

## 成像技术在烧伤伤情评估中的应用研究进展

尚柳彤<sup>1</sup> 王肖<sup>1</sup> 李瑞欣<sup>1</sup> 李天然<sup>1</sup> 孙天俊<sup>2</sup>

<sup>1</sup>解放军总医院第四医学中心放射诊断科,北京 100089;<sup>2</sup>解放军总医院第四医学中心

烧伤整形科,北京 100089

通信作者:李天然,Email:ltranmd@yeah.net

**【摘要】** 烧伤伤情的准确评估复杂而困难。一些新型皮肤成像技术,如高光谱成像、单边磁共振成像、激光多普勒灌注成像等的出现,已使关于烧伤伤情评估的研究取得了很大进展。随着成像技术及医学影像学的不断进步,数字X线摄影、CT、磁共振成像及超声成像等医学影像学技术在评估烧伤伤情中发挥了不可低估的作用。然而,有关烧伤影像学方面的研究报道仍较少,这可能源于用于烧伤评估的成像技术及诊断经验在部分医疗机构普及还不全面,且与烧伤相关的影像学表现复杂,缺乏特征性。该文主要针对近年来各种成像技术在烧伤伤情评估中的应用研究进展进行综述,旨在探求各种成像技术在烧伤伤情评估方面的应用价值。

**【关键词】** 烧伤; 体层摄影术,X线计算机; 磁共振成像; 超声检查; 皮肤; 医学影像学

**基金项目:**国家自然科学基金面上项目(81271607)

### Research progress on the application of imaging technology in burn injury assessment

Shang Liutong<sup>1</sup>, Wang Xiao<sup>1</sup>, Li Ruixin<sup>1</sup>, Li Tianran<sup>1</sup>, Sun Tianjun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Radiodiagnosis, the Fourth Medical Center of PLA General Hospital, Beijing 100089, China;

<sup>2</sup>Department of Burn and Plastic Surgery, the Fourth Medical Center of PLA General Hospital, Beijing 100089, China

Corresponding author: Li Tianran, Email: ltranmd@yeah.net

**【Abstract】** The accurate assessment of burn injuries is complex and difficult. The emergence of some new skin imaging techniques, such as hyperspectral imaging, unilateral magnetic resonance imaging, laser Doppler perfusion imaging, etc., has made great progress in research on burn injury assessment. With the continuous progress of imaging technology and medical

imaging, medical imaging technologies such as digital radiography, computed tomography, magnetic resonance imaging, and ultrasonography, and so on, have played an important role in burn injury assessment. However, there are still relatively few research reports on burn injury imaging, which may be due to the fact that the imaging techniques and diagnostic experience used for burn injury assessment are not yet fully popular in some medical institutions, and the imaging manifestations related to burns are complex and lack of specificity. This article mainly reviews the application research progress of various imaging techniques in the assessment of burn injury in recent years, aiming to explore the application value of various imaging techniques in burn injury assessment.

**【Key words】** Burns; Tomography, X-ray computed; Magnetic resonance imaging; Ultrasonography; Skin; Medical imaging

**Fund program:** General Program of National Natural Science Foundation of China (81271607)

烧伤具有极高的样貌损伤率、致残率和致死率,医治及恢复周期长,影响患者身心健康,增加患者家庭经济负担。给予烧伤患者及时精准的伤情评估,不但能给临床提供有力的诊疗依据,而且可尽量防止因评估偏差引发的治疗不当。当前,如何评估烧伤导致的组织损伤仍是临床需要解决的重大难题,而提升评估精准度也是治疗方法得以改进的先决条件。近年来,研究人员提出了多种烧伤伤情评估方法,目前关于采用成像技术评估烧伤伤情及其应用价值的研究已有陆续报道。鉴于此,现就近年来国内外有关各种成像技术在烧伤伤情评估方面的应用成果进行综述。

### 1 烧伤伤情评估研究背景

烧伤伤情的评估是临床合理处置的依据,评估内容包

DOI:10.3760/cma.j.cn501225-20231012-00112

本文引用格式:尚柳彤,王肖,李瑞欣,等.成像技术在烧伤伤情评估中的应用研究进展[J].中华烧伤与创面修复杂志,2024,40(8):796-800. DOI:10.3760/cma.j.cn501225-20231012-00112.

Shang LT,Wang X,Li RX,et al.Research progress on the application of imaging technology in burn injury assessment[J].Chin J Burns Wounds,2024,40(8):796-800. DOI:10.3760/cma.j.cn501225-20231012-00112.



括烧伤深度和烧伤面积<sup>[1]</sup>。烧伤深度与是否需要行外科植皮密切相关<sup>[2]</sup>，然而，同一患者不同部位的烧伤深度可能不同，即使是同一创面也可能同时存在深、浅层烧伤，初期可能很难准确评估，且烧伤伤情可动态进展，深度可能会逐渐加深。对于烧伤面积的评估，一般采用体表总面积的百分比估计，一些研究显示，首诊医院会低估较大面积的烧伤，造成早期液体复苏不足<sup>[3]</sup>。

此外，有学者提出“不确定烧伤深度的评估”的概念<sup>[4]</sup>，原因在于患者伤情的复杂性，即使综合烧伤面积、部位、症状及患者自身感觉等多个因素，烧伤深度的评估也仅有 60%~75% 的准确性。由此可见，烧伤伤情的准确评估复杂而困难。而一些新型皮肤成像技术，如高光谱成像 (hyperspectral imaging, HSI)、单边磁共振成像 (unilateral magnetic resonance imaging, UMRI)、激光多普勒灌注成像 (laser Doppler perfusion imaging, LDPI) 等的出现，使得关于烧伤伤情评估的研究取得了很大进展，其中 LDPI 技术预测烧伤深度的准确率达 96%<sup>[5]</sup>。此外，新型皮肤成像技术在烧伤后瘢痕治疗中也逐渐开始发挥重要作用，其因具有高分辨率、高灵敏度和实时成像等特点，可获取瘢痕组织的结构、血液供应和代谢情况等信息，为瘢痕治疗提供可靠的依据<sup>[5]</sup>。

## 2 成像技术在烧伤伤情评估中的应用

### 2.1 新型皮肤成像技术在烧伤伤情评估中的应用

**2.1.1 HSI** HSI 是一种无创非增强性成像技术，以氧合血红蛋白及脱氧血红蛋白的独特光谱为特性，可获取人体组织结构及光谱信息<sup>[6]</sup>。其具有分辨率高、成像速度快、信息丰富的优点，可清楚评估烧伤创面血流灌注的特性，反映烧伤皮肤的状态及损伤深度<sup>[7]</sup>。据文献报道，HSI 可比临床检查更早检测出永久性损伤组织的氧合血红蛋白与脱氧血红蛋白的变化，并能显示急性期浅 II 度、深 II 度和 III 度烧伤之间氧合指数的差异，可在烧伤后早期辅助判断是否需进行手术干预<sup>[8]</sup>，以减少患者的病痛，改善患者预后。但目前在用 HSI 技术评估烧伤深度方面尚无公认的参考值标准，仍有待进一步研究完善。

**2.1.2 太赫兹成像** 太赫兹成像是一种非接触式相干探测方法，其利用太赫兹脉冲信号对扫描物进行逐点扫描，记录不同位置的透射信息或反射信息，并经频谱分析构建出扫描物的图像。其具有分辨率高、耗能低及宽带光谱分析能力强等优势，并能够穿透不同材质的纱布，通过检测皮肤中的含水量从而了解皮肤状态，监测创面愈合、进展程度及感染迹象<sup>[9-10]</sup>。因此，可将太赫兹成像作为一种初步评估烧伤伤情的辅助技术。一项动物研究显示，大鼠皮肤烧伤后正常组织和烧伤组织因含水量有着明显差别而对太赫兹波存在不同的吸收率，因此其太赫兹电场强度分布不同，从而在图像上可表现出不同的灰度值分布<sup>[11]</sup>，可见太赫兹成像可以实现烧伤组织的位置和深度信息探测。尽管太赫兹成像技术作为一种新型的医疗成像手段已经成为国内外的

研究热点，但其需要对创面进行逐点扫描，且成像速度缓慢、耗时长，需要患者保持几十分钟的静止不动状态，因此临床应用率不高<sup>[12]</sup>。

**2.1.3 UMRI** UMRI 是一种新型磁共振技术，其设备体积小、便于移动，价格低廉，能够在任意位置从任意角度对物体进行无损检测。具备恒定磁场梯度的 UMRI 系统因其在纵深方向上的高磁场梯度而获得较高的图像分辨率，非常适合对具有多层组织结构的皮肤进行磁共振信号检测，可提供皮肤各层组织状态信息，有助于皮肤烧伤深度的判断和恢复程度估计<sup>[13]</sup>。有学者利用二维相位编码方法与切片选择相结合的 UMRI 系统对经沸水浸泡后的死猪皮肤创面进行成像检测，观察到烫伤后的浅表皮层和深部皮肤在 UMRI 中的共振频率相同，UMRI 可通过组织回波获得的信号进行重新定位，有助于量化烧伤深度<sup>[14]</sup>。但目前 UMRI 技术仍存在敏感度低、穿透度有限、成像时间长等问题，因此，优化设备技术参数和扫描序列是未来真正将 UMRI 技术应用于烧伤临床伤情评估的先决条件。

**2.1.4 LDPI** LDPI 是一种检测人体浅表组织血流动力学变化的非侵入性检查方法，其按照创面血液流速判定烧伤程度，具有 96% 的检测准确率<sup>[5]</sup>。已有临床研究显示，LDPI 可以有效地评估烧伤创面的愈合能力，并可根据血流情况评估烧伤深度和瘢痕形成情况<sup>[15]</sup>。关于 LDPI 的临床研究表明，入射光角度、组织曲度及探测距离等都能对图像造成影响，可能导致烧伤伤情评估不准确的问题<sup>[16]</sup>。

**2.1.5 红外热成像 (infrared thermal imaging, IRTI)** IRTI 是利用红外辐射照相原理，通过皮肤热辐射的差异进行热成像，研究体表温度分布状态，从而进行烧伤深度评估。有学者采用 IRTI 测量患者烧伤创面的温度，与激光多普勒成像进行比较，并计算烧伤和未烧伤皮肤之间的温差。结果显示，热辐射在浅度烧伤组织可因炎症等变化而增强，而在深度烧伤组织可因穿透力弱受坏死组织阻碍而减弱，从而间接反映烧伤创面的血流信息，对烧伤创面愈合潜力的评估也具有良好的有效性<sup>[17]</sup>。但 IRTI 图像对比度低，分辨细节能力较差，且检测结果受创面含水量的影响，因此其在临床的应用具有一定的局限性。

**2.1.6 近红外光谱成像 (near infrared spectrum imaging, NIRSI)** NIRSI 作为一种无创、非接触、快速检测的光谱检测工具，可利用血红蛋白对近红外光的吸收率差异而对烧伤深度进行分析<sup>[18]</sup>。有学者使用 NIRSI 对 20 只猪烧伤创面进行研究观察，将烧伤创面按照浅层、中层、深层部分损伤及全层损伤的分类，在损伤后 1~3 h 进行 NIRSI 评估，结果显示 NIRSI 区分深层和浅层烧伤的敏感度为 0.90，特异度为 0.83<sup>[19]</sup>，表明 NIRSI 在区分浅层烧伤和深层烧伤方面具有较大潜力。但目前尚缺乏关于 NIRSI 在烧伤深度检测方面的临床研究报道，因此 NIRSI 在临床中的应用尚需进一步研究。

**2.1.7 荧光检测** 荧光检测是通过静脉注射荧光物质后，在不同带宽频率激光束扫描下依据创面产生光谱的峰

值大小、时相特点及荧光强度对创面深度进行评估。Dingwall<sup>[20]</sup>最先使用荧光素钠对Ⅱ度烧伤和Ⅲ度烧伤进行区分,但荧光素钠对焦痂皮肤的穿透能力不足,因此不能准确鉴别浅Ⅱ度或深Ⅱ度创面。

目前新型皮肤成像技术对烧伤伤情的评估各有优点,均表现出良好的评估特性及较好的应用前景,但大都缺乏足够的敏感度和灵活性,同时由于成像原理和应用条件的限制使得这些技术在临床应用中受到一定限制。

## 2.2 常用医学影像学技术在烧伤伤情评估中的应用

新型皮肤成像技术能够实现烧伤皮肤状态或烧伤深度的评估,对于烧伤皮肤状态的评估这一点非常重要,尤其是对残余的汗腺导管上皮及毛囊内具有再生能力残存的皮肤小岛的评估,将对临床决策产生重要的影响。虽然如此,但皮肤成像技术对深层软组织损伤情况、烧伤后骨骼改变、严重烧伤所导致的血管与神经损伤及其他脏器受损的评估不理想或无法实现。比如,临床上致死致残率较高的高压电烧伤及热压伤等,可能存在创面小但损伤深度深的情况,这些严重烧伤导致的毁损性改变可造成皮肤及深部组织成像困难。因此,依托现有常规医学影像学技术来评估坏死组织的范围和深度,观察肌腱、神经、血管、骨关节及相应脏器损伤,帮助医师制订手术及治疗方案,显得尤为重要也更加符合临床实际。

### 2.2.1 数字 X 线摄影 (digital radiography, DR)

DR 是二维成像,采用该技术可初步判定烧伤骨骼改变及肺部吸入性损伤程度,能观察骨关节周围组织及骨关节改变等,并了解肺部感染、肺水肿及肺不张等并发症。当前,利用 DR 评估骨关节改变不存在争议,而胸部 DR 由于分辨率低,临床上对于用其评估烧伤后吸入性损伤和预后存在较大争议。有学者认为对大面积烧伤合并吸入性损伤患者行胸部 DR 可观察到肺纹理、肺透亮度、气管腔及肺门区血管增粗等改变<sup>[21]</sup>,对烧伤后肺损伤的诊断及预后评估有着一定应用价值;但也有研究显示,胸部 DR 结果无法作为烧伤后肺损伤的早期临床诊断依据<sup>[22]</sup>。本课题组在临床实践中观察到,由于吸入性损伤病变早期以缺氧为主要改变,组织学变化主要是小叶间隔增厚、肺间质水肿等间质性改变和肺泡内的渗出性病变,DR 不具有明显特异性,需结合患者病史动态观察病情演变。但对于烧伤面积大、不易搬动的患者,评估其肺部损伤、感染及肺水肿的演变,DR 检查仍是首选。

### 2.2.2 CT

CT 可进行三维成像,并能实现平扫、增强及动、静脉血管成像,在一定程度上能展现更加丰富的烧伤组织信息。CT 对肺组织的吸入性损伤具有特定的诊断价值,可显示不同范围肺组织的连续性损伤、局部肺气肿及密度变化,甚至可以显示直径约 1 mm 的实质性损伤,并确定损伤的范围,在相当程度上弥补了纤维支气管镜难以诊断肺实质损伤的不足。有研究者认为,胸部 CT 影像对评估吸入性损伤有较好的临床时效性<sup>[23]</sup>。另有研究显示,高分辨率 CT 测量的支气管壁厚度与烧伤患者的吸入性损伤严重程度相关,可用于吸入性损伤预后评估<sup>[24]</sup>。此外,有研究显

示,CT 三维重建的呼吸道影像可与纤维支气管镜图像媲美,并可以观测到纤维支气管镜不足以显示的小气道病灶,能在一定程度上弥补纤维支气管镜检查的不足<sup>[25]</sup>。CT 血管成像 (computed tomography angiography, CTA) 技术也是微创检查烧伤后血管情况的常用技术之一,该项检查的内容包括对烧伤部位血管的评估和拟取皮部位血管网的评估。近年来,多层螺旋 CTA 为肢体动脉狭窄及闭塞性病变的患者术前评估及术后随访提供了安全、无创、可靠的新途径,其优势在于多平面、三维、四维重建图像,允许观察者从任意角度观察狭窄及血管壁情况,还可以通过侧支循环显示闭塞血管远端情况<sup>[26]</sup>。研究显示,高压电烧伤后的血管在 CTA 检查中表现为节段性狭窄或血管远端的闭塞、中断,与诊断血管狭窄与闭塞的“金标准”数字减影血管造影下显示的血管损伤表现相仿<sup>[27]</sup>。但 CTA 仍不能精细地显示血管内膜的变化,如内膜水肿增厚、粗糙不平或脱落等。判断烧伤后微血管情况、评估微循环演变规律(间生态组织向坏死组织或正常组织的相互演变)是临床确定治疗方案的关键,CT 灌注成像能够实现这一目的。CT 灌注成像是指在静脉注射对比剂的同时对选定的层面进行连续多次扫描,以获得该层面内每一像素的时间-密度曲线,根据该曲线所提供的数值,利用不同的数学公式可计算出各种灌注参数值,并获得相应的灌注参数图,以此来评价组织器官的血流灌注状态,以指导临床判断组织的损伤程度及转归。CT 在烧伤伤情评估中作用价值较大,然而 CT 也存在一些不足,如 X 线辐射,大剂量使用对比剂可能损伤肾功能,扫描所获得的图像需专业人员用软件进行处理等,但其仍然是评估烧伤后肺损伤和血管情况的最佳方法。

### 2.2.3 磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI)

MRI 具有较好的软组织分辨率,其多平面、多参数、多功能成像的特点使其除了显示皮肤、肌腱、关节、韧带、骨骼等常规的解剖形态变化外,尚可提供烧伤创面病理及生物化学方面的信息,弥补了目前常用检查手段如超声、CT、放射性核素显影等无法准确评估早期烧伤,尤其是高压电烧伤四肢损伤程度的不足。因此,MRI 在烧伤伤情评估中的应用前景愈发广阔。有研究者在 1996 年使用 MRI 技术,依照 T1 加权成像及 T2 加权成像 (T2 weighted imaging, T2WI) 信号差异评估烧伤组织坏死情况,确认深部肌肉损伤的程度及范围<sup>[28]</sup>。国内外相关研究表明,烧伤组织的 T2WI 信号及增强后的信号强度随时间进展具有一定的演变规律。肌肉因血管、神经丰富,易受电流损伤。电流沿血管、神经传播,使肌群中部分肌肉坏死、部分肌肉水肿,常表现为“夹心样”坏死,并呈“跳跃性”损伤。因此,这些病变区域的软组织在 T2WI 常表现为高低混杂信号<sup>[29]</sup>。通过 MRI 观察到的高压电烧伤四肢骨骼肌损伤区、完全坏死区与术中探查所见的坏死组织、间生态组织及存活组织等分布完全一致,且与病理检测的结果相符<sup>[30-31]</sup>。国内也有学者对 MRI 是否能评估烧伤后的软组织进行了探索,证实联合 T2WI、增强图像及扩散加权成像 3 个序列的影像表现可更好地识别损伤区域

的肌肉及水肿;结合表观扩散系数值及 $\Delta$ 表观扩散系数值,可确定早期水肿肌肉损伤程度,为确定清创范围提供帮助<sup>[32]</sup>。随着功能 MRI 的发展,本课题组将致力于多模态功能 MRI 技术在高压电烧伤肌肉软组织损伤中的应用研究,如联合血氧水平依赖功能 MRI 及扩散加权成像评估肌肉软组织损伤程度以及相应支配区域神经功能障碍情况<sup>[33]</sup>。在评估血管损伤方面,磁共振血管造影对主要血管及其分支的显示较好,与数字减影血管造影及 CTA 相比的优势在于造影剂用量小、肾毒性小、对血管损伤小、不存在辐射、安全性好等,但其不足是无法对细小血管做出精确判断。磁共振血管造影对三级以上血管的显示欠佳,无法评估血管内膜损伤情况。MRI 可以实现对烧伤深度的有效评估,对深部软组织受累范围的评估以及附带损伤的评估,然而目前医用 MRI 系统体积大,检查时间较长,而患者对该检查的耐受力较低,因此该系统难以灵活应用于身体各部位的检查。此外,虽然 MRI 可达到毫米级分辨率,但尚未实现对皮肤的分层测量。另外,由于界面伪影的存在,对皮肤的 MRI 评估存在伪影干扰,目前尚未开发针对皮肤成像的专用线圈和扫描序列。

**2.2.4 超声成像** 超声成像能穿过真皮层及皮下脂肪层,其机电耦合及声波波长等因素决定了成像的精确度<sup>[34]</sup>。超声成像不只对气胸、肺水肿及肺栓塞等疾病有着诊断意义,还能对心功能不全或休克等烧伤有关问题进行评估及提示,兼具无创与可重复检查等优点。二维超声能显示血管壁厚度、管腔大小、内膜形态等细微病理变化。彩色多普勒超声可精准呈现血流速度、血流量的变化。彩色多普勒结合二维超声成像对血管损伤的判断准确性在手术探查及组织病理学检测中已得到验证<sup>[6]</sup>,这是其他检查手段所不具备的,对血管损伤评估具有重要价值。有学者采用二维超声观察电烧伤后软组织损伤情况,结果显示,高压电烧伤患肢的各种组织受损程度及范围不同,通常皮下组织<肌肉<血管,血管内膜、血管壁全层损伤及动脉壁的坏死由内层向外层逐渐减轻,并在术中得到了证实<sup>[34]</sup>。但超声成像存在一次性探测范围有限及探头窄等不足,因此对血管损伤的探测缺乏连续性及整体性,而且在大面积或严重烧伤,或存在多种复合性损伤时,超声检查因探头与体表或创面组织接触不好会使成像难度加大,且超声诊断的准确性易受诊断医师的临床经验和检测技能的影响。

**2.2.5 核素显像** 1977年,有研究者提出用放射性核素体内示踪法判断电烧伤后肢体肌肉存活情况,根据单位组织的放射性来推测局部肌肉的血流灌注情况<sup>[35]</sup>。核素显像可使用<sup>99m</sup>Tc 标记人血清白蛋白测量肺毛细血管通透性,能对早期 ARDS 做出诊断,并准确区分肺源或心源性肺水肿<sup>[36]</sup>。核素显像能真实呈现深部软组织受损与血供的改变情况,且血流灌注量和<sup>99m</sup>Tc 标记人血清白蛋白分布强度呈正相关。核素分布缺少的部位提示存在软组织变性或坏死,且已在术中和组织病理学检测中得到进一步证实。本课题组所在医院应用<sup>99m</sup>Tc 标记焦磷酸盐评估高压电烧伤软

组织损伤情况,通过评估坏死组织区域血流灌注情况来鉴别软组织损伤,虽然其对烧伤范围具有一定的诊断意义,但仍有空间分辨率低及平面重叠等局限性,因此对小范围肌肉坏死显示欠佳,不能详细分辨受损局部的解剖层次,且无法在三维空间准确显示坏死组织的部位及大小。该检查对设备和制剂要求较高,操作复杂费时,具有放射性,不便重复使用。

### 3 小结与展望

现阶段用于烧伤伤情评估的成像技术在很大程度上可以实现辅助了解烧伤深度、范围等,但仍有一些问题需要解决。首先,烧伤伤情评估成像技术虽然已经有了比较成熟的理论及实验基础,但从实验室到临床转化还需要不断地实践探索。其次,评估烧伤伤情的新型皮肤成像技术应用规范、影像学诊断标准和预后评价标准的缺乏也使得各项研究之间缺乏良好的可比性。再者,目前针对烧伤伤情的评估方法中缺乏对烧伤面积的定量评估,而烧伤面积结合烧伤深度的评估,以及结合烧伤后残存可再生皮肤岛的识别,对于烧伤治疗决策和预后判断更具价值。最后,烧伤虽然是以皮肤损伤为主要表现的损伤,但烧伤也是全身性疾病,可引起多脏器损伤,包括肺部并发症、心功能不全、肾功能不全、应激性溃疡、脑水肿等,以及心理疾病,而对这些相关疾病,尤其是心理疾病的影像研究开展甚少。因此,仍需要大量的烧伤伤情评估成像技术和相关影像学的探索研究来改善目前烧伤伤情评估中存在的不足。相信未来能研发出更多简单、安全、高效的工具和诊断方法应用于烧伤的检查,对烧伤伤情的判断更客观,对临床诊治更具指导价值。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

### 参考文献

- [1] Giretzlehner M, Ganitzer I, Haller H. Technical and medical aspects of burn size assessment and documentation[J]. *Medicina (Kaunas)*, 2021, 57(3): 242. DOI: 10.3390/medicina57030242.
- [2] Kagan RJ, Peck MD, Ahrenholz DH, et al. Surgical management of the burn wound and use of skin substitutes: an expert panel white paper[J]. *J Burn Care Res*, 2013, 34(2): e60-79. DOI: 10.1097/BCR.0b013e31827039a6.
- [3] Arabidarrehdor G, Tivay A, Bighamian R, et al. Mathematical model of volume kinetics and renal function after burn injury and resuscitation[J]. *Burns*, 2021, 47(2): 371-386. DOI: 10.1016/j.burns.2020.07.003.
- [4] Jaspers MEH, van Haasterecht L, van Zuijlen PPM, et al. A systematic review on the quality of measurement techniques for the assessment of burn wound depth or healing potential[J]. *Burns*, 2019, 45(2): 261-281. DOI: 10.1016/j.burns.2018.05.015.
- [5] Claes K, Hoeksema H, Vyncke T, et al. Evidence based burn depth assessment using laser-based technologies: where do we stand? [J]. *J Burn Care Res*, 2021, 42(3): 513-525. DOI: 10.1093/jbcr/iraa195.
- [6] Sen CK, Ghatak S, Gnyawali SC, et al. Cutaneous imaging technologies in acute burn and chronic wound care[J]. *Plast*

- Reconstr Surg,2016,138(3 Suppl):119S-128S.DOI:10.1097/PRS.0000000000002654.
- [7] 马雪洁,刘蓉,李晨曦,等. 高光谱在体组织成像方法的研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2020,57(8):12-21.DOI:10.3788/LOP57.080002.
- [8] McCarthy M, Prete VI, Oh S, et al. The use of visible-light hyperspectral imaging in evaluating burn wounds: a case report[J]. J Burn Care Res, 2021, 42(4): 825-828. DOI: 10.1093/jbcr/irab003.
- [9] 韩丽娜, 教媛媛, 宁威. 太赫兹成像和光谱在医疗领域的应用综述[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(2): 242-252. DOI: 10.3979/j.issn.1673-825X.202011120355.
- [10] 宁威, 祁峰, 汪晋宽. 利用太赫兹技术实现烧伤诊断[J]. 中国医疗设备, 2018, 33(7): 14-16. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1633.2018.07.003.
- [11] Nikitkina AI, Bikmulina PY, Gafarova ER, et al. Terahertz radiation and the skin: a review[J]. J Biomed Opt, 2021, 26(4):043005. DOI:10.1117/1.JBO.26.4.043005.
- [12] 余晓. 快速太赫兹时域光谱成像技术及其在皮肤烧伤检测应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [13] Van Landeghem M, Danieli E, Perlo J, et al. Low-gradient single-sided NMR sensor for one-shot profiling of human skin[J]. J Magn Reson, 2012, 215: 74-84. DOI: 10.1016/j.jmr.2011.12.010.
- [14] He Z, He W, Wu J, et al. The novel design of a single-sided MRI probe for assessing burn depth[J]. Sensors (Basel), 2017, 17(3):526. DOI:10.3390/s17030526.
- [15] Wang R, Zhao J, Zhang Z, et al. Diagnostic accuracy of laser doppler imaging for the assessment of burn depth: a meta-analysis and systematic review[J]. J Burn Care Res, 2020, 41(3):619-625. DOI:10.1093/jbcr/irz203.
- [16] Droog EJ, Steenbergen W, Sjöberg F. Measurement of depth of burns by laser Doppler perfusion imaging[J]. Burns, 2001, 27(6):561-568. DOI:10.1016/s0305-4179(01)00021-3.
- [17] Carrière ME, de Haas L, Pijpe A, et al. Validity of thermography for measuring burn wound healing potential [J]. Wound Repair Regen, 2020, 28(3):347-354. DOI:10.1111/wrr.12786.
- [18] Wang P, Cao Y, Yin M, et al. Full-field burn depth detection based on near-infrared hyperspectral imaging and ensemble regression[J]. Rev Sci Instrum, 2019, 90(6): 064103. DOI: 10.1063/1.5034503.
- [19] Sowa MG, Leonardi L, Payette JR, et al. Classification of burn injuries using near-infrared spectroscopy[J]. J Biomed Opt, 2006, 11(5):054002. DOI:10.1117/1.2362722.
- [20] Dingwall JA. A clinical test for differentiating second from third degree burns[J]. Ann Surg, 1943, 118(3):427-429. DOI: 10.1097/0000658-194309000-00011.
- [21] Lee MJ, O'Connell DJ. The plain chest radiograph after acute smoke inhalation[J]. Clin Radiol, 1988, 39(1): 33-37. DOI: 10.1016/s0009-9260(88)80334-9.
- [22] Wittram C, Kenny JB. The admission chest radiograph after acute inhalation injury and burns[J]. Br J Radiol, 1994, 67(800):751-754. DOI:10.1259/0007-1285-67-800-751.
- [23] Ma Y, Zhang S, Zhao L, et al. Inhalation lung injury induced by smoke bombs in children: CT manifestations, dynamic evolution features and quantitative analysis[J]. J Thorac Dis, 2018, 10(10):5860-5869. DOI:10.21037/jtd.2018.09.84.
- [24] 王欣, 张雪宁, 吴梦琳, 等. 特重度烧伤伴吸入性损伤患者支气管壁厚度动态变化趋势及对预后的意义[J]. 中华烧伤杂志, 2018, 34(4): 208-213. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1009-2587.2018.04.004.
- [25] Kwon HP, Zanders TB, Regn DD, et al. Comparison of virtual bronchoscopy to fiber-optic bronchoscopy for assessment of inhalation injury severity[J]. Burns, 2014, 40(7): 1308-1315. DOI:10.1016/j.burns.2014.06.007.
- [26] 马文国, 王成德, 王爱, 等. 三维CT血管造影辅助下游离足底内侧穿支皮瓣修复手掌深度烧伤创面的效果[J]. 中华烧伤杂志, 2020, 36(4): 323-326. DOI: 10.3760/cma.j.cn501120-20190308-00091.
- [27] Ma P, Sun Y, Zhang X, et al. Applications of 256-slice, spiral computed tomography perfusion scanning in limb salvage after high-voltage electrical injury[J]. Disaster Med Public Health Prep, 2018, 12(4):478-485. DOI:10.1017/dmp.2017.95.
- [28] Nettelblad H, Thuomas KA, Sjöberg F. Magnetic resonance imaging: a new diagnostic aid in the care of high-voltage electrical burns[J]. Burns, 1996, 22(2): 117-119. DOI: 10.1016/0305-4179(95)00104-2.
- [29] Chakka K, Clark A, Kowalske K. We got your back: evaluating recovery following spinal cord injury after high-voltage electric burns[J]. J Burn Care Res, 2023, 44(2):414-418. DOI: 10.1093/jbcr/irac115.
- [30] 黎淑娟, 王正磊, 朱维平, 等. 四肢高压电烧伤早期磁共振成像特点的临床研究[J]. 中华烧伤杂志, 2017, 33(12):750-756. DOI:10.3760/cma.j.issn.1009-2587.2017.12.006.
- [31] Meng C, Liu Y, Wang H, et al. Lower trapezius myocutaneous flap repairs adjacent deep electrical burn wounds[J]. Eur J Med Res, 2020, 25(1):63. DOI: 10.1186/s40001-020-00465-8.
- [32] 孙斯琴, 郭威, 陈军, 等. 兔肢体高压电烧伤后骨骼肌MRI特征[J]. 放射学实践, 2022, 37(5): 605-610. DOI: 10.13609/j.cnki.1000-0313.2022.05.014.
- [33] 吴兰香, 吴伟. 静息态功能磁共振成像在局灶性肌张力障碍中的应用研究进展[J]. 解放军医学杂志, 2022, 47(10): 1042-1048. DOI:10.11855/j.issn.0577-7402.2022.10.1042.
- [34] Goans RE, Cantrell JH Jr, Meyers FB. Ultrasonic pulse-echo determination of thermal injury in deep dermal burns[J]. Med Phys, 1977, 4(3):259-263. DOI:10.1118/1.594376.
- [35] Clayton JM, Hayes AC, Hammel J, et al. Xenon-133 determination of muscle blood flow in electrical injury[J]. J Trauma, 1977, 17(4): 293-298. DOI: 10.1097/00005373-197704000-00006.
- [36] Lull RJ, Tatum JL, Sugerman HJ, et al. Radionuclide evaluation of lung trauma[J]. Semin Nucl Med, 1983, 13(3): 223-237. DOI:10.1016/s0001-2998(83)80017-8.

(收稿日期: 2023-10-12)