

骨质疏松患者脊柱内固定失败预防策略的研究进展

Research progress of prevention strategies for failure of spinal internal fixation in patients with osteoporosis

孟 猛,王金佐,李忠海

(大连医科大学附属第一医院骨科 116000 大连市)

doi:10.3969/j.issn.1004-406X.2021.11.13

中图分类号:R681.5,R687.3 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2021)-11-1047-05

随着我国经济水平的不断提高、人民生活日益改善,人口平均寿命正不断延长,社会逐渐步入老龄化,骨质疏松成为影响老年人生活质量,限制其运动能力的重要原因。此外,随着年龄的增长,腰椎管狭窄症、退变性腰椎滑脱症、退行性脊柱侧凸等脊柱相关疾病的发生率也逐步增加,此类患者往往需要手术治疗。严重的骨质疏松导致脊柱术后容易出现应力性骨折、假关节形成、螺钉松动等并发症,严重影响手术疗效^[1-3]。然而目前,许多脊柱外科医生对于骨质疏松导致内固定失败的危害性认识不足。笔者就骨质疏松患者脊柱内固定失败的预防策略进行文献综述,以期指导临床,降低脊柱内固定手术失败率。

1 骨质疏松的筛查与评估

骨骼质量与内固定手术成功率密切相关,在内固定术前,常规筛查、评估患者骨量降低的情况可以帮助指导整个围手术期的治疗。目前在临床上多通过骨密度检测和骨生化代谢指标筛查两种途径评估患者骨量情况。

双能 X 线骨密度检查检测出的骨密度是诊断骨质疏松的金标准,将 $T \leq -2.5$ 的患者定为患有骨质疏松,将 $-2.5 < T \leq -1$ 定为低骨量^[4]。WHO 开发了一种骨折风险评估工具(fracture risk assessment tool,FRAX),通过分析骨密度和特定风险因素评估未来发生骨折的风险^[5]。定量 CT 技术可以更好地区分骨皮质和骨小梁,临床上大多用于评估骨质疏松治疗效果,但是需要注意其辐射量较高,对患者有一定损伤^[6]。近年来,一些新的影像技术如氢质子磁共振波谱(1H-magnetic resonance spectroscopy,1H-MRS)、磁共振弥散加权成像(DWI)等,具有敏感性高、发现病变早、能观察骨髓病理生理变化等优势,因此受到人们重视,对于骨质量的研究、药物疗效评估及临床治疗方案的指导具有很大帮助^[7,8]。

与骨密度的变化相比,骨生化代谢指标敏感性较高,可以更快地反应骨转换及代谢情况,因此常用于弥补单独骨密度诊断的不足,在骨质疏松诊断分型、骨折风险预测、指导用药等方面有着重要作用^[9]。I 型胶原 C 端肽和 I 型胶原 N 端前肽分别是反映骨吸收和骨形成速率的生化指标,其浓度越高,骨质流失越快,发生脆性骨折风险也越大^[10]。Civitelli 等^[11]研究发现,骨代谢产物筛查与骨密度测定结合使用时,可以更加准确地评估绝经后患有骨质疏松症妇女的骨折风险。近年来,一些新的研究发现,骨转换标志物血清抗酒石酸酸性磷酸酶-5b 和尿骨钙素可用来预测骨折发生,特别是在椎骨骨折中,但是结果有待在其他研究中得到进一步证实^[12]。另外 Naylor 等^[13]研究发现,骨转换标志物是评估双膦酸盐治疗反应的有效指标,可以预测骨密度变化水平,但具体治疗阈值有待进一步研究。

2 系统规范的抗骨质疏松治疗

预防是骨质疏松症管理中最重要原则,对于接受脊柱手术的骨质疏松患者,脊柱外科医生必须意识到患者骨质疏松的危害性并采取预防措施^[14]。在脊柱手术围手术期告知患者戒烟限酒、保证充足的钙和维生素 D 摄入。如在术前通过骨密度检测和骨生化代谢指标的筛查发现患者骨骼质量较差,具有发生骨折的风险,可以系统规范使用抗骨质疏松药物调节骨重建,进而影响骨骼质量^[15]。目前常用抗骨质疏松药物包括钙剂、维生素 D、降钙素、选择性雌激素受体调节剂(雷洛昔芬)、双膦酸盐、甲状旁腺素类似物(特立帕肽)、抗核因子 κB 受体活化因子(receptor activator of nuclear factor- κB ,RANK)配体单克隆抗体(狄诺塞麦)、锆盐(雷奈酸锆)等(表 1)^[16-22]。根据 FRAX 评估工具建议,对于所有 10 年内发生骨折风险 $> 3\%$ 的患者,都应积极考虑抗骨质疏松治疗^[23]。

术前患者维生素 D 和血钙水平较低,可能会导致腰椎融合欠佳,虽然没有证据证明补充维生素 D 可以改善脊柱融合,但是已有临床试验证明补充维生素 D 有助于减少全身性炎症,降低接受脊柱融合术患者的疼痛^[24],因此在临床上建议对骨质疏松患者补充钙剂和维生素 D,以期增

第一作者简介:男(1999-),住院医师,硕士在读,研究方向:脊柱退行性疾病的微创治疗及机制研究

电话:(0411)83635963 E-mail:mengmeng506203@126.com

通讯作者:李忠海 E-mail:lizhonghaispine@126.com

表 1 常用抗骨质疏松药物

代表性药物		作用机制	剂量	副作用
钙剂 ^[16]	钙剂	升高血钙	男性:50~70 岁 1000mg/d, 口服 >70 岁 1200mg/d, 口服 女性:>50 岁 1200mg/d, 口服	大剂量补钙会增加肾结石、心血管病风险
维生素 D ^[16]	维生素 D	促进钙的吸收	0.25~0.5μg/d, 口服	关节疼痛、肿胀、恶心
双膦酸盐 ^[17]	阿仑膦酸钠	促进破骨细胞凋亡	根据具体情况适当应用	胃肠道副作用、肾毒性、颌骨坏死、股骨骨折
甲状旁腺素类似物 ^[18]	特立帕肽	提高成骨细胞活性	20μg/d, 皮下注射	抽搐、恶心、头晕、可能增加骨肉瘤的风险
抗 RANK 配体单克隆抗体 ^[19]	狄诺塞麦	阻断 RANK 与 RANKL 的结合, 抑制破骨细胞活化和发展, 促进破骨细胞凋亡	60mg/6 个月, 皮下注射	背部/四肢疼痛、颌骨坏死、胰腺炎
选择性雌激素受体调节剂 ^[20]	雷洛昔芬	抑制破骨细胞的骨吸收作用, 促进成骨细胞的成骨作用	60mg/d, 口服	增加深静脉血栓形成风险
降钙素 ^[21]	鲑鱼降钙素	减少破骨细胞数量, 抑制肾小管对钙的重吸收	200IU/d, 鼻喷	鼻出血、过敏反应
锶盐 ^[22]	雷奈酸锶	增加成骨细胞分化的同时抑制破骨细胞形成	2g/d, 口服	胃肠道反应、增加血栓形成危险

加患者骨密度。双膦酸盐、降钙素、选择性雌激素受体调节剂等药物通过抑制破骨细胞活性,减少骨转换,从而增加骨密度。研究表明,双膦酸盐可以显著提高骨骼愈合质量,并降低术后骨折、椎弓根螺钉松动的发生率^[25]。但是在某些动物模型中,双膦酸盐不利于骨折愈合,而且长期使用双膦酸盐可能会增加股骨骨折的风险^[26],因此有学者建议对于已经使用双膦酸盐的患者,在脊柱手术前 3 个月停止用药,以促进骨重建的生理性增加^[27]。有研究显示降钙素通过上调促进骨和血管生成的基因来促进腰椎融合^[28];但也有研究发现降钙素对腰椎融合没有明显的积极作用,对于脊柱手术治疗的患者,降钙素不是用于提高患者骨骼质量的一线辅助疗法^[29]。选择性雌激素受体调节剂的应用范围较局限,有学者发现使用选择性雌激素受体调节剂可能会导致血栓形成,在某些情况下还可能产生致癌副作用^[30]。因此仅对于绝经后的妇女建议采用选择性雌激素受体调节剂治疗,进而提高骨质疏松患者术后的骨骼质量。特立帕肽是目前唯一可行的合成代谢骨制剂,可以有效提高内固定术后的脊柱融合率。Chaudhary 等^[31]建议在脊柱内固定术前 3 个月开始使用特立帕肽,术后继续使用 3 个月,最好持续两年。也有研究表明联合使用特立帕肽和狄诺塞麦增加的骨密度高于其单独使用,联合治疗更适用于具有高骨折风险的患者^[32]。狄诺塞麦作为抗 RANK 配体单克隆抗体,可以抑制破骨细胞的骨吸收作用、促进成骨细胞的成骨作用,显著降低骨质疏松患者发生椎体骨折的风险^[33]。近年来,有学者发现雷奈酸锶在增加成骨细胞分化的同时具有抑制破骨细胞形成的作用,尤其在骨质疏松骨骼中,可以明显增加患者骨密度,改善骨骼生物力学性能,降低骨质疏松患者发生脊柱椎骨骨折的风险,建议在围手术期使用来提高内固定术后骨骼质量^[22]。

3 内固定器械和手术技术的改良与研发

由于骨质疏松患者的骨密度降低,骨小梁结构破坏,力学性能降低,容易发生螺钉松动等并发症,因此对于骨质疏松患者来说,可以通过改进螺钉设计、改良置钉技术、采用骨水泥强化钉道、使用新兴辅助技术等方法增强内固定置入物的稳定性,减少并发症。

3.1 螺钉的设计

3.1.1 螺钉直径的增加 椎弓根螺钉的直径对其生物力学稳定性起着关键作用,一般来说,螺钉的直径越大,与椎弓根的接触面积就越大,其固定能力就越强,但是由于椎弓根高度有限,因此螺钉直径不可能无限增加。Matsukawa 等^[34]发现,螺钉直径的增加可以显著提高抗拔出强度和椎体固定强度。Kueny 等^[35]也发现,螺钉直径增加 1mm,可增加 24%的抗拔出力和 5%的疲劳强度。但是需要注意,过分增加椎弓根螺钉直径也会增加椎弓根骨折的风险^[36]。

3.1.2 螺钉螺纹、螺距和螺钉外形的改良 螺钉的螺纹、螺距及外形等参数发生变化,也会对螺钉的固定强度产生影响。Kim 等^[37]通过对比不同外形形状(圆柱形或圆锥形)、内径形状(圆柱形或圆锥形)和螺纹形状(V 形、锯齿形和方形)的螺钉固定强度,发现螺钉外形形状为圆柱形,内径形状为圆锥形,螺纹形状为“V”形的螺钉具有最高的抗拔出强度。Liu 等^[38]也发现,圆锥形的内径和双芯/双螺纹的设计可提高抗拔出强度,促使术后螺钉稳定性达到最佳效果。

3.1.3 可膨胀螺钉 当螺钉膨胀时,围绕螺钉的骨组织被压缩得更密,螺纹周围增强的骨密度有助于增强螺钉的固定强度。Chen 等^[39]通过生物力学研究证实,可膨胀螺钉的抗拔出力比传统的椎弓根螺钉大 5 倍。Cook 等^[40]回顾了 145 例骨质疏松患者,发现使用可膨胀螺钉可显著降低螺钉断裂等并发症的风险。此外 Gazzeri 等^[41]对比了骨水泥

增强螺钉和可膨胀螺钉的使用效果,发现使用可膨胀螺钉可缩短手术时间,由于可膨胀螺钉无需使用骨水泥,避免了发生骨水泥渗漏的风险。

3.1.4 螺钉涂层 螺钉表面进行涂层可以促进骨与螺钉接触面的骨重建,增强骨与螺钉界面的结合力。Hasegawa 等^[42]研究发现,羟基磷灰石(hydroxyapatite,HA)涂层螺钉的抗拔出出力为未涂层螺钉的 1.6 倍,在术后 10d,螺钉就与周围骨骼有了良好的结合。Upasani 等^[43]比较了 HA 螺钉、钛喷涂(titanium plasma spray,TPS)螺钉和复合 HA-TPS 涂层处理的螺钉,发现 HA 螺钉具有最好的骨结合效果。

3.2 置钉技术

3.2.1 攻丝 关于攻丝可增强骨质疏松患者内固定的固定强度仍存在一定争议。Kuhns 等^[44]的研究结果表明,在骨质疏松模型中,置入使用骨水泥增强的螺钉之前进行攻丝,可以使螺钉的把持力增强 54%,且攻丝深度越深,螺钉把持力越强。但是 Carmouche 等^[45]发现攻丝反而降低了骨质疏松患者腰椎的椎弓根螺钉抗拔出出力。另外 Chatzistergos 等^[46]研究发现导向孔的大小也会较大地影响自攻螺钉的抗拔出强度,缩小导向孔的直径可提高螺钉的抗拔出出力,这对开路锥等手术器械的改良有着较好的指导作用。

3.2.2 置钉轨迹 传统椎弓根螺钉钉道基本被松质骨包围,在骨质疏松的情况下,其把持力会降低。基于此,2009 年 Santoni 等^[47]首次提出了椎弓根皮质骨轨迹(cortical bone trajectory,CBT)螺钉固定技术。与传统椎弓根螺钉相比,CBT 螺钉的进钉点位于椎弓峡部,更靠内侧,从而减少了螺钉的暴露范围。由于螺钉直径更小,长度更短,螺纹排列更紧密,可与皮质骨、椎弓根后内侧壁、前外侧壁及椎体四点接触,使螺纹和骨皮质的接触面积更大,具有更强的把持力。自内而外、自下而上的轨迹,可以避开硬膜囊和神经根,降低了损伤神经、血管的概率。生物力学实验证明,与传统螺钉相比,CBT 螺钉的最大插入扭矩是其 1.71 倍,轴向抗拔出强度增加了 30%,从而显著提高了螺钉的固定力^[48]。Liu 等^[49]比较了 CBT 螺钉和椎弓根螺钉分别应用于腰椎后路融合术,发现使用 CBT 螺钉的患者手术时间更短,术中出血更少,术后恢复更快,并发症较少。

3.3 骨水泥强化

目前骨水泥强化主要有两种方案,一种是先用标准的椎体成形术将骨水泥沿钉道注入椎体,然后再插入椎弓根螺钉。另一种方法是使用有孔或者空心椎弓根螺钉,通过螺钉上的孔将骨水泥注入椎体内。Chen 等^[50]通过生物力学研究发现,两种方法注入骨水泥都可显著提高螺钉强度,但骨水泥强化的实心螺钉的抗拔出出力比骨水泥强化的空心螺钉更高。Kim 等^[51]将空心螺钉和实心螺钉分别应用于接受后路椎弓根螺钉固定的患者,发现在骨质疏松症患者中,空心螺钉比实心螺钉更能有效减少螺钉松动的发生率。

临床上常用的骨水泥包括聚甲基丙烯酸甲酯(poly-

methacrylate,PMMA),磷酸钙骨水泥(calcium phosphate cement,CPC)和羟基磷灰石骨水泥(hydroxyapatite cement,HAC)等。已有研究证实 PMMA 强化螺钉固定强度较高,但是 PMMA 固化时会产生大量热量,导致局部温度升高,会对骨骼造成损伤;注入椎体时可能会发生渗漏进入椎管或神经根管,引起脊髓或神经功能损害^[52]。CPC 和 HAC 等生物骨水泥与传统骨水泥相比,虽然固定强度有所下降,但是其凝固过程释放热量较少或者不发热,在术后可缓慢吸收,因此成为临床上一种新的选择^[53]。

3.4 其他

随着科技的发展,骨科手术机器人、3D 打印辅助导航等新兴技术的使用范围越来越广泛,并且成为脊柱外科手术的重要组成部分。已有研究证实,使用手术机器人、3D 打印辅助导航等技术辅助医生置入椎弓根螺钉比徒手置入螺钉更为准确,显著降低了内固定的失败率^[54,55]。随着 5G 技术的发展和操作模式的改变,这些新的技术将为脊柱外科手术带来更大的便利,从而为患者提供更为精准有效的医疗服务。

4 总结与展望

脊柱内固定是治疗创伤性或退变性脊柱疾病的常用手段,但是对于骨质疏松患者来说,脊柱内固定失败率仍然很高。目前可以通过在手术前筛查与评估患者的骨质量,针对不同程度的骨质疏松展开系统规范的抗骨质疏松治疗来减少患者骨量下降对内固定的影响。通过改进螺钉的设计、改变置钉的轨迹、使用骨水泥强化螺钉等方法加强内固定的固定强度,减少内固定术后螺钉松动、脱落等并发症发生。此外,其他新兴辅助脊柱外科医生的技术显示出了良好的应用前景。为了达到更好的固定效果,更有效地降低内固定失败率,临床医生可以针对不同手术方式、不同骨质疏松程度分别采用不同的预防措施。

5 参考文献

1. Cornell CN. Internal fracture fixation in patients with osteoporosis[J]. J Am Acad Orthop Surg, 2003, 11(2): 109-119.
2. von Rüden C, Augat P. Failure of fracture fixation in osteoporotic bone[J]. Injury, 2016, 47(Suppl 2): S3-S10.
3. Liu YY, Xiao J, Jin HJ, et al. Comparison of unilateral and bilateral polymethylmethacrylate-augmented cannulated pedicle screw fixation for the management of lumbar spondylolisthesis with osteoporosis[J]. J Orthop Surg Res, 2020, 15(1): 446.
4. Agten CA, Ramme AJ, Kang S, et al. Cost-effectiveness of virtual bone strength testing in osteoporosis screening programs for postmenopausal women in the United States[J]. Radiology, 2017, 285(2): 506-517.
5. Kanis JA, Oden A, Johansson H, et al. FRAX and its applications to clinical practice[J]. Bone, 2009, 44(5): 734-743.
6. Löffler MT, Sollmann N, Mei K, et al. X-ray-based quantitative osteoporosis imaging at the spine[J]. Osteoporos Int, 2020,

- 31(2): 233–250.
7. Momeni M, Asadzadeh M, Mowla K, et al. Sensitivity and specificity assessment of DWI and ADC for the diagnosis of osteoporosis in postmenopausal patients[J]. *Radiol Med*, 2020, 125(1): 68–74.
8. Manenti G, Capuani S, Fanucci E, et al. Diffusion tensor imaging and magnetic resonance spectroscopy assessment of cancellous bone quality in femoral neck of healthy, osteopenic and osteoporotic subjects at 3T: Preliminary experience [J]. *Bone*, 2013, 55(1): 7–15.
9. Jain S, Camacho P. Use of bone turnover markers in the management of osteoporosis[J]. *Curr Opin Endocrinol Diabetes Obes*, 2018, 25(6): 366–372.
10. Johansson H, Odén A, Kanis JA, et al. A Meta-analysis of reference markers of bone turnover for prediction of fracture [J]. *Calcif Tissue Int*, 2014, 94(5): 560–567.
11. Civitelli R, Armamento-Villareal R, Napoli N. Bone turnover markers: understanding their value in clinical trials and clinical practice[J]. *Osteoporos Int*, 2009, 20(6): 843–851.
12. Gerdhem P, Ivaska KK, Alatalo SL, et al. Biochemical markers of bone metabolism and prediction of fracture in elderly women[J]. *J Bone Miner Res*, 2004, 19(3): 386–393.
13. Naylor KE, Jacques RM, Paggiosi M, et al. Response of bone turnover markers to three oral bisphosphonate therapies in postmenopausal osteoporosis: the TRIO study [J]. *Osteoporos Int*, 2016, 27(1): 21–31.
14. Kanis JA, Cooper C, Rizzoli R, et al. European guidance for the diagnosis and management of osteoporosis in postmenopausal women[J]. *Osteoporos Int*, 2019, 30(1): 3–44.
15. Rizzoli R. Postmenopausal osteoporosis: assessment and management[J]. *Best Pract Res Clin Endocrinol Metab*, 2018, 32(5): 739–757.
16. Liu C, Kuang X, Li K, et al. Effects of combined calcium and vitamin D supplementation on osteoporosis in postmenopausal women: a systematic review and Meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *Food Funct*, 2020, 11(12): 10817–10827.
17. Lambrinoudaki I, Christodoulakos G, Botsis D. Bisphosphonates[J]. *Ann N Y Acad Sci*, 2006, 1092: 397–402.
18. Yuan F, Peng W, Yang C, et al. Teriparatide versus bisphosphonates for treatment of postmenopausal osteoporosis: a Meta-analysis[J]. *Int J Surg*, 2019, 66: 1–11.
19. Scott LJ. Denosumab: a review of its use in postmenopausal women with osteoporosis[J]. *Drugs Aging*, 2014, 31(7): 555–576.
20. Eriksen EF, Halse J, Moen MH. New developments in the treatment of osteoporosis [J]. *Acta Obstet Gynecol Scand*, 2013, 92(6): 620–636.
21. Reginster JY. Calcitonin for prevention and treatment of osteoporosis[J]. *Am J Med*, 1993, 95(5A): 44S–47S.
22. Hegde V, Jo JE, Andreopoulou P, et al. Effect of osteoporosis medications on fracture healing[J]. *Osteoporos Int*, 2016, 27(3): 861–871.
23. Unnanuntana A, Gladnick BP, Donnelly E, et al. The assessment of fracture risk[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2010, 92(3): 743–753.
24. Krasowska K, Skrobot W, Liedtke E, et al. The Preoperative supplementation with vitamin D attenuated pain intensity and reduced the level of pro-inflammatory markers in patients after posterior lumbar interbody fusion [J]. *Front Pharmacol*, 2019, 10: 527.
25. Liu WB, Zhao WT, Shen P, et al. The effects of bisphosphonates on osteoporotic patients after lumbar fusion: a meta-analysis[J]. *Drug Des Devel Ther*, 2018, 12: 2233–2240.
26. Silverman S, Kupperman E, Bukata S. Bisphosphonate-related atypical femoral fracture: managing a rare but serious complication[J]. *Cleve Clin J Med*, 2018, 85(11): 885–893.
27. Hassanzadeh H, Puvanesarajah V, Dalkin AC. Medical management of osteoporosis for elective spine surgery [J]. *Clin Spine Surg*, 2016, 29(4): 134–140.
28. Fan Y, Wu ZH, Zhang JG, et al. Effects of calcitonin on the pathology of spinal fusion in rabbit models[J]. *Zhongguo Yi Xue Ke Xue Yuan Xue Bao*, 2006, 28(4): 574–578.
29. Morris MT, Tarpada SP, Tabatabaie V, et al. Medical optimization of lumbar fusion in the osteoporotic patient[J]. *Arch Osteoporos*, 2018, 13(1): 26.
30. Martinkovich S, Shah D, Planey SL, et al. Selective estrogen receptor modulators: tissue specificity and clinical utility[J]. *Clin Interv Aging*, 2014, 9: 1437–1452.
31. Chaudhary N, Lee JS, Wu JY, et al. Evidence for use of teriparatide in spinal fusion surgery in osteoporotic patients [J]. *World Neurosurg*, 2017, 100: 551–556.
32. Tsai JN, Uihlein AV, Lee H, et al. Teriparatide and denosumab, alone or combined, in women with postmenopausal osteoporosis: the DATA study randomised trial [J]. *Lancet*, 2013, 382(9886): 50–56.
33. Cummings SR, San Martin J, McClung MR, et al. Denosumab for prevention of fractures in postmenopausal women with osteoporosis[J]. *N Engl J Med*, 2009, 361(8): 756–765.
34. Matsukawa K, Yato Y, Imabayashi H. Impact of screw diameter and length on pedicle screw fixation strength in osteoporotic vertebrae: a finite element analysis[J]. *Asian Spine J*, 2020, 20: 665–671.
35. Kueny RA, Kolb JP, Lehmann W, et al. Influence of the screw augmentation technique and a diameter increase on pedicle screw fixation in the osteoporotic spine: pullout versus fatigue testing[J]. *Eur Spine J*, 2014, 23(10): 2196–2202.
36. Hu SS. Internal fixation in the osteoporotic spine[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1997, 22(24 Suppl): 43S–48S.
37. Kim YY, Choi WS, Rhyu KW. Assessment of pedicle screw pullout strength based on various screw designs and bone

- densities: an ex vivo biomechanical study[J]. *Spine J*, 2012, 12(2): 164–168.
38. Liu MY, Tsai TT, Lai PL, et al. Biomechanical comparison of pedicle screw fixation strength in synthetic bones: effects of screw shape, core/thread profile and cement augmentation [J]. *PLoS One*, 2020, 15(2): e0229328.
39. 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.
40. Cook SD, Barbera J, Rubi M, et al. Lumbosacral fixation using expandable pedicle screws: an alternative in reoperation and osteoporosis[J]. *Spine J*, 2001, 1(2): 109–114.
41. Gazzeri R, Panagiotopoulos K, Galarza M, et al. Minimally invasive spinal fixation in an aging population with osteoporosis: clinical and radiological outcomes and safety of expandable screws versus fenestrated screws augmented with polymethylmethacrylate [J]. *Neurosurg Focus*, 2020, 49(2): E14.
42. Hasegawa T, Inufusa A, Imai Y, et al. Hydroxyapatite-coating of pedicle screws improves resistance against pull-out force in the osteoporotic canine lumbar spine model: a pilot study[J]. *Spine J*, 2005, 5(3): 239–243.
43. Upasani VV, Farnsworth CL, Tomlinson T, et al. Pedicle screw surface coatings improve fixation in nonfusion spinal constructs[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2009, 34(4): 335–343.
44. Kuhns CA, Reiter M, Pfeiffer F, et al. Surgical strategies to improve fixation in the osteoporotic spine: the effects of tapping, cement augmentation, and screw trajectory[J]. *Global Spine J*, 2014, 4(1): 47–54.
45. Carmouche JJ, Molinari RW, Gerlinger T, et al. Effects of pilot hole preparation technique on pedicle screw fixation in different regions of the osteoporotic thoracic and lumbar spine[J]. *J Neurosurg Spine*, 2005, 3(5): 364–370.
46. Chatzistergos PE, Sapkas G, Kourkoulis SK. The influence of the insertion technique on the pullout force of pedicle screws: an experimental study [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2010, 35(9): E332–337.
47. Santoni BG, Hynes RA, McGilvray KC, et al. Cortical bone trajectory for lumbar pedicle screws[J]. *Spine J*, 2009, 9(5): 366–373.
48. Li HM, Zhang RJ, Gao H, et al. Biomechanical fixation properties of the cortical bone trajectory in the osteoporotic lumbar spine[J]. *World Neurosurg*, 2018, 119: e717–e727.
49. Liu YZ, Hai Y, Zhang XN, et al. Comparison of cortical bone trajectory screw fixation and pedicle screw fixation in posterior lumbar fusion[J]. *Zhonghua Yi Xue Za Zhi*, 2019, 99(19): 1473–1478.
50. 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.
51. Kim JH, Ahn DK, Shin WS, et al. Clinical effects and complications of pedicle screw augmentation with bone cement: comparison of fenestrated screw augmentation and vertebroplasty augmentation[J]. *Clin Orthop Surg*, 2020, 12(2): 194–199.
52. Elder BD, Lo SF, Holmes C, et al. The biomechanics of pedicle screw augmentation with cement[J]. *Spine J*, 2015, 15(6): 1432–1445.
53. Galovich LA, Perez-Higueras A, Altonaga JR, et al. Biomechanical, histological and histomorphometric analyses of calcium phosphate cement compared to PMMA for vertebral augmentation in a validated animal model [J]. *Eur Spine J*, 2011, 20(Suppl 3): 376–382.
54. Lu S, Xu YQ, Lu WW, et al. A novel patient-specific navigational template for cervical pedicle screw placement[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2009, 34(26): E959–966.
55. Feng S, Tian W, Sun Y, et al. Effect of robot-assisted surgery on lumbar pedicle screw internal fixation in patients with osteoporosis[J]. *World Neurosurg*, 2019, 125: e1057–e1062.

(收稿日期:2021-05-12 末次修回日期:2021-09-18)

(本文编辑 李伟霞)