

综述

脊柱微创手术中患者辐射暴露和应对措施的研究进展

Radiation exposure and countermeasures to patients
in minimally invasive spine surgery

范永飞, 刘 刚

(南京大学医学院附属东部战区总医院骨科 210000 南京市)

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2018.11.12

中图分类号: R818 文献标识码: A 文章编号: 1004-406X(2018)-11-1042-04

在脊柱外科手术中,由于术中放射仪器的使用,几乎所有人体组织均可观察到辐射暴露的组织效应^[1],术中高剂量放射可引起皮肤红斑、白内障形成、甲状腺肿瘤和其他恶性肿瘤等一系列并发症的产生^[2,3]。患者遭受的辐射暴露主要与以下方面相关:(1)总透视时间,包括定位及术中操作所需透视时间^[4];(2)透视位置,侧位透视产生的直接辐射和散射辐射分别是正位透视的 200 倍和 30 倍^[5];(3)患者体重及体积,有研究表明,严重肥胖(BMI>35)与辐射暴露显著相关^[6]。且射线输出和皮肤与辐射源的距离取决于患者体积大小,对于体积较大患者,射线输出增加以保证透视图像清晰度,同时,辐射源与皮肤距离减小,可能诱发皮肤损伤^[5]。椎间盘切除术中,Mariscalco 等^[7]比较了传统手术方式和微创手术中手术人员的辐射暴露,发现微创手术中的暴露程度更高。临床上采用了几种方式减少术中手术人员的辐射暴露:(1)铅板、铅衣、甲状腺盾等对人体组织及器官进行保护;(2)增加手术人员与辐射源和患者的距离,以减少直接辐射和散射辐射;(3)在脉冲和低剂量模式下进行透视检查;(4)改进透视仪器,如:迷你 C 型臂

透视机^[8-10]。尽管以上措施明显降低了手术人员遭受的辐射暴露,但并未对患者进行相应的防护,甚至会增加术中患者的辐射暴露,笔者通过对辐射暴露的不良影响、传统手术及微创手术方式对患者产生的辐射作一综述,希望得到临床工作者的重视。

1 辐射暴露的影响

在术中成像过程中,手术人员和患者都会遭受到直接辐射和散射辐射。直接辐射是射线从辐射源射出时吸收的辐射,是患者和手术人员辐射暴露的主要来源;散射辐射通常来自手术环境中的患者皮肤表面的折射,散射辐射是手术人员远离手术台时的主要暴露形式^[8]。术中成像产生的辐射暴露可以通过直接或间接诱导 DNA 损伤和活性氧物质产生而导致细胞损伤,随后的细胞应激反应可通过复制或凋亡机制导致细胞死亡^[11],相反,如果不发生细胞死亡,肿瘤增殖的风险可能会增加,这是由于 DNA 病变细胞的持续存在和复制以及随后的基因组不稳定性^[12]。

辐射暴露的生物学效应可进一步描述为确定性效应或随机性效应。确定性效应是一种剂量依赖性效应,且在达到辐射暴露的特定阈值后,可观察到短期病理反应。如若有超过该阈值的额外暴露,这些影响随之恶化^[13]。与确定性效应相关的病理反应包括脱发、皮肤红斑、皮肤

第一作者简介:男(1993-),硕士在读,研究方向:脊柱外科
电话:(025)80860023 E-mail:fanyongfei_nju@163.com
通讯作者:刘刚 E-mail:liug2002xian@163.com

26. Richardson SM, Walker RV, Parker S, et al. Intervertebral disc cell-mediated mesenchymal stem cell differentiation [J]. Stem Cells, 2006, 24(3): 707-716.
27. Strassburg S, Hodson NW, Hill PI, et al. Bi-directional exchange of membrane components occurs during co-culture of mesenchymal stem cells and nucleus pulposus cells [J]. PLoS One, 2012, 7(3): e33739.
28. Strassburg S, Richardson SM, Freemont AJ, et al. Co-culture induces mesenchymal stem cell differentiation and modulation of the degenerate human nucleus pulposus cell phenotype[J]. Regen Med, 2010, 5(5): 701-711.

29. Ouyang A, Cerchiari A, Tang X, et al. Effects of cell type and configuration on anabolic and catabolic activity in 3D co-culture of mesenchymal stem cells and nucleus pulposus cells[J]. J Orthop Res, 2017, 35(1): 61-73.
30. Naqvi SM, Buckley CT. Extracellular matrix production by nucleus pulposus and bone marrow stem cells in response to altered oxygen and glucose microenvironments [J]. J Anat, 2015, 227(6): 757-766.

(收稿日期:2018-04-01 修回日期:2018-08-18)

(英文编审 庄乾宇/贾丹彤)

(本文编辑 姜雅浩)

灼伤和白内障形成^[14-16]。由于确定性效应的阈值在许多情况下是已知的,可以通过短时间内监测辐射暴露水平来预防。随机性效应是一种非剂量依赖性效应,机体接受的辐射暴露没有特定阈值,但辐射暴露可以逐渐积累,最后产生累积病理反应^[13],随机性效应通常与肿瘤发生和遗传缺陷有关^[17]。

由于低剂量辐射暴露也可产生随机性效应,如肿瘤发生和遗传性疾病,这些影响可能在数年后出现,遗传缺陷与性腺吸收的辐射剂量呈线性上升关系,肿瘤发生的可能性取决于患者的年龄和性别,年轻患者风险更高,并且与有效剂量成正比。有效剂量是国际放射防护委员会(International Commission on Radiological Protection, ICRP)引入的辐射防护量,作为对各种身体器官和组织的平均吸收辐射剂量的加权平均值(组织加权因子取决于各种器官/组织的放射敏感性)^[18]。每个放射敏感器官/组织吸收的平均剂量通过载有热释光探测器的人体模型的直接测量获得,其乘以组织加权因子则为器官/组织的有效剂量。ICRP 推荐的诱发肿瘤风险因子和遗传效应风险因子分别为 $5.0 \times 10^{-5}/\text{mSv}$ 和 $1.3 \times 10^{-5}/\text{mSv}$,有效剂量与风险因子的乘积即为诱发肿瘤和遗传缺陷的放射性风险^[16,19]。

为了防止过度辐射暴露的危险,ICRP 制订了辐射暴露的剂量限值,以 Sievert(Sv)为单位,Sievert 是衡量辐射暴露随机性效应的指标,1 Sv 的辐射暴露与 5.5% 的肿瘤发生风险相关。根据 ICRP 指南,职业暴露应限制在 5 年内平均最高不超过 20mSv/年,一年内暴露不超过 50mSv。对于普通人,暴露应严格限制在 5 年内平均最高 1mSv/年,一年内暴露不超过 5mSv^[20]。

2 脊柱微创手术的辐射暴露

2.1 椎间孔镜技术

椎间孔镜技术是通过特殊设计的工作套管、脊柱内镜和配套的成像系统共同组成的一个脊柱微创手术系统来完成腰椎间盘摘除的手术。Ipreburg 等^[21]采用椎间孔镜技术对 L4/5 及以上的椎间盘切除,平均总透视时间为 38.4 秒,患者遭受到的辐射暴露剂量平均为 1.5mSv。对于 L5/S1 椎间盘切除,平均透视时间为 54.6s,患者遭受到的辐射暴露剂量平均为 2.1mSv。此研究的平均总透视时间比之前报道的时间少约 3.5 倍^[22],且与术者初始使用椎间孔镜进行治疗的前 100 例患者相比,此研究中患者遭受到的辐射暴露剂量减少了 3.5 倍。由此可见,椎间孔镜技术对患者的辐射暴露很小并且在 1~2mSv 的范围内,虽然 L5/S1 椎间盘切除术会产生更多的辐射暴露,但与传统手术方式相比,并无太大差别。

2.2 经皮椎体成形术(PVP)及经皮椎后凸成形术(PKP)

PVP 是通过向病变椎体内注入骨水泥达到强化椎体的技术,PKP 是先用球囊扩张器扩张骨折的椎体后再注入骨水泥以强化椎体的技术,PVP 及 PKP 主要用于骨质疏松性椎体压缩性骨折的治疗,均可以使骨折的椎体高度得

到一定程度的恢复,且两者在操作中都需要长时间的透视,这必然增加了患者遭受到的辐射暴露。在 PVP 及 PKP 中,Perisinakis 等^[23]报道的总透视时间平均为 10.1min,年龄和性别标准化患者平均有效剂量和性腺剂量值分别为 12.7mSv 和 0.5mSv,平均皮肤入口剂量为 173~233mSv,这些值远高于标准放射检查的患者遭受的辐射暴露。其中皮肤入口剂量依赖于辐射源与皮肤距离,若总透视时间延长和/或辐射源-皮肤距离小于 35cm,则可能发生皮肤损伤。PKP 中的辐射暴露对于患者的肿瘤发生风险为 41/100000,遗传缺陷的风险为 1/100000。而在 PVP 中,辐射暴露对于患者的肿瘤发生风险为 1/580,遗传缺陷的风险为 1/20000^[16]。因此,PVP 或 PKP 对患者的辐射风险相当大,这些负面效应可能需要较长时间才能显现,应该将其纳入临床术式选择的考虑范围内。

2.3 经皮椎弓根螺钉固定术

经皮椎弓根螺钉固定技术采用 C 型臂透视机进行椎弓根精确定位,且在透视监测下置入椎弓根螺钉,由于其特殊的连接杆置入技术,术中不需暴露椎旁肌肉、横突和关节突,显著减少出血,保护了肌肉和脊神经后支,最大限度地避免手术导致的副损伤,再通过器械行骨折复位,或在通道下完成椎管减压椎间融合术。

在标准 C 型臂透视机辅助下,Bronsard 等^[24]将采用经皮椎弓根螺钉固定术与传统手术方式的 60 例患者的术中辐射进行比较,传统手术方式的平均总透视时间为 29.49s,术中辐射的有效剂量为 0.55mSv,而经皮椎弓根螺钉固定术的平均总透视时间为 139.67s,术中辐射的有效剂量为 1.51mSv,经皮椎弓根螺钉固定术产生辐射的有效剂量比传统手术方式高 3 倍左右。由此可见,经皮椎弓根螺钉固定术在发挥其优势的同时也极大地增加了患者遭受的辐射暴露,且学习曲线陡峭,从而限制了该技术的使用。

2.4 脊柱显微外科手术

脊柱显微外科手术是指在脊柱外科手术中运用显微镜,扩大手术视野,通过较小的皮肤切口进行手术操作,可避免椎旁肌肉的过度牵拉与损伤,同时增加术中切除病变组织的精确度。目前主要包括显微镜辅助下颈前路、后路椎间盘摘除术及后路腰椎间盘摘除手术等^[25,26]。Zhang 等^[27]通过显微镜辅助下经椎间孔腰椎椎间融合术(transforaminal lumbar interbody fusion, TLIF)与传统 TLIF 两种术式的比较,发现显微镜辅助手术组术中出血量及术后引流量明显低于传统手术组,而两组手术时间和术中辐射暴露时间无明显差异。这是由于显微镜目前仅限于术中减压及植骨融合时使用,而辐射暴露主要产生于微创手术中的工作通道定位及椎弓根螺钉置入,因此,脊柱外科手术中显微镜的使用对患者的辐射暴露并无显著影响。

3 应对措施

3.1 辅助操作技术

钱宇等^[28]采用精确定位法减少了术中总曝光次数、总曝光时间、总透视时间及总手术时间,罗小平等^[29]借助自制的椎弓根螺钉角度定位仪辅助进钉,每枚螺钉置入过程中透视的平均时间为 5.06 ± 0.68 s,患者术区所受辐射剂量为 $65.31 \pm 5.52 \mu\text{Sv}/\text{钉}$,而徒手置钉组透视平均时间为 14.69 ± 1.86 s,患者术区所受辐射剂量为 $199.37 \pm 15.36 \mu\text{Sv}/\text{钉}$,这两种方式均有效地降低了术中透视时间及对患者的辐射暴露。

3.2 计算机导航技术

标准 C 型臂透视机为脊柱外科最常用的术中监测仪器,但其具有明显的局限性,且频繁移入和移出手术区域亦会增加感染几率。目前,已经开发出计算机导航系统,由许多协同行动的元件组成,成像机制是收集荧光图像,将其导入计算机工作站,该计算机工作站创建兴趣解剖结构的三维(3D)重建,该计算机系统与专门的光学相机和手术器械相互作用,以指导螺钉的实时置入,而无需重复收集荧光图像,其可提高脊柱术中螺钉放置精确度及减少辐射暴露^[8]。如:基于术中 MRI 和术前 CT 的计算机导航技术。

术中 MRI 是脊柱外科领域的一项新技术,可显著减少患者和术者的术中辐射暴露。术中 MRI 对于软组织具有更好的分辨率,Choi 等^[30]利用术中 MRI 对 89 例接受椎间孔镜下腰椎间盘突出切除术的患者进行手术部位定位和减压确认,在椎间盘在脱出及游离的情况下,术中 MRI 成功检测到术中减压不足。但术中 MRI 对于骨组织分辨力较差,同时增加了手术时间及费用,这一点也限制了其在脊柱外科的应用。

计算机辅助技术基于术前脊柱 CT 断层扫描,层厚 1mm,将 CT 所采集数据以 DICOM 格式导入计算机,利用 Mimics 软件进行脊柱数据分析,生成目标椎体的三维重建模型,通过相关软件模拟椎体成形术或经皮椎弓根螺钉置入术,确定穿刺针进针点、角度及深度或椎弓根螺钉置入最佳尺寸及方向。Fei 等^[31]对 7 例骨质疏松性椎体压缩性骨折患者使用了计算机辅助下的 PVP 技术,基于术前 CT 数据,在 MIMICS 软件中构建了模拟伤椎 PVP(通过双侧经椎弓根入路)手术的 3D 模型,确定了双侧皮肤进针点、方向、角度及插入深度。术中患者的穿刺精确度明显提高,同时,患者的术中透视次数为 (7.9 ± 1.7) 次,与 Li 等^[32]报道的实验结果相似,均证实了计算机辅助技术有助于减少患者术中辐射暴露。

3.3 3D 打印导航模板技术

3D 打印是快速成型技术的一种,基于术前 CT 扫描,计算机辅助下确定椎弓根螺钉置入位置、方向及角度,并根据椎板、棘突及关节突后面的表面解剖形态设计出个体化椎体导航模板,保存所有数据,传送至 3D 打印机,使用沉积聚氨酯粉末打印出椎弓根螺钉置入导航模板,此为 3D 打印导航模板技术。

在脊柱外科中,将导航模板与椎体后方骨面贴合进行椎弓根螺钉置入,由于定位精确,不仅使得脊柱外科手

术时间明显降低,且术中透视次数大幅减少,患者遭受的辐射暴露亦明显降低^[33]。但导航模板与骨面的贴合需要更多软组织的剥离,一定程度上会增加出血量,且 3D 打印设备昂贵,从而限制了其在临床上的广泛应用。

4 小结

目前,脊柱外科手术中使用最普遍的是标准 C 型臂透视机,微创手术在其透视下将会明显增加辐射暴露,且远远高于传统手术方式,虽然已经出现新的成像模式及手术方式,例如:计算机导航技术及计算机辅助技术、3D 打印导航模板技术,但其在成本、培训要求和操作时间方面还有很大的局限性。辐射暴露是脊柱外科手术中必然会产生附加影响,在选择手术方式时,有必要将其设定在考虑范围内。辐射暴露所引起的确定性效应虽然很少出现,但其潜在的随机性效应(包括肿瘤发生和遗传缺陷)将会影响患者将来的生活质量和健康,应该得到重视。

5 参考文献

1. Hadelberg UP, Harel R. Hazards of ionizing radiation and its impact on spine surgery[J]. World Neurosurg, 2016, 92: 353–359.
2. Srinivasan D, Than KD, Wang AC, et al. Radiation safety and spine surgery: systematic review of exposure limits and methods to minimize radiation exposure [J]. World Neurosurg, 2014, 82(6): 1337–1343.
3. Albert JM. Radiation risk from CT: implications for cancer screening[J]. AJR Am J Roentgenol, 2013, 201(1): W81–87.
4. Reiser EW, Desai R, Byrd SA, et al. C-arm positioning is a significant source of radiation in spine surgery[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2017, 42(9): 707–710.
5. Yamashita K, Higashino K, Wada K, et al. Radiation exposure to the surgeon and patient during a fluoroscopic procedure: how high is the exposure dose? a cadaveric study [J]. Spine(Phila Pa 1976), 2016, 41(15): 1254–1260.
6. Kukreja S, Haydel J, Nanda A, et al. Impact of body habitus on fluoroscopic radiation emission during minimally invasive spine surgery[J]. J Neurosurg Spine, 2015, 22(2): 211–218.
7. Mariscalco MW, Yamashita T, Steinmetz MP, et al. Radiation exposure to the surgeon during open lumbar microdiscectomy and minimally invasive microdiscectomy: a prospective, controlled trial[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2011, 36(3): 255–260.
8. Narain AS, Hijji FY, Yom KH, et al. Radiation exposure and reduction in the operating room: Perspectives and future directions in spine surgery[J]. World J Orthop, 2017, 8(7): 524–530.
9. Giordano BD, Baumhauer JF, Morgan TL, et al. Cervical spine imaging using standard C-arm fluoroscopy: patient and surgeon exposure to ionizing radiation [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2008, 33(18): 1970–1976.
10. El Teele NE, El Ahmadieh TY, Patel BM, et al. Minimizing

- radiation exposure in minimally invasive spine surgery: lessons learned from neuroendovascular surgery[J]. *Neurosurg Clin N Am*, 2014, 25(2): 247–260.
11. Smith TA, Kirkpatrick DR, Smith S, et al. Radioprotective agents to prevent cellular damage due to ionizing radiation[J]. *J Transl Med*, 2017, 15(1): 232.
12. Morgan WF, Day JP, Kaplan MI, et al. Genomic instability induced by ionizing radiation[J]. *Radiat Res*, 1996, 146(3): 247–258.
13. Christensen DM, Iddins CJ, Sugarman SL, et al. Ionizing radiation injuries and illnesses[J]. *Emerg Med Clin North Am*, 2014, 32(1): 245–265.
14. Mendelsohn D, Strelzow J, Dea N, et al. Patient and surgeon radiation exposure during spinal instrumentation using intraoperative computed tomography-based navigation[J]. *Spine J*, 2016, 16(3): 343–354.
15. Lee K, Lee KM, Park MS, et al. Measurements of surgeons' exposure to ionizing radiation dose during intraoperative use of C-arm fluoroscopy[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2012, 37(14): 1240–1244.
16. Fitousi NT, Efstathiopoulos EP, Delis HB, et al. Patient and staff dosimetry in vertebroplasty [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2006, 31(23): E884–890.
17. Hauri D, Spycher B, Huss A, et al. Domestic radon exposure and risk of childhood cancer: a prospective census-based cohort study[J]. *Environ Health Perspect*, 2013, 121(10): 1239–1244.
18. International Commission on Radiological Protection. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection[M]. *Ann ICRP*, 1990, 21.
19. Perisinakis K, Theocharopoulos N, Damilakis J, et al. Estimation of patient dose and associated radiogenic risks from fluoroscopically guided pedicle screw insertion [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2004, 29(14): 1555–1560.
20. Anonymous. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection[M]. *ICRP publication 103, Ann ICRP*, 2007, 37(2–4): 1–332.
21. Ipremburg M, Wagner R, Godschalx A, et al. Patient radiation exposure during transforaminal lumbar endoscopic spine surgery: a prospective study[J]. *Neurosurg Focus*, 2016, 40(2): E7.
22. Ahn Y, Kim CH, Lee, J H, et al. Radiation exposure to the surgeon during percutaneous endoscopic lumbar discectomy: a prospective study[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2013, 38(7): 617–625.
23. Perisinakis K, Damilakis J, Theocharopoulos N, et al. Patient exposure and associated radiation risks from fluoroscopically guided vertebroplasty or kyphoplasty[J]. *Radiology*, 2004, 232(3): 701–707.
24. Bronsard N, Boli T, Challali M, et al. Comparison between percutaneous and traditional fixation of lumbar spine fracture: intraoperative radiation exposure levels and outcomes [J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2013, 99(2): 162–168.
25. Cai RZ, Wang YQ, Wang R, et al. Microscope-assisted anterior cervical discectomy and fusion combined with posterior minimally invasive surgery through tubular retractors for multisegmental cervical spondylotic myelopathy: a retrospective study[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2017, 96(35): e7965.
26. 陆晓生, 彭昊, 韦文, 等. 显微内窥镜与显微镜下手术治疗腰椎管狭窄症的对比研究[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2009, 19(9): 671–675.
27. Zhang W, Duan L, Shang X, et al. Effectiveness of minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion assisted with microscope in treatment of lumbar degenerative disease [J]. *Zhongguo Xiu Fu Chong Jian Wai Ke Za Zhi*, 2013, 27(3): 268–273.
28. 钱宇, 何磊, 梁文清, 等. 精确定位法透视减少胸腰段脊柱骨折内固定术中的辐射暴露[J]. *中华骨科杂志*, 2015, 35(8): 849–853.
29. 罗小平, 陈瑞生, 李基, 等. 自制椎弓根螺钉角度定位仪减少术中 X 射线辐射及并发症的初步研究[J]. *中国医学影像学杂志*, 2016, 24(7): 544–546, 548.
30. Choi G, Modi HN, Prada N, et al. Clinical results of XMR-assisted percutaneous transforaminal endoscopic lumbar discectomy[J]. *J Orthop Surg Res*, 2013, 8:14.
31. Fei Q, Zhao F, Meng H, et al. Modified percutaneous vertebroplasty assisted by preoperative CT-based digital design: a new technique for osteoporotic vertebral compression fracture [J]. *Zhonghua Yi Xue Za Zhi*, 2016, 96(9): 731–735.
32. Li J, Lin J, Xu J, et al. A Novel Approach for Percutaneous Vertebroplasty Based on Preoperative Computed Tomography-Based Three-Dimensional Model Design[J]. *World Neurosurg*, 2017, 105: 20–26.
33. Li X, Zhang Q, Zhao C, et al. Surgical application of pedicle drill template navigation technology for complicated scoliosis[J]. *Zhonghua Yi Xue Za Zhi*, 2014, 94(11): 840–843.

(收稿日期:2018-08-01 修回日期:2018-09-08)

(本文编辑 彭向峰)