

生物材料在脊柱骨质疏松性骨折修复中的应用研究进展

黄泰通 王迎松 (通讯作者)

昆明医科大学第二附属医院骨科 云南 昆明 650032

【摘要】：骨质疏松性椎体压缩骨折是老年人群常见的脊柱疾患，经皮椎体成形术和经皮椎体后凸成形术已成为其主要治疗手段，而生物材料的选择直接影响手术疗效和远期预后。本文系统综述了传统骨水泥材料、新型人工骨材料及复合材料在骨质疏松性椎体骨折修复中的应用现状。传统聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥具有良好的即刻支撑强度，但缺乏生物活性；磷酸钙骨水泥及含骨形态发生蛋白的复合材料展现出良好的骨传导性和成骨诱导能力；生物活性支架材料和聚氨酯材料为骨缺损修复提供了新选择。有限元分析揭示了不同材料植入后椎体应力分布规律，为优化手术方案提供了理论依据。个体化精准穿刺技术、骨水泥渗漏预防措施及材料功能优化成为当前研究热点。未来需要通过材料设计创新、多功能复合及精准治疗策略，进一步提高骨质疏松性椎体骨折的修复效果，降低术后并发症发生率。

【关键词】：骨质疏松；椎体压缩骨折；生物材料

DOI:10.12417/2705-098X.26.08.039

随着人口老龄化进程加快，骨质疏松性椎体压缩骨折的发病率逐年上升，已成为影响老年人生活质量的重要健康问题。经皮椎体成形术和经皮椎体后凸成形术因其微创、疗效确切等优势，在临床上得到广泛应用^[1]。这些术式的核心在于向骨折椎体内注入填充材料，以恢复椎体高度、缓解疼痛并重建脊柱稳定性。填充材料的生物学特性、力学性能及骨整合能力直接决定了手术的近期疗效和远期预后^[2]。传统的聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥虽然具有良好的即刻支撑作用，但其生物相容性和骨诱导能力存在争议^[3]。

近年来，磷酸钙骨水泥、人工骨材料、生物活性支架等新型材料不断涌现，为骨质疏松性椎体骨折的治疗提供了更多选择。同时，有限元分析技术的应用使研究者能够深入探讨不同材料植入后的生物力学特性。本文旨在系统综述各类生物材料在骨质疏松性椎体骨折修复中的应用现状、生物力学特性及优化策略，为临床材料选择和治疗方案优化提供参考。

1 传统生物材料在骨质疏松性椎体骨折修复中的应用

1.1 聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 骨水泥

聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥是椎体成形术中应用最广泛的填充材料。Zhang 等^[4]设计的随机对照临床试验表明，OSTEOPAL Plus PMMA 骨水泥在治疗老年退行性骨质疏松性胸椎压缩骨折中展现出良好的椎体成形能力和可塑性。PMMA 骨水泥的主要优势在于其优异的即刻机械强度和椎体支撑能力，能够快速缓解患者疼痛，恢复椎体高度。Wang 等^[4]的研究显示，PMMA 治疗骨质疏松性椎体压缩骨折的总有效率可达 97.5%，术后 7 天疼痛即可显著改善。然而，PMMA 骨水泥的生

物相容性一直存在争议，其缺乏生物活性，无法与周围骨组织形成良好的生物学结合，且不可降解，长期存在可能影响椎体的生理性重建^[5]。此外，PMMA 骨水泥的弹性模量远高于正常骨组织，可能导致应力分布不均，增加邻椎骨折风险。

1.2 磷酸钙骨水泥 (CPC)

磷酸钙骨水泥作为一种生物可降解材料，在骨质疏松性椎体骨折治疗中显示出独特优势。与 PMMA 相比，CPC 具有良好的生物相容性和骨传导性，能够被机体逐渐吸收并被新生骨组织替代。Wang 等^[4]的对比研究发现，自固化磷酸钙骨水泥在改善疼痛速度和远期支撑效果方面优于 PMMA，可减少新发骨折发生风险。CPC 的降解产物为钙离子和磷酸根离子，可参与骨代谢过程，有利于骨组织的生理性重建。然而，CPC 也存在一定局限性，其机械强度相对较低，后期降解后可能出现支撑力不足的问题^[6]。

1.3 复合骨水泥材料

为兼顾机械强度和生物活性，研究者开发了多种复合骨水泥材料。CPC/PMMA 复合骨水泥结合了两种材料的优点，既保证了必要的支撑强度，又具有一定的生物相容性。含有重组人骨形态发生蛋白 2 (rhBMP-2) 的磷酸钙骨水泥展现出更优异的成骨诱导能力。rhBMP-2/CPC 不仅在临床疗效上与 PMMA 相当，而且能够显著增加椎体骨密度，治疗后 6 个月椎体骨密度较治疗前明显增加。这种复合材料通过缓释骨形态发生蛋白，可促进骨组织再生，改善骨质疏松的病理环境，从根本上增强椎体的生物学修复能力。

作者简介：黄泰通，男（1993-12），汉族，云南曲靖，主治医师，硕士研究生，研究方向：脊柱外科。

通讯作者：王迎松，男（1973-08），汉族，云南昆明，主任医师，博士研究生，研究方向：脊柱畸形。

2 新型生物材料在骨质疏松性椎体骨折修复中的应用

2.1 人工骨修复材料

人工骨修复材料作为新型椎体填充材料,在经皮椎体成形术中展现出良好的应用前景。金凤等^[7]的回顾性研究表明,骨水泥混合人工骨修复材料在治疗骨质疏松性椎体压缩骨折中可获得良好的临床疗效,术后疼痛和功能障碍指数均显著改善。更重要的是,采用人工骨修复材料联合骨水泥的患者邻近椎体骨折发生率仅为 8.4%,显著低于单纯骨水泥组的 19.1%。这一结果提示人工骨材料可能通过改善椎体的生物力学环境和促进骨整合,降低邻椎骨折风险。

2.2 生物活性支架材料

生物活性支架材料为骨质疏松性骨缺损修复提供了新的治疗策略。在骨质疏松的不平衡骨改建环境下,单一材料支架的成骨能力有限,且常出现骨整合不良。为克服这一问题,研究者通过材料结合和设计,将生物活性物质纳入支架中,制备了一系列功能化的生物活性复合材料支架。这些复合支架通过表面修饰、3D 打印等技术手段,可以更好地适应骨质疏松性骨缺损的特殊病理环境,改善骨改建过程并增强骨整合能力。生物活性支架的三维多孔结构不仅为细胞黏附、增殖和分化提供了空间,还能促进血管化和营养物质交换,从而加速骨组织再生^[8]。

2.3 聚氨酯材料

聚氨酯支架材料作为骨组织工程的基本框架,具有良好的生物相容性、降解性、可塑性和骨传导性。研究指出,用于骨修复的传统聚氨酯材料需要针对骨质疏松性骨缺损进一步优化其结构设计和生物功能^[10]。一方面,需要调控其机械强度,确保必要的骨传导性,稳定骨缺损处的内固定,为骨组织再生提供三维空间;另一方面,需要赋予聚氨酯生物活性成分,介导成骨破骨的动态平衡,加速骨缺损再生。此外,将抗骨质疏松药物有效结合到聚氨酯材料中,实现长效控释,使其释放动力学与成骨过程相匹配,具有极大的应用前景。通过设计聚氨酯的单体组分和新型结构,可实现力学匹配性,防止骨折的进一步发展以及二次骨折的风险。

3 生物材料植入后的生物力学特性

3.1 椎体应力分布变化

有限元分析技术为研究生物材料植入后椎体应力分布提供了重要工具。有限元研究表明^[11],骨质疏松性椎体压缩骨折骨水泥强化治疗后,骨组织-骨水泥界面的等效应力极值和分布区间较术前明显优化。在不同运动工况下,T12 伤椎骨水泥强化后的最大主应力显著下降,特别是在前屈运动时,最大主应力从术前的 77.995 MPa 降至术后的 35.639 MPa。应力分布云图显示,伤椎强化术后骨界面的应力分布向中后柱转移,应力集中得到纠正,骨组织-骨水泥界面的应力分布趋向于均衡稳定

化,重建了脊柱的动态生物力学稳定性。

3.2 骨水泥渗漏对邻椎的影响

骨水泥渗漏是椎体成形术常见的并发症,可能增加邻椎骨折风险。骨水泥渗漏模型组在椎体 T9、T10、T11 上的应力增量分别为 29.61%~110.81%、7.11%~166.01%、51.49%~123.88%,明显高于骨水泥未渗漏组。特别是在前屈、后伸和旋转状态下,渗漏模型组的应力增量更加显著。骨水泥渗漏还导致相邻终板和椎间盘应力增加,这些生物力学改变可能增加邻椎骨折的风险。该研究强调,临床手术中减少骨水泥渗漏的发生率至关重要,这对于预防术后并发症和改善长期预后具有重要意义。

3.3 骨水泥分布对生物力学的影响

骨水泥在椎体内的分布模式直接影响术后生物力学特性。在垂直压缩力作用下,伤椎皮质骨 Von Mises 应力值在人体前屈、侧弯和轴向旋转时差异显著。同一平面内骨皮质完全强化组较无骨皮质强化组最大 Von Mises 应力值明显减小,随着骨皮质强化越广泛,应力值整体呈下降趋势。研究提示,横断面内骨水泥应尽量广泛对称水平分布于椎体骨皮质边缘,矢状面内应广泛纵向分布且靠近上下终板及前后壁,冠状面内应广泛分布于中线两侧并对称接触上下终板及侧壁。这种优化的骨水泥分布模式可有效降低伤椎再骨折风险,且不增加邻椎骨折和残留盘源性疼痛风险。

4 生物材料应用中的优化策略

个体化精准穿刺入路是近年来提出的椎体强化治疗新型入路方式。研究建立了楔形型、双凹型、塌陷型骨折的术前和术后有限元模型,结果显示个体化精准穿刺椎体强化术后,三种类型骨折椎体终板和邻近椎体终板的最大 von Mises 应力值均有不同程度的减小,相邻椎间盘整体最大 von Mises 应力值也均减小。这表明个体化精准穿刺椎体强化治疗可在一定程度上减轻不同类型椎体终板的应力,降低术后椎体再骨折的风险,理论上还能够缓解椎间盘退变。该技术通过针对患者具体骨折类型制定个体化穿刺方案,实现了精准治疗,已取得良好的临床疗效。针对伴椎体前壁破裂的骨质疏松性椎体骨折,预防骨水泥渗漏成为提高手术安全性的关键。明胶海绵可以有效封堵椎体前壁破裂处,减少骨水泥从破裂的骨皮质处渗漏。同时,CPC/PMMA 复合骨水泥兼顾了 PMMA 的即刻支撑强度和 CPC 的生物活性,在一定程度上降低了骨水泥渗漏风险。生物材料的组合与功能优化是提高骨质疏松性椎体骨折修复效果的重要途径。侯建明等^[12]的研究强调,通过材料结合和设计,从单一成分到多组分的结合,可以制备更加功能化、高效率的生物活性支架。例如,将具有成骨活性的因子(如骨形态发生蛋白、生长因子等)、抗骨质疏松药物(如双膦酸盐、甲状旁腺激素类似物等)与支架材料结合,可以实现多功能化治疗。此外,通过表面修饰、3D 打印等技术优化材料的物理结构和

力学性能,可以更好地适应骨质疏松性骨缺损的治疗需求。

5 结论

生物材料在骨质疏松性椎体骨折修复中发挥着至关重要的作用。传统 PMMA 骨水泥具有良好的即刻支撑强度,但缺乏生物活性;CPC 及含骨形态发生蛋白的复合材料展现出优异的骨传导性和成骨诱导能力;人工骨修复材料、生物活性支架

和聚氨酯材料为骨缺损修复提供了新选择。有限元分析揭示了不同材料植入后的生物力学特性,为优化材料选择和手术方案提供了理论依据。个性化精准穿刺技术、骨水泥渗漏预防措施及材料功能优化成为当前研究热点。未来研究应聚焦于材料设计创新、多功能复合及精准治疗策略,开发更加功能化、生物相容性更好的新型材料,以进一步提高骨质疏松性椎体骨折的修复效果,降低术后并发症发生率,改善患者预后和生活质量。

参考文献:

- [1] 张渊,任荣,李泽青,等.聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥和可注射人工骨材料植入修复老年退行性骨质疏松性胸椎压缩骨折:随机对照临床试验方案.中国组织工程研究,2018,22(10):1511-1516.
- [2] 潘泓宇,李红桃,肖常明,等.个性化精准穿刺椎体强化治疗不同类型骨质疏松性椎体压缩骨折的生物力学分析.中国组织工程研究,2025,29(27):5773-5784.
- [3] 方伟,黄兴桦,屈波,等.椎体骨皮质强化差异对骨质疏松性椎体压缩性骨折生物力学的影响.中国组织工程研究,2025,29(21):4430-4438.
- [4] 王雪峰,尚希福.三种填充材料修复胸腰椎骨质疏松性骨折的疗效对比.中国组织工程研究,2019,23(6):863-869.
- [5] 姚鹏程,马斌祥,关永林,等.有限元分析在 PKP 治疗骨质疏松性椎体压缩性骨折脊柱生物力学的研究应用.医学理论与实践,2023,36(4):575-578.
- [6] 朱佳福,宋红浦,徐卫星,等.CPC/PMMA 复合骨水泥联合明胶海绵预防伴椎体前壁破裂骨质疏松性椎体骨折术中骨水泥渗漏的疗效观察.浙江中西医结合杂志,2024,34(6):556-557.
- [7] 金凤,刘平平,李锦军,等.人工骨修复材料在经皮椎体成形术治疗骨质疏松性椎体压缩骨折中的应用.国际外科学杂志,2024,51(2):97-102.
- [8] 张高翔,张庆国.胸椎骨质疏松性压缩骨折经皮椎体成形术中骨水泥渗漏致邻椎骨折风险的有限元分析.中国医学装备,2025,22(3):29-36+42.
- [9] 林星良,陈吉冰,肖曜升,等.可诱导冻干脱钙骨混合骨水泥治疗骨质疏松性椎体压缩骨折的临床研究.医学理论与实践,2025,38(12):2054-2056.
- [10] 王路,李丽梅,李庆,等.聚氨酯材料在骨质疏松性骨缺损修复中的应用.中国组织工程研究,2022,26(21):3429-3434.
- [11] 权祯,秦大平,张晓刚,等.骨质疏松性椎体压缩骨折强化术后骨组织-骨水泥界面生物力学应力再平衡机制的有限元研究.中国脊柱脊髓杂志,2023,33(12):1107-1118.
- [12] 侯建明,李琦.生物活性支架材料修复骨质疏松性骨缺损.中国组织工程研究,2023,27(21):3423-3429.