



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405191

引用格式:魏祎璇,金龙哲,文雪丽,等.眼动参数作为负重行走疲劳表征指标的适用性研究[J].科学技术与工程,2025,25(14):6128-6135.

Wei Yixuan, Jin Longzhe, Wen Xueli, et al. Applicability of eye movement parameters as indicators of fatigue during weighted walking[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(14): 6128-6135.

眼动参数作为负重行走疲劳表征指标的适用性研究

魏祎璇¹, 金龙哲¹, 文雪丽², 赵颖²

(1. 北京科技大学大安全科学研究院, 北京 100083; 2. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘 要 为准确、全面地探究救援队员负重行走体力疲劳全过程发展趋势,提出了基于眼动特征-肌电信号-主观评价的多维疲劳程度评价方法。招募 8 名志愿者进行负重行走疲劳诱发实验,利用眼镜式眼动仪,采集并分析被试眼跳次数变化率(saccade time,ST)、平均眼跳速度变化率(saccade speed,SS)和最大眼跳幅度变化率(saccade amplitude,SA)。研究表明:ST、SS、SA 与主观疲劳评价的相关性分别为 -0.857 ± 0.052 、 -0.938 ± 0.054 、不相关;与肌电信号值的相关性分别为 -0.782 ± 0.090 、 -0.942 ± 0.030 、 -0.928 ± 0.026 。对主观评分、肌电信号值和眼动参数进行多元线性回归分析,回归方程 $R^2 = 0.989$,其中肌电信号、ST、SS 和 SA 回归系数分别为 0.27、-0.16、-0.513 和 -0.124。研究结果为负重行走疲劳监测与评价方法做出了新的探索与尝试。

关键词 眼动特征; 肌电信号; 主观评价; 负重行走; 疲劳监测与评估

中图分类号 X912;

文献标志码 A

Applicability of Eye Movement Parameters as Indicators of Fatigue during Weighted Walking

WEI Yi-xuan¹, JIN Long-zhe¹, WEN Xue-li², ZHAO Ying²

(1. Research Institute of Macro-safety Science, University of Science and Technology, Beijing 100083, China;

2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

[Abstract] To accurately and comprehensively explore the entire process of physical fatigue development in rescue team members during weighted walking, a multidimensional fatigue assessment method based on eye movement characteristics, electromyographic signals, and subjective evaluation is proposed. Eight volunteers were recruited for the weight-bearing walking fatigue induction experiment. The glasses eye tracking was used to extract the eye movement data about ST (saccade time), average SS (saccade speed) and maximum SA (saccade amplitude). The correlation between the characteristics of eye movement and the degree of fatigue estimated by subjective evaluation was -0.857 ± 0.059 , -0.938 ± 0.092 , not correlated, respectively. The correlation with iEMG to judge fatigue degree was -0.782 ± 0.090 , -0.942 ± 0.030 , -0.928 ± 0.026 , respectively. Multiple linear regression analysis was performed on subjective score, iEMG value and eye movement parameters. The regression model yielded a coefficient of determination $R^2 = 0.989$, with the following standardized coefficients: iEMG signals = 0.27, ST = -0.16, SS = -0.513, and SA = -0.124. This study makes new explorations and attempts in the monitoring and evaluation methods of fatigue during weighted walking.

[Keywords] eye movement signal; electromyographic signal; subjective evaluation; weight-bearing walking; fatigue monitoring and evaluation

当前中国从事矿山、危化品领域的应急救援人员共有 62 万人,在保障人民健康和财产安全方面做出巨大贡献^[1]。因其工作特点,救援队员在日常训练和救援工作中需长时间背负大重量救援设备,背部、脊柱、腰部、肩部损伤风险升高,其中最为常见的是下背痛和颈肩综合征^[2]。由此可见,肌肉骨骼损伤成为影响救援队员等职业健康与安全重要隐

患之一^[3]。

根据致因性质,作业引发的疲劳可划分为生理疲劳、心理疲劳、精神疲劳。测量疲劳的方法包括主观量表法、客观测量法、观测法、建模法等^[4]。其中主观量表法为传统测量方法,但难以实现持续测量,且易被主观感觉、情绪等因素影响^[5-6]。表面肌电信号被认为是评价肌肉疲劳的客观指标,其幅值

收稿日期:2024-07-11; 修订日期:2025-02-27

基金项目:北京市自然科学基金(9232023)

第一作者:魏祎璇(1991—),女,汉族,河北承德人,博士,讲师。研究方向:生物电信号与安全人行为、应急疏散、职业健康工程防护。

E-mail:weiyixuan@ustb.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

和频谱特征与肌力分析密切相关^[7],广泛应用于受限空间侧屈作业、攀爬作业、长时间驾驶等工作场景的疲劳监测^[8-10]。但肌电信号测量需将电极放置在目标肌肉群的皮肤表面,影响作业者舒适性,不适合进行长时间的身体疲劳监测。

因此,有学者提出图像识别疲劳状态的评估方法。例如,Yu等^[11]采用单镜头三维姿态估计算法,并将三维姿态数据与受力数据进行生物力学计算,宫法明^[12]采用AdaBoost算法对驾驶员脸部进行检测,计算驾驶员脸部区域图垂直方向的梯度矩阵,获取眼睛在图像中的相对位置。这类算法对图像采集质量与准确度要求较高,现场实际应用性有待进一步提升。

近些年,中外学者针对易发生安全事故的作业场景,采用脑电信号、眼动信号等应用于精神疲劳与心理疲劳监测^[13-15]。例如,对驾驶员行驶过程中的注意力分布、视觉搜索模式进行检测^[16-17]。基于生理信号的测量,揭示温湿度、光照、噪声、氧气浓度等物理环境对于精神疲劳变化的影响规律^[18-21]。多项研究表明,单一的生理状态指标易受到环境、情绪和习惯等因素影响,采用单一指标和主观量表的疲劳评估正确率为70%,而多维度测量方法对疲劳的预警和评估准确率可达95%^[22]。

然而,目前鲜有基于体力疲劳下的眼动信号变化特征研究。眼动信号作为非接触式测量手段,相较于肌电信号对实验者干扰更小,其应用于体力疲劳检测适用性有待验证。现通过模拟应急救援队员长时间负重行走,采集被试眼动信号,结合肌电信号与自评价方法,探究诱发体力疲劳过程中眼动信号变化规律;初步提出基于“眼动特征-肌电信号-主观评价”的多维疲劳程度评价方法。

1 负重行走疲劳诱发试验

1.1 试验对象

招募8名北京科技大学学生参加负重行走疲劳诱发试验。该试验运动强度较高,要求所有被试均为男性,有锻炼习惯,身体素质良好,无肌肉骨骼疾病史。被试年龄(22 ± 2)岁,身高(175 ± 5)cm,体重(69 ± 5)kg,身体质量指数(21 ± 2)kg/m²。由于试验过程中需佩戴眼镜式眼动仪,要求被试双眼裸眼视力达4.5以上。

1.2 试验设备

表面肌电信号采集使用的是美国Noraxon表面肌电采集分析仪器,以及上海申风公司生产制造的915s50型Ag-AgCl电极片,表面肌电采集处理系统如图1(a)所示。眼动特征检测设备采用Tobii Pro

Glasses 2眼动仪[图1(b)],为非侵入式可穿戴设备,采样率为50 Hz,具有4个内部和外部眼动追踪摄像头,分辨率为1 920 × 1 080,每秒25帧,可采集被试在负重行走过程的高清眼动图像。试验器材还包括跑步机、75%医用酒精棉、防滑垫板、哑铃片及背包。

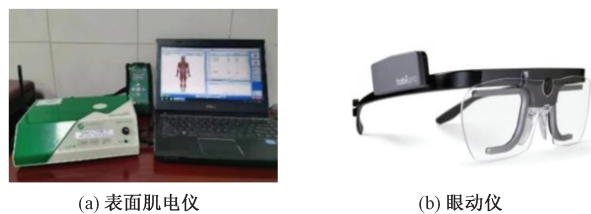


图1 试验设备

Fig. 1 Test equipment

1.3 试验设计与流程

1.3.1 试验场景设计

负重行走是救援队员应用体能训练的重要科目之一,本次实验设计参考《消防救援人员体能训练》,涉及地面坡度与负重方式双因素,共包含6组实验场景。其中3种地面坡度:平地(工况a₁)、下坡10°(工况a₂)、上坡10°(工况a₃);2种负重方式:低位双肩(工况b₁)、高位双肩(工况b₂)。如图2所示,负载重量为10 kg^[23],步速设定为7 km/h,单次试验时间为20 min。每位被试参与所有的实验场景,为减少累计疲劳对试验结果的影响,每人参与单次试验间隔为24 h以上。

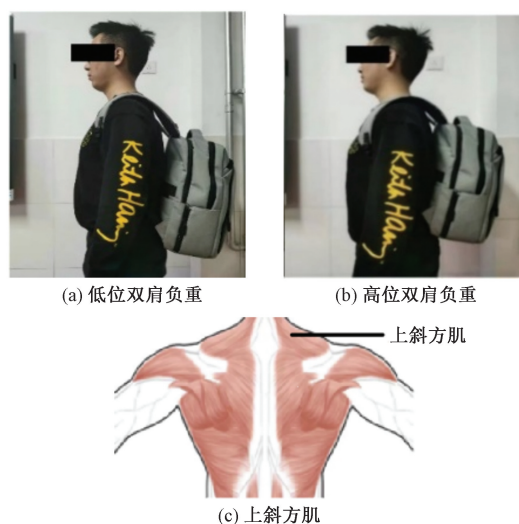


图2 负重方式及监测肌肉示意图

Fig. 2 Loading modes and monitoring muscle diagram

1.3.2 主观疲劳方法

本文研究采用的主观疲劳评估表参考《建筑工人疲劳评价量表》^[24]。

1.3.3 试验过程

(1) 试验准备。试验开始前向被试介绍研究目的、试验任务、评估量表内容、眼动仪的使用、安全注意事项等。在签署实验知情同意后,开始试验。

(2) 试验过程。试验开始前被试需进行热身运动,之后主试为其粘贴电极片。选取上斜方肌作为监测肌肉[图2(c)],以间距20 mm在测量肌肉上粘贴一对电极片。试验开始前,需针对被试佩戴的眼动仪进行校准。试验开始前及试验过程中每间隔5 min填写主观疲劳量表。试验流程如图3所示。

(3) 数据处理。对采集的表面肌电信号进行时域分析处理;采用Tobii Pro Lab(X64)分析眼动数据,包括眼跳次数、平均眼跳速度和最大眼跳幅度;使用MATLAB 2019a和IBM SPSS 25对数据开展独立样本 T 检验分析。

1.4 数据处理

1.4.1 眼动信号

本文研究测量了被试在负重行走中的眼跳次数、平均眼跳速度和最大眼跳幅度。眼跳是一种快速的注视转移,是将网膜的中央窝重新定位到视觉场景中的一个新点上,以此来获得精确而清晰的视觉。眼跳次数是指一定时间内眼跳行为发生的次数或者说注视点之间的转换次数。眼跳速度是指单位眼跳持续时间内眼跳的角度。眼跳幅度(deg)是指一次眼跳起始到终止所覆盖的范围。选取试验开始60 s前后各10 s的眼动参数平均值作为基准来衡量负重行走中的眼动变化情况。眼动参数特征值变化率的计算公式如式(1)所示, t 为试验时间。眼动参数特征值变化率包括被试眼跳次数变

化率(saccade time, ST)、平均眼跳速度变化率(average saccade speed, SS)、最大眼跳幅度变化率(maximum saccade amplitude, SA)。被试回答量表问题用时约30 s,在其前后1 min被试眼动参数和注视行为会产生波动。去除每次问询前后1 min的眼动数据,保留两次问卷中3 min的眼动数据进行分析。

眼动参数特征值变化率 =

$$\frac{t \text{ 时刻眼动参数特征值} - \text{基准值}}{\text{基准值}} \quad (1)$$

1.4.2 肌电信号

对测得的表面肌电信号进行滤波处理,得到较为平缓稳定的表面肌电电位数据。将试验阶段划分为20个阶段,每一阶段为60 s,通过表面肌电时域分析,得到每一阶段对应的积分肌电值,最终取期望值以减小误差。积分肌电值(integral electromyography, iEMG)是指肌电信号图曲线所包络的面积,反映一定时间内人体特定肌肉运动单位的放电量,计算公式为

$$iEMG = \int_t^{t+T} |EMG(t)| dt \quad (2)$$

式(2)中: $EMG(t)$ 为肌电信号随时间变化的幅度值, μV s; t 为时间,s; T 为肌电信号测量周期。

2 眼动参数变化特征分析

本文研究计算了不同工况下被试ST值、SS值、SA值,具体如图4~图6所示。从图4(a)中看出,被试ST值变化规律主要可分为三个阶段:第一阶段0~7 min,ST值在 $\pm 5\%$ 范围内,此时被试处于疲劳过渡期,身体机能的调节适应运动状态;第二阶段8~14 min,被试处于疲劳发展期,ST值出现较为

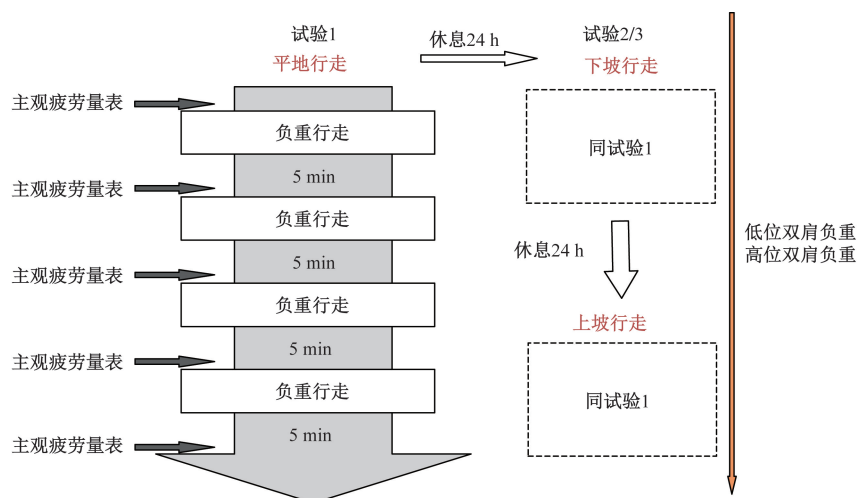


图3 负重行走试验流程图

Fig. 3 Protocol of the experiment of walking

明显的下降,平均下降 0.34% ~ 6.67%,特别在 a_3 工况时 ST 下降显著,分别下降 6.67% (工况 a_3b_1) 和 4.32% (工况 a_3b_2),可以得出 ST 降低与被试开始发生肌肉疲劳相关,随着负重时间的延长,ST 不断下降;第三阶段 15 ~ 20 min 为疲劳调整期,被试眼跳次数频率上升 0.6% ~ 2.2%。从图 4(b) 中看出,随着时间延长,不同时期的 ST 平均值出现先下降后上升趋势,不同时期的 ST 存在显著性差异。从图 5(a) 和图 6(a) 可以看出,负重时间对眼跳速度及眼跳幅度均产生显著影响。SS 和 SA 变化大体可分为两个阶段:第一阶段 0 ~ 7 min,SS 和 SA 在 $\pm 5\%$ 范围内波动。第二和第三阶段 8 ~ 20 min,SS 和 SA 持续下降,6 种工况的 SS 平均下降 8.83%,SA 平均下降 5.48%,随着试验时间的延长,眼动参数显著下降。图 5(b) 和图 6(b) 均表明不同时期的 SS 和 SA 平均值均存在显著性差异。结论表明平均眼跳速度与最大眼跳幅度在被试进入负重行走适应状态后呈现不断下降的变化规律,而眼跳次数呈现先下降后稍有回升的趋势。

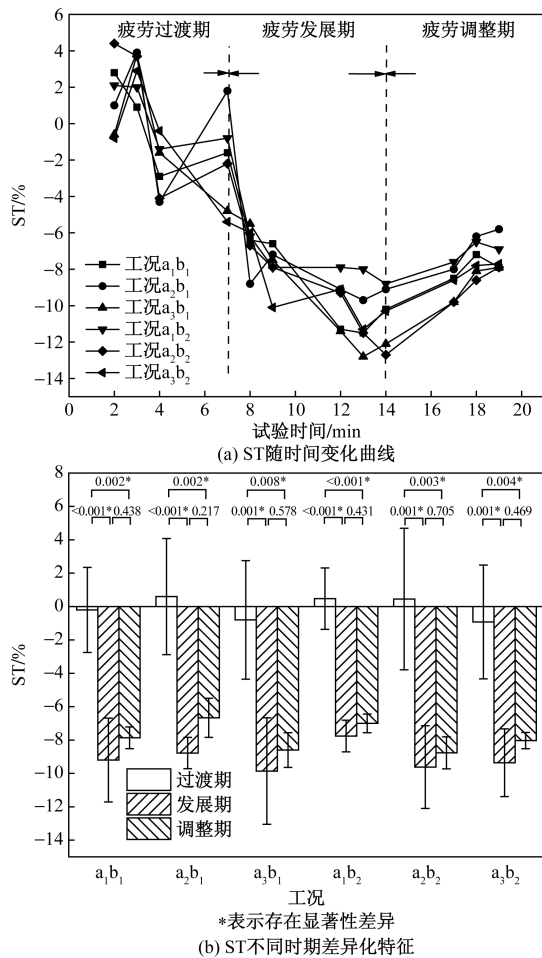


图 4 不同时期 ST 变化趋势
Fig. 4 ST value variation trend in different periods

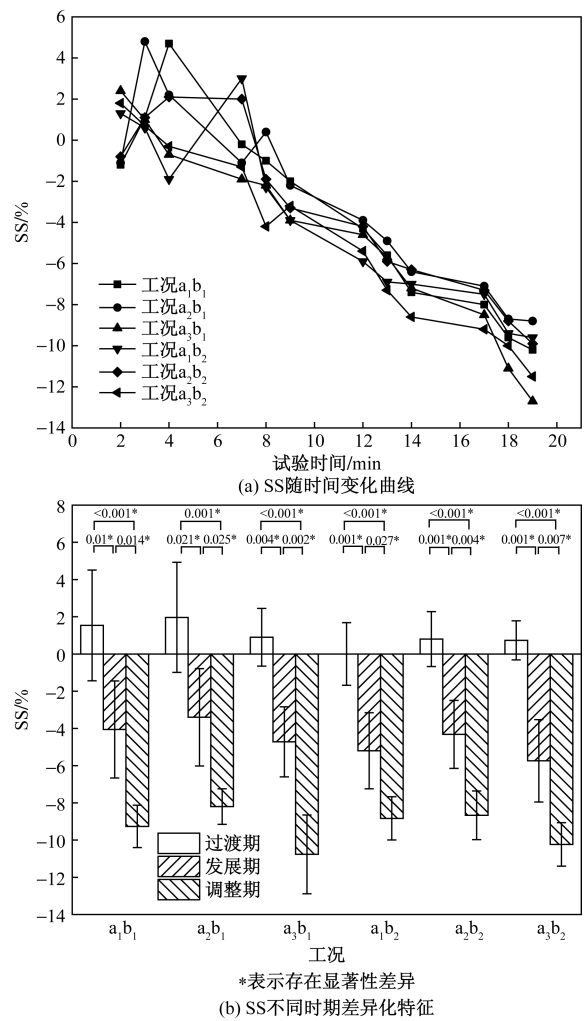


图 5 不同时期 SS 值变化趋势
Fig. 5 SS value variation trend in different periods

采用双因素方差开展不同负重方式、不同地面类型对 ST、SS、SA 的显著性影响分析,结果如表 1 所示。给定显著性水平 $\alpha = 0.05$,若 $F > F_c$,则认为该因素对试验结果存在显著性影响。地面类型对三种眼动参数均存在显著性影响,说明被试负重行走过程中的眼动参数特征受坡度影响较大;负重方式对 ST 的显著性影响仅在疲劳调整期,对 SS 的影响仅存在疲劳过渡期和疲劳发展期;负重方式、地面类型及其交互作用对 SA 均存在显著性影响。

3 主客观测量关联性分析

3.1 主观评估与客观测量相关性分析

取 0、5、10、15、20 min 的表面肌电特征参数和眼动参数实验结果数据的第 50 分位数,与 5 次主观评价结果进行相关性分析,采用皮尔逊 (Pearson) 相关系数进行衡量。主观评价、积分肌电值 (iEMG 值)、眼动参数三者的皮尔逊相关系数如表 2 所示。

iEMG 与主观评价结果的相关系数均大于 0.97,说明 iEMG 与主观评价结果存在较强的正相关关系,说明主观评价与负重行走时肌肉的疲劳程度。ST、SS 与主观评价之间存在负相关关系,随着疲劳程度的增加,眼跳次数和平均眼跳速度均下降。

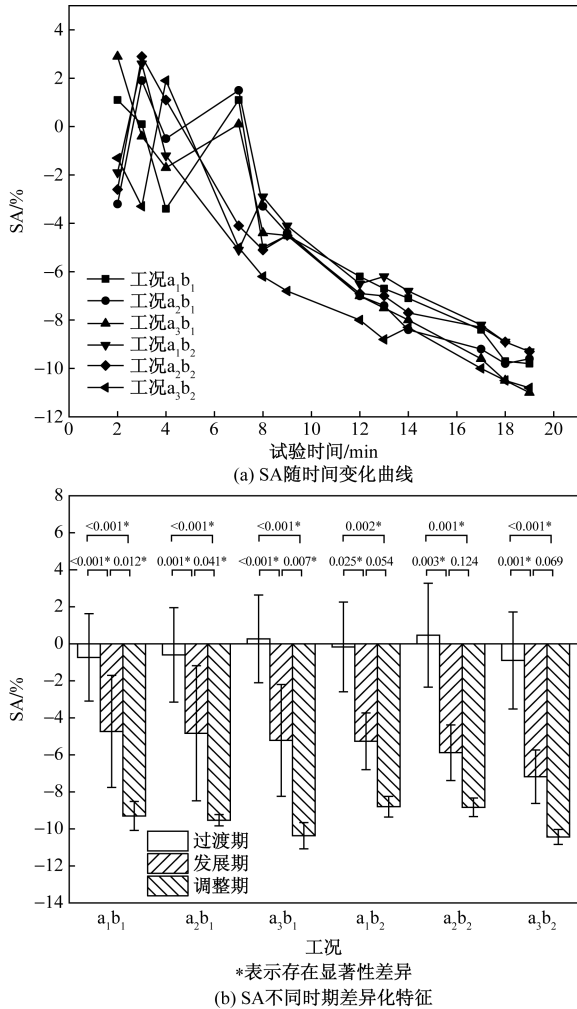


图 6 不同时期 SA 变化趋势
Fig. 6 SA value variation trend in different periods

平地行走工况下,ST 与主观评价更相关,平均相关系数为 -0.921 ;下坡和上坡行走工况下,SS 与主观评价更相关,平均相关系数分别为 -0.920 和 -0.980 。SA 与主观评价之间不存在相关关系,iEMG 与主观评价之间的相关关系更强(系数为 0.986 ± 0.007),同时,iEMG 与眼动参数之间存在负相关关系,相关系数为 -0.885 ± 0.081 ,且与 SS 和 SA 相关系数(-0.942 ± 0.028 、 -0.928 ± 0.020)高于 ST(-0.782 ± 0.049)。

3.2 基于主客观测量的疲劳评估方法

被试在不同工况条件下上斜方肌 iEMG 值和主观疲劳评分随时间变化如图 7 所示,从图 7(a) 看出,在平地和下坡行走过程中,工况 b_1 对肩部上斜方肌的肌肉负荷较小,肌电信号波动范围(1.325 ± 0.113) μV_s 、(1.229 ± 0.115) μV_s ,主观评价评分 20.38 ± 6.30 、 19.87 ± 6.41 。在上坡行走过程中,两种负重方式下 iEMG 值分别为 1.329 ± 0.112 μV_s 、 1.482 ± 0.115 μV_s ,主观评分分别为 24.51 ± 8.21 、 23.67 ± 8.78 。以工况 a_3b_2 为例,被试 iEMG 值和主观评分及个体标准差如图 7(b) 所示,随着试验进程,主观评分个体间差异程度越来越大,iEMG 值个体间差异有所降低。工况 a_3b_2 下两种双肩负重方式的主观疲劳程度热图如图 8 所示,工况 b_1 下疲劳程度起初高于工况 b_2 ,后呈现快速增长。双肩负重方式下上斜方肌近乎呈现均匀上升的规律,上坡行走过程中工况 b_2 的积分肌电值线性拟合斜率($k=0.0193$)相比于工况 b_1 ($k=0.0187$)大,说明试验过程中高位负重情况下肩部肌肉疲劳增长速度更快,与主观评价中高位双肩负重方式疲劳评分反超低位双肩负重方式疲劳评分相一致,因此在上坡行走过程中采用高位双肩负重方式一段时间后,为避免压肩,应更换为低位双肩负重方式,臀部受力。

表 1 不同工况下眼动数据的双因素方差分析结果

Table 1 Results of two-factor variance analysis of eye tracking characteristics under different conditions										
眼动参数	时间因素	疲劳过渡期			疲劳发展期			疲劳调整期		
		P	F	F _c	P	F	F _c	P	F	F _c
ST	负重方式	0.859	0.033	4.75	0.254	1.434	4.75	0.047 *	4.912	4.75
	地面类型	<0.001 *	23.511	3.88	0.024 *	5.163	3.88	0.013 *	6.350	3.88
	负重方式 × 地面类型	0.967	0.034	3.88	0.001 *	14.942	3.88	0.003 *	10.167	3.88
SS	负重方式	0.013 *	8.416	4.75	<0.001 *	75.002	4.75	0.879	0.024	4.75
	地面类型	<0.001 *	101.757	3.88	<0.001 *	52.818	3.88	<0.001 *	31.548	3.88
	负重方式 × 地面类型	0.043	4.155	3.88	0.477	0.787	3.88	0.083	3.079	3.88
SA	负重方式	<0.001 *	904.022	4.75	0.004 *	12.282	4.75	<0.001 *	35.264	4.75
	地面类型	<0.001 *	51.333	3.88	<0.001 *	74.307	3.88	<0.001 *	132.809	3.88
	负重方式 × 地面类型	<0.001 *	110.087	3.88	<0.001 *	39.368	3.88	0.001 *	12.015	3.88

注: * 表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著。

表 2 主观评价、iEMG、眼动参数的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of subjective evaluation, iEMG value and eye tracking characteristics

疲劳测量方法		工况					
		a_1b_1	a_2b_1	a_3b_1	a_1b_2	a_2b_2	a_3b_2
主观评价	iEMG	0.985 *	0.992 *	0.973 *	0.993 *	0.987 *	0.988 *
	ST	-0.926 *	-0.826 *	-0.849 *	-0.916 *	-0.827 *	-0.798 *
	SS	-0.846 *	-0.926 *	-0.970 *	-0.982 *	-0.913 *	-0.989 *
	SA	-0.289	-0.427	-0.427	-0.371	-0.266	-0.359
iEMG 值	ST	-0.803 *	-0.692 *	-0.813 *	-0.822 *	-0.801 *	-0.763 *
	SS	-0.912 *	-0.933 *	-0.954 *	-0.916 *	-0.954 *	-0.985 *
	SA	-0.910 *	-0.903 *	-0.951 *	-0.945 *	-0.944 *	-0.920 *

注：* 表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著。

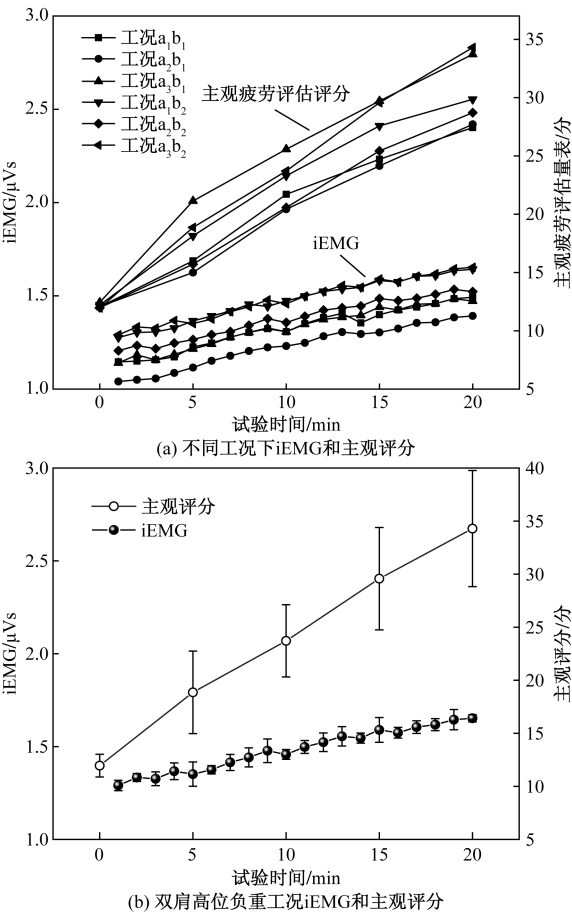


图 7 被试上斜方肌 iEMG 和主观疲劳评分

Fig. 7 iEMG value and subjective score of trapezius muscle

iEMG、主观疲劳评分和眼动参数三者变化趋势如图 9 所示,以工况 a_3b_1 为例,主观疲劳评分与 iEMG 之间增长趋势相近,而眼动参数呈逐步下降趋势。根据以往研究,将主观疲劳评分 20 分以下定义为未出现疲劳,20 ~ 30 分定义为轻度疲劳,30 分以上定义为中重度疲劳^[24]。试验开始 5 min,被试达到轻度疲劳水平,15 min 达到中重度疲劳水平。对所有数据进行归一化处理,后采用最小二乘法对主观评分、iEMG 值和眼动参数进行多元线性回归分析,被

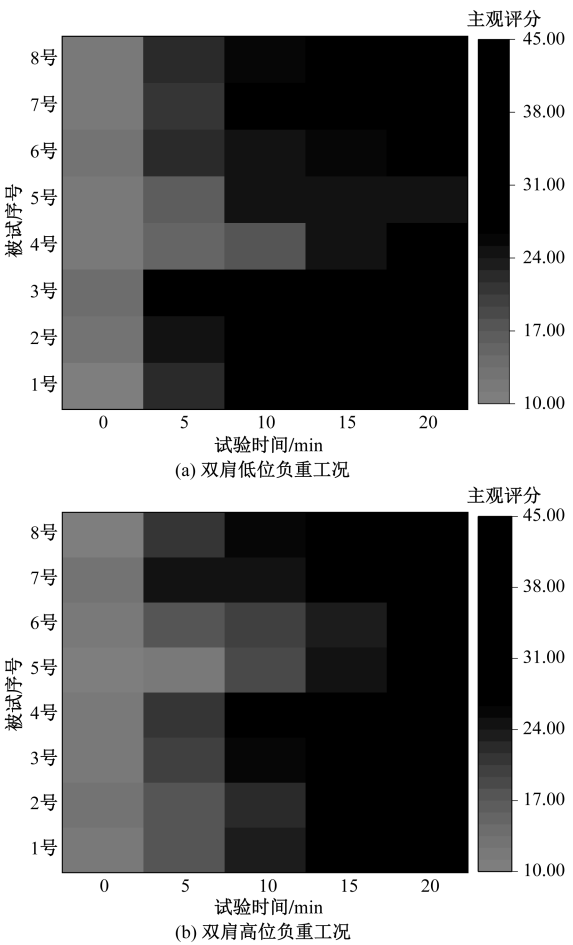


图 8 被试上斜方肌主观疲劳评价程度热图

Fig. 8 Heatmaps of subjective fatigue evaluation degree of trapezius muscle

试主观评分(Y)与 iEMG(X_1)、眼动参数(X_2 :ST, X_3 :SS, X_4 :SA)之间线性拟合方程如表 4 所示。三组曲线拟合的模型系数都满足 sig. =0.000,具有统计学意义。三个眼动指标参数与肌电信号,同主观评价的拟合方程见表 3 第 4 个公式,其中 SS 的线性回归系数绝对值最大为 0.513,说明 SS 对主观评分的影响程度最大。

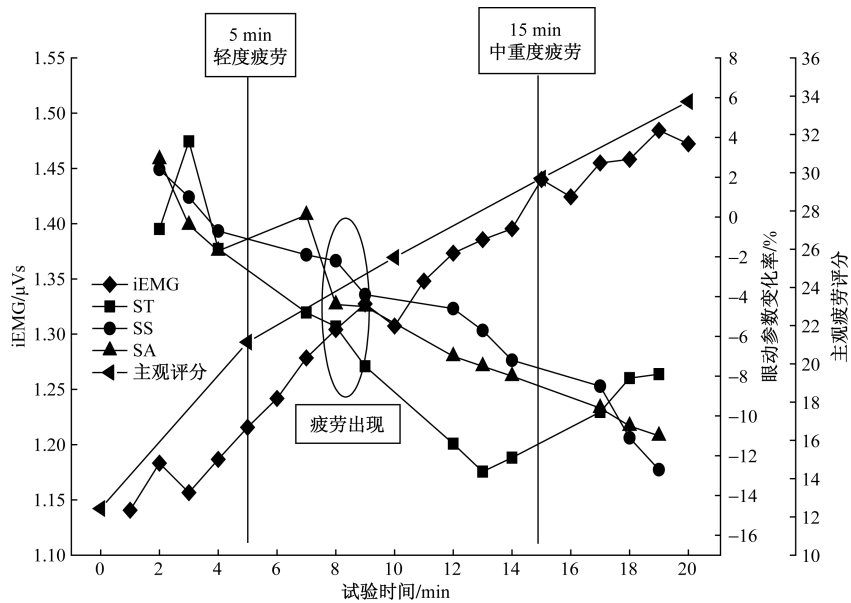


图9 低位双肩负重工况下 iEMG、主观疲劳评分和眼动参数
Fig. 9 iEMG value, subjective fatigue score and eye tracking characteristics of under low shoulder loading mode

4 目前研究的局限性

本文中研究中尚存几点不足,包括单个单元试验时长为 20 min,尚未完全还原应急救援队员长时间负重行走情景;其次,本文研究还需招募现场作业人员参与实验,并增加负重重量,以提升疲劳评价模型的泛化能力;此外,本文研究将提取更高维度的眼动参数,测量多点位的肌电信号,尝试结合面部特征识别等方法建立更加准确的多特征参数疲劳监测模型,实现体力疲劳的监测和预警功能。

表3 低位双肩负重工况主观评分(Y)与 iEMG(X_1)、眼动参数(X_i)之间线性拟合方程

Table 3 Linear fitting equation between subjective score(Y), iEMG value(X_1) and eye tracking characteristics (X_i) under low shoulder loading mode

公式	眼动参数	线性回归方程	拟合度 R^2
1	ST	$Y=0.913X_1-0.009X_2+8.426$	0.96
2	SS	$Y=0.583X_1-0.411X_3+47.909$	0.98
3	SA	$Y=0.634X_1-0.318X_4+36.401$	0.981
4	ST、SS、SA	$Y=0.270X_1-0.160X_2-0.513X_3-0.124X_4+80.917$	0.99

5 结论

针对救援队员负重行走肌肉骨骼疲劳问题,开展了负重行走疲劳诱发实验,并基于主观评价、眼动特征和肌电信号三参数对肌肉疲劳评估发展变化趋势进行定量评价。结果表明基于眼动参数特征变化规律可有效检测被试的疲劳程度值,且设备

具备方便携带、不受限于使用者姿态、检测速度快等优势,得到如下结论。

(1)随着负重实验的进行,被试的眼跳次数变化率、平均眼跳速度变化率、最大眼跳幅度变化率总体呈现下降趋势,平均下降 6.67%、8.83% 和 5.48%。

(2)眼动参数与 iEMG 呈显著负相关关系,其中平均眼跳速度变化率与 iEMG 相关系数绝对值均在 0.912 以上。与主观评估得分显著相关的评价指标是 iEMG、眼跳次数和平均眼跳速度,相关水平为 0.986 ± 0.007 、 -0.857 ± 0.052 和 -0.938 ± 0.054 。

(3)不同疲劳时期,负重方式和地面类型对眼动参数差异性影响存在差异。地面类型对三种眼动参数均存在显著性影响,负重方式、地面类型及其交互作用对最大眼跳幅度变化率均存在显著性影响。

(4)对比眼动参数、iEMG 和主观评估评分,对主观评分、iEMG 和眼动参数进行多元线性回归分析。通过结合主观评价、客观测量的手段,为实现负重行走疲劳发展多参数评价新方法提供了基础研究。

参考文献

- [1] 刘乐艺. 我国救援能力迅速增强,受灾损失大幅下降[EB/OL]. (2021-05-08) [2024-10-08]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-05/08/content_5605203.htm.
Liu Leyi. The rapid enhancement of China's rescue capabilities has significantly reduced disaster-related losses [EB/OL]. (2021-05-08) [2024-10-08]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-05/08/content_5605203.htm.

- [2] 马臻臻. 基于表面肌电的疲劳评估对背负系统的设计影响因子研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2022.
- Ma Zhenzhen. Study on the influencing factors of backpack system design based on surface EMG fatigue evaluation[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2022.
- [3] 徐相蓉, 王生, 余善法, 等. 工作相关肌肉骨骼疾患的行业流行趋势及进展[J]. 中国工业医学杂志, 2016, 29(4): 278-282.
- Xu Xiangrong, Wang Sheng, Yu Shanfa, et al. Industry epidemiological trends and progress of work-related musculoskeletal disorders[J]. Chinese Journal of Industrial Medicine, 2016, 29(4): 278-282.
- [4] 侯文文. 基于生理电信号的精神疲劳分级研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2011.
- Hou Wenwen. Study on mental fatigue grading based on physiological signals[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2011.
- [5] Demura S, Kobayashi H, Sato S, et al. Examination of validity of the subjective fatigue scale for young adults[J]. Japanese Journal of Public Health, 2001, 48(2): 76-84.
- [6] 万斌, 贾爱芳. 矿工心理疲劳状况调查分析[J]. 能源技术与管理, 2022, 47(5): 52-55.
- Wan Bin, Jia Aifang. Investigation and analysis of psychological fatigue among miners[J]. Energy Technology and Management, 2022, 47(5): 52-55.
- [7] 方博儒, 仇大伟, 白洋, 等. 表面肌电信号在肌肉疲劳研究中的应用综述[J]. 计算机科学与探索, 2024, 18(9): 2261-2275.
- Fang Boru, Qiu Dawei, Bai Yang, et al. Review of applications of surface EMG signals in muscle fatigue research[J]. Computer Science and Exploration, 2024, 18(9): 2261-2275.
- [8] 梁展琿, 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, 75.
- Liang Zhanhui, Li Jiajie, Zhang Dan, et al. Surface EMG analysis of local muscle load and fatigue in simulated high-voltage tower climbing operations by power supply inspection personnel[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2023, 40(1): 62-67, 75.
- [9] 王宏鹏, 艾力·斯木吐拉. 基于表面肌电信号的高原公路驾驶员颈部疲劳试验分析[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(26): 323-328.
- Wang Hongpeng, Aili·Simutula. Experimental analysis of neck fatigue in plateau highway drivers based on surface EMG signals[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(26): 323-328.
- [10] 徐胜, 金龙哲, 徐明伟. 受限空间钻孔工人的肌肉疲劳特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(3): 76-81.
- Xu Sheng, Jin Longzhe, Xu Mingwei. Study on muscle fatigue characteristics of workers drilling in confined spaces[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(3): 76-81.
- [11] Yu Y, Li H, Yang X, et al. An automatic and non-invasive physical fatigue assessment method for construction workers[J]. Automation in Construction, 2019, 103: 1-12.
- [12] 官法明. 交通驾驶员脸疲劳驾驶行为优化图像识别[J]. 计算机仿真, 2015, 32(11): 199-202.
- Gong Faming. Image recognition optimization of fatigue driving behavior in traffic drivers[J]. Computer Simulation, 2015, 32(11): 199-202.
- [13] Li J, Li H, Wang H, et al. Evaluating the impact of mental fatigue on construction equipment operators' ability to detect hazards using wearable eye-tracking technology[J]. Automation in Construction, 2019, 105: 102835-102835.
- [14] 李红霞, 陈磊, 田方圆, 等. 基于脑电数据的不同轮班制度下煤矿一线从业人员疲劳评估[J]. 煤矿安全, 2022, 53(11): 259-264.
- Li Hongxia, Chen Lei, Tian Fangyuan, et al. Fatigue assessment of frontline coal mine workers under different shift systems based on EEG data[J]. Coal Mine Safety, 2022, 53(11): 259-264.
- [15] 邵舒羽, 吴锦涛, 张朋, 等. 人机交互下智能仓储物流拣选操作者脑力疲劳[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(19): 8279-8287.
- Shao Shuyu, Wu Jintao, Zhang Peng, et al. Mental fatigue of intelligent warehouse logistics pickers under human-computer interaction[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(19): 8279-8287.
- [16] Hosking S G, Liu C C, Bayly M. The visual search patterns and hazard responses of experienced and inexperienced motorcycle riders[J]. Accident Analysis and Prevention, 2009, 42(1): 196-202.
- [17] 郭子慧, 郭伟伟, 谭墜元. 驾驶员接管自动驾驶车辆的机动特性和行为分析[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(1): 65-71.
- Guo Zihui, Guo Weiwei, Tan Xiyuan. Eye movement characteristics and behavior analysis of drivers taking over autonomous vehicles[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(1): 65-71.
- [18] Choi Y, Kim M, Chun C. Measurement of occupants' stress based on electroencephalograms (EEG) in twelve combined environments[J]. Building and Environment, 2015, 88: 65-72.
- [19] Park J Y, Min B K, Jung Y C, et al. Illumination influences working memory: an EEG study[J]. Neuroscience, 2013, 247: 386-394.
- [20] Périard J D, De Pauw K, Zanow F, et al. Cerebrocortical activity during self-paced exercise in temperate, hot and hypoxic conditions[J]. Acta Physiologica, 2018, 222(1): e12916.
- [21] Robertson C V, Marino F E. Cerebral responses to exercise and the influence of heat stress in human fatigue[J]. Journal of Thermal Biology, 2017, 63: 10-15.
- [22] 王政, 李延军, 严曲, 等. 监控作业脑力疲劳综合评定方法研究[J]. 航天医学与医学工程, 2010, 23(1): 20-24.
- Wang Zheng, Li Yanjun, Yan Qu, et al. Comprehensive evaluation method for mental fatigue in monitoring operations[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2010, 23(1): 20-24.
- [23] Li S S W, Chow D H K. Comparison of predictions between an EMG-assisted approach and two optimization-driven approaches for lumbar spine loading during walking with backpack loads[J]. The Journal of Human Factors and Ergonomics Society, 2020, 62(4): 565-577.
- [24] 张铭宗. 建筑工人疲劳与安全绩效的关系[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- Zhang Mingzong. Relationship between fatigue and safety performance of construction workers[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.