

论著 DOI: 10.16369/j.oher.issn.1007-1326.2024.02.001

· 专稿: 工作相关肌肉骨骼疾患研究 ·

# 隧道防水工钉枪作业局部肌肉负荷与疲劳预警的分析与研究

徐擎<sup>1</sup>, 莫仕围<sup>2</sup>, 胡新尧<sup>2</sup>, 李楚豪<sup>2</sup>, 段青松<sup>2</sup>, 岳鹏<sup>2</sup>, 赵文悦<sup>2</sup>,  
钟志康<sup>2</sup>, 牛邓强<sup>2</sup>, 丁宇欣<sup>2</sup>, 张梦莹<sup>1</sup>, 王忠旭<sup>1</sup>, 贾宁<sup>1</sup>

1. 中国疾病预防控制中心职业卫生与中毒控制所职业防护与工效学研究室, 北京 100050;

2. 深圳大学机电与控制工程学院, 广东 深圳 518060

**摘要:** 目的 利用表面肌电描记(surface electromyography, sEMG)技术探究隧道防水作业典型肌肉负荷水平与肌肉疲劳间的关系, 为客观评定肌肉疲劳提供方法依据。方法 2023年4月, 采用现场实验方法, 从隧道防水施工现场选择9名钉枪作业人员, 使用sEMG方法采集其防水作业全流程中肱桡肌、肱二头肌和肱三头肌的表面肌电信号, 并通过问卷调查其主观疲劳感觉(rating of perceived exertion, RPE)分值, 分析目标肌肉时域、频域指标和RPE分值的关系, 利用联合频谱振幅分析法(joint amplitude and spectrum analysis, JASA)对受试对象局部肌肉疲劳情况进行分析。结果 9名受试对象相同疲劳程度(以RPE分值计)下的肌电数据符合正态分布( $P > 0.05$ )。随RPE分值逐渐上升, 对应肱桡肌标准化均方根值(percentage of maximal voluntary electrical activation, MVE)呈先上升、再下降又快速上升的趋势, 肱二头肌的肌电MVE呈波动上升的趋势, 而肱三头肌肌电MVE呈先下降、再快速上升又下降的趋势; 随RPE评分逐渐上升, 对应肱桡肌、肱二头肌的肌电中位频率(media frequency, MF)呈先上升、再下降的趋势, 肱三头肌的肌电MF呈波动下降的趋势。不同RPE分值组肱二头肌、肱桡肌、肱三头肌的肌电MVE、MF差异均有统计学意义( $P < 0.01$ )。肱桡肌在RPE分值为10分、15分和17分时出现疲劳; 肱二头肌在RPE分值为13分、14分、16分和17分时出现疲劳; 肱三头肌在RPE分值为11分、12分、13分、14分和15分时出现疲劳。结论 表面肌电的时域和频域信号通过JASA法判别受试对象当前肌肉疲劳状态与主观RPE分值调查有一致性, 但表面肌电技术在实际作业场景中应用尚存在问题, 仍需要进一步探究。

**关键词:** 表面肌电描记; 联合频谱振幅分析; 肌肉负荷; 肌肉疲劳; 肌肉骨骼疾患

**中图分类号:** R135    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-1326(2024)02-0142-06

**引用:** 徐擎, 莫仕围, 胡新尧, 等. 隧道防水工钉枪作业局部肌肉负荷与疲劳预警的分析与研究[J]. 职业卫生与应急救援, 2024, 42(2): 142-147.

**Study on local muscle load level and fatigue monitoring in tunnel-construction workers engaged in nail-gun operation** XU Qing<sup>1</sup>, MO Shiwei<sup>2</sup>, HU Xinyao<sup>2</sup>, LI Chuhao<sup>2</sup>, DUAN Qingsong<sup>2</sup>, YUE Peng<sup>2</sup>, ZHAO Wenyue<sup>2</sup>, ZHONG Zhikang<sup>2</sup>, NIU Dengqiang<sup>2</sup>, DING Yuxin<sup>2</sup>, ZHANG Mengying<sup>1</sup>, WANG Zhongxu<sup>1</sup>, JIA Ning<sup>1</sup> (1. Laboratory of Occupational Protection and Ergonomics, National Institute of Occupational Health and Poison Control, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100050, China; 2. College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

**Abstract: Objective** This study aimed to investigate the correlation between typical muscle load levels and muscle fatigue of tunnel-construction workers during tunnel waterproofing operations using surface electromyography (sEMG). The findings will provide a methodological foundation for the objective assessment of muscle fatigue. **Methods** Using the field experiment method, nine nail-gun operators were selected from the tunnel waterproofing operations site in April 2023. The surface electromyography signaling of their brachioradialis, biceps, and triceps in the whole process of the tunnel waterproofing operations was gathered using sEMG, and their rating of perceived exertion (RPE) was surveyed with the questionnaire. An analysis was conducted to determine the relationship between time-domain and frequency-domain

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2022YFC2503205); 中国疾病预防控制中心职业卫生与中毒控制所职业健康风险评估与国家职业卫生标准制定项目(131031109000160004)

**作者简介:** 徐擎(1992—), 男, 硕士, 助理研究员

**通信作者:** 贾宁, 研究员, E-mail: jianing@niohp.chinacdc.cn

indicators of the target muscles and the RPE scores. The JASA method was employed to analyze the local muscle fatigue of the workers. **Results** The electromyographic data of nine workers under the same fatigue degree (calculated by RPE score) were in the normal distribution ( $P > 0.05$ ). With the gradual increase of the RPE score, the percentage of maximal voluntary electrical activation (MVE) of the brachioradialis showed a trend of initially rising, subsequently falling, and then rapidly increasing; the MVE of the biceps showed a fluctuating upward trajectory; and the MVE of the triceps showed a trend of first decreasing, then rapidly rising, and then decreasing. With the gradual increase in RPE score, the corresponding media frequency (MF) of both the brachioradialis and biceps showed a trend of initially increasing and then decreasing, while the MF of the triceps showed a fluctuating downward trend. There were statistically significant differences in both MVE and MF of the brachioradialis, biceps, and triceps among different groups with varied RPE scores ( $P < 0.01$ ). Fatigue occurred in the brachioradialis at RPE scores of 10, 15, and 17; fatigue in the biceps at RPE scores of 13, 14, 16, and 17; and fatigue in the triceps at RPE scores of 11, 12, 13, 14, and 15. **Conclusions** The time-domain and frequency-domain signals of surface electromyography were consistent with the subjective RPE score survey in judging the current muscle fatigue state of the workers by the JASA method. Nevertheless, challenges still remained in applying sEMG technology to real-world operational settings, necessitating further research.

**Keywords:** surface electromyography (sEMG); joint amplitude and spectrum analysis (JASA); muscle load; muscle fatigue; musculoskeletal disorders

随着铁路建设的现代化,我国铁路里程实现了跨越式发展,我国已成为全球铁路发展最快、总里程最长的国家。这些成就离不开铁路建设者十几年如一日的艰辛付出。相较一般性施工,铁路建设特别是隧道建设具有作业环境恶劣、工作条件差、工期紧迫、任务繁重、工作强度大等特点,工作过程中广泛存在搬运重物、强迫体位、重复操作、长时间负荷、休息不充分等严重不良工效学问题,由此导致作业人员局部肌肉出现经常性的疲劳,乃至诱发工作相关肌肉骨骼疾患 (work-related musculoskeletal disorders, WMSDs)。WMSDs 是受多种工效学危险因素影响的一类慢性累积性疾病<sup>[1-2]</sup>。因此,早期识别与评估相关危险是防控该类疾病的关键。根据国际公认的“负荷-肌肉反应-疲劳-损伤”WMSDs 致病模型,作业疲劳可作为 WMSDs 的早期指征<sup>[3]</sup>。

表面肌电描记 (surface electromyography, sEMG) 技术在肌肉疲劳检测方面具有显著的应用价值,能够实时、高效地分析肌肉的生理反应,为康复医学、人体工效学评估以及运动员训练等领域提供有力的技术支持。传统的疲劳评估方法主要依赖于主观观察和简单测试<sup>[4]</sup>,不够精确和客观。而 sEMG 信号作为一种直接反映局部肌肉电活动的生物标记,为疲劳分析提供了一个全新的视角,近些年得到广泛应用。sEMG 信号在肌肉疲劳检测中具有连续和灵敏度高的特性,适用于在线实时分析<sup>[5]</sup>,在预防 WMSDs 领域已有应用<sup>[6-8]</sup>,但绝大多数都是针对静态作业<sup>[9]</sup>和实验室模拟作业<sup>[10]</sup>而开展的。

目前关于动态作业肌肉疲劳的肌电研究仍处于起步阶段,有必要对局部肌肉疲劳的表面肌电信

号进行分析与研究,探讨作业过程肌电信号的特征性变化及其与主观疲劳的关系。本研究拟以隧道防水工钉枪作业为例,为客观评定局部肌肉疲劳,预防 WMSDs 提供数据支持。

## 1 对象与方法

### 1.1 对象

根据现场作业人员具体工作内容,选择某隧道施工现场 9 名从事钉枪作业且均无肌肉骨骼疾患的男性防水工为研究对象。本研究已通过中国疾病预防控制中心职业卫生与中毒控制所伦理审查,所有研究对象均已签订知情同意书。

### 1.2 方法

2023 年 4 月,采用现场实验方法,采集上述研究对象防水作业全流程中相关的肱桡肌、肱二头肌和肱三头肌的 sEMG 和主观疲劳感觉 (rating of perceived exertion, RPE) 分值,分析上述部位局部肌肉作业负荷与相关肌肉疲劳的 sEMG 信号变化规律,分析表面肌电时域、频域指标与受试对象局部肌肉主观疲劳的相关程度,探讨局部肌肉作业疲劳的客观评定指标与方法。

#### 1.2.1 目标动作确认

隧道防水作业可概括为材料准备、施工准备、防水材料铺设与防水层黏结四部分。其中,防水材料铺设和防水层黏结是防水施工作业的重点工序。防水材料铺设是施工人员利用钉枪将防水材料固定于隧道侧壁的作业,该作业以动态作业为主;防水层粘结是施工人员利用热熔枪将防水层粘合的作业,该作业以静态(力)作业为主。本研究选择以

动态作业为主的钉枪作业作为目标动作(主要涉及肱桡肌、肱二头肌和肱三头肌三组肌肉群)。钉枪作业负荷一致性较好,且贯穿防水施工全流程,是进行肌电分析的最佳目标动作。

### 1.2.2 sEMG 信号采集

使用北京昌丰科技公司智芸薇无线表面肌电仪进行信号采集,并同步采集作业视频资料,设备共模抑制比为 120 dB,采样频率为 1 000 Hz,带通滤波为 10~480 Hz。选择肱桡肌、肱二头肌和肱三头肌作为本研究的目标肌肉群,采用 sEMG 系统从防水工开始工作时起,实时采集目标肌肉群的表面肌电信号,直至其主观感觉劳累 (RPE > 16 分) 为止。试验前对受试对象进行人体数据测量,记录身高、体重、年龄等。受试对象在施工开始前须进行目标肌肉的最大自主收缩 (maximum voluntary contraction, MVC) 测试。

电极片固定:首先使用酒精湿巾配合刮刀除去目标肌群附近皮肤的死皮、毛发和污物,待皮肤自然干燥后,将两片专用肌电电极沿目标肌肉肌纤维走向粘贴于肌腹处,电极为银-氯化银双电极,形状为正方形,边长为 35 mm,有效采集直径为 10 mm,表面附有透明导电凝胶。将肌电采集模块连接后利用肌效贴牢固固定于受试者臂部,使得电极从检测开始至结束保持在同一位置连续采集。采集电极具体位置:肱桡肌(前臂内桡侧,距外侧上 4 cm)、肱二头肌(上臂前面肌腹中央)、肱三头肌(上臂后侧肌腹中央)。

### 1.2.3 sEMG 信号处理

(1) sEMG 截取标准。本研究采用 EMG Server 3.0 软件对 sEMG 信号进行截取和分析。信号截取原则:通过同步现场作业视频资料确定受试对象完成钉枪作业的肱桡肌、肱二头肌和肱三头肌发力肌电信号波形。截取自发力起始至结束的全部波形<sup>[11]</sup>。根据研究的需要,分别计算不同目标肌肉相应 RPE 分值对应肌电信号的平均值。目标肌肉 MVC 肌电信号截取原则为:截取以最大振幅值点为中心的前后 1 s 最大幅值段 sEMG,取 3 次最大值的平均值作为目标肌肉 MVC 肌电。

(2) 时域。均方根值 (root mean square, RMS) 代表肌电信号振幅大小,与肌纤维募集数量和其放电频率有关,常用于判断肌电的能量大小,随着疲劳的加深,RMS 有上升的趋势<sup>[12]</sup>。RMS 计算见公式(1):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (1)$$

式中,  $x_i$  为 sEMG 采样值, 单位为  $\mu$ V;  $N$  为肌电

信号段数。

为消除受试对象个体因肌力大小差异带来的 sEMG 误差,对 RMS 进行标准化,将实际测得的肌电振幅值 (RMS<sub>act</sub>) 表示为最大随意收缩时肌电振幅值 (RMS<sub>mvc</sub>) 的百分比 (percentage of maximal voluntary electrical activation, MVE), 即标准化均方根值。MVE 值的计算见公式(2):

$$MVE = \frac{RMS_{act}}{RMS_{mvc}} \times 100 \quad (2)$$

(3) 频域。MF 为对应肌电信号谱能量的中位频率值(单位为 Hz),MF 会随着疲劳程度的加深逐渐减小<sup>[12]</sup>。其计算见公式(3):

$$MF = \int_0^{MF} (f) df = \int_{MF}^{\infty} P(f) df = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} P(f) df \quad (3)$$

式中,  $P(f)$  为功率谱曲线;  $df$  为频率分辨率;  $f$  为频率。

(4) 联合频谱振幅分析<sup>[13]</sup> (joint amplitude and spectrum analysis, JASA)。JASA 法是利用表面肌电时域 (RMS) 和频域 (MF) 指标判断某个单位时间段内肌肉活动负荷与肌肉疲劳间的关系。采用线性回归法分析结束时点时域、频域与起始时点对应指标的关系,获得回归曲线的回归系数建立坐标,横坐标为时域回归系数,纵坐标为频域回归系数。根据回归系数的正负值,确定肌肉在当前时段的状态:第一象限代表肌肉活动负荷增加,第二象限代表肌肉活动恢复,第三象限代表肌肉活动负荷减少,第四象限代表肌肉活动疲劳。

### 1.2.4 主观疲劳感调查

使用《主观体力感觉等级表》评价受试对象的主观疲劳感觉 (rating of perceived exertion, RPE)<sup>[14]</sup>。本研究中,调查人员自防水作业开始,每 10 min 询问受试对象前臂和上臂的主观疲劳感受,并观察其工作状态,根据问询观察结果记录当前时点的 RPE 分值。

### 1.2.5 数据整理

依据现场视频资料,将全部钉枪作业截取的肌电数据按作业持续时间顺序排列,并按照作业持续时间顺序对截取的肌电信号数据赋予对应的 RPE 分值。

### 1.2.6 质量控制

为避免因早晚班作业轮替造成的数据结果偏差,本研究统一选择早班工人(前一日无夜班)进行测试。现场调查前对调查人员进行设备使用方法及调查标准化用语培训,并对仪器设备进行检查,测试前对受试对象进行统一培训(包括 RPE 分值含义

理解、MVC 测试要点及现场采集过程中的注意事项),并严格按要求给受试对象穿戴设备。肌电数据处理根据作业劳动负荷和作业用力情况统一截取动作,并进行数据清洗,避免由于肌电信号截取造成数据偏差。

### 1.2.7 统计学分析

用 SPSS 22.0 统计软件对数据进行分析,剔除  $|Z| > 3$  的异常数据。涉及肌电信号 MVE、MF 数据分布的采用柯尔莫戈洛夫-斯米诺夫 (K-S) 检验。采用单因素方差分析比较不同 RPE 分值下的肌电信号 (MVE、MF) 差异,检验水准  $\alpha = 0.05$  (双侧)。将所得的 MVE、MF 值进行线性回归分析,得到肌电信号随 RPE 分值变化的回归系数。

## 2 结果

### 2.1 受试对象一般情况

9 名男性防水钉枪作业人员的年龄为  $(37.0 \pm 9.2)$  岁,身高为  $(164.8 \pm 3.8)$  cm,体重为  $(61.2 \pm 9.0)$  kg,体重指数 (BMI) 为  $(23.1 \pm 6.4)$  kg/m<sup>2</sup>,惯用手均为右手。肱二头肌皮褶厚度为  $(3.5 \pm 1.3)$  mm,肱三头肌皮褶厚度为  $(8.7 \pm 2.8)$  mm。

### 2.2 主观疲劳调查结果

全部受试对象的平均测试时长为  $(125.0 \pm 36.3)$  min, RPE 分值随着作业时间增加逐步上升,平均疲劳时间为  $(78.5 \pm 31.3)$  min。

### 2.3 表面肌电结果

根据现场作业视频,全部钉枪作业动作按时间顺序截取,共获得 10 900 余段肌电数据,对应的作业时间涵盖全部测试时长。将全部截取的数据片段按作业时间对应受试对象当前的 RPE 分值,即按 RPE 分值将肌电信号分组。不同 RPE 分值下,受试对象的肌电数据均符合正态分布 ( $P > 0.05$ ),具有较好的一致性。见表 1。

#### 2.3.1 时域

由表 2 可见,随着受试对象的主观疲劳 RPE 分值逐渐上升,对应的肱二头肌的肌电 MVE 呈波动上升的趋势;肱桡肌肌电 MVE 呈先上升、再下降又快速上升的趋势;而肱三头肌肌电 MVE 呈先下降、再快速上升又下降的趋势。不同 RPE 分值组肱二头肌、肱桡肌、肱三头肌的肌电 MVE 差异均有统计学意义 ( $P < 0.01$ )。

#### 2.3.2 频域

由表 3 可见,随着受试对象的 RPE 分值逐渐上升,对应肱桡肌、肱二头肌的肌电 MF 呈先波动上升,

表 1 各肌肉不同 RPE 分值下 MF、MVE 指标 K-S 检验结果

RPE 分值	肱桡肌			肱二头肌			肱三头肌		
	肌肉活动次数	MF	MVE	肌肉活动次数	MF	MVE	肌肉活动次数	MF	MVE
8	134	0.058	0.021	86	0.054	0.056	113	0.046	0.057
9	106	0.064	0.069	122	0.103	0.099	77	0.063	0.043
10	198	0.038	0.026	233	0.038	0.039	187	0.046	0.078
11	424	0.044	0.038	415	0.026	0.046	335	0.029	0.012
12	324	0.028	0.038	263	0.054	0.042	259	0.037	0.039
13	662	0.035	0.033	485	0.018	0.032	585	0.035	0.058
14	551	0.035	0.039	551	0.029	0.039	574	0.043	0.038
15	562	0.011	0.026	903	0.006	0.002	544	0.057	0.051
16	400	0.009	0.028	626	0.028	0.022	372	0.041	0.042
17	114	0.164	0.209	12	0.086	0.075	82	0.082	0.065

注:表中数据为 K-S 检验统计量 ( $D$  值); $P$  值均  $> 0.05$ 。

表 2 防水钉枪作业各目标肌肉群的 MVE 和 RPE 分值

RPE 分值	肱二头肌		肱桡肌		肱三头肌	
	肌肉活动累计次数	MVE/%	肌肉活动累计次数	MVE/%	肌肉活动累计次数	MVE/%
8	134	$16.9 \pm 13.9$	86	$35.7 \pm 17.6$	113	$46.6 \pm 2.3$
9	240	$16.2 \pm 6.1$	208	$37.8 \pm 22.3$	190	$37.0 \pm 2.56$
10	438	$15.4 \pm 6.8$	441	$49.2 \pm 24.4$	377	$28.4 \pm 14.3$
11	862	$16.8 \pm 6.5$	856	$46.0 \pm 16.5$	712	$28.7 \pm 17.9$
12	1 186	$15.3 \pm 6.5$	1 119	$40.7 \pm 15.3$	971	$36.4 \pm 20.2$
13	1 848	$16.8 \pm 8.3$	1 604	$36.6 \pm 12.2$	1 556	$40.6 \pm 26.1$
14	2 399	$18.8 \pm 8.8$	2 155	$32.3 \pm 25.6$	2 130	$44.9 \pm 28.5$
15	2 961	$19.5 \pm 21.7$	3 058	$44.1 \pm 26.8$	2 674	$56.2 \pm 22.3$
16	3 361	$22.2 \pm 6.6$	3 684	$43.0 \pm 20.9$	3 046	$39.6 \pm 17.1$
17	3 475	$26.7 \pm 20.1$	3 696	$54.7 \pm 13.4$	3 128	$32.7 \pm 6.3$
F 值		16.547		20.372		45.662
P 值		$< 0.01$		$< 0.01$		$< 0.01$

注:部分异常值已剔除。

表 3 防水钉枪作业各目标肌肉群的肌电 MF 和 RPE 分值

RPE 分值	肱二头肌		肱桡肌		肱三头肌	
	肌肉活动累计次数	MF/Hz	肌肉活动累计次数	MF/Hz	肌肉活动累计次数	MF/Hz
8	134	59.175 ± 18.393	85	93.383 ± 14.798	91	66.462 ± 24.168
9	242	57.935 ± 9.802	207	98.270 ± 20.661	168	77.941 ± 32.284
10	482	64.140 ± 29.006	439	97.996 ± 31.143	358	75.703 ± 35.272
11	902	64.984 ± 9.196	847	104.041 ± 20.675	711	75.065 ± 10.084
12	1 227	67.861 ± 10.592	1 104	105.648 ± 19.546	943	72.192 ± 16.287
13	1 859	63.963 ± 10.449	1 590	110.440 ± 21.877	1 445	71.841 ± 21.032
14	2 400	62.094 ± 12.214	2 141	105.251 ± 37.371	2 045	65.509 ± 22.188
15	2 984	62.944 ± 10.131	3 039	103.424 ± 24.520	2 561	64.585 ± 6.075
16	3 417	60.27 ± 10.499	3 703	100.667 ± 31.649	2 937	60.893 ± 19.372
17	3 531	59.151 ± 12.003	3 741	97.938 ± 7.411	3 050	62.167 ± 16.283
F 值	12.233		8.918		18.466	
P 值	< 0.01		< 0.01		< 0.01	

注:部分异常值已剔除。

再波动下降的趋势;而肱三头肌的肌电 MF 呈波动下降的趋势,不同 RPE 分值组肱二头肌、肱桡肌、肱三头肌的肌电 MF 差异均有统计学意义( $P < 0.01$ )。

#### 2.4 JASA 分析结果

将三块目标肌肉的肌电时域(MVE)和频域(MF)信号指标按 RPE 分值排序后,以 RPE 分值为自变量对相邻分进行组间线性回归,回归系数详见表 4。

表 4 目标肌肉群肌电指标随 RPE 分值变化的线性回归系数

RPE 分值	参考组 RPE 分值	肱桡肌		肱二头肌		肱三头肌	
		MVE	MF	MVE	MF	MVE	MF
9	8	0.021	4.887	-0.007	-1.240	-0.097	11.478
10	9	0.114	-0.274	-0.008	6.204	-0.085	-2.238
11	10	-0.032	6.045	0.014	0.844	0.003	-0.637
12	11	-0.053	1.606	-0.014	2.877	0.076	-2.873
13	12	-0.042	4.793	0.015	-3.897	0.042	-0.351
14	13	-0.042	-5.190	0.020	-1.869	0.043	-6.332
15	14	0.118	-1.826	0.007	0.849	0.113	-0.924
16	15	-0.012	-2.757	0.027	-2.674	-0.167	-3.692
17	16	0.118	-2.729	0.044	-1.119	-0.069	1.275

通过 JASA 四个象限图探究肌电信号和 RPE 分值的联系,可以看出肱桡肌 RPE 分值为 10 分、15 分和 17 分时出现疲劳;肱二头肌在 RPE 为 13 分、14 分、16 分和 17 分时出现疲劳;肱三头肌在 RPE 为 11 分、12 分、13 分、14 分和 15 分出现疲劳。见图 1。

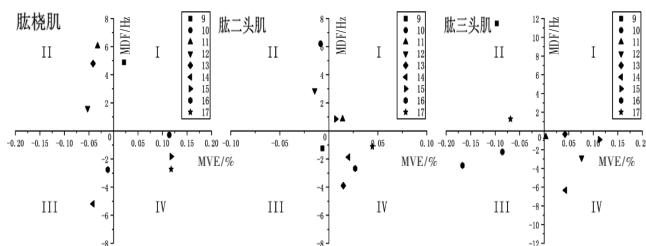


图 1 钉枪作业时目标肌肉群负荷疲劳的 JASA 分析结果

### 3 讨论

近年来,WMSDs 越来越成为职业卫生领域重点关注的疾病,相关研究逐年增加。研究<sup>[3]</sup>表明,控制作业疲劳是避免 WMSDs 产生和发展的重要手段。作业人员肌肉负荷监测和疲劳预警是该疾患防控的重要方法,而表面肌电描记(sEMG)技术即是一种客观评估肌肉用力负荷的监测手段。目前,使用 sEMG 技术评价肌肉负荷疲劳的相关研究多为实验室模拟<sup>[12, 15-16]</sup>,与实际作业相比,实验室模拟条件参数、模拟任务、信号采集的可控性更好,得到的肌电信号干扰少,易于截取分析,但实际意义尚有待于现场验证。本研究中,以隧道防水施工为例,首先验证了真实作业条件下相同作业动作不同受试对象在相同 RPE 分值情况下的肌电时域和频域指标变化的一致性,为 sEMG 技术用于现场作业人员肌肉负荷监测奠定了基础。另外,随防水施工的累计负荷进程,受试人员的主观疲劳程度逐渐增加,肱桡肌的表面肌电时域指标(MVE)在 RPE 分值为 14~17 分时呈现波动性上升趋势,频域指标(MF)在 RPE 分值为 13~17 分时出现稳步下降趋势;肱二头肌的 MVE 在 RPE 分值为 12~17 分时逐步上升,MF 在 RPE 分值为 12~17 分时波动下降;肱三头肌的 MVE 则在 RPE 分值为 10~15 分时呈现上升趋势,MF 在 RPE 分值为 9~16 分时呈现波动下降趋势。各目标肌肉群的肌电指标变化不尽相同,可能与具体的作业姿势与负荷有关,但均在出现主观疲劳的时段呈现肌电时域上升、频域下降的趋势。从肌电信号变化的大趋势看,本研究与 JASA 法判别肌肉疲劳状态<sup>[13]</sup>的标准相符。说明在复杂真实环境下,使用表面肌电技术判定肌肉负荷水平和通过主观疲劳感判定负荷水平具有一致性。按 RPE 分值逐一进行 JASA 判别,各目标肌肉群首次出现疲劳

对应的 RPE 分值分别为 10 分(肱桡肌)、13 分(肱二头肌)和 11 分(肱三头肌)。一般地,认为 RPE 分值 > 13 分时出现主观疲劳,> 16 分出现主观劳累。本研究显示,肌电判别疲劳的时点略早于主观疲劳感知。由此可见,实时的表面肌电描记在一定程度上可以作为工况状态下肌肉负荷的客观监测手段和疲劳判定方法,但其适用性还有待进一步的研究。

表面肌电信号的变化,除了取决于肌肉疲劳状况,还与负荷、肌肉用力的状况有关。真实隧道作业通常多工序多工种同步推进,受试对象进行作业时常需要协调其他工种完成其他工作,并且防水作业流程包含了材料准备(物料搬运、升降机操作等)、施工前准备(角磨机、电焊机、锤击、材料裁切等)等。施工隧道内施工环境复杂,受试对象作业时常需要上下攀爬脚手架。上述活动均存在不同程度的肌肉负荷,且负荷的随机性较高,受试对象完成这些工作内容的肌肉活动水平无法精确判定。这些因素都限制了表面肌电技术在真实现场进行肌肉疲劳判定的进一步应用<sup>[17]</sup>。

另外,表面肌电信号较其他电信号比更微弱<sup>[18]</sup>、频率更低<sup>[19]</sup>,信号采集和传输易受外界环境干扰,隧道防水作业中,使用电焊机带来的信号干扰十分严重。这对数据的截取和清洗提出了更高的要求,大量数据需要根据现场作业视频进行精确区分和判定,可能在一定程度上影响了疲劳判定的时效性。

综上所述,本研究分析了隧道防水钉枪作业局部肌肉负荷与疲劳的 sEMG 信号变化规律,初步建立了肌肉负荷水平和疲劳预警方法。结果表明,肌电的时域和频域信号通过 JASA 法判别受试对象当前肌肉疲劳状态与主观 RPE 分值调查有一致性,但表面肌电技术在实际作业场景中应用尚存在诸多限制,如检测对象作业活动中须存在贯穿作业全程的、明显的、用力模式固定的、重复性操作;作业环境信号干扰可控等。使用表面肌电技术作为真实作业现场人员肌肉负荷水平和疲劳的判定,在理论上可行,但实际应用还需要进一步探讨。

**作者声明** 本文无实际或潜在的利益冲突

## 参考文献

- [1] 陈青松. 工作相关肌肉骨骼疾患及其防控[J]. 环境与职业医学, 2023, 40(1):1-5.
- [2] 刘伟达, 王忠旭. 肌肉骨骼损伤及其工效学[J]. 环境与职业医学, 2008, 25(6):605-608.
- [3] 徐擎, 张华东, 凌瑞杰, 等. 中国职业人群作业疲劳与工作相关肌肉骨骼疼痛及损伤关联性分析[J]. 中国职业医学, 2023, 50(2):133-139.
- [4] JO D, BILODEAU M. Rating of perceived exertion (RPE) in studies of fatigue-induced postural control alterations in healthy adults: scoping review of quantitative evidence[J]. Gait Posture, 2021, 90:167-178.
- [5] WANG W. Intelligent scanning detection system of muscle exercise fatigue based on surface electromyography[J]. Scanning, 2022, 2022:9163978.
- [6] FURUTERA H, KAWAKAMI S, KODAMA N, et al. Detection of muscle fatigue caused by repeated posterior tongue lift movement from neck surface EMG: a pilot study[J]. J Oral Rehabil, 2021, 48(12):1337-1346.
- [7] 王世娟, 张忠彬, 王生, 等. 表面肌电描记术在工作相关肌肉骨骼损伤研究中的应用 [J]. 环境与职业医学, 2017, 34(9): 812-816.
- [8] 单绵佳, 展建梅, 肖光旭, 等. 长时间电脑使用诱发颈肩肌肉疲劳监测中的表面肌电分析[J]. 医用生物力学, 2021, 36(增刊 1):353.
- [9] SOMETTI D, SEMEIA L, BAEK S, et al. Muscle fatigue revisited—insights from optically pumped magnetometers[J]. Front Physiol, 2021, 12:724755.
- [10] GOUBAULT E, MARTINEZ R, BOUFFARD J, et al. Shoulder electromyography-based indicators to assess manifestation of muscle fatigue during laboratory-simulated manual handling task [J]. Ergonomics, 2022, 65(1):118-133.
- [11] 徐擎, 钟思武, 张雪艳, 等. 基于模拟搬举作业的表面肌电数据处理方法差异性研究[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2020, 38(9):651-656.
- [12] 郁英杰, 黄新宇, 王亦君, 等. 搬举作业局部肌肉易疲劳性表面肌电分析[J]. 中国职业医学, 2022, 49(3):254-259.
- [13] HÄGG G M, LUTTMANN A, JÄGER M. Methodologies for evaluating electromyographic field data in ergonomics [J]. J Electromogr Kinesiol, 2000, 10(5):301-312.
- [14] BORG G A. Psychophysical bases of perceived exertion[J]. Med Sci Sports Exerc, 1982, 14(5):377-381.
- [15] 梁展晖, 李嘉杰, 张丹, 等. 模拟供电运检人员高压塔攀爬作业局部肌肉负荷与疲劳的表面肌电分析[J]. 环境与职业医学, 2023, 40(1):62-67.
- [16] SUN J, LIU G, SUN Y, et al. Application of surface electromyography in exercise fatigue: a review[J]. Front Syst Neurosci, 2022, 16:893275.
- [17] 张梦莹, 贾宁, 莫仕围, 等. 高原隧道钢筋工弯腰作业相关肌肉负荷与疲劳的表面肌电特征分析[J]. 中国工业医学杂志, 2023, 36(1):3-6.
- [18] NA Y, CHOI C, LEE H D, et al. A Study on estimation of joint force through isometric index finger abduction with the help of sEMG peaks for biomedical applications[J]. IEEE Trans Cybern, 2016, 46(1):2-8.
- [19] DASOG M, KOIRALA K, LIU P, et al. Electromyogram bandwidth requirements when the signal is whitened[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2014, 22(3):664-670.

收稿日期: 2023-12-11