兔肢体高压电烧伤后骨骼肌 MRI 特征

孙斯琴,郭威,陈军,杨凡

【摘要】目的:连续性观察免肢体电烧伤后骨骼肌 MRI 平扫、增强及 DWI 成像特点,总结其变化 规律。方法:选取16只实验免,制作免肢体高压电烧伤模型,分别于造模后2h、24h、48h、72h行双后 肢 MRI 平扫、DWI 检查(b=600 s/mm²)及造模肢增强扫描,每个时间点扫描完成后随机抽取 2 只兔处 死,取病变肌肉行病理检查。结果:所有实验兔电极入口及出口处皮肤及皮下组织增厚、肿胀(入口处损 伤更重),局部皮下软组织间隙少量积液(14例)。骨骼肌可见"袖套样"损伤、"夹心样"坏死,整体呈"跳 跃性"分布(16例),随时间延长,损伤肌肉肿胀更明显、病变范围扩大、边缘逐渐模糊不清,电极入口处 较出口处损伤累及更多肌群。T。WI损伤肌肉呈片状高信号、稍高信号、低信号,部分混杂,24h较2h 信号稍减低:T,WI抑脂序列呈斑片状稍低、稍高混杂信号,但所显示病变范围明显小于T,WI:增强扫 描 2 h 时病变区明显强化,24~72 h 强化程度逐渐减低、范围逐渐减小;DWI 示受损肌肉呈明显扩散受 限高信号,随时间延长,病变范围逐渐扩大、受损肌肉信号逐渐升高。近电极入口、出口处受损骨骼肌 ADC 值均随时间延长而降低(P<0.05);相同电烧伤时间,近入口处受损骨骼肌 ADC 值较近出口处低 (P < 0.05)。当 ADC 值变化率(ΔADC) < 20.10%时,损伤肌肉仅少量变性;当 ΔADC 介于 20.10%~ 36.06%时,少量肌肉坏死;当 ΔADC 介于 36.06%~42.62%时,损伤肌肉坏死逐渐增多;当 ΔADC> 42.62%时损伤肌肉大量坏死。组织病理显示随时间延长而加重的肌纤维束变性坏死和断裂、炎症细胞 浸润、红细胞渗出、血栓形成等表现。结论:兔肢体高压电烧伤后骨骼肌损伤具有独特的 MRI 表现及变 化规律,MRI检查可为临床肢体高压电烧伤清创手术方案制定及肌肉切除范围提供帮助。

【关键词】 兔;烧伤,电;骨骼肌;磁共振成像;扩散加权成像;病理学

【中图分类号】R685.4; R445.2 【文献标识码】A 【文章编号】1000-0313(2022)05-0605-06 DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2022.05.014 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



MR characteristics of skeletal muscle following a high voltage electrical burn in rabbit limbs SUN Si-qin,GUO Wei,CHEN Jun, et al.Department of Radiology, Wuhan Third Hospital (Tongren Hospital Affiliated to Wuhan University), Wuhan 430061, China

[Abstract] Objective: Analyze the characteristics of unenhanced MRI, contrast-enhanced scanning, and diffusion weighted imaging (DWI) in skeletal muscles of rabbit limbs after high voltage electrical burns. Methods: Sixteen rabbits were selected to make high voltage electrical burns models of their limb. Unenhanced MRI scanning and DWI examination (b = 600s/mm²) and contrast-enhanced MRI obtained for both hind limbs at 2h, 24h, 48h, and 72h after limbs high voltage electrical burns. Two rabbits were randomly selected and sacrificed after each imaging time point, and histology of injured muscles was performed for pathological examination. Results: The skin and subcutaneous tissues at the electrode entrance and exit were thickened and swollen (the damage at the entrance was more severe), and a small amount of fluid was observed in the subcutaneous soft tissue (n = 14 cases). "Cuff-, sandwich-", and "jump-like" injuries were observed in skeletal muscle, and the overall distribution was "skipping" (n=16 cases). Swelling and the lesion volumes were increased and the lesion edges were blurred over time. More injured muscle groups were detected at the electrode entrance than the exit. For the injured skeletal muscles, T_2 WI presented hyperintensity, slight hyperintensity, hypointensity, and mixtures of these signals, which were slightly lower at 24h than those at 2h, T_1 WI

作者单位:430061 武汉,武汉市第三医院(武汉大学附属同仁医院)放射科(孙斯琴、郭威、杨凡);430061 武汉,武汉大学人 民医院放射科(陈军) 作者简介:孙斯琴(1991-),女,湖北应城人,硕士,住院医师,主要从事骨骼肌肉磁共振研究工作。

通讯作者:郭威,E-mail:547157822@qq.com

基金项目:湖北省武汉市卫生健康委员会医学科研资助项目(WX19Y05)

showed mixtures of slight hypointensity and hyperintensity, but the lesion range of these signals were substantially smaller than T_2 WI. In contrast-enhanced MRI, the signal intensity was markedly increased at 2 hours and progressively decreased from 24 to 72 hours with narrower range.DWI showed a high signal of limited diffusion in the damaged muscle. The lesion area gradually expanded and the signal of the damaged muscle gradually increased over time. ADC for injured skeletal muscles was decreased at the entrance and exit of electrodes over time (P < 0.05) and it was lower near the entrance compared with the exit (P < 0.05). Minor degeneration, minor necrosis, dramatic necrosis, and vast necrosis in the injured muscles were observed when Δ ADC was below 20.10%, between 20.1% and 36.06%, between 36.06% and 42.62%, and above 42.62%, respectively. Pathological examination showed increased degeneration, necrosis, and fracture of muscle fiber bundles, inflammatory cells infiltration, and erythrocyte exudation and thrombosis throughout the time period. **Conclusion**: Skeletal muscle injury after high voltage electrical burn of rabbit limbs has unique MRI manifestations and changes. This approach may be used to help develop plan and identify muscles for resection for debridement surgery.

(Key words) Rabbit; Burns, electric; Skeletal muscle; Magnetic resonance imaging; Diffusion weighted imaging; Pathology

高压电烧伤是一种严重的烧伤疾病,易伤及躯干 和四肢,截肢率明显高于低电压烧伤[1-2];发生在肢体 时,由于皮肤具有较强的电阻,而其他如骨骼、肌肉、血 管和神经等组织有良好的导电性能,使烧伤的皮肤表 面并不能很好地反映损伤的真实程度,同时由于电烧 伤的电热效应、非热损伤、继发性坏死和间接性损伤等 因素,导致骨骼肌产生"袖套状"、"夹心样"及"跳跃性" 坏死[3],且受损范围深而广,多呈"烧瓶状"口小、底大 样分布,同时严重肌肉水肿、血管栓塞等因素可发生骨 筋膜室综合症加重肢体损伤[4],故明确肢体损伤程度 和范围对治疗方案的制定至关重要,盲目探查、反复探 查、延迟清创或清创不彻底可能会带来二次甚至多次 损伤,加重出血、感染的风险,严重者往往需要截肢^[5]。 无辐射、无创性的 MRI 具有良好的软组织分辨率及空 间分辨率,MRI平扫加增强检查可以清晰显示骨骼肌 电烧伤后的信号改变,明确病变范围及坏死程度。扩 散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)有利 于凸显损伤肌肉,并通过其成像参数表观扩散系数 (apparent diffusion coefficient, ADC)值的测量判断肌 肉损伤程度。本研究通过建立兔肢体电烧伤模型,观 察电烧伤后骨骼肌 MRI 及 DWI 的影像特点及变化规 律,为临床清创手术方案的制定提供影像学帮助。

材料与方法

1.动物模型制作

选取 9~10 个月月龄的健康新西兰白兔 16 只(湖 北逸挚诚生物科技有限公司提供), 雌雄不限, 体重 2.0~2.3 kg, 用 10%水合氯醛 2 mL/kg 麻醉, 用脱毛 膏脱去左后肢毛发, 将入口电极片(面积约 0.25 cm²) 置于膝关节以下 5 cm 处,出口电极片(面积约 9 cm²) 置于膝关节以上 5 cm 处,棉球加压、弹力绷带及绝缘 胶带固定,使用张伟等^[6]所述方法自制电击设备,电压 2 kV,电击时间 0.1 s。

2.MRI 检查方法

所有实验兔随机等分为 4 组,分别于电击后 2 h、 24 h、48 h、72 h 行 MRI 平扫、增强扫描及 DWI 检查, 采用 GE Signa HDxt 1.5T 扫描仪(美国通用电气公 司,美国),膝关节线圈。MRI 平扫采用 FSE T₁WI、 FRFES T₂WI 序列,对兔双后下肢行矢状面平扫, T₁WI 抑脂序列扫描参数:TR/TE=440 ms/14.1 ms, T₂WI 扫描参数:TR/TE=1659 ms/61.9 ms。DWI 扫 描 参数:TR/TE = 3950 ms/94.9 ms, b 值 取 0、 600 s/mm²。对比剂采用钆双胺注射液[欧乃影,通用 电器药业(上海)有限公司],剂量 0.1 mL/kg,经耳缘 静脉团注,5 mL 生理盐水冲管,对兔左后下肢(造模肢 体)行横轴面增强扫描,T₁WI-FS 序列扫描参数:TR/ TE=560 ms/13.1 ms。所有扫描序列均采用以下参 数:层厚 3 mm,层间距 0,矩阵 256 × 224,视野 160 mm×160 mm,激励次数 2。

3.病理标本制作

每个时间点完成扫描后随机取2只实验兔经耳缘 静脉注入空气处死,逐层剖开皮肤、筋膜、肌肉,对病变 区行大体观察,然后取病变区肌肉组织用体积分数 10%甲醛溶液固定后石蜡包埋、切片,常规 HE 染色, 行病理分析。

4.统计学分析

扫描完成后分析 MRI 平扫及增强表现,对应 DWI图像,在ADC图像上取左后下肢(造模肢体)近 电极入口处(膝关节以下 2 cm)及近出口处(膝关节以 上 2 cm)损伤程度最重区、右后下肢(正常肢体),放置 面积约 25 mm² 圆形 ROI 测量 ADC 值,参考文献^[7] 计算 ADC 值变化率(ΔADC),即正常肌肉与病变肌肉 ADC 差值除以正常肌肉 ADC 值。采用 SPSS 22.0 软 件进行统计学分析,对多组均数差异的比较采用单因 素方差分析(one-way ANOVA)。以 *P*<0.05 为差异 有统计学意义。

结 果

1.MRI 平扫及增强表现

皮肤及皮下组织表现:入口处皮肤及皮下组织明 显增厚、水肿,局部皮下软组织间隙可见条状积液, T₁WI抑脂呈低信号,T₂WI呈高信号。随损伤时间延 长,皮肤及皮下组织水肿逐渐加重,皮下组织间隙积液 稍增多。 骨骼肌表现:电烧伤后骨骼肌损伤整体呈"夹心 样"、"跳跃性"分布,且入口处较出口处损伤累及更多 肌群。2h时 T₂WI部分肌肉见片状高信号、稍高信号 混杂损伤区,边界较清,随损伤时间延长,损伤肌肉肿 胀更加明显、病变范围扩大、边缘逐渐模糊不清,24h 时损伤区 T₂WI信号较 2h时稍减低,而 48~72h时 损伤区 T₂WI信号逐渐增高;24h时 T₂WI损伤区内 出现斑片状低信号,随时间延长范围扩大;72h时部分 患肢近入口端可见斑点状气体信号影。损伤肢体 T₁WI抑脂见斑片状稍低、稍高混杂信号,所显示病变 范围明显小于 T₂WI;随时间延长,T₁WI抑脂病变范 围扩大、信号升高,48~72h部分肌间隙见条状高信 号。增强扫描 2h病变区明显强化,所示病变范围较 T₂WI大,24~72h强化程度逐渐减低、强化范围逐渐 减小,但始终未见明显无强化区(图1)。

2.DWI及 ADC 结果



图 1 免骨骼肌 MRI 表现,可见近出口处损伤肌肉 DWI 高信号,增强明显强化(长箭),近入口处损伤肌肉 T₂WI 高信号(短箭)。a~c) 分别为 2h 时矢状面 DWI 图像、T₂WI 图像、横轴面 T₁WI 抑脂增强图像; d~f) 分别为 24h 时矢状面 DWI 图像、T₂WI 图像、横轴面 T₁WI 抑脂增强图像; g~i) 分别为 48h 时矢状面 DWI 图像、T₂WI 图像、横轴面 T₁WI 抑脂增强图像; j~l) 分别为 72h 时矢状面 DWI 图像、T₂WI 图像、横轴面 T₁WI 抑脂增强图像; j~l) 分别为 72h 时矢状面 DWI 图像、T₂WI 图像、横轴面 T₁WI 抑脂增强图像。

表1 近入口处和近出口处不同时间点损伤肌肉的 ADC 值 (×10⁻³ mm²/s)

分组	近入口处 ADC 值	近出口处 ADC 值	正常肌肉组织 ADC 值	F 值	P 值
2h	0.922 ± 0.080	1.152 ± 0.379	1.446 ± 0.678	213.350	0.000
24h	0.832 ± 0.115	1.038 ± 0.123	1.456 ± 0.071	291.503	0.000
48h	0.737 ± 0.060	0.889 ± 0.027	1.436 ± 0.590	96.659	0.000
72h	0.641 ± 0.288	0.754 ± 0.120	1.447 ± 0.718	130.072	0.000
F 值	21.275	31.110	0.046		
P 值	0.000	0.000	0.987		

DWI 在 2 h 时即可见明显扩散受限高信号灶,所 示范围较 T₂ WI 小,随时间延长,扩散受限范围逐渐扩 大、信号逐渐升高。近入口、出口处损伤肌肉 DWI 信 号强度肉眼观察未见明显差异。正常肌肉组织 ADC 值随时间变化差异无统计学意义(P > 0.05)。近入 口、出口处受损骨骼肌 ADC 值均随时间延长而降低, 差异有统计学意义(P < 0.05);相同电烧伤时间,近入 口处受损骨骼肌的 ADC 值较近出口处受损骨骼肌 低,差异有统计学意义(P < 0.05)(表 1、图 1)。近入口 及近出口处受损肌肉 ADC 值变化率(Δ ADC)均随时 间延长而增大(表 2)。

表 2 不同时间点损伤肌肉的 ADC 值变化率 (%)

分组	近入口处 ∆ADC	近出口处 ∆ADC
2h	36.06 ± 6.22	20.10 ± 7.11
24h	42.62 ± 9.32	28.58 ± 8.84
48h	48.84 ± 5.30	38.32 ± 7.61
72h	55.73 ± 6.39	47.88 ± 8.21

3.病理结果

电击后受伤肢体表面:入口处骨骼肌、肌腱外露, 周围皮肤呈焦黑样改变,出口处皮肤破损,颜色加深, 局部肌肉外露;入口至出口间可见红色线样影(图 2e)。皮肤随时间延长逐渐变硬,72 h 时较难切开。 2 h组:损伤肢体肌肉呈深红色,整体显示稍肿胀;未见 明显坏死肌肉组织;24 h组:损伤肢体肌肉呈深红色, 肿胀较 2 h加重;48~72 h:48 h肌肉呈红白相间改变 (图 2f),随时间延长,肌肉肿胀明显加重,白色部分组 织增多,血管增粗、颜色加深。

HE染色病理:近入口处损伤较重,2h时出现少量肌细胞变性坏死,并空泡变,未见明显炎症细胞浸润,随时间延长,变性坏死肌纤维及炎症细胞增多。间质中出现红细胞渗出,而72h肌束严重坏死、变性,

表 3 近入口处和近出口处病理 HE 染色结果

分组	近入口处 (膝关节以下 2cm)	近出口处 (膝关节以下 2cm)
2h	少量肌纤维束变性坏 死并空泡变,间质疏松 水肿	少量肌纤维束断裂、空 泡变
24h	大量肌纤维束变性坏 死并空泡变,少量肌细 胞肌纤维呈菱形,间质 炎症细胞散在浸润	少量肌纤维束变性坏 死并空泡变,间质炎症 细胞散在浸润
48h	肌纤维束大量坏死,间 质中存在大量红细胞 及炎症细胞	部分肌纤维断裂,间质 少量炎症细胞浸润并 伴有红细胞渗出
72h	肌纤维重度变性、坏死 伴有细胞核象出现,间 质大量炎细胞浸润,血 栓形成	肌纤维重度变性坏死 伴有细胞核象出现,间 质大量炎细胞浸润,血 栓形成



图 2 a) 近入口 2h 受损肌肉组织的 HE 染色(×100 倍) 图片; b) 出口处 2h 受损肌肉组织的 HE 染色(×100 倍) 图片; c) 近入口 72h 受损肌肉组织的 HE 染色(×100 倍) 图片; d) 出口处 72h 受损肌肉组织的 HE 染色(×100 倍) 图片; e) 电击后照片; f) 电击后 48h 肌肉损伤情况。

结构松散,可见炎症细胞浸润,血管内见血栓形成。肌 纤维变性坏死伴有细胞核象出现,间质炎细胞散在浸 润(表 3、图 2)。

讨 论

高压电烧伤是一种特殊损伤形式造成的严重烧伤 疾病,是指超过生理耐受的电流(≥1000 V)造成的损 伤,伴随高截肢率的是高致残率和致死率。核素显像、 PET 技术、超声价值有限,不能为临床提供直观有效 的影像信息^[8-10]。CT 灌注成像有一定价值,但需要较 大对比剂用量,并接受较大剂量辐射^[11]。MRI 具有高 软组织分辨率及空间分辨率,相关研究表明 MRI 对高 压电烧伤受损肌肉组织程度和范围的判断与术中探查 表现及病理检查结果相符^[12-14],但此前研究多为患者 肢体电烧伤后某时间点的骨骼肌 MRI 表现,而电烧伤 后骨骼肌损伤特点及变化规律同样重要。

1.电烧伤后骨骼肌损伤特点及 MRI 表现

本实验见沿兔小腿骨骼周围肌肉明显肿胀、损伤, 呈"袖套状"包绕骨骼肌,这是因为电烧伤的电热效 应^[1],使电流穿过电阻最高的骨组织时产生大量热能, 进而引起蛋白质变性、凝固^[15],导致骨骼周围肌肉烧伤 产生此表现,本实验见此现象在近电极入口处更明显。

骨骼肌细胞及神经细胞因易受电流的非热损伤即 细胞膜电穿孔损伤而坏死^[1,16]。影像可见损伤肌肉肿 胀、T₁WI信号混杂、T₂WI信号增高、增强明显强化、扩 散明显受限等表现,且T₂WI信号增高、增强明显强化、扩 散明显受限等表现,且T₂WI所示病变范围较T₁WI抑 脂大,增强扫描所示范围较T₂WI大,DWI所示范围较 T₂WI小,但笔者认为由于DWI可以反映微观水分子的 扩散运动能力,可显示出真正受损肌肉组织,而损伤早 期T₂WI水肿及坏死组织难以区分,同时肌肉水肿、充 血使增强扫描显示病变范围较大,故结合T₂WI、增强及 DWI表现对病变肌肉及水肿可更好地识别。

本实验 24 h 近电极入口端损伤区见 T₁WI 抑脂 稍高信号内出现小斑片状稍低信号,对应增强表现为 低强化区,边界不清且范围逐渐扩大,推测此斑片状低 信号区即为坏死区,由于电流易沿电阻最小的组织(即 血管)穿行^[1],肌肉因血管丰富易受电流损伤,使肌群 中部分肌肉坏死、部分肌肉水肿,呈"夹心样"坏死特 点。同时电流易沿血管、神经传播^[11,17],使 T₂WI 膝 关节屈面肌群部分为损伤水肿高信号、部分为正常肌 肉等信号,呈典型"跳跃性"损伤特点。部分患肢在近 电极入口处肌间可见斑点状气体信号影,推测由于肌 纤维束坏死严重、肌筋膜受损,气体进入肌间隙,或产 气菌感染引起,但此次实验未能进一步证实。

电流通过导电体的强度与横截面面积成反比,所产生的大量热能主要负载在肌肉中,故横截面越小的

组织受损越重^[18];本研究结果显示,受损肌肉与正常 肌肉间的 ADC 值差异均有统计学意义(P<0.05);同 一电烧伤时间,近入口处受损骨骼肌的 ADC 值较近 出口处低(P<0.05),表明近入口处扩散受限更明显, 肌肉损伤更重,结合 MRI 平扫、增强扫描、大体观察及 病理检查,肢体电烧伤近入口处(近踝关节)的肌肉损 伤重而广,出口处(近大腿根部)损伤相对稍轻但深,与 文献报道相符^[15,18-19]。

2.电烧伤后骨骼肌 MRI 变化规律

电烧伤后骨骼肌的渐进性坏死机制^[1]:电流沿血 管神经穿行,致血管内皮损伤、平滑肌固缩、血栓形成, 加之神经细胞损伤、炎症细胞浸润等,均导致损伤渐进 性进展、创面难以愈合。本实验结果显示,随时间延 长,受损肌肉肿胀更加明显,病变范围扩大,病变边界 逐渐由较清晰变得模糊,影像表现同病理结果相符。 另在 48~72 h部分肌间隙见条状 T₁WI抑脂高信号, 考虑此时血管损伤加重、红细胞渗出,肌间隙开始出现 少许积血表现,各序列表现均提示肌肉组织坏死及炎 性反应的渐进性加重特点。

本实验受损肌肉 T₂WI 信号随时间进展的变化, 结合组织病理,推测是由于2h时肌肉损伤以水肿表 现为主,而24h时水肿减轻,出现更多肌细胞变性坏 死、散在炎症细胞浸润,故T。WI信号稍减低,48~ 72 h由于肌纤维束断裂、坏死增多,较多的炎症细胞浸 润及红细胞渗出,导致 T₂WI 信号从 24 h 开始逐渐升 高。增强扫描随时间进展的变化,推测是由于2h受 损肌肉充血水肿明显而呈明显强化,24h后充血水肿 较前减轻,为实际损伤肌肉范围,故强化范围逐渐减 小:另外 24~72 h 强化程度逐渐减低,但仍有强化,并 没有出现明显液化坏死区,与其他文献报道不符[12-14], 但结合本实验造模情况、MRI 平扫、大体观察和病理 检查,表明肌肉及间质损伤进展加重,认为强化程度减 低、范围减小即说明受损肌肉组织的渐进性坏死、损伤 随时间进展,这也与平扫 T₂WI 变化表现相对应。近 电极入口、出口处受损骨骼肌 ADC 值均随损伤时间 延长而降低(P<0.05),扩散受限逐渐加重,表明肌肉 损伤逐渐加重,符合电烧伤后骨骼肌渐进性坏死特征。

3.骨骼肌电烧伤后 MRI 检查的临床价值

相关研究表明,骨骼肌完全缺血后4h开始出现 坏死,7h出现广泛不可逆坏死^[20],电烧伤后血管血栓 形成,缺血加重肌肉渐进性坏死,但临床高压电烧伤患 者多存在全身多系统病变,甚至影响生命体征^[19],故 往往无法做到极早期清创,而延迟清创或盲目清创会 加重组织创伤,可继发骨筋膜室综合症或感染等,所以 在生命体征稳定后,早期(<24h)积极、充分清创^[21], 同时尽量保留间生态组织,此类组织在采用血供丰富 的组织瓣覆盖进行早期修复或实行负压引流有存活希望,能取得更好的治疗效果、降低截肢率^[22-23],但间生态组织也可能液化坏死,所以确定清创范围及随诊至关重要。

本实验结果显示 2 h 近入口端少量肌肉坏死,近 出口端肌肉变性:24 h 两端肌肉均出现坏死、变性, 目 随时间进展损伤程度逐渐加重,故在电烧伤后应早期 及时行 MRI 检查,对 DWI 扩散受限高信号所示的真 实损伤肌肉彻底清创。同时,笔者认为对 T₂WI 所示 与损伤肌肉难以区分的周围高信号水肿肌肉带应予以 重视,因为随时间延长,周围水肿肌肉会继发坏死,目 范围及程度逐渐加重。结合本实验病理、ADC 值及 ΔADC 结果,笔者推测当 $\Delta ADC < 20.10\%$ 时,损伤肌 肉仅少量变性,当 ΔADC 介于 20.10%~36.06%时, 损伤肌肉已有少量坏死,当 ΔADC 介于 36.06%~ 42.62%时,损伤肌肉坏死增多、少量炎症细胞浸润、血 管破坏少许红细胞渗出,当ΔADC>42.62%时损伤肌 肉明显大量坏死、大量炎症细胞浸润、大量红细胞渗 出。故笔者认为早期可通过测量 ADC 值,结合 ΔADC 值判断水肿肌肉带损伤程度,对 $\Delta ADC >$ 36.06%的肌肉应早期清创切除,避免渐进性进展造成 二次损伤;对 ΔADC 介于 20.10%~36.06%的肌肉结 合 MRI 平扫、增强、DWI 及临床表现,判断是否切除: 而对 $\Delta ADC < 20.10\%$ 的肌肉,可予以皮瓣覆盖或负压 引流等治疗后随诊观察。

综上所述,肢体电烧伤后肌肉损伤表现为"套袖状"、"夹心样"和"跳跃性"等特点,且肌肉往往为渐进 性坏死,早期行 MRI 检查,通过平扫、增强及 DWI 表 现,配合 ADC 值及 ΔADC,可为早期确定清创范围提 供帮助。另外清创后行 MRI 随诊,结合肌肉损伤变化 规律,可了解术后肢体情况及残余间生态肌肉是否继 发坏死,以便及时调整诊疗方案。

参考文献:

- [1] Ding HR, Huang MM, Li DH, et al. Epidemiology of electrical burns: a 10-year retrospective analysis of 376 cases at a burn centre in South China [J]. J Int Med Res, 2020, 48 (3): 300060519891325.
- Li H, Tan J, Zhou J, et al. Wound management and outcome of 595 electrical burns in a major burn center [J]. J Surg Res, 2017, 214 (6):182-189.
- [3] 张丕红,黄晓元,黄跃生.深度电烧伤创面早期修复专家共识(2020 版)[J].中华创伤杂志,2020,36(10):865-871.
- [4] Başaran A, Gürbüz K, Özlü Ö, et al. Electrical burns and complications: data of a tertiary burn center intensive care unit[J]. Ulus Travma Acil Cerrahi Derg, 2020, 26(2):222-226.
- [5] Zhao JC, Shi K, Hong L, et al. Retrospective review of free anterolateral thigh flaps for limb salvage in severely injured high-voltage electrical burn patients[J]. Ann Plast Surg, 2018, 80(3):232-237.

- [6] 张伟,谢卫国,赵超莉,等.大鼠单侧肢体高压电击伤模型的建立 [J].中华损伤与修复杂志(电子版),2008,3(4):426-432.
- [7] 李花,宋琼,马宝新,等.磁共振弥散加权成像对局部晚期非小细胞 肺癌同步放化疗疗效预测价值[J].中华肿瘤防治志,2020,27 (14):1171-1176.
- [8] 刘达恩,覃伟武,牛占国,等.^{99m}Tc-亚甲基二膦酸盐在肢体高压电 损伤中的诊断价值[J].中华损伤与修复杂志(电子版),2009,4 (5):566-570.
- [9] 李利根,柴家科.肢体高压电烧伤软组织及血管损伤的影像学判断 及临床意义[J].中华烧伤杂志,2020,36(11):1009-1012.
- [10] Ibrahim RM, Gunnarsson GL, Akram J, et al. Color Doppler ultrasonography targeted reconstruction using pedicled perforator flapsa systematic review and meta-analysis[J].Eur J Plast Surg, 2018,41(5):495-504.
- [11] 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.
- [12] Ligen L, Hongming Y, Feng L, et al. Magnetic resonance imaging features of soft tissue and vascular injuries after high-voltage electrical burns and their clinical application [J]. Injury, 2012, 43 (9):1445-1450.
- [13] 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.
- [14] 杨家斐,马林.肢体高压电损伤 MRI 影像学的临床及实验研究 [D].北京:军医进修学院,2009.
- [15] 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.
- [16] Chen X, Zhang C, Cheng L, et al. Survival and versatility of the flow-through lateral-thigh free flap in severe electrical injuries to the wrist[J]. Ann Plast Surg, 2020, 85(6); 612-617.
- [17] AlQasas T, Galet C, Wibbenmeyer L.Delayed spinal cord injury from electrical burns: two cases[J].J Burn Care Res, 2021, 42 (3):560-563.
- [18] Depamphilis MA, Cauley RP, Sadeq F, et al. Surgical management and epidemiological trends of pediatric electrical burns[J]. Burns, 2020, 46(7):1693-1699.
- [19] Lee DH, Desai MJ, Gauger EM. Electrical Injuries of the hand and upper extremity[J].J Am Acad Orthop Surg, 2019, 27(1): el-e8.
- [20] Zhang H, Wang X, Guan M, et al. Skeletal muscle evaluation by MRI in a rabbit model of acute ischaemia[J].Br J Radiol, 2013, 86(1026):20120042.
- [21] Jang YS, Lee BH, Park HS, Lower amputation rate after fasciotomy by straight midline incision technique for a 22,900-V electrical injury to the upper extremities [J]. Injury, 2017, 48 (11): 2590-2596.
- [22] Uslu A.Reconstruction of the distal leg and foot using free anterolateral thigh flaps in patients with high-voltage electrical burns[J].J Burn Care Res, 2019, 40(5):703-709.
- [23] Eyvaz K,Kement M,Balin S,et al.Clinical evaluation of negativepressure wound therapy in the management of electrical burns[J].Ulus Travma Acil Cerrahi Derg,2018,24(5):456-461.

(收稿日期:2021-06-23 修回日期:2021-09-14)