

论 著

能谱CT去金属伪影技术对髋关节置换患者置换物伪影及成像质量效果影响研究*

张晓慧 袁 颖*
首都医科大学附属北京友谊医院放射科
(北京 100050)

【摘要】目的 探循能谱CT去金属伪影(MAR)技术对髋关节置换患者置换物伪影及成像质量效果影响研究。方法 回顾性研究,纳入首都医科大学附属北京友谊医院于2022年1月至2023年10月收治的42例髋关节置换患者为研究对象,均应用CT能谱及MAR技术,基于原始能谱CT扫描数据,权重能级范围70~130keV,并以20keV能级为间隔(依次为70keV、90keV、110keV及130keV),共计4组,所获单能量图像按MAR技术使用有无分为非MAR组、MAR组。观察两组置换物周围肌肉、周围骨组织、膀胱在相同能级下的信噪比(SNR)及伪影指数(AI)用以评估伪影情况,且由2名高年资影像医师对置换物周围肌肉、骨质结构及盆腔器官情况进行主观评分用以评估成像质量效果。结果 随能级升高,两组置换物周围肌肉、周围骨组织、膀胱SNR均有升高,AI均有降低,且在70~110KeV能级条件下,MAR组置换物周围肌肉、周围骨组织SNR均高于非MAR组,AI均低于非MAR组,差异有统计学意义($P<0.05$),在70~130KeV能级条件下,MAR组膀胱SNR均高于非MAR组,AI均低于非MAR组,差异有统计学意义($P<0.05$);随能级升高,非MAR组周围肌肉、盆腔器官主观评分先升后降,于110KeV抵达最高值,骨质结构主观评分逐步升高,MAR周围肌肉、骨质结构及盆腔器官情况主观评分均逐步升高,于70keV、90keV、110keV及130keV相同能级下,相较于非MAR组,MAR周围肌肉、骨质结构及盆腔器官情况主观评分均更高($P<0.05$)。结论 髋关节置换患者应用能谱CT联合MAR技术,置换物伪影得以减少,成像质量效果果有提高,推荐在110KeV能级水平上采用MAR技术,可最大限度消除金属伪影,并充分显示临近组织,更有助于临床诊断。

【关键词】髋关节置换;能谱CT;去金属伪影
【中图分类号】R814
【文献标识码】A
【基金项目】北京市卫生和计划生育科技计划(2020-B-002)
DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2024.03.052

Study on the Effect of Metal Artifact Removal Technique with Energy Spectrum CT on Artifact and Image Quality in Patients with Hip Replacement*

ZHANG Xiao-hui, YUAN Ying*
Department of Radiology, Beijing Friendship Hospital Affiliated to Capital Medical University, Beijing 100050, China

ABSTRACT
Objective To investigate the effect of energy spectrum CT metal artifact removal (MAR) on the artifact and image quality in patients with hip replacement. **Methods** A retrospective study was conducted on 42 patients with hip replacement admitted to Beijing Friendship Hospital, Capital Medical University from January 2022 to October 2023. All patients were treated with CT spectroscopy and MAR technology. Based on the original CT scanning data, the energy level was determined to be 70-130keV. There were 4 groups with 20keV energy levels as intervals (70keV, 90keV, 110keV and 130keV in turn), and the single energy images obtained were divided into non-MAR group and MAR group according to the use of MAR technology. The signal-to-noise ratio (SNR) and artifact index (AI) of the muscles, bone tissue and bladder around the two groups of replacements at the same energy level were observed to evaluate the artifact condition, and the conditions of the muscles, bone structure and pelvic organs around the replacement were subically scored by two senior imaging physicians to evaluate the imaging quality. **Results** With the increase of energy level, SNR of muscle, bone tissue and bladder around the replacement increased, while AI decreased in both groups. Under the condition of 70-110keV energy level, SNR of muscle and bone tissue around the replacement in MAR group was higher than that in non-MAR group, and AI was lower than that in non-MAR group, with statistical significance ($P<0.05$). At 70-130KeV energy level, SNR and AI in MAR group were all higher than those in non-MAR group, and the difference was statistically significant ($P<0.05$). With the increase of energy level, the subjective scores of the surrounding muscles and pelvic organs in the non-MAR group increased first and then decreased, and reached the highest value at 110KeV, and the subjective scores of the surrounding muscles, bone structure and pelvic organs gradually increased, and the subjective scores of the surrounding muscles, bone structure and pelvic organs gradually increased at the same energy level of 70keV, 90keV, 110keV and 130keV. Compared with the non-MAR group, the subjective scores of muscle, bone structure and pelvic organs around MAR were higher ($P<0.05$). **Conclusion** The application of energy spectrum CT combined with MAR technology in patients with hip replacement can reduce the artifacts of replacement and improve the imaging quality. MAR technology is recommended at the level of 110KeV, which can eliminate metal artifacts to the maximum extent and fully display adjacent tissues, and is more conducive to clinical diagnosis.
Keywords: Hip Replacement; Energy Spectrum CT; Removing Metal Artifacts

在人口老龄化进程加重形势下,髋关节炎、股骨头坏死等关节疾病逐年上升,据悉全球病例近2.4亿人,其中我国>50岁人群患病率为14.3%^[1]。随髋关节置换术日臻成熟,越来越多病例倾向选择该术式用于临床治疗,据估计,2019年全国髋关节置换手术量逾90万台^[2]。但于临床应用过程中,仍有部分患者会出现假体松动、骨折、感染等并发症,这可影响手术疗效,进而导致患者预后不佳^[3]。由此,及时发现诊断髋关节置换术后并发症并进行干预至关重要。现阶段术后复查主要采用常规CT检查,但髋关节置换术中使用金属植入物在常规CT检查中会形成星芒样或放射状伪影,原因主要为线束硬化及光子饥饿,可干扰周围组织及骨质观察,进而导致漏诊或误诊^[4]。随仪器革新发展,现今立足卷积神经网络(CNN)研发的能谱CT可瞬时切换高(140KV)/低电压(80KV)同源、同时、同向收集数据,并在在投影空间中解析获取101个单能量成像(40KeV~140KeV),可有效避免X线能量不纯形成的反射及散射导致的金属伪影,此外,减少伪影发生还可通过图像质量优化及最佳单能量图像选择来实现^[5]。但能谱CT仍存在一定局限,因宽带能谱光使用可导致测量物体X线吸收系数不确定,可能会在影像中表现出骨骼间带状伪影。且需根据患者个体化灵活选择最佳单能量图像^[6]。而作为专门用于金属伪影去除的去金属伪影(MAR)技术,能有效纠正由“光子饥饿”造成的低密度伪影,可在能谱CT自带单能量图像基础上进一步减少金属伪影^[7]。鉴于金属植入物大小、形态及材质乃至植入部位差异影响,利用MAR去除金属伪影效果存在一定差异。且MAR是否可用于髋关节、膝关节等大关节置换术后金属植入物伪影去除尚未见可靠证据,有待进一步研究证实。现作报道如下。

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性研究,研究时限:2022年1月至2023年10月;研究地点:首都医科大学附属北京友谊医院;研究对象:髋关节置换患者;研究例数:42例。

【第一作者】张晓慧,女,初级技师,主要研究方向:医学影像技术。E-mail: xiaohui891524@163.com
【通讯作者】袁 颖,男,主管技师,主要研究方向:心血管影像研究方向。E-mail: 715337108@qq.com

纳入标准：满足髌关节置换指征；均应用CT能谱及MAR技术；患者及家属对研究知情同意；排除标准：CT图像质量欠佳，原因归咎于患者自身或操作不当；精神认知异常；临床资料缺失。其中，男24例，女18例；年龄45~78岁，平均 (62.27 ± 8.52) 岁；手术原因：8例骨性关节炎、12例股骨颈骨折、20例股骨头坏死及2例强直性脊柱炎。研究申请已通过北京友谊医院伦理委员会核准并授意执行。

1.2 分组标准 基于原始能谱CT扫描数据，权定能级范围70~130keV，并以20keV能级为间隔(依次为70keV、90keV、110keV及130keV)，共计4组，所获单能量图像按MAR技术使用有分为非MAR组、MAR组。

1.3 方法

1.3.1 扫描方法 指导患者仰卧，头先进。采用256排Revolution型CT(美国GE公司)自髌关节置换术上下端(通常均>5cm)行CT扫描，设置扫描参数，管电压80/140kV快速切换，管电流采用Smart mA模式，电流变化范围180~320mA，准直器宽度0.625mm，旋转时间0.28s，螺距0.984，层厚0.6mm。重建间隔5mm，矩阵 512×512 。扫描后所获80/140kV融合CT图像数据传至GE公司AW4.7工作站，启用能谱分析软件GS1 viewer，基于原始能谱CT扫描数据，权定能级范围70~130keV，并以20keV能级为间隔，依次为70keV、90keV、110keV及130keV，共计4组，所获单能量图像按MAR技术使用有分为非MAR组、MAR组。

1.3.2 图像分析 信噪比(SNR)及伪影指数(AI)计算(客观评价)：在相同层面，测量置换物周围肌肉、周围骨组织、膀胱及皮下脂肪4个感兴趣区(ROI)(每个ROI大小约为 $30 \sim 64 \text{mm}^2$)的CT值及标准差(SD)，每个位置分别放3次ROI，重复测量3次取平均值，以CT皮下脂肪及SD皮下脂肪为基准(即在皮下脂肪放ROI)，测算置换物周围肌肉、周围骨组织、膀胱在相同能级下的信噪比(SNR)及伪影指数(AI)。计算公式如下^[8]： $\text{SNR} = \text{CT}_x \text{值} / \text{SD}_x \text{值}$ ，其中，x指代

置换物周围肌肉、周围骨组织及膀胱； $\text{AI} = (\text{SD}_x \text{值}^2 - \text{SD}_{\text{脂肪值}}^2)^{0.5}$ 。

置换物周围肌肉、骨质结构及盆腔器官情况主观评分：由2名高年资(工作年限12年、14年)放射医师在盲法下独立评估置换物周围肌肉、骨质结构及盆腔器官情况等结构金属伪影及周围组织情况，参考文献^[9]，采用Likert 5级评分法(1~5分)，以严重伪影产生，无法实施诊断计作1分，以严重伪影产生，难以实施诊断计作2分，以中度伪影产生，尚可实施诊断计作3分，以轻微伪影产生，不形成诊断干扰计作5分，以伪影极少或未形成，可明确诊断计作5分。若意见出现分歧，则经协商后统一口径。

1.4 统计学处理 应用SPSS 22.0软件作统计处理，符合正态分布计量资料以“ $\bar{x} \pm s$ ”形式表示，重复测量数据行独立样本t检验，若 $P < 0.05$ ，差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组置换物周围肌肉、周围骨组织、膀胱在相同能级下的SNR及AI比较 随能级升高，两组置换物周围肌肉、周围骨组织、膀胱SNR均有升高，AI均有降低，且在70~110KeV能级条件下，MAR组置换物周围肌肉、周围骨组织SNR均高于非MAR组，AI均低于非MAR组，差异有统计学意义($P < 0.05$)，在70~130KeV能级条件下，MAR组膀胱SNR均高于非MAR组，AI均低于非MAR组，差异有统计学意义($P < 0.05$)，详见表1-3。

2.2 两组置换物周围肌肉、骨质结构及盆腔器官情况主观评分比较 随能级升高，非MAR组周围肌肉、盆腔器官主观评分先升后降，于110KeV抵达最高值，骨质结构主观评分逐步升高，MAR周围肌肉、骨质结构及盆腔器官情况主观评分均逐步升高，于70keV、90keV、110keV及130keV相同能级下，相较于非MAR组，MAR周围肌肉、骨质结构及盆腔器官情况主观评分均更高($P < 0.05$)，详见表4。

表1 两组置换物周围肌肉在相同能级下的SNR及AI比较

能级	SNR值		t	P	AI值		t	P
	非MAR组	MAR组			非MAR组	MAR组		
70keV	0.52 ± 0.12	0.81 ± 0.36	4.953	0.000	15.69 ± 5.41	12.53 ± 3.72	3.116	0.003
90keV	0.80 ± 0.24	0.98 ± 0.25	3.366	0.001	13.26 ± 5.21	10.72 ± 3.24	2.683	0.009
110keV	1.12 ± 0.31	1.86 ± 0.61	7.009	0.000	11.57 ± 5.81	8.08 ± 2.73	3.523	0.001
130keV	1.91 ± 0.76	2.15 ± 0.49	1.720	0.089	9.04 ± 4.27	7.67 ± 3.28	1.649	0.103

表2 两组置换物周围骨组织在相同能级下的SNR及AI比较

能级	SNR值		t	P	AI值		t	P
	非MAR组	MAR组			非MAR组	MAR组		
70keV	1.01 ± 0.12	1.98 ± 0.23	24.232	0.000	39.41 ± 7.58	24.07 ± 5.60	10.549	0.000
90keV	1.19 ± 0.18	2.15 ± 0.34	16.172	0.000	35.84 ± 6.89	23.61 ± 5.42	9.041	0.000
110keV	1.51 ± 0.27	2.42 ± 0.47	10.880	0.000	30.15 ± 6.27	22.51 ± 5.20	6.078	0.000
130keV	2.71 ± 0.49	2.95 ± 0.69	1.838	0.070	22.47 ± 5.38	21.08 ± 4.96	1.231	0.222

表3 两组膀胱在相同能级下的SNR及AI比较

能级	SNR值		t	P	AI值		t	P
	非MAR组	MAR组			非MAR组	MAR组		
70keV	0.16 ± 0.07	1.05 ± 0.71	8.085	0.000	16.72 ± 6.45	8.03 ± 4.68	7.067	0.000
90keV	0.21 ± 0.12	1.16 ± 0.79	7.705	0.000	15.92 ± 6.35	7.75 ± 3.32	7.389	0.000
110keV	0.26 ± 0.21	1.32 ± 1.10	6.134	0.000	14.62 ± 5.72	7.29 ± 3.78	6.929	0.000
130keV	0.31 ± 0.17	1.40 ± 1.01	6.897	0.000	13.08 ± 6.03	7.07 ± 4.29	5.263	0.000

表4 两组置换物周围肌肉、骨质结构情况及盆腔器官情况主观评分比较

能级	周围肌肉		t	P	骨质结构		t	P	盆腔器官		t	P
	非MAR组	MAR组			非MAR组	MAR组			非MAR组	MAR组		
70keV	1.08±0.11	2.48±0.24	34.367	0.000	1.11±0.10	3.84±0.27	61.448	0.000	1.43±0.10	3.89±0.28	53.621	0.000
90keV	2.13±0.35	3.12±0.28	14.314	0.000	2.42±0.31	4.37±0.42	24.209	0.000	2.12±0.13	4.12±0.41	30.135	0.000
110keV	3.02±0.47	4.19±0.37	12.676	0.000	3.15±0.27	4.54±0.56	14.490	0.000	2.99±0.18	4.55±0.51	18.693	0.000
130keV	2.51±0.23	4.57±0.41	28.399	0.000	4.08±0.39	4.83±0.53	7.387	0.000	2.86±0.29	4.87±0.49	22.878	0.000

3 讨 论

在CT检查过程中，经髋关节置换术植入金属物通常可出现线束硬化及金属投影，前者是指机体经混合能量X射线束穿过后，组织首先吸收低能量X射线，使得高能量X射线穿透机体组织，X射线束平均能量获有整体提升，由此导致X射线束硬化形成杯状或条状伪影^[10]；后者是因X射线束穿透金属时强度骤然衰减引发CT投影数据失真形成的高密度条状伪影^[11]。虽然借助窗位降低、窗宽扩大以及骨算法重建可一定程度减少传统CT检查形成的金属植入物伪影，但造影过大可影响图像质量，且周围软组织难以有效显示、评估，此外，还无法解决X线束形成的硬化伪影^[12]。随CT仪器革新发展，能谱CT自身具有的单能量成像以及结合MAR技术在伪影去除作用日益明确，现已在义齿种植^[13]、颅内动脉瘤弹簧圈栓塞术^[14]、脊柱后固定术^[15]患者伪影去除上获有确切效果。但在髋关节置换术上，能谱CT联合MAR技术伪影去除效果尚缺乏深入研究。

通常来说，不同能级水平图像特征不一，处于40~65KeV水平的X线能量较低，穿透力不高，较易吸收，导致图像对比度增强，但与此同时噪音增强，图像质量普遍较差。而70KeV水平图像质量与120KV常规混合能量质量接近。而能谱CT能级范围为40~140KeV，考虑到辐射剂量不宜过高，兹本文以间隔20KeV进行划分，权定能级范围为70~130KeV。由本文结果显示：随能级上升，两组置换物周围肌肉、周围骨组织、膀胱SNR均有升高，AI均有降低。且与非MAR组相比，MAR组在70~110KeV能级条件下，置换物周围肌肉、周围骨组织SNR更高，AI更低，在70~130KeV能级条件下，膀胱SNR更高，AI更低。提示能谱CT联合MAR技术可减少髋关节置换术患者伪影及噪音。究其原因在于^[16-17]：MAR是在CNN基础上发展而来的，经过特征提取、非线性滤波及图像重建步骤可区分组织结构 and 射束硬化伪影区，且可预测部分伪影信息。而后对射线通过金属植入物后产生的光子饥饿现象形成的低信号进行数据处理，以便获取准确金属植入物及其周围组织投影数据，并考虑到金属植入物存在这一前提条件下，对图像数据进行重新计算，可有效降低金属伪影作用。但在130KeV能级条件下，能谱CT联合MAR技术较单一能谱CT在置换物周围肌肉、周围骨组织的伪影减少效果上并未体现明显益处。原因在于MAR在伪影校正时可能因过矫正导致形成新的伪影(主要是将具有较大密度差别的机构误当做伪影)，且能级过大时，还可影响软组织及肌肉的诊断分析。这与Bongers等^[18]研究证实相较于单一能谱CT，能谱CT联合MAR技术金属伪影去除效果更好结论相符，但该研究认为130KeV为最佳能级，与本文结论有所不符，究其原因可能与金属植入物大小、结构及形态差异有关。而在获有良好伪影去除效果的同时，还需充分显示金属植入物周围肌肉及组织乃至膀胱的关系，以便获得高质量图像进行准确临床诊断。但能级上升在减少AI值的同时，随之而来的问题是对比度下降，可影响金属植入物软组织层次对比^[19]。由此，笔者还与放射科医师一同协作，进一步探讨了能谱CT联合MAR技术对髋关节置换患者置换物成像质量效果。根据本文结果发现单一能谱CT在110KeV可同时兼顾到伪影去除及金属植入物周围组织及结构显示2个方面，且能谱CT联合MAR技术亦有助于髋关节置换患者置换物成像质量提高。这与李杰等^[20]研究表明≥110KeV水平可使脊柱患者获有较佳成像质量，便于临床诊断进行相符。

综上所述：髋关节置换患者应用能谱CT联合MAR技术，置换

物伪影得以减少，成像质量效果获有提高，推荐在110KeV能级水平上采用MAR技术，可最大限度消除金属伪影，并充分显示临近组织，更有助于临床诊断。但本文存在以下局限：(1)纳入样本数目较少，仅42例，尚待扩大样本量以使研究更具代表性；(2)未控制光子饥饿效应的影响，即未对金属植入物具体信息，诸如大小、形态及金属含量进行细化分类，由此可能导致研究结论出现一定偏倚；(3)本文权定能级范围为70~130KeV，以间隔20KeV进行划分，要明确最佳能级水平还有待研究从90~130KeV按间隔10KeV作进一步细分。

参考文献

[1]Katz JN,Arant KR,Loeser RF.Diagnosis and treatment of hip and knee osteoarthritis:a review[J].JAMA, 2021, 325 (6): 568-578.

[2] 中国老年保健协会. 髋膝关节置换围手术期加速康复专家共识[J]. 实用骨科杂志, 2021, 27 (11): 961-965.

[3]HEALTH Investigators,Bhandari M,Einhorn TA,et al.Total hip arthroplasty or hemiarthroplasty for hip fracture[J].N Engl J Med, 2019, 381 (23): 2199-2208.

[4]魏娟,李培岭,赵振江,等. 去金属伪影序列在腰椎金属植入物术后磁共振成像中的应用[J]. 中国CT和MRI杂志, 2022, 20 (12): 156-158. .

[5]Busi M,Kehl C,Frisvad JR,et al.Metal artifact reduction in spectral X-ray CT using spectral deep learning[J].J Imaging, 2022, 8 (3): 77.

[6]Laukamp KR,Lennartz S,Neuhaus VF,et al.CT metal artifacts in patients with total hip replacements:for artifact reduction monoenergetic reconstructions and post-processing algorithms are both efficient but not similar[J].Eur Radiol, 2018 , 28 (11): 4524-4533.

[7]Huang Z,Zhang G,Lin J,et al.Multi-modal feature-fusion for CT metal artifact reduction using edge-enhanced generative adversarial networks[J].Comput Methods Programs Biomed, 2022, 217: 106700.

[8]Hu Y,Pan S,Zhao X,et al.Value and clinical application of orthopedic metal artifact reduction algorithm in CT scans after orthopedic metal implantation[J].Korean J Radiol, 2017, 18 (3): 526-535.

[9]Große Hokamp N,Neuhaus V,Abdullayev N,et al.Reduction of artifacts caused by orthopedic hardware in the spine in spectral detector CT examinations using virtual monoenergetic image reconstructions and metal-artifact-reduction algorithms[J].Skeletal Radiol, 2018, 47 (2): 195-201.

[10]郝帅.MSCT多平面重组对踝关节运动损伤的诊断价值[J]. 中国CT和MRI杂志, 2022, 20 (9): 170-172.

[11]Wellenberg RHH,Hakvoort ET,Slump CH,et al.Metal artifact reduction techniques in musculoskeletal CT-imaging[J].Eur J Radiol, 2018, 107: 60-69.

[12]廖建勇,杜静波,勾振恒,等. 能谱CTMARs与单能量成像技术去除骨关节金属置入物伪影的效果[J]. 武警医学, 2021, 32 (1): 68-70.

[13]Laukamp KR,Zopf D,Lennartz S,et al.Metal artifacts in patients with large dental implants and bridges:combination of metal artifact reduction algorithms and virtual monoenergetic images provides an approach to handle even strongest artifacts[J].Eur Radiol, 2019 , 29 (8): 4228-4238.

[14]余娜,严敏,傅浪舟,等. 应用能谱CT技术去除颅内动脉瘤弹簧圈栓塞术后金属伪影[J]. 第三军医大学学报, 2020, 42 (20): 2069-2074.

[15]Popp D,Sinzinger AX,Decker JA,et al.Spectral metal artifact reduction after posterior spinal fixation in photon-counting detector CT datasets[J].Eur J Radiol, 2023, 165: 110946.

[16]史再峰,谢向桅,曹清洁,等. 基于卷积神经网络的能谱CT射束硬化伪影抑制方法[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2021, 54 (2): 74-79, 84.

[17]尹冰心,陈兴灿. 能谱CT金属伪影消除技术和骨算法成像消减脊柱金属内固定物伪影的对比研究[J]. 中华解剖与临床杂志, 2017, 22 (6): 448-451.

[18]Bongers MN,Schabel C,Thomas C,et al.Comparison and combination of dual-energy- and iterative-based metal artefact reduction on hip prosthesis and dental implants[J].PLoS One, 2015, 10 (11): e0143584.

[19]李昊翔,朱凯,孙重阳,等. 宝石能谱CT在减少金属伪影方面的应用进展[J]. 中国医药导报, 2015, 12 (11): 42-45.

[20]李杰,袁源,陈永明,等. MAR技术去除脊柱金属物伪影的临床应用研究[J]. 临床放射学杂志, 2020, 39 (6): 1180-1184.

(收稿日期：2023-04-25) (校对编辑：韩敏求)