

- surgery [J]. *Ann Thorac Surg*, 2000, 70(1):243-247.
- [13] Nagahiro I, Andou A, Aoe M, et al. Pulmonary function, postoperative pain, and serum cytokine level after lobectomy: a comparison of VATS and conventional procedure [J]. *Ann Thorac Surg*, 2001, 72(2):362-365.
- [14] Franke A, Lantea W, Fackeldey V, et al. Pro-inflammatory cytokines after different kinds of cardio-thoracic surgical procedures; is what we see what we know [J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2005, 28(4):569-575.
- [15] Walker WS, Leaver HA. Immunologic and stress responses following video-assisted thoracic surgery and open pulmonary lobectomy in early stage lung cancer [J]. *Thorac Surg Clin*, 2007, 17(2):241-249.
- [16] Friscia ME, Zhu J, Kolff JW, et al. Cytokine response is lower after lung volume reduction through bilateral thoracoscopy versus sternotomy [J]. *Ann Thorac Surg*, 2007, 83(1):252-256.
- [17] 王长利, 张真发, 王劲, 等. 早期非小细胞肺癌胸腔镜与小切口根治性切除的急性期反应比较 [J]. *中国肿瘤临床*, 2008, 35(2):66-70.
- [18] Long H, Lin ZC, Situ DR, et al. Cytokine responses after lobectomy: a prospective randomized comparison of video-assisted thoracoscopic surgery and minimal incision thoracotomy [J]. *Ai Zheng*, 2007, 26(9):991-995.
- [19] Szczesny TJ, Slotwinski R, Stankiewicz A, et al. Interleukin 6 and interleukin 1 receptor antagonist as early markers of complications after lung cancer surgery [J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2007, 31(4):719-724.
- [20] Whitson BA, D'Cunha J, Andrade RS, et al. Thoracoscopic versus thoracotomy approaches to lobectomy: differential impairment of cellular immunity [J]. *Ann Thorac Surg*, 2008, 86(6):1735-1744.
- [21] Ito Y, Oda M, Tsunozuka Y, et al. Reduced perioperative immune response in video-assisted versus open surgery in a rat model [J]. *Surg Today*, 2009, 39(8):682-688.
- [22] Gitzelmann CA, Mendoza-Sagaon M, Talamini MA, et al. Cell-mediated immune response is better preserved by laparoscopy than laparotomy [J]. *Surgery*, 2000, 127(1):65-71.
- [23] 张建萍, 卢丹, 王维, 等. 腹腔镜与开腹子宫切除术对机体免疫功能影响的比较研究 [J]. *实用妇产科杂志*, 2002, 18(2):88-90.
- [24] Walker WS, Codispoti M, Soon SY, et al. Long-term outcomes following VATC lobectomy for non-small cell bronchogenic carcinoma [J]. *Eur J Cardio-Thorac Surg*, 2003, 23(3):397-402.
- [25] Ng CS, Wan S, Hui CW, et al. Video-assisted thoracic surgery for early stage lung cancer can short term immunological advantages improve long term survival [J]? *Ann Thorac Cardiovasc Surg*, 2006, 12(5):308-312.

(收稿日期:2010-09-25 修回日期:2011-03-22)

· 综 述 ·

仿真体模研制及在胸部 CT 应用的进展*

赵峰综述, 曾勇明[△]审校

(重庆医科大学附属第一医院放射科 400016)

关键词: 体层摄影术, X 线计算机, 辐射剂量, 仿真体模, 胸部

doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2011.23.035

文献标识码: A

文章编号: 1671-8348(2011)23-2371-03

仿真体模 (anthropomorphic phantom) 是根据人体参数, 与人体组织具有相同或相近散射和吸收系数相似的所谓“组织等效材料 (tissue equivalent materials)”制成的具有骨骼、肌肉、脏器的人体模型。它具有外部形态相似性、组织辐射等效性、内部结构仿真性、辐射剂量可测试性 4 大特点。目前它已成为国内外放射防护、诊断、治疗、教学和辐射标准研究中作为“人体替身”和物质能量、信息传递的“稳定受体”, 进行剂量可视化、量化“模拟的工具”而广为应用^[1]。现就仿真胸部体模研制及其在 CT 应用方面的新进展作一综述。

1 仿真体模国内外研制的进展

1.1 国外仿真体模研制的进展 体模发展可以追溯到 20 世纪初期, 1906 年奥地利放射物理学家 Kienbock 将水作为肌肉的替代物, 用石蜡作为软组织的替代物研究射线对人体组织的作用。1949 年 Jones 等在石蜡中掺入了氧化镁和二氧化钛等高原子的无机添加材料并开始应用于制作简单的仿真辐照体

模及辐射剂量测量中。1956 年有学者首次把合成高分子材料引入组织辐射等效材料的研究中, 选用聚乙烯为原材料合成了世界上第一具聚乙烯仿真辐照体模。1961 年 Stacey 等用橡胶作为组织辐射等效材料, 制成 Temes 体模进行放射剂量测定。20 世纪 60 年代中期, 美国的 Alderson 实验室推出了改进型橡胶仿真辐照体模, 同时开始了仿真辐照体模放射诊断、治疗、教育、研究系列体模的开发, 成立了最早对外销售仿真辐照体模及组织辐射等效材料的公司, 该公司的主要产品是 RANDO 仿真辐照体模, 它含有真人骨骼、体腔和拟人肺。1984 年美国 Lawrence Livermore 胸肺体模已有剂量测定、疾病模拟, 检测机器人和人员训练等 10 种功能。1985 年 Wielopolski 等向聚丙烯酰胺中加入添加剂使得该材料的元素组成、比重、电子密度和形态上都与模拟组织更加相似, 由于聚丙烯酰胺是一种可加工成各种复杂形状、并且易于制得、均一密度的材料, 所以其在用于制造形状复杂的人体器官等效材料方面具有一定的优势。

随着现代科技进步和影像医学的迅速发展,体模材料和相关技术日趋完善,体模向系列化和商品化发展,其中 CIRS 及 KYOTO KAGAKU 等公司研制并销售多种应用于 X 线/CT、核磁共振、超声、放疗、乳腺等研究领域不同型号商用体模。KYOTO KAGAKU 公司开发的胸部 CT 筛查仿真体模(LSCT001)包括了双臂上举的胸部仿真体模、模拟肿瘤和剂量测量装置 3 部分,开发用于肺癌筛查中优化放射剂量和其他扫描条件的 CT 体模,该体模设计可用于早期肺癌如磨玻璃密度影(ground glass opacity, GGO)的检测;胸部体模 N1“LUNG-MAN”用于普通 X 线和 CT 扫描,体模内部由纵隔、肺血管和可拆分腹部组成,并可以嵌入模拟肿瘤或其他模拟病变,其三维肺血管模型可以提供真人化的 X 线和 CT 图像。2008 年 Yoon 等^[2]研制出一种用猪肺经塑化后制成的仿真肺部体模,用高分辨 3D-CT 对活猪体内肺及塑化肺体模扫描并三维重建,对比二者解剖特征、体积及 CT 值,经塑化的肺体模保持着其原有复杂的解剖结构。

1.2 国内仿真体模研制的进展 国外多数体模的人体参数是按国际辐射防护委员会(international commission on radiological protection, ICRP)标准,根据欧美人种解剖参数确定的,与中国人体型、体质、辐射特征有显著差异。由于人体参数与国家、民族、出生地等有明显的相关性,因此中国的仿真人体模型必须符合中国人体的参数特性。我国于上世纪 80 年代初期开始相关研究,取得了较大进展。国内仿真辐照体模由当初单一组织辐射等效材料制成的均匀仿真体模发展为包括骨骼、肌肉和肺等多种组织辐射等效材料的非均匀体模,器官分布也基本按照真实人体分布,外形也由简单型向拟人化发展^[3]。1980 年以后,国内结合中国人特点开展了均匀体模、液体体模、非均匀体模的试制,并取得了较大进步。1986 年,四川大学林大全教授成功制作了中国首具男性仿真辐照体模。该体模包含一具真人骨骼和多种人工组织辐射等效材料制成的人体模拟脏器,其中肺组织辐射等效材料由发泡型高分子材料制成^[4]。2000 年林大全教授研制出中国成人男性 CDP-IC 型高端仿真胸部体模(体模身高 1.659 m,体质量 57.5 kg),它根据中国成人男性的人体参数特性,利用组织等效材料制造而成,因其具有模拟胸壁、纵隔、脊柱、肋骨等结构和良好的等效性,有很好的临床运用前景。曾勇明等^[5]研究认为该体模密度特征与实际的胸部有所不同,但对于不同数字 X 线成像系统用它来进行病变数量、图像质量及曝光剂量测量,效果是相同的。彭刚等^[6]对该仿真胸部体模组织等效性的影像学研究表明仿真胸部体模的 CT 断层解剖图像与人体结构基本符合,该体模呈双臂平放状态,与实际胸部 CT 扫描时受检者双臂上举不一致及体模缺少气管、肺血管等解剖结构,该体模的改进研制正在进行中。

2 仿真胸部体模在 CT 的应用进展

2.1 模拟肺部结节胸部低剂量 CT 检出的应用研究 在世界范围内肺癌的发病率及病死率持续增高。当今应用螺旋 CT 扫描作为早期肺癌筛查方法被广泛关注。由于肺内有空气与肺实质的良好对比,因此肺部最适合于低剂量 CT 扫描。研究表明胸部低剂量 CT 对早期肺癌发现率是胸部平片的 2.6~10 倍^[7-8]。肺部结节检出的影响因素很多,其中与扫描参数相关因素包括扫描层厚、重建间隔、螺距以及管电压、管电流;与非扫描参数相关因素的影响,包括结节位置、密度、大小、形状、边缘及图像显示方法等。

朱天照等^[9]的肺内模拟结节检出率研究发现低剂量组直径 5 mm 结节检出率为 89.7%,与常规剂量组比较差异无统计学意义,直径 10 mm 的结节在低剂量组与常规剂量组均全部检出。Muramatsu 等^[10]应用仿真胸部体模获得与肺部筛查相似的图像,并可清晰显示肺部病变,该研究发现高对比度($\Delta CT270$)时直径 6 mm 模拟肿瘤在肺尖、支气管分叉和肺底水平检出率均为 100%,与螺距及管电流无关;低对比度时($\Delta CT100$)在螺距 2.5 时模拟肿瘤图像对比度降低,影响了检出率;低剂量扫描时图像条状伪影程度增加,但模拟结节检出的无明显差异。Silverman 等^[11]研究 320 层容积 CT 仿真体模内模拟肺实性小结节的检出率,认为低剂量 CT 肺小结节检出的限制因素是图像噪声而不是空间分辨率,在低剂量时通过选择平滑重建可保证结节检出率,合理选择重建参数,在保证肺实性小结节检出率的同时,放射剂量可减少到低于目前的低剂量(5 mGy)的超低剂量(0.1 mGy)水平。

Funama 等^[12]用多排螺旋 CT 对模拟肺部磨玻璃密度影的体模研究结果显示,低剂量(21 mA、45 mA)CT 检查时 CT 值<800 HU 或更低密度的 GGO 模拟结节漏检率约为 60%、36%,CT 值高于<650 HU 的 GGO 结节在 21 mA、45 mA 时漏检率分别为 17%、8%,因此在低管电流下磨玻璃密度影难以检出,低剂量 CT 应用于肺部磨玻璃密度影的检出有一定限度。Rusinek 等^[13]研究指出 20 mA 时虽然低剂量 CT 的图像噪声和伪影增多,未能检出磨玻璃影,在一定程度上降低了肺结节检出的敏感性和特异性,但能够可靠检出大于 5 mm 的肺结节,与标准剂量扫描相比差异无统计学意义。

2.2 仿真胸部体模在低剂量 CT 扫描技术的优化中的应用 影响 CT 剂量的扫描参数包括管电流、电压、扫描方式及扫描范围,管电流是最常用的控制参数,在其他扫描参数相同的情况下放射剂量的多少与管电流呈线性相关,为了减少放射剂量,常用固定最低管电流的方法进行低剂量筛查,文献报道的常用低剂量管电流多为 25~50 mA 不等,在低剂量 CT 筛查时图像质量随肺部位置和筛查者体型不同而改变,肺尖和肺底周围有较多组织重叠,图像有较多伪影,明显影响病变显示。

自动曝光技术(automatic exposure control, AEC)于 20 世纪 90 年代末研制出,它通过患者放射线衰减值调控管电流来控制放射剂量^[14]。采用自动曝光技术可以较好地解决不同体厚处光子量不均匀问题。Brisse 等^[15]应用新生儿、1 岁、5 岁和 10 岁 4 种儿童仿真体模测量多排螺旋 CT 检查器官吸收剂量,发现应用自动曝光技术能显著减少胸部器官剂量(甲状腺减少 31%~61%、肺组织 21%~37%、食管 17%~34%、乳腺 10%~39%)。Matsumoto 等^[16]研究发现低剂量肺部 CT 检查中 3D-AEC 技术能够在保证肺部不同位置及不同体型受检者图像质量的同时降低放射剂量。Gomi 等^[17]则认为应用 AEC 技术可有效降低放射剂量,低剂量胸部筛查时采用自动曝光技术结合铝制滤线器能够在不增加放射剂量的同时明显改善图像质量。

Einstein 等^[18]应用大体形态及 X 线图像类似男性或女性的仿真体模模拟冠状动脉断层扫描血管造影(CT angiography, CTA)检查,在包括 64 层螺旋扫描和 280 层容积扫描等 6 种不同扫描方式条件下,容积扫描与螺旋扫描相比较显著降低冠状动脉 CTA 检查放射剂量。

2.3 仿真胸部体模在 CT 诊断中器官吸收剂量测定及有效剂量评估 CT 剂量研究中剂量长度乘积(dose length product,

DLP)方法计算有效剂量是常用方法。Hurwitz 等^[19]应用金属氧化物半导体场效应晶体管技术探测多排螺旋 CT 临床常规扫描时女性仿真体模 20 个器官受照射剂量,体模器官直接测量的有效剂量较 DLP 方法探测的有效剂量高 14%~37%,研究表明用 DLP 方法计算的有效剂量低于器官直接测量的有效剂量。因此既往 DLP 方法报道的有效剂量低于实际器官剂量和体部总体有效剂量。

Fujii 等^[20]比较 6 岁儿童体模和成人仿真体模 CT 检查中器官和有效剂量,由于儿童甲状腺射线高敏感性,甲状腺的器官剂量高于成人,在儿童胸部检查中运用自动管电流技术和甲状腺防护设备能够降低甲状腺剂量。Feng 等^[21]在儿科 64 层 CT 检查放射剂量和致癌风险的仿真体模研究中发现常规儿科胸部 CT 检查中乳腺器官剂量为 7.89 mGy,含有较高放射敏感性的器官(包括乳腺、甲状腺、结肠和肺)时相关致癌风险增长约 0.16%。

3 展 望

随着放射学的迅猛发展,各种新 CT 技术不断应用于临床,推动医学的发展。与此同时,公众辐射危害已成为一个严重问题。在保证 CT 影像图像质量的同时,合理控制放射线辐射剂量,有必要实施 CT 检查质量控制和剂量管理,仿真胸部体模会越来越显现出其重要性;同时由于研制仿真体模的材料和技术日趋完善,仿真体模将受到更多的关注与认识。

参考文献:

[1] 林大全,王远萍,张春德. 仿真辐照人体模型的研究与医学应用[J]. 医疗设备,2003,16(9):38.

[2] Yoon S, Henry RW, Bouley DM, et al. Characterization of a novel anthropomorphic plastinated lung phantom [J]. Med Phys, 2008, 35(12):5934-5943.

[3] 曾勇明. 数字 X 线成像技术操作规范与剂量优化[M]. 重庆:重庆出版社,2009:117.

[4] 林大全,张纪淮,王星泉,等. 中国模拟人--非均匀组织等效辐照体模研制[J]. 医学物理,1985,2(3):23.

[5] 曾勇明,吴富荣,张志伟,等. CR 入射体表剂量与肺部病变检出相关性的实验研究[J]. 重庆医学,2009,38(2):130-133.

[6] 彭刚,曾勇明,赵峰,等. 中国人仿真胸部体模组织等效性的影像学研究[J]. 重庆医科大学学报,2010,35(7):1060-1063.

[7] MacRedmond R, McVey G, Lee M, et al. Screening for lung cancer using low dose CT scanning: results of 2 year follow up [J]. Thorax, 2004, 61(1):54-56.

[8] Jett J, Midthun D. Screening for lung cancer: current status and Future directions; Thomas A. Neff lecture [J]. Chest, 2004, 125(5 Suppl):S158-S162.

[9] 朱天照,唐光健,蒋学祥. 低剂量螺旋 CT 肺结节扫描与常规剂量 CT 的对照研究[J]. 中华放射学杂志,2004,38(4):428-431.

[10] Muramatsu Y, Tsuda Y, Nakamura Y, et al. The development and use of a chest phantom for optimizing scanning

techniques on a variety of low-dose helical computed tomography devices[J]. J Comput Assist Tomogr, 2003, 27(3):364-374.

- [11] Silverman JD, Paul NS, Siewerdsen JH. Investigation of lung nodule detectability in low-dose 320-slice computed tomography[J]. Med Phys, 2009, 36(5):1700-1710.
- [12] Funama Y, Awai K, Liu D, et al. Detection of nodules showing ground-glass opacity in the lungs at low-dose multidetector computed tomography: phantom and clinical study [J]. J Comput Assist Tomogr, 2009, 33(1):49-53.
- [13] Rusinek H, Naidich DP, McGuinness G, et al. Pulmonary nodule detection: low-dose versus conventional CT [J]. Radiology, 1998, 209(1):243-249.
- [14] McCollough CH, Bruesewitz MR, Kofler JM. CT dose reduction and dose management tools: overview of available options[J]. Radiographics, 2006, 26(2):503-512.
- [15] Brisse HJ, Robilliard M, Savignoni A, et al. Assessment of organ absorbed doses and estimation of effective doses from pediatric anthropomorphic phantom measurements for multi-detector row CT with and without automatic exposure control[J]. Health Phys, 2009, 97(4):303-314.
- [16] Matsumoto K, Ohno Y, Koyama H, et al. 3D automatic exposure control for 64-detector row CT: Radiation dose reduction in chest phantom study[J]. Eur J Radiol, 2009, 77(3):522-527.
- [17] Gomi S, Muramatsu Y, Tsukagoshi S, et al. Low-dose CT screening for lung cancer with automatic exposure control: phantom study[J]. Radiol Phys Technol, 2008, 1(2):244-250.
- [18] Einstein AJ, Elliston CD, Arai AE, et al. Radiation dose from single-heartbeat coronary CT angiography performed with a 320-detector row volume scanner[J]. Radiology, 2010, 254(3):698-706.
- [19] Hurwitz LM, Yoshizumi TT, Goodman PC, et al. Effective dose determination using an anthropomorphic phantom and metal oxide semiconductor field effect transistor technology for clinical adult body multi-detector array computed tomography protocols[J]. J Comput Assist Tomogr, 2007, 31(4):544-549.
- [20] Fujii K, Aoyama T, Koyama S, et al. Comparative evaluation of organ and effective doses for paediatric patients with those for adults in chest and abdominal CT examinations[J]. Br J Radiol, 2007, 80(956):657-667.
- [21] Feng ST, Law MW, Huang B, et al. Radiation dose and cancer risk from pediatric CT examinations on 64-slice CT: A phantom study[J]. Eur J Radiol, 2010, 76(2):e19-e23.