compared with that in group A. There were no significant differences for Fmax between group A and B, group B and C, and group E and F ($P=0.230$, $P=0.203$, $P=0.152$, respectively). While significant differences were found between every other two groups($P<0.05$). There was significantly positive correlation between Fmax and the volume of PMMA($r=0.877$, $P<0.05$). **Conclusions:** PMMA can enhance stability of pedicle screw in severe osteoporosis, and the screw holding strength increases with the increment of the PMMA volume in a limited range. Injection of 3ml PMMA is considered the preferred volume to improve the pedicle screw holding strength in severe osteoporotic lumbar vertebrae.

[Key words] Severe osteoporosis, Lumbar vertebrae, Pedicle screw, Polymethylmethacrylate, The maximum axial pullout strength

[Author's address] Department of Orthopaedics, Chengdu Military General Hospital, Chengdu, 610083, China

椎弓根螺钉内固定系已经被广泛应用于脊柱外科,并取得了良好的临床疗效^[1,2]。然而,随着人口老龄化的日益加剧,合并骨质疏松的脊柱疾病患者越来越多。骨质疏松严重影响螺钉的把持力,在骨质疏松的椎体上进行内固定面临着巨大的挑战,术中或术后因骨质条件下降容易导致螺钉松动、退出,甚至断裂^[3],这一并发症在临床上屡见不鲜。尤其是重度骨质疏松对螺钉稳定性的影响作用更为严重,曾经一度成为脊柱内固定手术的禁区。

然而,骨水泥凭借其强大的机械强度受到越来越多脊柱外科医生和学者的关注。很多学者通过向钉道内注射骨水泥(polymethylmethacrylate, PMMA)来强化螺钉的稳定性。然而,通过文献回顾我们发现,在众多的研究中注射 PMMA 的剂量存在很大的差异^[4-15],波动范围可达 $0.8\sim 8.0\text{ml}$,且对于不同剂量 PMMA 强化螺钉稳定性的比较研究以及螺钉稳定性与 PMMA 剂量之间的相关性研究甚少。甚至有部分研究中^[4,11]发现增加 PMMA 的剂量并不能显著提高螺钉的稳定性。本研究的目的是在重度骨质疏松腰椎标本中注射不同剂量的 PMMA 来强化椎弓根螺钉,通过生物力学实验比较椎弓根螺钉的稳定性,分析 PMMA 剂量与螺钉稳定性之间的关系,探索重度骨质疏松腰椎

内强化螺钉固定时注射 PMMA 的最佳剂量,为临床应用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 实验标本

18 个腰椎标本取自 4 具新鲜尸体的脊柱(L1~L5)(第四军医大学解剖教研室提供)。尸体为平均年龄 65 岁(57~79 岁)的 3 名女性和 1 名男性。所有标本经 X 线检查排除畸形、骨折等病变,其中 1 个腰椎因严重退行性变、1 个腰椎因为骨质缺损被排除在本研究外。双能 X 线吸收骨密度仪(Lunar Prodigy, GE, USA)测量各椎体的骨密度值(bone mineral density, BMD)。去除标本周围软组织,自腰椎间盘处离断,游离成单个椎体。制成 18 个人体腰椎标本,于 -20°C 条件下储存。所有涉及人体腰椎标本的操作均严格遵守国家伦理委员会制定的相关原则,并获得了第四军医大学伦理委员会的同意。

1.2 实验器材

普通椎弓根螺钉(UPASS)长度为 45.0mm ,直径为 6.5mm ,由山东枢法模-威高骨科医疗器械公司制作,共 36 枚,由 Ti-6Al-4V 钛合金材料制成。PMMA 骨水泥(Tecres, Italy)包括粉剂($20.0\text{g}\times 1$ 包/盒)和水剂($10.0\text{ml}\times 1$ 支/盒),用来强化螺钉。

置入螺钉使用的配套丝攻、持钉器等器械均由 Medtronic-Weigao 骨科器械有限公司提供。双能 X 线吸收骨密度仪 (Lunar Prodigy, GE, USA), 由成都军区总医院门诊部提供, 数字化 X 线机 (DirectView DR7500, Kodak, USA) 由成都军区总医院放射科提供。MTS 858 (MTS System, Minneapolis, MN, USA) 生物材料实验机, 由西南交通大学力学实验中心提供。

1.3 分组和实验方法

所有标本均在室温下自然解冻。18 个腰椎的 36 侧椎弓根完全随机分为 6 个组 (每组 6 个椎弓根)。对所有标本均采用相同的方法制备钉道。采用“人字嵴”顶点法确定进钉点, 咬骨钳咬出局部皮质, 使用直径为 3.5mm 的手钻沿椎弓根纵轴与棘突成 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 角缓慢旋入制备钉道 (图 1), 深度约 45.0mm, 用探针探查钉道是否完整。使用直径为 4.5mm 的丝攻攻丝钉道后, 再次用探针探查钉道。A~F 组: 分别向钉道内直接注入 PMMA (0ml、1.0ml、1.5ml、2.0ml、2.5ml、3.0ml), 将粉剂和水剂严格按照 2:1 的比例在金属器皿内充分搅拌至均匀, 在骨水泥呈糊状时按照分组将不同剂量的 PMMA 抽入 5ml 的注射器内。小心排除内部的空气, 至骨水泥呈牙膏状时为佳, 然后将不同剂量的 PMMA 缓慢注入椎体内, 然后拧入螺钉。待骨水泥完全硬化后对所有标本进行 X 线检查, 了解螺钉及周围骨水泥的分布情况。

1.4 螺钉的轴向拔出实验

将标本通过特制夹具固定于 MTS 858 (MTS System, Minneapolis, MN, USA) 力学实验机上, 沿椎弓根螺钉长轴方向以 5mm/min 的加载速度^[7]进行拔出实验 (图 2), 出现螺钉拔出破坏后停止。螺钉被拔出的标准是载荷-位移曲线到最高点后随即明显下降 (图 3)。实验机的载荷信号由计算机数据采集系统记录, 并由相应的测试软件计算出螺钉的最大轴向拔出力 (the maximum axial pullout strength, $F_{\max}$)。

1.5 统计学处理

计量资料采用均数 $\pm$ 标准差表示, 采用 SPSS 16.0 进行单因素方差分析, 多个处理组均数之间的两两比较采用 LSD 检验, $F_{\max}$ 和 PMMA 剂量之间进行 Pearson 相关性分析, $P<0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 BMD 测量结果

A~F 组的 BMD 分别为 $0.53\pm 0.09\text{g}/\text{cm}^2$ 、 $0.55\pm 0.07\text{g}/\text{cm}^2$ 、 $0.55\pm 0.07\text{g}/\text{cm}^2$ 、 $0.53\pm 0.05\text{g}/\text{cm}^2$ 、 $0.52\pm 0.07\text{g}/\text{cm}^2$ 和 $0.57\pm 0.04\text{g}/\text{cm}^2$ 。各组中 BMD 之间的差异无统计学意义 ($P=0.799$)。所有腰椎的 BMD 均小于 $0.6\text{g}/\text{cm}^2$, T 值均小于 -3.5, 根据 WHO 关于骨质疏松的诊断标准, 所有标本均为重度骨质疏松椎体。

2.2 X 线检查

如图 4 所示, A 组中, 螺钉被周围骨质所包绕, 螺钉周围未见任何 PMMA; B~F 组中, 螺钉周围呈现高亮影区域 (PMMA), 螺钉被 PMMA 严密包绕, PMMA 相对均匀地分布于螺钉周围的骨质中。所有标本均未见明显 PMMA 渗漏。

2.3 轴向拔出实验

A~F 组轴向拔出的 $F_{\max}$ 分别为 $358.50\pm 86.00\text{N}$ 、 $442.67\pm 96.02\text{N}$ 、 $532.00\pm 103.18\text{N}$ 、 $740.67\pm 120.90\text{N}$ 、 $841.50\pm 133.42\text{N}$ 和 $1111.50\pm 158.57\text{N}$ 。与 A 组相比, B~F 组的 $F_{\max}$ 的提高程度分别为 23.48%、48.40%、106.60%、134.73% 和 210.04%, 差异均具有统计学意义 ($P<0.05$)。A 组和 B 组之间, B 组和 C 组之间, D 组和 E 组之间 $F_{\max}$ 的差异均不具有统计学意义 ($P=0.230$, $P=0.203$, $P=0.152$), 其余各组间的差异均具有统计学意义 ($P<0.05$)。如图 5 所示, $F_{\max}$ 与 PMMA 剂量之间存在显著的正相关关系 (Pearson 相关系数 $r=0.877$, $P<0.05$)。

3 讨论

如何有效提高骨质疏松条件下椎弓根螺钉的稳定性一直是困扰脊柱外科医生的难题。目前解决的方法主要采用 PMMA 来强化螺钉的稳定性。早期有些学者向钉道内直接注射 PMMA 显著提高了螺钉把持力。随着研究的进一步深入, 越来越多的学者通过不同设计的可注射椎弓根螺钉注射 PMMA 来强化螺钉的固定。在众多的研究中, 不论是何种注射方法、何种实验对象中 PMMA 的注射剂量各不相同, 不同剂量 PMMA 强化螺钉稳定性的效果也存在很大的差异^[4-15]。Frankel 等^[4]通过带侧孔的丝攻向骨质疏松的椎体 (T5~L5) 内注射 PMMA, 注射 PMMA 的平均剂量为 3.7ml (2.0~8.0ml), 可以分别将螺钉初次置钉和翻修置钉的

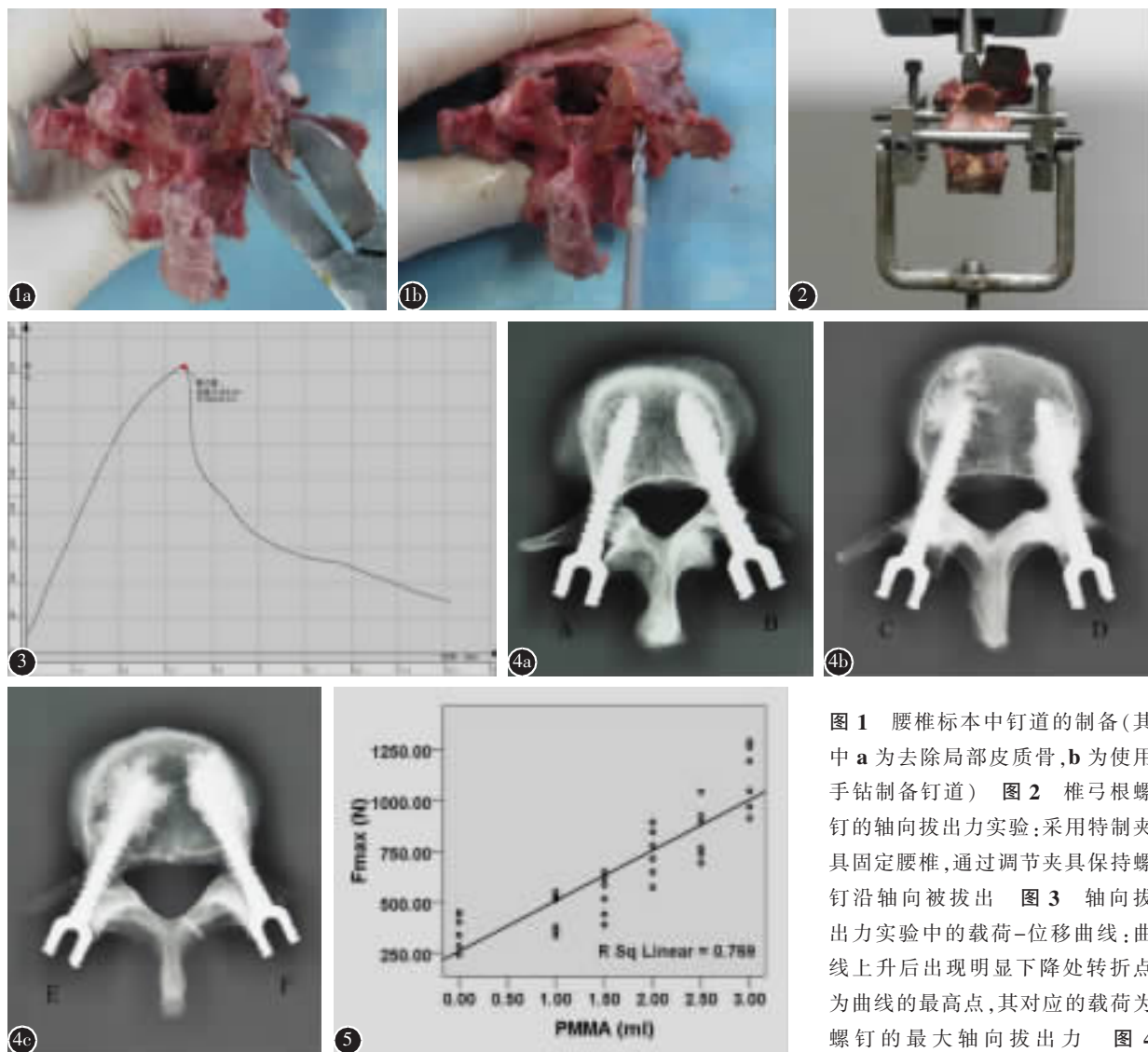


图1 腰椎标本中钉道的制备(其中a为去除局部皮质骨,b为使用手钻制备钉道) 图2 椎弓根螺钉的轴向拔出力实验:采用特制夹具固定腰椎,通过调节夹具保持螺钉沿轴向被拔出 图3 轴向拔出力实验中的载荷-位移曲线:曲线上升后出现明显下降处转折点为曲线的最高点,其对应的载荷为螺钉的最大轴向拔出力 图4 a~c 不同组中螺钉周围PMMA分布的X线检查(其中a~f分别为A~F组)。A组中螺钉周围未见PMMA,B组~F组中PMMA存在螺钉周围的骨质中,从A组到F组,螺钉周围的PMMA范围逐渐增加 图5 Fmax与PMMA剂量之间的相关性分析

Figure 1 The preparation of pilot hole in lumbar vertebrae(a indicates removing the cortical bone, b indicates preparing the hole with hand drill) Figure 2 The axial pull-out test of pedicle screw. The lumbar vertebrae was fixed into the special-designed jag, which allowed to ensure that each screw was pulled out along its axial direction Figure 3 The load-displacement curve in the axial pull-out test. On the curve, the maximum pullout strength(Fmax) was defined as the inflection point where the load peaked and then sharply decreased with the increasing displacement Figure 4 a~c X-ray examination of PMMA distribution around screw in different groups. A~F indicate group A, B, C, D, E and F, respectively. No PMMA was found around screw in group A and PMMA was found in bone tissue around screw in groups B~F. From groups A to F, screws were wrapped up by gradually increasing scope of PMMA Figure 5 The correlation between Fmax and volume of PMMA

稳定性提高了 119%和 162%,而高剂量组(5.5ml)和低剂量组(2.8ml)中螺钉的稳定性之间未见统计学差异。Paré 等^[11]通过带侧孔的椎弓根螺钉向骨质疏松的尸体胸椎(0.5ml、1.0ml、1.5ml)和腰椎(1.5ml、2.0ml、2.5ml)中注射不同剂量的 PMMA。除了胸椎中注射 0.5ml 外,其余剂量均能显著提高螺钉的稳定性,胸椎中 1.0ml 和 1.5ml 剂量组中螺钉的稳定性分别提高了 186%和 158%,腰椎中

1.5ml、2.0ml 和 2.5ml 剂量组中螺钉的稳定性分别提高了 264%、221% 和 198%。而在胸椎或腰椎中,不同剂量组(除 0.5ml 外)中螺钉的稳定性之间无统计学差异。研究表明,通过螺钉注射 PMMA 后螺钉的稳定性并不随着 PMMA 剂量的增加而逐渐提高。该研究中未对螺钉稳定性与 PMMA 剂量间关系进行研究。Chen 等^[14]向重度骨质疏松人工骨模块中注射不同剂量的 PMMA 后发现,注射 1.0ml、2.0ml、3.0ml 后螺钉的稳定性分别提高了 259%、508%、715%;且不同剂量之间的差异均具有统计学意义。但并未做螺钉稳定性与 PMMA 剂量的相关性研究。

由此可见,目前对于螺钉稳定性与注射 PMMA 剂量的相关性研究甚少,尤其缺乏针对重度骨质疏松条件下的相关研究。因此本研究针对目前该领域的不足,设计了重度骨质疏松腰椎中传统注射方法中螺钉稳定性与 PMMA 剂量之间的相关性研究的实验。同时,通过细化 PMMA 剂量希望初步探索出注射 PMMA 的最合适剂量。

前期研究中我们选用 1522-507# 人工骨模块进行螺钉的拔出实验^[16]。该模块具有各向同性和均质的特点,含有 95% 以上的开放式孔隙结构,可以模拟重度骨质疏松状态下的松质骨蜂窝状结构及力学特点,并已在国外的研究中被大量使用^[9,12,14]。注射不同剂量的 PMMA 后螺钉的稳定性均有显著的提高,螺钉的稳定性与 PMMA 剂量存在显著的正相关关系。我们还发现,虽然螺钉稳定性与 PMMA 成正相关关系,但在某个范围内增加注射 PMMA 的剂量并不能显著提高螺钉的稳定性。注射 3ml PMMA 时螺钉的稳定性显著高于注射 2ml,但与注射 4ml 之间无明显差异。虽然注射 5ml PMMA 后螺钉的稳定性显著高于注射 3ml,但结合文献报道注射 5ml 时骨水泥渗漏的风险明显增加,因此,我们认为注射 3ml PMMA 可以作为骨质疏松模块中较合适的选择。随后,我们选取 1522-505# 人工骨模块来模拟重度骨质疏松状态下的松质骨蜂窝状结构,同样的方法研究后发现,1522-505# 模块中螺钉的稳定性与 PMMA 剂量存在显著的正相关关系。注射 4ml 时螺钉的稳定性显著高于其他小剂量组,与注射 5ml 时螺钉的稳定性接近。因此我们认为,重度骨质疏松人工骨模块中注射 4ml PMMA 是比较合适的选择。

然而人工骨模块主要模拟骨质疏松状态下松

质骨的结构,而螺钉在腰椎的固定强度由椎体和椎弓根两部分组成,两者的微观结构存在很大差异,所以人工骨模块中的力学结果只能初步模拟螺钉在腰椎内的固定强度。因此,为了更接近临床手术的真实情况,本研究中我们收集了重度骨质疏松尸体腰椎标本,向钉道注射不同剂量的 PMMA,通过力学实验比较不同剂量 PMMA 强化螺钉稳定性的效果。

研究发现,注射不同剂量的 PMMA 后螺钉在腰椎中的稳定性均不同程度的提高,且随着 PMMA 剂量的增加螺钉的稳定性也逐渐提高,螺钉的稳定性与 PMMA 剂量之间存在显著的正相关关系。然而,在一定的范围内增加 PMMA 的剂量并不能显著提高螺钉的固定强度。与空白组相比注射 1.0ml PMMA 可以将螺钉的稳定性提高 23.48%,但两者的差异并无统计学意义。而剂量大于 1ml 的实验组中螺钉的稳定性均有显著提高。同样的,注射 1.5ml 与 1.0ml 之间相比以及注射 2.5ml 与 2.0ml 之间相比螺钉的稳定性分别提高了 20.18% 和 13.61%,但差异均无统计学意义。而注射 3.0ml 时螺钉的稳定性显著高于任何其他剂量组中螺钉的稳定性。通过组间的两两比较,注射 3ml 时螺钉具有最强的稳定性。而本研究中并未发现 PMMA 的渗漏,注射 3ml PMMA 具有安全性。因此,我们从螺钉的稳定性和安全性分析认为注射 3ml PMMA 可以作为提高重度骨质疏松椎体椎弓根螺钉稳定性的合适选择。

结合文献报道的注射剂量,同时考虑到 PMMA 的渗漏风险,本研究中我们没有设置更大的 PMMA 剂量组。由于标本来源有限,本研究中主要采用了螺钉的轴向拔出实验及最大轴向拔出力来评价螺钉的稳定性。然而椎弓根螺钉在体内由固定棒和横连组装成一个整体的框架结构,因此在脊柱活动的过程中,螺钉不仅受到轴向的作用力,在螺钉尾部也受到垂直方向的载荷,在下一步实验中我们会加入螺钉侧方稳定性的研究,及螺钉固定棒系统整体稳定性的研究。本实验对螺钉稳定性与 PMMA 剂量间的关系进行了初步研究。在下一步的研究中,还需要进一步细化 PMMA 的剂量分组、腰椎 BMD 的分组,深入研究 BMD 及 PMMA 剂量两因素对于螺钉稳定性的作用。

通过本实验我们发现,PMMA 可以提高重度

骨质疏松腰椎中椎弓根螺钉的稳定性, 螺钉稳定性与 PMMA 剂量成显著的正相关关系。在一定范围内, 注射 PMMA 和增加 PMMA 的剂量并不能显著增加螺钉的稳定性。我们认为, 重度骨质疏松腰椎中注射 3ml PMMA 可以作为合适的选择。

4 参考文献

1. Kaymaz B, Demirkiran G, Ayyaz M, et al. Treatment of thoracolumbar burst fractures using combined pedicle screw-laminar hook fixation [J]. Acta Orthop Traumatol Turc, 2014, 48 (2): 152-156.
2. Wang L, Li J, Wang H, et al. Posterior short segment pedicle screw fixation and TLIF for the treatment of unstable thoracolumbar/lumbar fracture [J]. BMC Musculoskelet Disord, 2014, 15: 40.
3. Di Silvestre M, Parisini P, Lolli F, et al. Complications of thoracic pedicle screws in scoliosis treatment [J]. Spine, 2007, 32(15): 1655-1661.
4. Frankel BM, D'Agostino S, Wang C. A biomechanical cadaveric analysis of polymethylmethacrylate-augmented pedicle screw fixation [J]. J Neurosurg Spine, 2007, 7(1): 47-53.
5. Becker S, Chavanne A, Spitaler R, et al. Assessment of different screw augmentation techniques and screw designs in osteoporotic spines [J]. Eur Spine J, 2008, 17(11): 1462-1469.
6. Chang MC, Liu CL, Chen TH. Polymethylmethacrylate augmentation of pedicle screw for osteoporotic spinal surgery: a novel technique [J]. Spine, 2008, 33(10): E317-E324.
7. Moon BJ, Cho BY, Choi EY, et al. Polymethylmethacrylate-augmented screw fixation for stabilization of the osteoporotic spine: a three-year follow-up of 37 patients [J]. J Korean Neurosurg Soc, 2009, 46(4): 305-311.
8. Blattert TR, Glasmacher S, Riesner HJ, et al. Revision characteristics of cement-augmented, cannulated-fenestrated pedicle screws in the osteoporotic vertebral body: a biomechanical in vitro investigation. Technical note [J]. J Neurosurg Spine, 2009, 11(1): 23-27.
9. Chen LH, Tai CL, Lai PL, et al. Pullout strength for cannulated pedicle screws with bone cement augmentation in severely osteoporotic bone: influences of radial hole and pilot hole tapping [J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2009, 24(8): 613-618.
10. Bullmann V, Schmoelz W, Richter M, et al. Revision of cannulated and perforated cement-augmented pedicle screws: a biomechanical study in human cadavers [J]. Spine, 2010, 35(19): E932-E939.
11. Paré PE, Chappuis JL, Rampersaud R, et al. Biomechanical evaluation of a novel fenestrated pedicle screw augmented with bone cement in osteoporotic spines [J]. Spine, 2011, 36 (18): E1210-1214.
12. Chen LH, Tai CL, Lee DM, et al. Pullout strength of pedicle screws with cement augmentation in severe osteoporosis: a comparative study between cannulated screws with cement injection and solid screws with cement pre-filling [J]. BMC Musculoskelet Disord, 2011, 12: 33.
13. Liu D, Shi L, Lei W, et al. Biomechanical comparison of expansive pedicle screw and polymethylmethacrylate-augmented pedicle screw in osteoporotic synthetic bone in primary implantation: an experimental study [J]. J Spinal Disord Tech, 2013 Nov 5. [Epub ahead of print]
14. Chen YL, Chen WC, Chou CW, et al. Biomechanical study of expandable pedicle screw fixation in severe osteoporotic bone comparing with conventional and cement-augmented pedicle screws [J]. Med Eng Phys, 2014, 36(11): 1416-1420.
15. 代飞, 刘瑶瑶, 孙东, 等. 新型可注射骨水泥椎弓根螺钉与骨水泥钉道强化在治疗腰椎滑脱伴骨质疏松中的比较研究 [J]. 脊柱外科杂志, 2014, 12(5): 257-261.
16. 刘达, 潘显明, 廖冬发, 等. 不同剂量聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥强化骨质疏松人工骨模块中椎弓根螺钉稳定性的研究 [J]. 中华临床医师杂志(电子版), 2013, 14(7): 6477-6480.
17. Hashemi A, Bednar D, Ziada S. Pullout strength of pedicle screws augmented with particulate calcium phosphate: an experimental study[J]. Spine J, 2009, 9(5): 404-410.

(收稿日期:2015-01-14 修回日期:2015-03-31)

(英文编审 蒋欣/贾丹彤)

(本文编辑 彭向峰)