

# 骨水泥强化椎弓根螺钉技术临床应用循证指南(2025版)

贺思豪<sup>1</sup> 邢军超<sup>1</sup> 初同伟<sup>2</sup> 常正奇<sup>3</sup> 程细高<sup>4</sup> 代飞<sup>1</sup> 江晓兵<sup>5</sup> 郝杰<sup>6</sup> 胡豇<sup>7</sup>  
黄景辉<sup>8</sup> 侯天勇<sup>1</sup> 罗飞<sup>1</sup> 廖博<sup>9</sup> 李长青<sup>2</sup> 刘雷<sup>10</sup> 刘国栋<sup>11</sup> 刘鹏<sup>11</sup> 陆声<sup>12</sup>  
李危石<sup>13</sup> 刘洋<sup>14</sup> 刘臻<sup>15</sup> 梅伟<sup>16</sup> 唐佩福<sup>17</sup> 王冰<sup>18</sup> 王兵<sup>19</sup> 王策<sup>14</sup> 王洪立<sup>20</sup> 王亮<sup>21</sup>  
王升儒<sup>22</sup> 王孝宾<sup>18</sup> 汪洋<sup>23</sup> 汪颖峰<sup>24</sup> 王征<sup>17</sup> 许建中<sup>1</sup> 殷国勇<sup>25</sup> 于海洋<sup>26</sup>  
杨强<sup>27</sup> 叶招明<sup>28</sup> 张斌<sup>29</sup> 张承旻<sup>1</sup> 邹俊<sup>30</sup> 周强<sup>31</sup> 赵敏<sup>32</sup> 周锐<sup>1</sup> 张晓军<sup>6</sup>  
赵永飞<sup>17</sup> 张忠荣<sup>33</sup> 张泽华<sup>1</sup> 张英泽<sup>34</sup>

中国医师协会骨科医师分会

<sup>1</sup>陆军军医大学第一附属医院, 重庆 400038; <sup>2</sup>陆军军医大学第二附属医院, 重庆 400037; <sup>3</sup>中国人民解放军联勤保障部队第九六〇医院, 济南 250031; <sup>4</sup>南昌大学第二附属医院, 南昌 330006; <sup>5</sup>广州医科大学附属第二医院, 广州 510260; <sup>6</sup>重庆医科大学附属第一医院, 重庆 400042; <sup>7</sup>四川省人民医院, 成都 610072; <sup>8</sup>空军军医大学第一附属医院, 西安 710032; <sup>9</sup>空军军医大学第二附属医院, 西安 710038; <sup>10</sup>中山大学附属第八医院, 深圳 518033; <sup>11</sup>陆军军医大学陆军特色医学中心, 重庆 400042; <sup>12</sup>云南省第一人民医院, 昆明 650032; <sup>13</sup>北京大学第三医院, 北京 100083; <sup>14</sup>海军军医大学第二附属医院, 上海 200003; <sup>15</sup>南京大学医学院附属鼓楼医院, 南京 210008; <sup>16</sup>郑州市骨科医院, 郑州 450052; <sup>17</sup>中国人民解放军总医院, 北京 100853; <sup>18</sup>中南大学湘雅二医院, 长沙 410011; <sup>19</sup>昆明医科大学第一附属医院, 昆明 650032; <sup>20</sup>复旦大学附属华山医院, 上海 200040; <sup>21</sup>南方医科大学第三附属医院, 广州 510630; <sup>22</sup>北京协和医院, 北京 100730; <sup>23</sup>重庆医科大学附属第二医院, 重庆 400010; <sup>24</sup>黄山市人民医院, 黄山 245099; <sup>25</sup>江苏省人民医院, 南京 210029; <sup>26</sup>阜阳市人民医院, 阜阳 236010; <sup>27</sup>天津市天津医院, 天津 300210; <sup>28</sup>浙江大学医学院附属第二医院, 杭州 310009; <sup>29</sup>南昌大学第一附属医院, 南昌 330006; <sup>30</sup>苏州大学附属第一医院, 苏州 215031; <sup>31</sup>重庆医科大学第三附属医院, 重庆 401120; <sup>32</sup>鹰潭市人民医院, 鹰潭 335003; <sup>33</sup>中国人民解放军陆军第九五八医院, 重庆 400020; <sup>34</sup>河北医科大学第三医院, 石家庄 050052

通信作者:许建中, Email:xjzslw@163.com; 张英泽, Email:yzling\_liu@163.com; 唐佩福, Email:pftang301@126.com; 罗飞, Email:luofei@tmmu.edu.cn

**【摘要】** 对于中老年脊柱骨折、脊柱退行性病变等患者, 脊柱内固定术是脊柱稳定性重建的核心术式, 且高度依赖椎弓根螺钉系统提供的生物力学稳定性。而这类患者常伴有骨质疏松症, 可显著削弱椎弓根螺钉-骨界面的稳定性, 导致椎弓根螺钉松动和手术失败率显著增高。骨水泥强化椎弓根螺钉技术通过向椎体或钉道内注入骨水泥实现骨-椎弓根螺钉复合体力学性能优化, 能显著增强椎弓根螺钉的固定强度、有效预防椎弓根螺钉失效, 可有效降低高危人群脊柱融合术的内固定失败率。但该技术临床推广应用面临着临床决策(适应证、禁忌证选择)不准确、操作欠规范、并发症防范意识不足等问题, 致使临床疗效差异较大, 甚至出现严重并发症。为此, 由陆军军医大学第一附属医院罗飞教授牵头, 中国医师协会骨科医师分会组织相关领域专家, 基于循证医学证据, 制订《骨水泥强化椎弓根螺钉技术临床应用循证指南(2025版)》, 从骨水泥强化椎弓根螺钉技术的临床应用价值、应用范围和操作规范方面提出8条推荐意见, 为临床决策提供循证医学支持与技术操作规范。

【关键词】 骨黏合剂;骨质疏松;椎弓根螺钉

【中图分类号】 R683;R722.14+1;R687.3

基金项目:国家高层次人才特殊支持计划科技创新领军人才(514ZH11);重庆英才创新领军人才(524Z88124)

国际实践指南注册与透明化平台:PREPARE-2024CN138

DOI:10.3760/cma.j.cn501098-20250516-00275

## Evidence-based clinical practice guideline for bone cement-augmented pedicle screw technique (version 2025)

He Sihao<sup>1</sup>, Xing Junchao<sup>1</sup>, Chu Tongwei<sup>2</sup>, Chang Zhengqi<sup>3</sup>, Cheng Xigao<sup>4</sup>, Dai Fei<sup>1</sup>, Jiang Xiaobing<sup>5</sup>, Hao Jie<sup>6</sup>, Hu Jiang<sup>7</sup>, Huang Jinghui<sup>8</sup>, Hou Tianyong<sup>1</sup>, Luo Fei<sup>1</sup>, Liao Bo<sup>9</sup>, Li Changqing<sup>2</sup>, Liu Lei<sup>10</sup>, Liu Guodong<sup>11</sup>, Liu Peng<sup>11</sup>, Lu Sheng<sup>12</sup>, Li Weishi<sup>13</sup>, Liu Yang<sup>14</sup>, Liu Zhen<sup>15</sup>, Mei Wei<sup>16</sup>, Tang Peifu<sup>17</sup>, Wang Bing<sup>18</sup>, Wang Bing<sup>19</sup>, Wang Ce<sup>14</sup>, Wang Hongli<sup>20</sup>, Wang Liang<sup>21</sup>, Wang Shengru<sup>22</sup>, Wang Xiaobin<sup>18</sup>, Wang Yang<sup>23</sup>, Wang Yingfeng<sup>24</sup>, Wang Zheng<sup>17</sup>, Xu Jianzhong<sup>1</sup>, Yin Guoyong<sup>25</sup>, Yu Haiyang<sup>26</sup>, Yang Qiang<sup>27</sup>, Ye Zhaoming<sup>28</sup>, Zhang Bin<sup>29</sup>, Zhang Chengmin<sup>1</sup>, Zou Jun<sup>30</sup>, Zhou Qiang<sup>31</sup>, Zhao Min<sup>32</sup>, Zhou Rui<sup>1</sup>, Zhang Xiaojun<sup>6</sup>, Zhao Yongfei<sup>17</sup>, Zhang Zhongrong<sup>33</sup>, Zhang Zehua<sup>1</sup>, Zhang Yingze<sup>34</sup>

Chinese Association Orthopaedic Surgeons

<sup>1</sup>First Affiliated Hospital of Army Medical University, Chongqing 400038, China; <sup>2</sup>Second Affiliated Hospital of Army Medical University, Chongqing 400037, China; <sup>3</sup>960th Hospital of the Joint Logistics Support Force of the PLA, Jinan 250031, China; <sup>4</sup>Second Affiliated Hospital of Nanchang University, Nanchang 330006, China; <sup>5</sup>Second Affiliated Hospital of Guangzhou Medical University, Guangzhou 510260, China; <sup>6</sup>First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 400042, China; <sup>7</sup>Sichuan Provincial People's Hospital, Chengdu 610072, China; <sup>8</sup>First Affiliated Hospital of Air Force Medical University, Xi'an 710032, China; <sup>9</sup>Second Affiliated Hospital of Air Force Medical University, Xi'an 710038, China; <sup>10</sup>Eighth Affiliated Hospital of Sun Yat-sen University, Shenzhen 518033, China; <sup>11</sup>Army Medical Center of Army Medical University, Chongqing 400042, China; <sup>12</sup>Yunnan Provincial First People's Hospital, Kunming 650032, China; <sup>13</sup>Peking University Third Hospital, Beijing 100083, China; <sup>14</sup>Second Affiliated Hospital of Naval Medical University, Shanghai 200003, China; <sup>15</sup>Nanjing Drum Tower Hospital Affiliated to Nanjing University Medical School, Nanjing 210008, China; <sup>16</sup>Zhengzhou Orthopedic Hospital, Zhengzhou 450052, China; <sup>17</sup>Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China; <sup>18</sup>Second Xiangya Hospital of Central South University, Changsha 410011, China; <sup>19</sup>First Affiliated Hospital of Kunming Medical University, Kunming 650032, China; <sup>20</sup>Huashan Hospital Affiliated to Fudan University, Shanghai 200040, China; <sup>21</sup>Third Affiliated Hospital of Southern Medical University, Guangzhou 510630, China; <sup>22</sup>Peking Union Medical College Hospital, Beijing 100730, China; <sup>23</sup>Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 400010, China; <sup>24</sup>Huangshan City People's Hospital, Huangshan 245099, China; <sup>25</sup>Jiangsu Provincial People's Hospital, Nanjing 210029, China; <sup>26</sup>Fuyang People's Hospital, Fuyang 236010, China; <sup>27</sup>Tianjin Hospital, Tianjin 300210, China; <sup>28</sup>Second Affiliated Hospital of Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou 310009, China; <sup>29</sup>First Affiliated Hospital of Nanchang University, Nanchang 330006, China; <sup>30</sup>First Affiliated Hospital of Soochow University, Suzhou 215031, China; <sup>31</sup>Third Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 401120, China; <sup>32</sup>Yingtian People's Hospital, Yingtian 335003, China; <sup>33</sup>958th Hospital of PLA Army, Chongqing 400020, China; <sup>34</sup>Third Hospital of Hebei Medical University, Shijiazhuang 050052, China

Corresponding authors: Xu Jianzhong, Email: xjzshw@163.com; Zhang Yingze, Email: yzling\_liu@163.com; Tang Peifu, Email: pftang301@126.com; Luo Fei, Email: luofei@tmmu.edu.cn

【Abstract】 For middle-aged and elderly patients with conditions such as spinal fractures and degenerative spinal diseases, spinal internal fixation is a core surgical procedure for reconstructing spinal stability, heavily relying on the biomechanical stability provided by pedicle screw systems. Whereas, these patients are often complicated by osteoporosis that can significantly compromise the stability of the bone-pedicle screw interface, leading to a marked increase in pedicle screw loosening and surgical failure rates. The bone cement-augmented pedicle screw technique, which involves injecting bone cement into the vertebral body or screw trajectory to optimize the mechanical properties of the bone-pedicle screw composite, has been proven to significantly enhance fixation strength and effectively prevent screw-related failures, thereby reducing the incidence of internal fixation failure in high-risk populations undergoing spinal fusion. However, the

widespread clinical application of this technique has faced challenges such as inaccurate clinical decision-making (indication and contraindication selection), non-standardized operative practices, and insufficient awareness of complication prevention, resulting in considerable variability in clinical outcomes and even severe complications. To address this, Prof. Luo Fei from First Affiliated Hospital of Army Medical University initiated the project and the Chinese Association Orthopaedic Surgeons organized relevant experts to develop the *Evidence-based clinical practice guideline for bone cement-augmented pedicle screw technique (version 2025)*, based on current evidence. The guidelines put forward 8 recommendations regarding the clinical value, scope of application, and operational standards of the technique, aiming to provide evidence-based medical support and technical standardization for clinical decision-making.

**【Key words】** Bone cements; Osteoporosis; Pedicle screws

**Fund programs:** National High-Level Personnel of Special Support Program (514ZH11); Chongqing Talents Innovation Leadership Project (524Z88124)

**Practice guideline registration for transparency:** PREPARE-2024CN138

DOI: 10.3760/cma.j.cn501098-20250516-00275

随着我国人口老龄化进程加剧,骨质疏松症及其引发的脊柱骨折、脊柱退行性疾病的发病率均呈显著攀升趋势。据统计,我国 65 岁以上人群中,骨质疏松症的发病率高达 32%,其中男性发病率为 10.7%,女性发病率高达 51.6%<sup>[1]</sup>。椎弓根螺钉技术是治疗脊柱骨折及退行性疾病的重要技术手段,而骨质疏松症患者由于骨密度下降、骨小梁稀疏,导致椎弓根螺钉的力学稳定性显著降低,可能影响手术安全及术后疗效<sup>[2-3]</sup>。此外,强直性脊柱炎等骨病、内固定松动翻修患者椎弓根螺钉周围骨质吸收等因素也会增加椎弓根螺钉失效风险。对于以上患者,要实现坚强可靠的脊柱内固定,有赖于临床技术改良与内固定器械创新。

骨水泥强化椎弓根螺钉技术是针对这些临床难题而诞生的解决方案,主要分为技术改良和器械创新两大类:(1)骨水泥钉道强化技术。将聚甲基丙烯酸甲酯(polymethyl methacrylate, PMMA)骨水泥(本指南涉及的“骨水泥”均特指 PMMA 骨水泥)注入椎体或预制的椎弓根螺钉通道,然后立刻置入普通椎弓根螺钉,利用骨水泥强化椎体强度,增加椎弓根螺钉的把持力,起到增强固定作用<sup>[4-6]</sup>。(2)可注射骨水泥多孔中空椎弓根螺钉(bone cement-injectable cannulated pedicle screw, CICPS)。根据骨水泥的理化性质及流体力学特征,将普通椎弓根螺钉改良设计成中空、多个侧孔的多孔中空骨水泥强化椎弓根螺钉<sup>[7-18]</sup>,可先置入椎弓根螺钉,确认位置正确后再将骨水泥从椎弓根螺钉尾部注入,经侧孔弥散到椎体中,形成牢稳的椎弓根螺钉-骨水泥-骨复合物<sup>[14-18]</sup>。尽管大量临床与生物力学研究证实骨水泥强化椎弓根螺钉技术可有效增强螺钉稳定性<sup>[6-10, 14-18]</sup>,但其临床应用价值仍存争议。目前该技术已广泛用于

治疗脊柱骨折、强直性脊柱炎,以及内固定松动需翻修患者,但其适用范围尚未明确界定,且操作流程(置钉深度、骨水泥注入时机、骨水泥注入量等)也缺乏统一规范,致使临床疗效差异显著。随着骨水泥强化椎弓根螺钉技术推广,该技术的并发症也开始引起关注(骨水泥渗漏等),故对相关并发症的预防意识需要加强,改进并规范有效的预防策略也显得尤为迫切。然而,目前国内外均没有针对该技术的临床指南或专家共识供临床参考,亟需对骨水泥强化椎弓根螺钉技术的应用范围与操作规范进行系统明确与优化。为此,由陆军军医大学第一附属医院罗飞教授牵头,中国医师协会骨科医师分会组织相关专家,依据临床循证证据,制订《骨水泥强化椎弓根螺钉技术临床应用循证指南(2025 版)》(以下简称“本指南”)。本指南主要围绕骨水泥强化椎弓根螺钉的临床应用价值、应用范围、操作规范等维度,提出 8 条推荐意见,旨在为规范该技术的临床应用提供科学指导。

## 1 指南制订流程

### 1.1 指南发起单位

本指南由中国医师协会骨科医师分会发起并负责,由本领域的循证医学专家提供方法学和证据支持。本指南启动时间为 2024 年 8 月 1 日,定稿时间为 2025 年 10 月 14 日。本指南制订过程符合美国医学科学院(IOM)指南研究与评价工具(AGREE II)及世界卫生组织(WHO)指南制订手册关于临床实践指南构建的概念与过程框架;报告过程参考卫生实践指南报告标准(RIGHT)<sup>[19]</sup>。

### 1.2 成立指南工作组

指南工作组于 2024 年 8 月成立,指南工作组筹备

并组建了指导委员会、专家组、秘书组 3 个工作组。

### 1.2.1 指导委员会

指导委员会由 4 名骨科领域专家构成。核心工作任务:(1)确定本指南的主题和大纲;(2)组建指南专家组、秘书组,并管理利益冲突声明;(3)统筹规划与制订指南工作的流程安排;(4)批准指南的发表并推进指南的出版和推广。

### 1.2.2 专家组

指导委员会组建专家组,成员共 50 名,主要由全国各省(直辖市、自治区)骨科领域的专家构成。专家组核心职责:(1)对指南提出的临床问题进行审核;(2)对推荐意见草稿进行表决及修改;(3)参与指南全文的修订并对指南终稿进行审定。

### 1.2.3 秘书组

由 3 名骨科医师组成。核心职责:(1)在国际实践指南注册平台完成注册;(2)撰写指南制订计划书;(3)系统梳理临床问题并组织问卷调查;(4)起草、修订和完善指南;(5)协调组织指南讨论会议,做好会议记录及决议整理。

### 1.3 指南注册

本指南于 2024 年 8 月 6 日在国际实践指南注册平台完成注册(注册号:PREPARE-2024CN138)。未在该平台检索到与本指南主题相同或相关的注册记录。

### 1.4 利益冲突声明

所有参与指南制订的成员对本指南有关的任何利益关系进行了声明,并填写利益冲突声明表。

### 1.5 临床问题的确定

指南主要的作用是解决临床实践中遇到的临床问题。因此,本指南工作组通过第 1 轮开放性问卷调查收集了 32 份问卷,共计 46 个临床问题。对收集到的 46 个临床问题进行汇总去重后,最终得到 18 个临床问题。通过 2 轮专家函询及 1 次线下专家讨论会,对 18 个临床问题再次解构、删减和合并,最终确定 8 个临床问题。

### 1.6 文献检索过程

按照人群、干预措施、对照、结局指标、研究类型(PICOS)原则对纳入的临床问题进行解构,并根据解构的临床问题进行证据检索。检索数据库为 PubMed、Web of Science、Embase、中国知网及万方数据知识服务平台。中文检索式为:(“椎弓根螺钉”OR“固定”OR“钉道”)AND (“骨水泥”OR“强化”OR“增强”)。英文检索式为:(“pedicle screw”OR“fixation”)AND (“bone cement”OR“polymethyl methacrylate”OR

“PMMA”OR“augmentation”)。文献纳入标准:(1)研究内容与骨水泥强化椎弓根螺钉技术应用相关;(2)研究类型包括系统评价、Meta 分析及随机对照试验(RCT)、队列研究、病例对照研究等;(3)文献类型为论著、综述、临床指南、专家共识等;(4)有明确研究结果且为定量资料。文献排除标准:(1)内容与题目严重不符;(2)内容重复或无法获得全文。优先检索 5 年内的系统评价、Meta 分析及 RCT。通过数据库搜索纳入 3 831 篇文献。除去重复文献,根据文献纳入和排除标准、文献评价及补充指南相关问题需要,最终引用 99 篇文献,其中英文 90 篇,中文 9 篇。

### 1.7 证据质量分级与推荐强度

针对系统评价和 Meta 分析,使用系统评价的方法学工具进行方法学质量评价;针对 RCT,使用 Cochrane 风险偏倚评价工具进行评价;针对观察性研究,使用纽卡斯尔-渥太华量表对相应类型的研究进行评价。本指南采用证据推荐分级的评估、制订及评价(GRADE)分级体系<sup>[20-21]</sup>对证据的证据质量和推荐意见的推荐强度进行分级。GRADE 证据质量和推荐强度分级的含义分别见表 1、2。通过 3 轮德尔菲法包括 2 轮专家函询及 1 次线下专家讨论会,组织专家对推荐意见进行投票表决,参照 GRADE 分级体系达成共识,并明确每条推荐意见的强度(强推荐、弱推荐、专家建议)。推荐或反对某一种意见,需要得到至少 50% 专家的认可,而对推荐意见不足 20% 的推荐意见则需要选择相关替代方案,最后达成的共识交由指南指导委员会评审。经过 2 轮讨论会、1 轮德尔菲法共识会及 1 轮终审会后,最终确定 8 条推荐意见。本指南的适用对象涵盖骨科、神经外科、疼痛科的医护人员。

表 1 GRADE 证据质量分级

分级	研究类型	具体描述
高(A)	RCT,质量升高二级的观察性研究	非常有把握观察值接近真实值
中(B)	质量降低一级的 RCT,质量升高一级的观察性研究	对观察值有中等把握:观察值有可能接近真实值,但也有可能差别很大
低(C)	质量降低二级的 RCT,观察性研究	对观察值的把握有限:观察值可能与真实值有很大差别
极低(D)	质量降低三级的 RCT,质量降低一级的观察性研究,系列病例观察,个案报道	对观察值几乎没有把握:观察值与真实值可能有极大差别

注:GRADE 为证据推荐分级的评估、制订及评价,RCT 为随机对照试验

表 2 GRADE 推荐强度分级

推荐强度	说明
强	明确显示干预措施利大于弊
弱	利弊不确定或干预措施可能利大于弊
GPS	基于非直接证据或专家意见、经验形成的推荐

注:GRADE 为证据推荐分级的评估、制订及评价, GPS 为良好实践主张

### 1.8 指南外审与批准

秘书组完成最终版指南草案后,通过《中华创伤杂志》进行同行评议,并系统梳理外审专家的评审意见,对存在争议或证据等级不足的推荐意见进行补充论证与针对性修改,并提交指导委员会进行内容的科学性和适用性终审评估,经指导委员会最终审核并批准后予以正式发布。

### 1.9 指南发布与更新

本秘书组参考 RIGHT<sup>[19]</sup>完成指南的撰写及发布工作,汇报指南的制订流程与具体内容。指南的中文全文发表在《中华创伤杂志》上,并计划每 5 年根据临床问题的增补情况和检索证据更新情况,适时对本指南的推荐意见进行补充和更新。

### 1.10 指南推广

指南发表后,将通过学术期刊出版、学术会议、社交媒体及学习班等方式传播。针对指南的实施和评价,拟通过发布本指南相关解读文章及学员规范化培训进一步促进指南实施。

## 2 骨水泥强化椎弓根螺钉技术的临床应用价值

### 2.1 技术优势

采用骨水泥钉道强化技术治疗骨质疏松症患者时,由于椎体骨密度下降难以形成可靠的锚定点及骨支撑结构,导致椎弓根螺钉固定力不足。在长期负重、活动状态下,固定强度不足可能引发术后椎弓根螺钉松动、断裂及移位等问题,影响最终治疗效果<sup>[1-3]</sup>。采用骨水泥强化椎弓根螺钉技术能有效提升椎弓根螺钉的生物力学稳定性、降低脊柱融合术后的内固定松动率、提升脊柱融合成功率,现已成为脊柱内固定强化应用最广泛的技术之一。

骨水泥钉道强化技术通过向骨质疏松椎体内注入骨水泥来增加椎弓根螺钉固定强度。该技术的原理是通过使用骨水泥强化椎弓根螺钉周围的骨组织,同时提升椎弓根螺钉与骨水泥、骨水泥与邻近骨组织的结合强度。骨水泥注入后可在椎体松质骨中扩散,形成大量骨水泥“锚栓”结构,从而

显著增大骨水泥与骨组织的接触面积,最终形成牢固稳定的骨-骨水泥-椎弓根螺钉复合结构,显著提升椎弓根螺钉力学性能<sup>[4-9, 22-23]</sup>。研究结果表明,骨水泥钉道强化椎弓根螺钉的抗拔出出力较常规椎弓根螺钉提高 96%~262%,横向弯曲刚度增加 153%<sup>[24]</sup>。生物力学研究数据显示,采用骨水泥钉道强化技术后,脊柱胸腰段至骨盆区域(胸椎、腰椎、骶骨及髌骨)的内固定系统稳定性显著改善,其椎弓根螺钉抗拔出出力较普通椎弓根螺钉提高 100%~150%<sup>[25-29]</sup>。

CICPS 在普通椎弓根螺钉的基础上于螺钉中轴增设骨水泥注射通道,并在钉体前段横面上设置骨水泥流出的侧孔<sup>[14-18]</sup>。CICPS 的技术优势源于其特殊结构设计,为避免骨水泥向椎管渗漏,CICPS 的侧孔分布主要位于椎弓根螺钉前段,骨水泥通过侧孔灌注进入椎体并均匀分布,有效增强了椎体抗压能力<sup>[6,8,14-18]</sup>。许建中教授团队首先设计并改良 CICPS,将侧孔集中于椎弓根螺钉钉体前 2/5,并根据流体力学原理将其设计为不同大小,即由近到远逐渐增大的形式,使骨水泥在 3 个侧孔周围弥散量大致相等;同时,侧孔集中于钉体前段,可减小骨水泥向椎体后方弥散的趋势,进一步降低骨水泥渗漏风险<sup>[14-18]</sup>。Bostelmann 等<sup>[30]</sup>发现,CICPS 的失效循环载荷显著高于未强化组,且在轴向拔出试验中,其最大拔出出力远远超过未强化组;与普通椎弓根螺钉相比,不同强化技术对椎弓根螺钉的失效载荷无显著差异。许建中教授团队通过的生物力学研究结果表明,CICPS 相比普通椎弓根螺钉的纵向拔出出力提升达 328.1%,并较骨水泥钉道强化椎弓根螺钉提升 96%~262%<sup>[31-32]</sup>。

### 2.2 总体疗效

椎弓根螺钉松动是骨质疏松症患者脊柱融合术后的常见并发症,易引发内固定失效和假关节形成,最终导致手术失败。采用骨水泥强化椎弓根螺钉技术的主要目的是增强椎弓根螺钉固定的稳定性,提供坚强内固定以促进脊柱骨性融合<sup>[33-47]</sup>。Shafiekhani 等<sup>[9]</sup>对 114 例椎管狭窄患者进行的 RCT 研究结果表明,椎管狭窄合并骨质疏松症患者骨水泥钉道强化技术组螺钉松动率(5.1%)显著低于普通椎弓根螺钉组(86.2%)。Kim 等<sup>[38]</sup>对 132 例合并骨质疏松症患者进行超过 2 年的随访研究结果显示,CICPS 组椎弓根螺钉松动率为 7.3%,骨水泥钉道强化技术组螺钉松动率达 50%。Tang 等<sup>[5]</sup>通过回顾性研究证实,合并骨质疏松的脊柱退行性疾病患者

多节段普通椎弓根螺钉内固定有较高的椎弓根螺钉松动发生率(8.46%),而骨水泥强化椎弓根螺钉技术可以提供更好的稳定性并降低椎弓根螺钉松动发生率(0.89%)。一项 Meta 分析结果显示,在骨质疏松症患者脊柱融合术后的随访观察中,CICPS 与骨水泥钉道强化技术相比降低螺钉松动率(3.68%:15.26%)和翻修率(1.33%:4.85%)方面均优于骨水泥钉道强化技术<sup>[41]</sup>。另有多项研究结果表明,与骨水泥钉道强化技术相比,CICPS 在提升椎弓根螺钉稳定性方面具有优势<sup>[5,7,18,35-44,47]</sup>。

脊柱融合成功率是衡量脊柱融合术疗效的关键评价指标<sup>[40-42]</sup>。代飞等<sup>[18]</sup>报告 CICPS 治疗腰椎滑脱伴骨质疏松患者的椎间融合率高于骨水泥钉道强化技术(94.6%:90.2%)。随后其研究团队通过回顾性研究发现,CICPS 治疗腰椎退行性疾病伴骨质疏松症患者(222 例)均取得良好的脊柱融合率<sup>[15,17]</sup>。另有 8 项临床研究涉及近千例患者数据显示,末次随访时骨水泥强化椎弓根螺钉技术组脊柱融合率可达 90% 以上,而骨水泥钉道强化技术组仅为 80% 左右<sup>[34-41]</sup>。术后疼痛缓解、功能恢复和脊柱融合率是评估脊柱手术效果的核心指标<sup>[41-42]</sup>。研究结果表明,虽然骨水泥钉道强化技术与 CICPS 的总体疗效相近,但多孔中空椎弓根螺钉骨水泥强化技术在视觉模拟评分(VAS)和 Oswestry 功能障碍指数(ODI)改善率方面更具优势<sup>[14-15,17-18,34-36,40]</sup>。

与普通椎弓根螺钉固定相比,骨水泥钉道强化技术应用过程中骨水泥注入带来的手术部位潜在感染风险增加是临床关注的重点问题之一<sup>[41]</sup>。虽然骨水泥本身具有一定的抗菌作用,但手术操作规范性及患者免疫功能仍是影响感染风险的关键因素。多项研究结果表明,骨水泥强化椎弓根螺钉技术本身并不增加感染发生率,且 CICPS 组切口感染发生率不高于普通椎弓根螺钉组<sup>[9,41,44]</sup>。此外,骨水泥的使用与术后感染风险无显著相关性,感染更多见于合并糖尿病等基础疾病或接受翻修手术的患者<sup>[5,45-46]</sup>。早期感染可能导致局部红肿、疼痛、发热等症状,严重时甚至可能引发脓毒症等并发症<sup>[46]</sup>。迟发性感染则可能影响脊柱和内固定稳定性,导致骨质破坏、神经损伤、反复多次清创手术,甚至可能出现死亡<sup>[4,7]</sup>。多数感染患者经非手术治疗即可获得满意疗效,而对于深部组织感染,早期及时的外科干预是有效的处理方式,通常无须移除骨水泥<sup>[4,7,44,46]</sup>。目前,尚未见应用 CICPS 后椎体感染的相关报道。

### 3 骨水泥强化椎弓根螺钉技术临床应用推荐意见

#### 3.1 应用范围

骨水泥强化椎弓根螺钉技术作为增强椎弓根螺钉稳定性的有效方法,在脊柱外科中广泛应用于椎弓根螺钉松动高风险患者<sup>[48-59]</sup>。准确掌握其适应证与禁忌证,是确保手术安全、提升临床效果的关键前提。

##### 3.1.1 骨水泥强化椎弓根螺钉技术的适应证

**推荐意见 1:**骨水泥强化椎弓根螺钉技术适用于椎弓根螺钉松动高风险患者,可优先用于关键承重节段或椎弓根螺钉松动概率较高节段(**推荐强度:强**)。

共纳入文献证据 25 项,其中 7 项 A 级证据<sup>[1,9,18,36-37,41-42]</sup>,6 项 B 级证据<sup>[14-15,51-54]</sup>,12 项 C 级证据<sup>[43-46,48-50,55-59]</sup>。

骨质疏松症患者存在骨量减少、骨微结构破坏等病理改变,导致脆性增加和骨折风险升高<sup>[1]</sup>。骨质疏松症诊断标准(符合以下 3 条中之一)如下:(1)髌部或椎体脆性骨折;(2)双能 X 线吸收法(DXA)测定中轴骨骨密度或桡骨远端 1/3 骨密度 T 值 $\leq -2.5$  SD;(3)骨密度测量( $-2.5$  SD $<$ T 值 $<$  $-1.0$  SD)+肱骨近端、骨盆或前臂远端脆性骨折。重度骨质疏松症诊断标准为 T 值 $<$  $-2.5$  SD 并伴脆性骨折<sup>[1,47]</sup>。需注意腰椎退行性变可能导致 DXA 测量值假阴性升高,进而增加骨质疏松症漏诊风险<sup>[1,60-62]</sup>。有学者发现,在高龄脊柱退行性变患者及退行性腰椎侧凸患者中,DXA 的漏诊率和 T 值假性升高比例随年龄增长显著增加<sup>[1-2]</sup>。椎体 CT 值测量可作为骨质疏松筛查的重要补充方法<sup>[60-64]</sup>。研究结果表明,联合应用 DXA 与椎体 CT 值能有效降低腰椎退变患者的骨质疏松症漏诊率<sup>[62-65]</sup>。Zou 等<sup>[60]</sup>发现,当 L<sub>1</sub>椎体 CT 值 $\leq 110$  HU 时,骨质疏松症诊断特异度为 90%;CT 值 $< 160$  HU 则提示骨量减少。选择 L<sub>1</sub>椎体的优势在于其广泛覆盖于胸椎 CT、腹盆腔 CT 等多种临床 CT 扫描范围内,具有较高的临床应用价值<sup>[65]</sup>。同时,基于 L<sub>1</sub>椎体 CT 值可进行骨质疏松程度分级:80 HU $<$ CT 值 $\leq 110$  HU 为轻度骨质疏松;50~80 HU 为重度骨质疏松,此时椎体脆性骨折风险显著升高;CT 值 $< 50$  HU 为极重度骨质疏松,患者不仅多发椎体骨折( $\geq 3$  节段)风险升高,且经皮椎体后凸成形术后再骨折风险明显增加<sup>[66-67]</sup>。

临床上,骨质疏松相关疾病,包括胸腰椎退变性疾病(如腰椎管狭窄、腰椎滑脱、脊柱侧弯等<sup>[9,14-15,18,23,33-37,41-46,48-49]</sup>)、骨质疏松性椎体压缩/爆裂

骨折等<sup>[23]</sup>,是骨水泥强化椎弓根螺钉技术最常见的适应证,且L<sub>1</sub>椎体CT值≤110 HU时即可考虑使用该技术,但术者仍应根据患者个体情况综合判断。

此外,骨水泥强化椎弓根螺钉技术的临床应用范围还包括如下方面:(1)强直性脊柱炎。脊柱强直和融合导致手术难度增加,且内固定效果往往不佳,应用骨水泥强化椎弓根螺钉技术可提升椎弓根螺钉固定效果、改善脊柱生物力学平衡和稳定性、促进术后功能恢复<sup>[55]</sup>。(2)肿瘤性骨破坏。由于肿瘤侵蚀破坏骨组织,传统内固定方法效果欠佳。骨水泥强化椎弓根螺钉技术可填充骨缺损并增强固定强度,提供有效内固定<sup>[45]</sup>。Ghermandi等<sup>[56]</sup>应用该技术治疗脊柱肿瘤和镰状细胞病椎体骨折患者,术后患者疼痛显著缓解、行走能力明显改善。Newman等<sup>[49]</sup>在转移性肿瘤分离手术中采用CICPS进行短节段固定替代长节段固定,疗效满意。(3)翻修手术。既往的手术创伤显著改变了脊柱周围的解剖结构和骨组织,内固定难度增加。应用骨水泥强化椎弓根螺钉技术可显著提高固定强度、降低内固定失败风险,为翻修手术提供有力保障<sup>[57]</sup>。Kang等<sup>[50]</sup>报告1例L<sub>3</sub>~L<sub>5</sub>术后椎弓根螺钉松动患者,应用骨水泥强化椎弓根螺钉技术翻修后10个月未再松动,临床症状明显缓解。后续生物力学研究结果则进一步表明该技术在翻修手术中的应用价值<sup>[58]</sup>。Kocak等<sup>[59]</sup>比较2例腰椎融合术后患者双侧椎弓根螺钉松动后的不同翻修方案的治疗效果,发现骨水泥钉道强化椎弓根螺钉与传统方法翻修椎弓根螺钉(增大椎弓根螺钉直径)具有同等稳定性。(4)其他应用场景。在脊柱矫形长节段固定中,骨水泥强化椎弓根螺钉技术可降低椎弓根螺钉松动/断裂风险、提高手术成功率和患者满意度。对老年患者长节段固定时,头尾端椎弓根螺钉松动率较高,建议至少选择性强化头尾端椎弓根螺钉(特别是胸腰段区域),以预防拔钉及交界性后凸或交界性失败等并发症<sup>[57,50-54]</sup>。

### 3.1.2 骨水泥强化椎弓根螺钉技术的禁忌证

**推荐意见 2:**骨水泥强化椎弓根螺钉技术的禁忌证包括血液系统肿瘤活动期、凝血障碍或抗凝治疗期间、对骨水泥材料过敏、免疫功能低下;相对禁忌证为严重心肺功能不全、椎体严重破坏导致无法安全建立钉道、局部或全身感染未获控制(**推荐强度:GPS**)。

共纳入文献证据25项,其中5项A级证据<sup>[9,18,35,41-42]</sup>,10项B级证据<sup>[14-17,23,40,47,51-53]</sup>,10项C级证据<sup>[10-13,25,55-59]</sup>。

骨水泥强化椎弓根螺钉技术相关并发症主要由骨水泥注入过程导致,故禁忌证应同时涵盖骨水泥使用的一般禁忌证<sup>[9-18,23,25,35,40-42,45-47,50-53,55-59]</sup>。血液系统肿瘤活动期、凝血障碍或抗凝治疗期间的患者出血风险显著增加<sup>[68]</sup>;对骨水泥材料过敏、免疫功能低下患者手术相关风险、术后感染等风险显著提高<sup>[45-46]</sup>,上述情况为骨水泥强化椎弓根螺钉技术的绝对禁忌证。除绝对禁忌证外,严重心肺功能不全、椎体严重破坏导致无法安全建立钉道、局部或全身感染未获控制等情形应视为相对禁忌证,须充分评估风险收益比后谨慎决策。

### 3.2 操作规范

骨水泥强化椎弓根螺钉技术的规范操作是保障其临床安全性与有效性的关键环节。本部分围绕该技术的核心操作步骤及要点,系统阐述置钉深度、骨水泥注入时机、注入量、合理分布等关键技术细节,并重点讨论并发症的预防策略与翻修术中椎弓根螺钉的取出原则。推荐意见均基于现有临床与生物力学证据,旨在为术者提供标准化操作流程参考,在增强椎弓根螺钉稳定性的同时最大限度降低相关风险。

#### 3.2.1 置钉深度

**推荐意见 3:**骨水泥强化椎弓根螺钉技术置钉深度在椎弓根轴线长度的80%内(**推荐强度:弱**)。

共纳入文献证据3项,均为C级证据<sup>[69-71]</sup>。

骨水泥强化椎弓根螺钉技术的置钉操作需兼顾固定强度与并发症风险。普通椎弓根螺钉固定强度主要取决于骨-椎弓根螺钉界面,而骨水泥强化椎弓根螺钉技术则通过钉-骨、钉-水泥、骨-水泥多个界面增强椎弓根螺钉抗拔出<sup>[1-2]</sup>。因此,椎弓根螺钉尺寸、置钉深度、骨水泥分布状态等会对椎弓根螺钉稳定性产生重要影响。Weinstein等<sup>[70]</sup>通过生物力学试验证实,后路椎弓根钉棒系统60%的固定强度源于椎弓根本身的生物力学特性,强调了精准制备钉道的重要性。Varghese等<sup>[71]</sup>通过生物力学试验比较不同置钉深度(70%、85%、100%)下的螺钉稳定性,发现随着置钉深度增加,椎弓根螺钉的插入扭矩、拔出力和刚度等生物力学指标均呈现上升趋势。当椎弓根螺钉置入深度达到椎弓根穿刺点至椎弓根轴线与椎体前缘交点连线距离的80%时,固定强度已接近最大值,继续增加置钉深度对固定强度提升无显著作用。McKinley等<sup>[69]</sup>发现,35 mm椎弓根螺钉较40 mm和45 mm椎弓根螺钉需

承受额外 16% 的弯曲力矩,其固定强度相对较弱,但过长的椎弓根螺钉可能增加内脏及血管损伤风险。

置钉深度需平衡稳定性需求和并发症风险。例如,椎弓根螺钉穿透椎体前缘皮质可增强固定效果,但会显著增加骨水泥渗漏发生率,尤其是经皮 CICPS。因此,为兼顾固定效能和操作安全性,置钉深度建议遵循以下原则:(1)尽可能达到但不超过椎弓根轴线长度的 80%;(2)避免穿透椎弓根侧壁及椎体外侧皮质。该操作方案可在维持足够固定强度的同时,有效降低骨水泥渗漏相关并发症的发生风险。

### 3.2.2 骨水泥注入时机

**推荐意见 4:**普通椎弓根螺钉在骨水泥注入后立即置钉;CICPS 宜选择骨水泥拔丝期注入;且骨质疏松症程度严重时应在骨水泥黏度较高时注入(**推荐强度:强**)。

共纳入文献证据 7 项,其中 1 项 A 级证据<sup>[1]</sup>,4 项 B 级证据<sup>[4,16,29,72]</sup>,2 项 C 级证据<sup>[8,73]</sup>。

骨水泥的固化过程可分为 4 个阶段:砂浆期、拔丝期、面团期和固化期。其作用机制主要依靠微观绞锁和容积填充效应,而非黏合作用。关于骨水泥钉道强化技术的置钉时机,现有研究存在不同结论。Cho 等<sup>[72]</sup>证实,骨水泥注入后 6 min 内完成置钉可提升固定强度,其中 4~6 min 时固定强度随时间递增,6 min 后开始下降。另有研究结果表明,在骨水泥固化后置钉仍能改善固定效果<sup>[73]</sup>。为了使骨水泥的分布更加均匀并提升 CICPS 骨水泥置入操作的可控性及安全性,CICPS 通常采取加压注射骨水泥。虽然低黏度骨水泥注入时无须过高的压力,注射时相对容易,但出现骨水泥渗漏的风险较高。Liu 等<sup>[16]</sup>通过生物力学试验证实,在拔丝期注射 2 ml 骨水泥,即可显著提升 CICPS 固定强度。多项研究结果表明,骨水泥黏度较高时注入可显著减少血管栓塞、骨水泥渗漏等相关并发症,但须提高压力和注射速度以达到足够的骨水泥注入量<sup>[8,16,25-26,31]</sup>。对于重度骨质疏松症患者,骨小梁稀疏,骨水泥渗漏风险较高<sup>[1]</sup>。为避免骨水泥渗漏,建议待骨水泥黏度较高时再行注射<sup>[4,8,16,25-26,29]</sup>。在临床操作过程中,术者应权衡骨水泥注射时机,在尽可能增加椎弓根螺钉稳定性的同时避免并发症的发生。

### 3.2.3 骨水泥注入量

**推荐意见 5:**单枚骨水泥钉道强化椎弓根螺钉与单枚 CICPS 的骨水泥注入量为 1~3 ml (**推荐强度:强**)。

共纳入文献证据 11 项,其中 3 项 B 级证据<sup>[16,26,31]</sup>,8 项 C 级证据<sup>[8,73-79]</sup>。

Weiser 等<sup>[73]</sup>对 25 例骨质疏松症患者椎体(T<sub>12</sub>~L<sub>4</sub>)进行生物力学试验,发现与常规椎弓根螺钉相比,1 ml 和 3 ml 骨水泥钉道强化椎弓根螺钉的疲劳载荷分别提升 41% 和 51%,但差异无统计学意义。Leichtle 等<sup>[74]</sup>提出胸椎手术至少使用 1 ml 骨水泥,腰椎手术至少 3 ml。虽然骨水泥注入量与骨水泥钉道强化椎弓根螺钉固定强度通常存在正相关关系,但增加骨水泥注入量会显著提高渗漏风险<sup>[26,75-79]</sup>。鉴于渗漏风险,建议单枚骨水泥钉道强化椎弓根螺钉使用 1 ml 骨水泥。许建中教授团队通过系列生物力学研究发现,1~3 ml 骨水泥均可显著提升椎弓根螺钉抗拔出力,注入 1.5 ml 骨水泥便达到稳定性峰值<sup>[8,16,31,76]</sup>。该团队进一步通过临床试验观察 CICPS 治疗腰椎滑脱、腰椎间盘突出伴重度骨质疏松症患者的螺钉稳定性,发现注入 1~2 ml 骨水泥可达到稳定的固定强度<sup>[14-16,18]</sup>。生物力学试验结果表明,骨水泥分布均匀性显著影响固定效果<sup>[75]</sup>。当骨水泥靠近椎弓根且分布密集时,可依托该区域丰富的皮质骨结构获得更优稳定性<sup>[76-78]</sup>。另有研究结果表明,注入 1~3 ml 骨水泥均可显著提升 CICPS 与普通椎弓根螺钉的抗拔出力,超过 3.5 ml 则无额外强化效果<sup>[74-79]</sup>。因此,建议骨水泥钉道强化技术单枚椎弓根螺钉钉道的骨水泥注入量应控制在 1~3 ml,CICPS 骨水泥注入量可根据术中影像监测来确定,一般 1~2 ml 即可。临床实际操作中,须综合考量椎体体积、骨质疏松程度、术者手感及术中影像学监测进行个体化调整。

### 3.2.4 骨水泥合理分布

**推荐意见 6:**为获得最佳力学强度并避免骨水泥渗漏相关并发症,骨水泥应优先填充于椎弓根螺钉的钉尖至椎体后缘之间的松质骨区域(**推荐强度:弱**)。

共纳入文献证据 10 项,其中 1 项 A 级证据<sup>[18]</sup>,5 项 B 级证据<sup>[14-15,33,72,80]</sup>,4 项 C 级证据<sup>[73,75-76,78]</sup>。

研究结果表明,骨水泥的合理分布对提升力学强度和防止渗漏并发症具有关键作用<sup>[75-76,78,80]</sup>。基于生物力学特性和安全要求,依据椎弓根螺钉、椎弓根和椎体后缘等解剖标志,骨水泥分布可分为 3 个区域:一区位于椎弓根螺钉尖端,该区域对椎弓根螺钉横向稳定性起主要作用,其作用机制类似双皮质椎弓根螺钉固定。该区域骨水泥强化可显著提升椎弓根螺钉抗周期松动能力(提高 23%~35%)<sup>[72]</sup>。

二区涵盖椎弓根螺钉中远段至椎体后缘,此区域是骨水泥在椎体弥散分布的主要区域,可安全容纳较多骨水泥,并显著增强骨水泥钉道强化椎弓根螺钉与 CICPS 的轴向抗拔出力。三区包含椎弓根螺钉尾部、椎体后缘及椎弓根区域,因邻近神经结构和椎体后壁皮质,在骨质疏松症、骨代谢疾病及病理性骨量流失等病理状态下,骨水泥渗漏风险高,故须严格控制骨水泥分布。目前普遍认为,骨水泥安全边界应止于椎体后缘皮质和椎弓根内侧壁<sup>[72-73]</sup>。使骨水泥分布在钉尖到椎体后缘的松质骨内是目前 CICPS 研发与改进的重要方向,从而保证椎弓根螺钉的稳定性与安全性<sup>[14-15,17-18,33]</sup>。

目前尚缺乏具有操作参考价值的研究类文献证据。基于现有证据,建议术中分级强化策略的目标设定为:二区作为主要骨水泥分布区,一区可补充强化,三区应严格避免骨水泥分布<sup>[31,75-76]</sup>。

### 3.2.5 骨水泥钉道强化椎弓根螺钉与 CICPS 移除

**推荐意见 7:**骨水泥钉道强化椎弓根螺钉与 CICPS 的移除操作具有可行性,多数情况下常规手术操作即可完成(**推荐强度:弱**)。

共纳入文献证据 6 项,均 C 级证据<sup>[46,76,81-84]</sup>。

研究结果表明,在骨质疏松尸体标本中,椎弓根螺钉-骨水泥界面先于骨水泥-骨界面失效<sup>[81]</sup>。即使对脊柱退行性变伴严重骨质疏松症患者应用骨水泥强化椎弓根螺钉技术,翻修手术仍能轻松、安全取出椎弓根螺钉,且不会导致椎体骨质显著破坏<sup>[82-83]</sup>。骨水泥钉道强化椎弓根螺钉进行翻修时,可直接沿原钉道旋出椎弓根螺钉;而 CICPS 需先折断开孔部位的骨水泥方能退钉,故前者在取出便利性方面更具优势<sup>[76]</sup>。Chao 等<sup>[83]</sup>比较骨水泥钉道强化技术的螺钉与 CICPS 拔出力,发现 CICPS 的旋出扭矩高于骨水泥钉道强化技术的螺钉,但差异无统计学意义。Blatter 等<sup>[84]</sup>通过体外实验证实,在取出 CICPS 过程中,椎弓根螺钉-骨水泥界面优先发生松动,且 CICPS 在骨质疏松椎体中的中位拔出扭矩为 0.34 N·m,显著低于骨水泥钉道强化技术的螺钉在正常椎体中的中位拔出扭矩(1.23 N·m),该特性可有效防止骨水泥在椎体内发生旋转。Paré 等<sup>[82]</sup>的尸体研究数据显示,CICPS 的移除成功率可达 88%(15/17)。Martín-Fernández 等<sup>[46]</sup>回顾性分析 313 例接受脊柱融合患者的资料,发现其中需要进行翻修手术的 56 例患者共 180 枚 CICPS 均被顺利取出。

因此,骨水泥钉道强化椎弓根螺钉与 CICPS 的

取出操作难度总体可控,常规外科技术通常能够完成该操作。但需要指出的是,目前尚缺乏高级别的循证医学证据明确支持此类椎弓根螺钉取出的具体难易程度。因此,即使在技术可行的情况下,置钉策略与操作仍应格外谨慎,避免因反复操作导致钉道骨壁损坏、椎弓根螺钉稳定性丧失等并发症。在翻修手术前,应制订详细的术前规划和应急预案,以保障手术安全顺利实施。

### 3.2.6 并发症预防

**推荐意见 8:**应用骨水泥强化椎弓根螺钉技术应重点防范骨水泥渗漏,关键措施包括精准置钉及术中影像监控(**推荐强度:强**)。

共纳入文献证据 15 项,其中 8 项 B 级证据<sup>[16,51-54,85-87]</sup>,7 项 C 级证据<sup>[25,57-59,82,88-89]</sup>。

骨水泥强化椎弓根螺钉技术的临床应用需重点预防其潜在并发症,其中骨水泥渗漏发生率最高,可达 5%~80%<sup>[3,16,51-54,57-59,85]</sup>。骨水泥渗漏进入椎管可压迫脊髓神经导致神经根性疼痛,甚至截瘫;骨水泥渗漏进入循环系统可造成心搏骤停、肺栓塞等严重并发症;渗漏骨水泥的聚合产热反应还可能导导致局部组织缺血、神经根刺激及神经根病等<sup>[3,59,90]</sup>。根据 Yeom 分类体系,骨水泥渗漏可分为 3 种类型:经椎基底静脉渗漏(B型)、经节段静脉渗漏(S型)和经骨皮质缺损渗漏(C型)<sup>[91]</sup>。临床研究结果表明,无症状性骨水泥渗漏发生率可达 66.7%,其中 7.8% 的患者并发肺栓塞<sup>[87]</sup>。Guo 等<sup>[88]</sup>发现,在 202 例使用 950 枚骨水泥钉道强化椎弓根螺钉患者中,81.68% 的患者和 35.26% 的螺钉发生渗漏,其中 S 型、B 型、C 型骨水泥渗漏发生率分别为 76.12%、22.99%、8.96%。Mueller 等<sup>[89]</sup>发现,在 98 例(237 个椎体)使用 474 枚骨水泥钉道强化椎弓根螺钉患者中,93.6% 的患者和 73.3% 的椎体出现骨水泥渗漏,但均为无症状性渗漏,其中 S 型、B 型、C 型骨水泥渗漏发生率分别为 61.8%、41.3%、11.6%。Liu 等<sup>[16]</sup>报告 276 例患者共 835 枚 CICPS 的临床数据,发现 23.2% 的患者和 8.9% 的 CICPS 出现骨水泥渗漏,其中 B 型和 S 型骨水泥渗漏发生率较高。文献报道的骨水泥渗漏发生率差异较大,这可能与骨水泥注入量、椎弓根螺钉设计和手术操作不同有关<sup>[25,51,53,89,92-95]</sup>。据报道,骨水泥渗漏发生率为 13%~17%<sup>[82,96]</sup>,而骨水泥强化椎弓根螺钉技术的骨水泥渗漏发生率为 5%~80%<sup>[85,93-95,97]</sup>。Paré 等<sup>[82]</sup>指出,CICPS 的侧孔靠近椎弓根螺钉远端,即远离后方椎管,可在一定程度上减少骨水泥渗漏

发生。许建中教授团队采用改良 CICPS 设计实现不同位置侧孔周围接近均匀的骨水泥弥散,并通过系列生物力学及临床研究证实 CICPS 骨水泥渗漏发生率低<sup>[14-18]</sup>。骨水泥强化椎弓根螺钉技术的骨水泥渗漏常为无症状性。Morimoto 等<sup>[86]</sup>分析 1 960 例应用骨水泥钉道强化技术患者,发现骨水泥渗漏总体发生率为 6%(0~28.6%),其中症状性肺栓塞患者的骨水泥渗漏发生率为 1.3%(0~26%)。

在手术操作技术层面,精准置钉和术中影像监控是预防骨水泥渗漏的关键。置钉前,须用探针探测,确保钉道骨壁完整性,避免骨水泥从破壁处渗漏。置钉时,CICPS 置钉的角度应略大于普通椎弓根螺钉,使椎弓根螺钉侧孔尽量远离椎体壁面,为骨水泥弥散预留空间,降低椎体内局部压力。置钉后,应于骨水泥注入前保持骨水泥流出道通畅。同时,应重点关注骨水泥置入时机和注入量等,最大限度避免骨水泥渗漏。术中实时影像学监控是预防渗漏的核心措施,建议在透视下实时监控骨水泥注入过程,发现渗漏或接近渗漏时应立即终止注射,必要时术后须行 X 线及 CT 检查评估渗漏骨水泥潜在的不良影响。另外,虽然手术导航不能降低血管系统渗漏风险(尤其是 S 型渗漏),但可提高置钉精度、减少椎管内渗漏和皮质裂隙渗漏,建议有条件的单位积极应用<sup>[86,98-99]</sup>。

#### 4 总结与说明

本指南基于现有文献证据和专家组的临床实践,主要围绕骨水泥强化椎弓根螺钉技术的应用范围、操作规范等维度给出推荐意见,旨在为规范临床应用提供参考。本指南是一项基于现有循证证据的学术共识,旨在为临床诊疗提供学术和技术参考依据,且推荐意见将随未来证据的积累而不断修订,而非必须遵循的强制性标准。本指南不具备法律效力,不可作为医疗纠纷中的追责依据,亦不适用于所有临床情境,医护人员需依据患者个体情况独立判断。

**利益冲突** 所有作者声明不存在利益冲突

**作者贡献声明** 贺思豪、邢军超:资料收集及分析、指南撰写及修改;罗飞:指南框架构建及制订工作组织、指南修改;唐佩福、许建中、张英泽:指南制订指导、资料分析及解释、指南修改;其他作者:文献筛选、指南论证

#### 参 考 文 献

- [1] 中华医学会骨质疏松和骨矿盐疾病分会,章振林.原发性骨质疏松症诊疗指南(2022)[J].中国全科医学,2023,26(14):1671-1691. DOI:10.12114/j.issn.1007-9572.2023.0121.
- [2] Bokov A, Bulkin A, Aleynik A, et al. Pedicle screws loosening in patients with degenerative diseases of the lumbar spine: Potential risk factors and relative contribution [J]. *Global Spine J*, 2019, 9(1):55-61. DOI:10.1177/2192568218772302.
- [3] Rometsch E, Spruit M, Zigler JE, et al. Screw-related complications after instrumentation of the osteoporotic spine: A systematic literature review with meta-analysis [J]. *Global Spine J*, 2020, 10(1):69-88. DOI:10.1177/2192 568218818164.
- [4] Olbrycht T, Latka K, Kolodziej W, et al. Cement-augmented pedicle screw fixation in patients with osteoporosis: Safety, efficacy and complications [J]. *J Korean Neurosurg Soc*, 2025, 68(2):127-136. DOI:10.3340/jkns.2024.0081.
- [5] Tang YC, Guo HZ, Guo DQ, et al. Effect and potential risks of using multilevel cement-augmented pedicle screw fixation in osteoporotic spine with lumbar degenerative disease [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2020, 21(1):274. DOI:10.1186/s12891-020-03309-y.
- [6] Hoppe S, Keel MJ. Pedicle screw augmentation in osteoporotic spine: indications, limitations and technical aspects [J]. *Eur J Trauma Emerg Surg*, 2017, 43(1):3-8. DOI:10.1007/s00068-016-0750-x.
- [7] Ehresman J, Pennington Z, Elsamadicy AA, et al. Fenestrated pedicle screws for thoracolumbar instrumentation in patients with poor bone quality: Case series and systematic review of the literature [J]. *Clin Neurol Neurosurg*, 2021, 206:106675. DOI:10.1016/j.clineuro.2021.106675.
- [8] Liu Y, Xu J, Sun D, et al. Biomechanical and finite element analyses of bone cement - injectable cannulated pedicle screw fixation in osteoporotic bone [J]. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, 2016, 104(5):960-967. DOI:10.1002/jbm.b.33424.
- [9] Shafiekhani P, Darabi M, Jajin EA, et al. Pedicle screw fixation with cement augmentation versus without in the treatment of spinal stenosis following posterior spinal fusion surgery, superiority according to bone mineral density: A three-arm randomized clinical trial [J]. *World Neurosurg*, 2023, 180:e266-e273. DOI:10.1016/j.wneu.2023.09.050.
- [10] Peng JC, Guo HZ, Zhan CG, et al. Comparison of pedicle screw fixation with or without cement augmentation for treating single-segment isthmic spondylolisthesis in the osteoporotic spine [J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1):827. DOI:10.1038/s41598-023-27539-x.
- [11] Nhã LH, Hùng KD. Efficacy of cement-augmented pedicle screw fixation for osteoporotic mid-thoracic vertebral fractures [J]. *Surg Neurol Int*, 2023, 14:378. DOI:10.25259/SNI\_751\_2023.
- [12] Gueorguiev B, Lenz M. Zementaugumentation und knochenersatzmaterialien und biomechanik [J]. *Unfallchirurgie (Heidellb)*, 2022, 125(6):430-435. DOI:10.1007/s00113-022-01182-z.
- [13] Boucas P, Mamdouhi T, Rizzo SE, et al. Cement Augmentation of Pedicle Screw Instrumentation: A Literature Review [J]. *Asian Spine J*, 2023, 17(5):939-948. DOI:10.31616/asj.2022.0216.
- [14] Rong Z, Zhang F, Xiao J, et al. Application of cement-injectable cannulated pedicle screw in treatment of osteoporotic thoracolumbar vertebral compression fracture (AO type A): A retrospective study of 28 cases [J]. *World Neurosurg*, 2018, 120:e247-e258. DOI:10.1016/j.wneu.2018.08.045.
- [15] Song L, Xiao J, Zhou R, et al. Clinical evaluation of the efficacy of a new bone cement-injectable cannulated pedicle screw in the treatment of spondylolysis-type lumbar spondylolisthesis with osteoporosis: a retrospective study [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2022, 23(1):951. DOI:10.1186/s12891-022-05904-7.

- [16] Liu YY, Xiao J, He L, et al. Risk factor analysis of bone cement leakage for polymethylmethacrylate-augmented cannulated pedicle screw fixation in spinal disorders [J]. *Heliyon*, 2023, 9(4): e15167. DOI:10.1016/j.heliyon.2023.e15167.
- [17] Li CC, Yang XL, Wu WW, et al. Injectable bone cement cannulated pedicle screw for lumbar degenerative disease in osteoporosis-clinical follow-up of over 5 years [J]. *J Orthop Surg Res*, 2024, 19(1):440. DOI:10.1186/s13018-024-04934-2.
- [18] 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. DOI:10.3969/j.issn.1672-2957.2014.05.001.
- [19] Chen Y, Yang K, Marušić A, et al. A reporting tool for practice guidelines in health care: The RIGHT statement [J]. *Ann Intern Med*, 2017, 166(2):128-132. DOI:10.7326/M16-1565.
- [20] Guyatt GH, Oxman AD, Vist GE, et al. GRADE: an emerging consensus on rating quality of evidence and strength of recommendations [J]. *BMJ*, 2008, 336(7650):924-926. DOI:10.1136/bmj.39489.470347.AD.
- [21] 郑博隆, 梅伟, 高延征, 等. 急性症状性骨质疏松性胸腰椎压缩骨折椎体强化术治疗指南(2025 版) [J]. *中华创伤杂志*, 2025, 41(9):805-818. DOI:10.3760/cma.j.cn501098-20250416-00220.
- [22] Seesala VS, Sheikh L, Basu B, et al. Mechanical and bioactive properties of PMMA bone cement: A review [J]. *ACS Biomater Sci Eng*, 2024, 10(10):5939-5959. DOI:10.1021/acsbomaterials.4c00779.
- [23] Wang C, Chu YW, Lv CT. Pedicle screw fixation plus cement augmentation or cement augmentation only for osteoporotic vertebral compression fracture: A systematic review and meta-analysis [J]. *World Neurosurg*, 2025, 197:123952. DOI:10.1016/j.wneu.2025.123952.
- [24] Erdem MN, Karaca S, Sari S, et al. Application of cement on strategic vertebrae in the treatment of the osteoporotic spine [J]. *Spine J*, 2017, 17(3):328-337. DOI:10.1016/j.spinee.2016.10.001.
- [25] Choma TJ, Pfeiffer FM, Swope RW, et al. Pedicle screw design and cement augmentation in osteoporotic vertebrae: effects of fenestrations and cement viscosity on fixation and extraction [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2012, 37(26):E1628-E1632. DOI:10.1097/BRS.0b013e3182740e56.
- [26] Liu D, Wu ZX, Pan XM, et al. Biomechanical comparison of different techniques in primary spinal surgery in osteoporotic cadaveric lumbar vertebrae: expansive pedicle screw versus polymethylmethacrylate-augmented pedicle screw [J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2011, 131(9):1227-1232. DOI:10.1007/s00402-011-1290-9.
- [27] Grechenig S, Gänsslen A, Gueorguiev B, et al. PMMA-augmented SI screw: a biomechanical analysis of stiffness and pull-out force in a matched paired human cadaveric model [J]. *Injury*, 2015, 46 Suppl 4:S125-S128. DOI:10.1016/S0020-1383(15)30031-0.
- [28] Yu BS, Li ZM, Zhou ZY, et al. Biomechanical effects of insertion location and bone cement augmentation on the anchoring strength of iliac screw [J]. *Clin Biomech (Bristol)*, 2011, 26(6):556-561. DOI:10.1016/j.clinbiomech.2011.01.008.
- [29] Wang Y, Yang L, Li C, et al. The biomechanical properties of cement-augmented pedicle screws for osteoporotic spines [J]. *Global Spine J*, 2022, 12(2):323-332. DOI:10.1177/2192568220987214.
- [30] Bostelmann R, Keiler A, Steiger HJ, et al. Effect of augmentation techniques on the failure of pedicle screws under cranio-caudal cyclic loading [J]. *Eur Spine J*, 2017, 26(1):181-188. DOI:10.1007/s00586-015-3904-3.
- [31] 刘瑶瑶, 代飞, 孙东, 等. 不同量骨水泥强化新型空心椎弓根螺钉的体外生物力学研究 [J]. *第三军医大学学报*, 2012, 34(16): 1626-1629. DOI:10.16016/j.1000-5404.2012.16.034.
- [32] Wang Z, Liu P, Liu MY, et al. Reversed windshield-wiper effect leads to failure of cement-augmented pedicle screw: Biomechanical mechanism analysis by finite element experiment [J]. *Heliyon*, 2023, 9(2):e13730. DOI:10.1016/j.heliyon.2023.e13730.
- [33] Sawakami K, Yamazaki A, Ishikawa S, et al. Polymethylmethacrylate augmentation of pedicle screws increases the initial fixation in osteoporotic spine patients [J]. *J Spinal Disord Tech*, 2012, 25(2):E28-E35. DOI:10.1097/BSD.0b013e318228bbbed.
- [34] Cao Y, Liang Y, Wan S, et al. Pedicle screw with cement augmentation in unilateral transforaminal lumbar interbody fusion: A 2-year follow-up study [J]. *World Neurosurg*, 2018, 118:e288-e295. DOI:10.1016/j.wneu.2018.06.181.
- [35] Mo GY, Guo HZ, Guo DQ, et al. Augmented pedicle trajectory applied on the osteoporotic spine with lumbar degenerative disease: mid-term outcome [J]. *J Orthop Surg Res*, 2019, 14(1):170. DOI:10.1186/s13018-019-1213-y.
- [36] 左如俊, 黄承, 蒋毅, 等. 不同方式骨水泥强化椎弓根螺钉对老年骨质疏松性胸腰椎骨折预后的影响 [J]. *局解手术学杂志*, 2018, 27(4):293-296. DOI:10.11659/jjssx.07E017007.
- [37] Chen TZ, Lu XJ, Wu DZ, et al. Efficacy of minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion plus cement-augmented pedicle screw fixation in the treatment of degenerative lumbar spine disease with osteoporosis in the elderly [J]. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*, 2023, 27(14):6573-6582. DOI:10.26355/eurev\_202307\_33128.
- [38] 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. DOI:10.4055/cios19127.
- [39] Yagi M, Ogiri M, Holy CE, et al. Comparison of clinical effectiveness of fenestrated and conventional pedicle screws in patients undergoing spinal surgery: a systematic review and meta-analysis [J]. *Expert Rev Med Devices*, 2021, 18(10):995-1022. DOI:10.1080/17434440.2021.1977123.
- [40] 孙浩林, 李淳德, 杨泽川, 等. 多孔中空椎弓根螺钉骨水泥加强固定治疗合并骨质疏松症的腰椎退变性疾病 [J]. *北京大学学报:医学版*, 2016, 48(6):1019-1025. DOI:10.3969/j.issn.1671-167X.2016.06.017.
- [41] 郭海威, 谢家豪, 林燕平, 等. 骨水泥强化空心侧孔与常规椎弓根螺钉内固定修复骨质疏松椎体效果及安全性 Meta 分析 [J]. *中国组织工程研究*, 2021, 25(30):4891-4899. DOI:10.12307/2021.279.
- [42] 余照宇, 谭黎鑫, 孙凯, 等. 骨水泥强化椎弓根螺钉治疗骨质疏松性胸腰椎退行性疾病的 Meta 分析 [J]. *中国组织工程研究*, 2024, 28(5):813-820. DOI:10.12307/2023.980.
- [43] Kim KH, Lee SH, Lee DY, et al. Anterior bone cement augmentation in anterior lumbar interbody fusion and percutaneous pedicle screw fixation in patients with osteoporosis [J]. *J Neurosurg Spine*, 2010, 12(5):525-532. DOI:10.3171/2009.11.SPINE09264.
- [44] 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. DOI:10.1007/s00586-008-0769-8.
- [45] Wang Z, Liu Y, Rong Z, et al. Clinical evaluation of a bone cement-injectable cannulated pedicle screw augmented with polymethylmethacrylate: 128 osteoporotic patients with 42 months of follow-up [J]. *Clinics (Sao Paulo)*, 2019, 74:e346. DOI:10.6061/clinics/2019/e346.

- [46] Martín-Fernández M, López-Herradón A, Piñera AR, et al. Potential risks of using cement-augmented screws for spinal fusion in patients with low bone quality [J]. *Spine J*, 2017, 17(8):1192-1199. DOI:10.1016/j.spinee.2017.04.029.
- [47] 陈建, 李青青, 顾军, 等. 老年骨质疏松性胸腰段椎体骨折伴后凸畸形诊疗指南(2024版)[J]. *中华创伤杂志*, 2024, 40(11):961-973. DOI:10.3760/cma.j.cn501098-20240724-00446.
- [48] Massaad E, Rolle M, Hadzipasic M, et al. Safety and efficacy of cement augmentation with fenestrated pedicle screws for tumor-related spinal instability [J]. *Neurosurg Focus*, 2021, 50(5):E12. DOI:10.3171/2021.2.FOCUS201121.
- [49] Newman WC, Amin AG, Villavieja J, et al. Short-segment cement-augmented fixation in open separation surgery of metastatic epidural spinal cord compression: initial experience [J]. *Neurosurg Focus*, 2021, 50(5):E11. DOI:10.3171/2021.2.FOCUS217.
- [50] Kang SH, Kim KT, Park SW, et al. A case of pedicle screw loosening treated by modified transpedicular screw augmentation with polymethylmethacrylate [J]. *J Korean Neurosurg Soc*, 2011, 49(1):75-78. DOI:10.3340/jkns.2011.49.1.75.
- [51] 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. DOI:10.1186/s13018-020-01975-1.
- [52] Gao S, Hu Y, Mamat F, et al. Application of cement-augmented pedicle screws in elderly patients with spinal tuberculosis and severe osteoporosis: a preliminary study [J]. *J Orthop Surg Res*, 2023, 18(1):624. DOI:10.1186/s13018-023-04099-4.
- [53] Tani Y, Naka N, Ono N, et al. Can we rely on prophylactic two-level vertebral cement augmentation in long-segment adult spinal deformity surgery to reduce the incidence of proximal junctional complications? [J]. *Medicina (Kaunas)*, 2024, 60(6):860. DOI:10.3390/medicina60060860.
- [54] Doodkorte RJP, Vercoulen TFG, Roth AK, et al. Instrumentation techniques to prevent proximal junctional kyphosis and proximal junctional failure in adult spinal deformity correction - a systematic review of biomechanical studies [J]. *Spine J*, 2021, 21(5):842-854. DOI:10.1016/j.spinee.2021.01.011.
- [55] Trungu S, Ricciardi L, Forcato S, et al. Percutaneous instrumentation with cement augmentation for traumatic hyperextension thoracic and lumbar fractures in ankylosing spondylitis: a single-institution experience [J]. *Neurosurg Focus*, 2021, 51(4):E8. DOI:10.3171/2021.7.FOCUS21308.
- [56] Ghermandi R, Pipola V, Colangeli S, et al. Polymethylmethacrylate-augmented fenestrated pedicle-screw fixation in low bone quality patients: a case series and literature review [J]. *J Biol Regul Homeost Agents*, 2018, 32(6 Suppl.1):71-76.
- [57] Kiner DW, Wybo CD, Sterba W, et al. Biomechanical analysis of different techniques in revision spinal instrumentation: larger diameter screws versus cement augmentation [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2008, 33(24):2618-2622. DOI:10.1097/BRS.0b013e3181882cac.
- [58] Kang SH, Cho YJ, Kim YB, et al. Pullout strength after expandable polymethylmethacrylate transpedicular screw augmentation for pedicle screw loosening [J]. *J Korean Neurosurg Soc*, 2015, 57(4):229-234. DOI:10.3340/jkns.2015.57.4.229.
- [59] Kocak T, Däxle M, Reichel H, et al. Alternative technique of cement augmentation of loosened pedicle screws--technical note and presentation of two cases [J]. *Acta Chir Orthop Traumatol Cech*, 2013, 80(1):89-91. DOI:10.55095/achot2013/014.
- [60] Zou D, Li W, Deng C, et al. The use of CT Hounsfield unit values to identify the undiagnosed spinal osteoporosis in patients with lumbar degenerative diseases [J]. *Eur Spine J*, 2019, 28(8):1758-1766. DOI:10.1007/s00586-018-5776-9.
- [61] Zou D, Li W, Xu F, et al. Use of Hounsfield units of S1 body to diagnose osteoporosis in patients with lumbar degenerative diseases [J]. *Neurosurg Focus*, 2019, 46(5):E6. DOI:10.3171/2019.2.FOCUS18614.
- [62] Deshpande N, Hadi MS, Lillard JC, et al. Alternatives to DEXA for the assessment of bone density: a systematic review of the literature and future recommendations [J]. *J Neurosurg Spine*, 2023, 38(4):436-445. DOI:10.3171/2022.11.SPINE22875.
- [63] St Jeor JD, Jackson TJ, Xiong AE, et al. Osteoporosis in spine surgery patients: what is the best way to diagnose osteoporosis in this population? [J]. *Neurosurg Focus*, 2020, 49(2):E4. DOI:10.3171/2020.5.FOCUS20277.
- [64] Zaidi Q, Danisa OA, Cheng W. Measurement techniques and utility of Hounsfield unit values for assessment of bone quality prior to spinal instrumentation: A review of current literature [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2019, 44(4):E239-E244. DOI:10.1097/BRS.0000000000002813.
- [65] Pickhardt PJ, Pooler BD, Lauder T, et al. Opportunistic screening for osteoporosis using abdominal computed tomography scans obtained for other indications [J]. *Ann Intern Med*, 2013, 158(8):588-595. DOI:10.7326/0003-4819-158-8-201304160-00003.
- [66] Zou D, Ye K, Tian Y, et al. Characteristics of vertebral CT hounsfield units in elderly patients with acute vertebral fragility fractures [J]. *Eur Spine J*, 2020, 29(5):1092-1097. DOI:10.1007/s00586-020-06363-1.
- [67] Ye K, Zou D, Zhou F, et al. Low vertebral CT Hounsfield units: a risk factor for new osteoporotic vertebral fractures after the treatment of percutaneous kyphoplasty [J]. *Arch Osteoporos*, 2022, 17(1):137. DOI:10.1007/s11657-022-01177-8.
- [68] Brokke KE, Graman M, Servaas S, et al. Bone cement implantation syndrome: a scoping review [J]. *Br J Anaesth*, 2025, 135(4):1038-1050. DOI:10.1016/j.bja.2025.05.041.
- [69] McKinley TO, McLain RF, Yerby SA, et al. Characteristics of pedicle screw loading. Effect of surgical technique on intravertebral and intrapedicular bending moments [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1999, 24(1):18-25. DOI:10.1097/00007632-199901010-00005.
- [70] Weinstein JN, Rydevik BL, Rauschnig W. Anatomic and technical considerations of pedicle screw fixation [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1992, (284):34-46.
- [71] Varghese V, Saravana Kumar G, Krishnan V. Effect of various factors on pull out strength of pedicle screw in normal and osteoporotic cancellous bone models [J]. *Med Eng Phys*, 2017, 40:28-38. DOI:10.1016/j.medengphy.2016.11.012.
- [72] Cho W, Wu C, Erkan S, et al. The effect on the pullout strength by the timing of pedicle screw insertion after calcium phosphate cement injection [J]. *J Spinal Disord Tech*, 2011, 24(2):116-120. DOI:10.1097/BSD.0b013e3181dd7961.
- [73] Weiser L, Sellenschloh K, Püschel K, et al. Reduced cement volume does not affect screw stability in augmented pedicle screws [J]. *Eur Spine J*, 2020, 29(6):1297-1303. DOI:10.1007/s00586-020-06376-w.
- [74] Leichte CI, Lorenz A, Rothstock S, et al. Pull-out strength of cemented solid versus fenestrated pedicle screws in osteoporotic vertebrae [J]. *Bone Joint Res*, 2016, 5(9):419-426. DOI:10.1302/2046-3758.59.2000580.

- [75] Liu D, Sheng J, Wu HH, et al. Biomechanical study of injectable hollow pedicle screws for PMMA augmentation in severely osteoporotic lumbar vertebrae: effect of PMMA distribution and volume on screw stability [J]. *J Neurosurg Spine*, 2018, 29(6):639-646. DOI:10.3171/2018.4.SPINE171225.
- [76] Li C, Song L, Xiao J, et al. Second-generation bone cement-injectable cannulated pedicle screws for osteoporosis: biomechanical and finite element analyses [J]. *J Orthop Surg Res*, 2023, 18(1):343. DOI:10.1186/s13018-023-03752-2.
- [77] Yoon SH, Lee SH, Jahng TA. An experimental study on the biomechanical effectiveness of bone cement-augmented pedicle screw fixation with various types of fenestrations [J]. *J Korean Neurosurg Soc*, 2022, 65(6):779-789. DOI:10.3340/jkns.2021.0315.
- [78] González SG, Bastida GC, Vlad MD, et al. Analysis of bone cement distribution around fenestrated pedicle screws in low bone quality lumbosacral vertebrae [J]. *Int Orthop*, 2019, 43(8):1873-1882. DOI:10.1007/s00264-018-4115-4.
- [79] Charles YP, Pelletier H, Hydiar P, et al. Pullout characteristics of percutaneous pedicle screws with different cement augmentation methods in elderly spines: An *in vitro* biomechanical study [J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2015, 101(3):369-374. DOI:10.1016/j.otsr.2015.01.005.
- [80] Chiu CK, Chan CYW, Kwan MK. The accuracy and safety of fluoroscopic-guided percutaneous pedicle screws in the thoracic and lumbosacral spine in the Asian population: A CT scan analysis of 1002 screws [J]. *J Orthop Surg (Hong Kong)*, 2017, 25(2):2309499017713938. DOI:10.1177/2309499017713938.
- [81] Elder BD, Lo SF, Holmes C, et al. The biomechanics of pedicle screw augmentation with cement [J]. *Spine J*, 2015, 15(6):1432-1445. DOI:10.1016/j.spinee.2015.03.016.
- [82] 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 (Phila Pa 1976)*, 2011, 36(18):E1210-E1214. DOI:10.1097/BRS.0b013e318205e3af.
- [83] Chao KH, Lai YS, Chen WC, et al. Biomechanical analysis of different types of pedicle screw augmentation: a cadaveric and synthetic bone sample study of instrumented vertebral specimens [J]. *Med Eng Phys*, 2013, 35(10):1506-1512. DOI:10.1016/j.medengphy.2013.04.007.
- [84] Blattner 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. DOI:10.3171/2009.3.SPINE08625.
- [85] Zhang J, Wang G, Zhang N. A meta-analysis of complications associated with the use of cement-augmented pedicle screws in osteoporosis of spine [J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2021, 107(7):102791. DOI:10.1016/j.otsr.2020.102791.
- [86] Morimoto T, Kobayashi T, Hirata H, et al. Cardiopulmonary cement embolism following cement-augmented pedicle screw fixation: A narrative review [J]. *Medicina (Kaunas)*, 2023, 59(2):407. DOI:10.3390/medicina59020407.
- [87] Singh V, Mahajan R, Das K, et al. Surgical trend analysis for use of cement augmented pedicle screws in osteoporosis of spine: A systematic review (2000-2017) [J]. *Global Spine J*, 2019, 9(7):783-795. DOI:10.1177/2192568218801570.
- [88] Guo HZ, Tang YC, Guo DQ, et al. The cement leakage in cement-augmented pedicle screw instrumentation in degenerative lumbosacral diseases: a retrospective analysis of 202 cases and 950 augmented pedicle screws [J]. *Eur Spine J*, 2019, 28(7):1661-1669. DOI:10.1007/s00586-019-05985-4.
- [89] Mueller JU, Baldauf J, Marx S, et al. Cement leakage in pedicle screw augmentation: a prospective analysis of 98 patients and 474 augmented pedicle screws [J]. *J Neurosurg Spine*, 2016, 25(1):103-109. DOI:10.3171/2015.10.SPINE15511.
- [90] Chang MC, Kao HC, Ying SH, et al. Polymethylmethacrylate augmentation of cannulated pedicle screws for fixation in osteoporotic spines and comparison of its clinical results and biomechanical characteristics with the needle injection method [J]. *J Spinal Disord Tech*, 2013, 26(6):305-315. DOI:10.1097/BSD.0b013e318246ae8a.
- [91] Yeom JS, Kim WJ, Choy WS, et al. Leakage of cement in percutaneous transpedicular vertebroplasty for painful osteoporotic compression fractures [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 2003, 85(1):83-89. DOI:10.1302/0301-620x.85b1.13026.
- [92] Song Z, Zhou Q, Jin X, et al. Cement-augmented pedicle screw for thoracolumbar degenerative diseases with osteoporosis: a systematic review and meta-analysis [J]. *J Orthop Surg Res*, 2023, 18(1):631. DOI:10.1186/s13018-023-04077-w.
- [93] Hu MH, Wu HT, Chang MC, et al. Polymethylmethacrylate-augmented screw fixation of the pedicle screw: The cement distribution in the vertebral body [J]. *Eur Spine J*, 2011, 20(8):1281-1288. DOI:10.1007/s00586-011-1824-4.
- [94] 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. DOI:10.3340/jkns.2009.46.4.305.
- [95] Kan D, Wang J, Qiao G, et al. Efficacy and safety of hollow pedicle screw-anchored bone cement combined with posterior long-segment fixation for stage III Kümmell's disease [J]. *Jt Dis Relat Surg*, 2025, 36(1):15-23. DOI:10.52312/jdrs.2024.1834.
- [96] Schmidt R, Cakir B, Mattes T, et al. Cement leakage during vertebroplasty: an underestimated problem? [J]. *Eur Spine J*, 2005, 14(5):466-473. DOI:10.1007/s00586-004-0839-5.
- [97] Cao L, Xu HJ, Yu YK, et al. Comparative analysis of the safety and efficacy of fenestrated pedicle screw with cement and conventional pedicle screw with cement in the treatment of osteoporotic vertebral fractures: A meta-analysis [J]. *Chin J Traumatol*, 2025, 28(2):101-112. DOI:10.1016/j.cjte.2024.07.013.
- [98] Ishak B, Bajwa AA, Schneider T, et al. Early complications and cement leakage in elderly patients who have undergone intraoperative computed tomography (CT)-guided cement augmented pedicle screw placement: Eight-year single-center experience [J]. *World Neurosurg*, 2019, 128:e975-e981. DOI:10.1016/j.wneu.2019.05.047.
- [99] Wang Y, Xiao Y, Wang J, et al. Spine-specific robots may offer superior screw placement accuracy in spinal surgery procedures. A systematic review and network and proportional meta-analysis [J]. *J Orthop Surg Res*, 2025, 20(1):920. DOI:10.1186/s13018-025-06005-6.

(收稿日期:2025-05-16)

#### 本文引用格式

贺思豪, 邢军超, 初同伟, 等. 骨水泥强化椎弓根螺钉技术临床应用循证指南(2025版)[J]. *中华创伤杂志*, 2025, 41(11): 1035-1047. DOI: 10.3760/cma.j.cn501098-20250516-00275.