

中文引用格式:汪文生,姜润发,杨三军. 生理疲劳对井下作业人员安全行为能力影响模拟[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(11): 245–252.

英文引用格式:WANG Wensheng, JIANG Runfa, YANG Sanjun. Simulation on impact of physiological fatigue on safety behavior capacity of underground workers[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(11): 245–252.

# 生理疲劳对井下作业人员安全行为能力影响模拟<sup>\*</sup>

汪文生<sup>1</sup>教授, 姜润发<sup>1</sup>, 杨三军<sup>\*\*2</sup>教授

(1 中国矿业大学(北京)管理学院, 北京 100083;

2 中国矿业大学(北京)体育教研部, 北京 100083)

中图分类号:X912

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.11.0246

资助项目:国家社会科学重点项目(23AGL033)。

**【摘要】** 为预防生理疲劳诱发矿工不安全行为导致的事故,降低生理疲劳对安全行为能力的影响,开展生理疲劳反应试验。首先,将40名成年男性平均分为2组,分别诱导其产生肌肉耐力疲劳(MEF)、肌肉爆发力疲劳(MPF);其次,采用操作测试测量其注意力水平、反应速度、判断能力、身体协调能力;然后,通过配对样本 $t$ 检验分析疲劳前后的行为数据,研究生理疲劳对安全行为能力的影响;最后,从减轻作业人员的生理疲劳和降低生理疲劳对不安全行为的作用效应2方面给出管理建议。研究表明:MEF通过影响平均瞳孔直径(显著性 $P<0.01$ ),平均眨眼次数( $P<0.01$ )和平均眼跳次数( $P<0.05$ )显著降低了注意力水平,MPF对注意力水平也产生一定影响,表现为平均瞳孔直径( $P<0.01$ )的效应没有MEF显著;MPF能够降低身体协调能力,其中,手眼协调能力( $P<0.05$ )和精细操作能力( $P<0.05$ )均显著下降;MPF对反应速度有一定提升,其中,简单反应时提高0.028 s ( $P<0.01$ ),综合反应时提高0.020 s ( $P<0.05$ );生理疲劳对判断能力没有显著影响。

**【关键词】** 生理疲劳; 井下作业人员; 安全行为能力; 肌肉耐力疲劳(MEF); 肌肉爆发力疲劳(MPF)

## Simulation on impact of physiological fatigue on safety behavior capacity of underground workers

WANG Wensheng<sup>1</sup>, JIANG Runfa<sup>1</sup>, YANG Sanjun<sup>2</sup>

(1 School of Management, China University of Mining and Technology (Beijing),

Beijing 100083, China; 2 Department of Physical Education and Research,

China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** To prevent accidents caused by miners' unsafe behaviors induced by physical fatigue and reduce the impact of physical fatigue on safe behaviors ability, a physical fatigue response test was carried out. First, forty adult male participants were equally divided into two groups, with each group induced to develop MEF and MPF respectively. Subsequently, a series of operational performance tests were conducted to measure attention level, reaction speed, judgment accuracy, and body coordination ability. Then, paired sample  $t$ -tests were employed to analyze pre- and post-fatigue behavioral data, investigating

\* 文章编号:1003-3033(2025)11-0245-08; 收稿日期:2025-07-02; 修稿日期:2025-09-10

\*\* 通信作者:杨三军(1979—),男,湖南湘潭人,博士,教授,主要从事矿山救援管理、特殊人群体能方面的研究。E-mail:108947@cumt.edu.cn。

the effects of physiological fatigue on safety-related performance capabilities. Finally, evidence-based management recommendations were formulated according to the analytical results. The findings reveal that muscular endurance fatigue significantly compromise attention levels through its effects on mean pupil diameter( $P<0.01$ ), blink frequency( $P<0.01$ ), and saccadic rate( $P<0.05$ ). While muscular explosive power fatigue also demonstrates measurable influence on attentional performance as evidenced by altered pupil diameter( $P<0.01$ ), its effect magnitude is statistically inferior to that of endurance fatigue. Also, muscular explosive power fatigue reduces the body coordination ability, as both hand-eye coordination ability( $P<0.05$ ) and fine operation ability( $P<0.05$ ) have significantly declined. However, muscle explosive fatigue does have a certain improvement effect on reaction speed, with simple reaction time increasing by 0.028 s( $P<0.01$ ) and comprehensive reaction time increasing by 0.020 s( $P<0.01$ ). Physiological fatigue has no significant impact on judgment accuracy.

**Keywords:** physiological fatigue; underground workers; safety behavior capacity; muscle endurance fatigue(MEF); muscle explosive power fatigue(MPF)

## 0 引言

井下作业环境的高强度体力劳动特性使矿工长期面临生理疲劳累积风险。研究表明:持续作业引发的肌肉系统功能衰退会显著降低作业人员的安全行为能力,诱发非自主性不安全行为<sup>[1]</sup>,这一机制已被证实是煤矿安全事故的重要诱因<sup>[2]</sup>。矿山实证数据显示,疲劳相关事故占比超过 50%<sup>[3]</sup>,而我国大陆 74%的煤矿事故是由于人的不安全行为导致<sup>[4]</sup>,这一严峻态势凸显了探究疲劳效应与安全行为为关联机制的迫切性。

在矿工疲劳研究领域,学界普遍采用生理-心理二元分类体系,其中,生理疲劳对不安全行为的预测效力显著高于心理疲劳<sup>[5]</sup>。生理疲劳是指由于肌肉长时间的运动而造成的疲劳,其表现为力量输出减小和完成某一动作困难等<sup>[6]</sup>,在作业过程中长时间连续工作、体位不当、反复执行相同动作或过度使用身体某一部位都会导致生理疲劳的累积。王越<sup>[7]</sup>通过问卷与肌电试验研究发现,矿工的颈、肩、背、肘、腰等部位发生肌肉疲劳的比例较高;钻孔作业显著增加了作业人员手腕、手肘和肩部主观疲劳评分<sup>[8]</sup>;搬运作业中,矿工的腰部疲劳程度增长明显,且年龄和体重对疲劳具有显著正向影响<sup>[9]</sup>;拉车作业中,手臂肌肉和腰部肌肉疲劳累积情况严重<sup>[10]</sup>。此外,延长工作时间、恶劣的工作条件、高工作量等因素也是导致疲劳的关键原因<sup>[11]</sup>。值得注意的是,体力疲劳不仅直接削弱动作协调性,还通过职业倦怠等心理中介间接影响安全行为<sup>[12-13]</sup>。

尽管现有研究已取得重要进展,但在以下维度仍存在明显局限:生理疲劳类型构建不足,缺乏类型

细分和影响效应分析;不同类型生理疲劳与特定安全行为能力的映射关系尚未明晰。鉴于此,笔者拟针对性地设计生理疲劳的模拟试验,通过定量负荷的方式诱导疲劳产生,系统解析不同类型生理疲劳引发的安全行为能力变化关系;分析不同疲劳类型对安全行为能力的影响;讨论煤矿企业如何降低作业人员生理疲劳带来的事故风险,以期为煤矿企业的人因安全管理体系构建提供理论支撑。

## 1 生理疲劳模拟试验设计

### 1.1 被试

招募 40 名被试,均为 20~45 岁的成年健康男性,有运动习惯,平均身高(173.6±8.4)cm,平均体质质量(68.8±6.7)kg。上述所有被试无严重躯体疾病,非色盲患者,无认知障碍,测试前 24 h 未服用神经活性物质,未从事剧烈运动,未饮酒且睡眠充足(睡眠时间≥8 h)。右利手,或能够熟练使用右手操作;自愿参加本项研究。在被告知测试流程及潜在风险后签署了知情同意书。

### 1.2 疲劳诱导

慢肌纤维(Type I)主导低强度、持续性活动,引发的疲劳符合中枢-外周整合模型<sup>[14]</sup>,这种源于慢肌纤维持续耗氧作业称之为肌肉耐力疲劳(Muscle Endurance Fatigue, MEF);快肌纤维(Type II)主导高强度、瞬时发力活动,引发的疲劳符合神经驱动衰减假说<sup>[15]</sup>,这种源于快肌纤维无氧糖酵解衰竭,称为肌肉爆发力疲劳(Muscle explosive Power Fatigue, MPF)。井下作业人员的工作场景既包含长时间负重搬运、持续性保持弯腰或蹲姿作业、重复性打钻或操作设备等高重复低强度任务,也包括敲击、破碎,

强力拧动或者扳动等瞬时高负荷任务,因此,将矿工的生理疲劳类型分为 MEF 和 MPF。

将 40 名被试平均分为 MEF 组和 MPF 组试验,通过定量负荷诱导疲劳,并设置相应的疲劳诱导方式,分别探究不同疲劳状态下的安全行为表现。

根据以往研究,井下作业人员的颈、肩、背、肘、腰疲劳更为明显<sup>[7]</sup>,因此,试验着重强调模拟与井下作业人员疲劳相似的疲劳状态设置疲劳诱导过程。健身房是合适的展开模拟试验的场景,在健身房中进行器械项目模拟矿工井下疲劳具有较大优势,在健身房中可通过控制合适的方式、强度和负荷量对颈、肩、背、肘、腰进行充分的疲劳诱导;健身房中便于控制光照、噪声、温度等干扰因素,减少脑力疲劳和心理疲劳的复杂影响,进而针对性研究生理疲劳的影响;健身房中的训练器械具有较高的安全性,并能够配备完善的保护措施,便于开展试验。因此,选择在健身房中通过器械项目试验,根据动作相似性与负荷等效性,确定诱导 MEF 和 MPF 8 个试验器械及项目,分别为:二头肌弯举训练椅、三头肌推蹬器、坐式肩膊推举训练器、坐姿高位下拉器、蝴蝶机、坐式胸肌推举训练器、引体向上训练器、仰卧起坐板,这些器械在动作模式和肌肉发力方式与井下工作具有高度相似性。MEF 是慢肌纤维的持续耗氧作业的结果,采用低强度、高频次的方式诱导,被试需要以 40% 的最大力量完成 8 项器械运动,进行 4 组,每组 20 次,项间休息 30 s,组间休息 2 min;MPF 是快肌纤维的快速无氧作业的结果,采用高强度、低频次的方式诱导,被试需要以 70% 的最大力量完成 8 项器械运动,进行 4 组,每组 5 次,项间休息 30 s,组间休息 2 min。

1.3 生理疲劳测试指标

基于 HOCKEY<sup>[16]</sup>的能量补偿模型,生理疲劳会导致认知资源再分配,迫使矿工牺牲安全监控以维持基础任务。井下作业安全高度依赖人员的实时认知决策与肢体控制能力,生理疲劳会优先损害高阶认知功能(注意、判断)和神经肌肉协调性(反应、协调),进而诱发操作失误,由此确定测试指标。在疲劳诱导前后,被试需要分别进行安全行为能力测试。

采用眼动仪进行注意力水平测试,测量平均瞳孔直径、平均眨眼次数、平均眼跳次数,在完成判断能力测试时,放置在屏幕下方,记录眼动情况,采样频率 60 Hz。应用电子反应时测试仪记录被试的反应时间,根据指示灯提示进行按键操作,记录简单反

应时和综合反应时,设备精度为 0.001 s。判断能力测试涵盖判断准确性、速度及自信心 3 个维度,设置 8 道数字判断题、2 道视觉判断题和 3 道逻辑判断题,测量被试的数字判断能力、视觉判断力以及逻辑判断力,试验前后的 2 套判断题经过测试,难度无显著差异。通过改进的儿童运动评估量表第 2 版(Movement Assessment Battery for Children - 2, MABC-2)展开被试身体协调能力测试,手眼协调能力采用 10 次对墙的抛接球进行测试,左右手交替进行,用球为网球,距离墙面 2.5 m;平衡能力采用单脚闭眼站立测试,被试需要尽可能保持长时间闭眼时的身体平衡;精细操作能力用中等难度的火线冲击任务测试,如果中途任务失败,则需返回起点重新开始,采用不停表计时,直至任务完成;身体协调能力 3 项指标均用秒表记录完成时间。测试所用设备如图 1 所示。

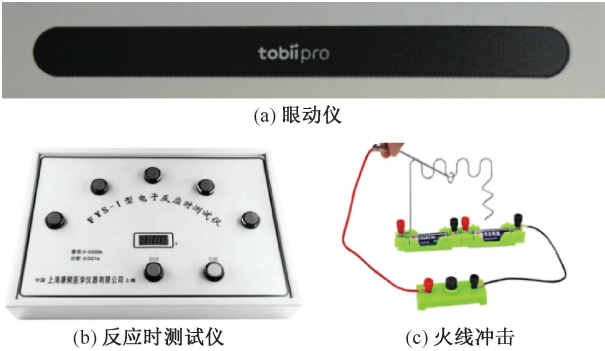


图 1 测试设备  
Fig. 1 Testing facility

2 生理疲劳对安全行为能力的影响模拟

清洗数据中的极端值,使用均值替换少量缺失值和极端值,然后进行正态分布检验, $P$  值均大于 0.05,试验结果满足正态分布,可进行配对样本  $t$  检验。

2.1 生理疲劳对注意力水平的影响

眼动数据是研究视觉注意力的重要手段,因此,采用眼动测试来确定被试的注意力水平,选取平均瞳孔直径、平均眨眼次数、平均眼跳次数 3 个指标确定注意力水平。瞳孔直径减小,反映警觉性下降和疲劳积累,认知负担低<sup>[17]</sup>,瞳孔直径增大通常与认知负荷增加、注意力集中或情绪唤醒有关<sup>[18]</sup>;眨眼频率增加意味着注意力涣散或者存在疲劳累积<sup>[19]</sup>,注意力

集中对眨眼频率有抑制效应<sup>[20]</sup>;在快速阅读或目标导向任务中,眼跳次数减少且幅度增大,表明信息整合效率高,注意力分配精准<sup>[21]</sup>,高眼跳次数可能反映注意力在多个刺激间快速切换或注意力不稳定<sup>[22]</sup>。

对试验前、后注意力水平进行配对样本 *t* 检验,结果显示,MEF 和 PMF 组的平均瞳孔直径在疲劳

前后都具有非常显著性差异,均表现为平均瞳孔直径减小;平均眨眼次数在 2 组中呈现不同结果,MEF 组表现出非常显著性差异,平均眨眼次数减少,而 MPF 组没有显著性差异;MEF 组的平均眼跳次数也具有显著性差异,表现为平均眼跳次数减少,而 MPF 组没有显著性差异,检验结果见表 1。

表 1 注意力水平配对样本 *t* 检验

Table 1 Paired-sample *t*-test for attention level

| 因素    |                             | 测试阶段 | MEF  |      |          |          | MPF  |      |          |          |
|-------|-----------------------------|------|------|------|----------|----------|------|------|----------|----------|
|       |                             |      | 均值   | 标准差  | <i>t</i> | <i>P</i> | 均值   | 标准差  | <i>t</i> | <i>P</i> |
| 注意力水平 | 平均瞳孔直径/mm                   | 前测   | 2.82 | 0.37 | 3.254 ** | 0.004    | 2.73 | 0.27 | 2.907 ** | 0.009    |
|       |                             | 后测   | 2.69 | 0.37 |          |          | 2.59 | 0.30 |          |          |
|       | 平均眨眼频率/(次·s <sup>-1</sup> ) | 前测   | 0.24 | 0.09 | 4.269 ** | 0.000    | 0.27 | 0.18 | -0.523   | 0.607    |
|       |                             | 后测   | 0.18 | 0.08 |          |          | 0.29 | 0.16 |          |          |
|       | 平均眼跳频率/(次·s <sup>-1</sup> ) | 前测   | 4.04 | 3.08 | 2.695 *  | 0.015    | 4.36 | 3.15 | -0.369   | 0.716    |
|       |                             | 后测   | 3.37 | 2.62 |          |          | 4.59 | 3.70 |          |          |

注:*P* 为显著性,\*表示 *P*< 0.05,\*\*表示 *P*< 0.01(下同)。

2.2 生理疲劳对反应速度的影响

反应时测试仪可以测试和评价被试的简单反应和综合反应,通过按键和灯光显示及音响来完成测试。简单反应时表示从信号发出到接收信号的时间,综合反应时表示从信号发出到完成信号指令的时间。

对试验前、后反应速度进行配对样本 *t* 检验,结果显示,MEF 组的 2 项反应时间在试验前后的均值都有减少,但没有表现为统计学差异;MPF 组在试验前后的 2 项反应时间减小更为显著,其中,简单反应时表现为非常显著性差异,综合反应时表现为显著性差异,检验结果见表 2。

表 2 反应速度配对样本 *t* 检验

Table 2 Paired sample *t*-test for reaction speed

| 因素   |         | 测试阶段 | MEF   |       |          |          | MPF   |       |          |          |
|------|---------|------|-------|-------|----------|----------|-------|-------|----------|----------|
|      |         |      | 均值    | 标准差   | <i>t</i> | <i>P</i> | 均值    | 标准差   | <i>t</i> | <i>P</i> |
| 反应速度 | 简单反应时/s | 前测   | 0.247 | 0.037 | 0.836    | 0.414    | 0.237 | 0.035 | 3.685 ** | 0.002    |
|      |         | 后测   | 0.242 | 0.041 |          |          | 0.209 | 0.034 |          |          |
|      | 综合反应时/s | 前测   | 0.394 | 0.041 | 1.365    | 0.189    | 0.361 | 0.038 | 2.789 *  | 0.012    |
|      |         | 后测   | 0.385 | 0.051 |          |          | 0.341 | 0.041 |          |          |

2.3 生理疲劳对判断能力的影响

通过设置问题对判断准确性、判断速度和判断自信心展开测试。设置 13 个题项展开计算判断能力、视觉判断能力和逻辑判断能力的测试。

对试验前、后判断能力进行配对样本 *t* 检验,结果显示,MEF 组和 MPF 组在试验前后的判断能力没有显著差异,检验结果见表 3。

表 3 判断能力配对样本 *t* 检验

Table 3 Paired sample *t*-test for judgment ability

| 因素   |       | 测试阶段 | MEF  |      |          |          | MPF  |      |          |          |
|------|-------|------|------|------|----------|----------|------|------|----------|----------|
|      |       |      | 均值   | 标准差  | <i>t</i> | <i>P</i> | 均值   | 标准差  | <i>t</i> | <i>P</i> |
| 判断能力 | 准确率   | 前测   | 0.81 | 0.12 | -0.871   | 0.395    | 0.80 | 0.11 | -0.956   | 0.351    |
|      |       | 后测   | 0.83 | 0.07 |          |          | 0.82 | 0.06 |          |          |
|      | 速度得分  | 前测   | 7.26 | 1.41 | -1.222   | 0.238    | 7.35 | 1.39 | -0.123   | 0.904    |
|      |       | 后测   | 7.68 | 1.29 |          |          | 7.40 | 1.88 |          |          |
|      | 自信心得分 | 前测   | 6.95 | 1.54 | -0.265   | 0.794    | 6.75 | 1.21 | -0.343   | 0.735    |
|      |       | 后测   | 7.05 | 1.72 |          |          | 6.90 | 1.92 |          |          |

2.4 生理疲劳对身体协调能力的影响

身体协调能力的构成包括平衡、空间方向和反应能力,现有的身体协调测试多为儿童或有神经疾病的成人设计<sup>[23]</sup>,不能完全适用于正常成年人。关于身体协调能力测试目前最有效的方法是 MABC-2,通过测量手部灵活性,球类技能和平衡能力来测试儿童的身体协调能力<sup>[24]</sup>,在测试儿童的身体协调能力上具有较高信度<sup>[25]</sup>。改进 MABC-2,以适用于成年人的身体协调能力测试,用手眼协调能力、平衡能力和精细操作能力来表示井下工作人员的身体协调能力。改

进的测试分为抛接球、单脚闭眼站立和火线冲击 3 个项目,其中,手眼协调能力要求被试在一定距离内进行投掷和接球动作,记录完成时长;平衡能力采用单脚闭眼站立,记录站立时长;精细操作能力采用中等难度的火线冲击任务测试,记录完成时长。

对试验前、后身体协调能力进行配对样本  $t$  检验,结果显示,试验前后 MEF 组身体协调能力没有显著差异;MPF 组在手眼协调能力上表现出显著性差异,在精细操作能力上表现出非常显著性差异,在平衡能力上没有显著差异,检验结果见表 4。

表 4 身体协调能力配对样本  $t$  检验

Table 4 Paired sample  $t$ -test for body coordination ability

| 因素     |          | 测试阶段 | MEF   |       |        |       | MPF   |       |           |       |
|--------|----------|------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-----------|-------|
|        |          |      | 均值    | 标准差   | $t$    | $P$   | 均值    | 标准差   | $t$       | $P$   |
| 身体协调能力 | 手眼协调能力/s | 前测   | 19.39 | 4.21  | -0.798 | 0.436 | 17.92 | 7.20  | -2.281 *  | 0.034 |
|        |          | 后测   | 20.19 | 4.70  |        |       | 19.92 | 8.41  |           |       |
|        | 平衡能力/s   | 前测   | 55.27 | 33.07 | 0.290  | 0.775 | 50.70 | 37.97 | 0.214     | 0.832 |
|        |          | 后测   | 53.97 | 33.19 |        |       | 48.95 | 44.46 |           |       |
|        | 精细操作能力/s | 前测   | 84.72 | 46.14 | -0.678 | 0.506 | 77.67 | 29.74 | -2.930 ** | 0.008 |
|        |          | 后测   | 94.84 | 87.30 |        |       | 87.57 | 35.78 |           |       |

3 基于 MEF 和 MPF 的安全行为能力影响分析

3.1 生理疲劳的影响分析

1) 注意力水平。在 2 种疲劳状态下,被试的注意力水平均表现出显著差异,但影响存在差异。MEF 和 MPF 组的平均瞳孔直径均显著减小,而瞳孔扩张与注意力集中、任务表现正相关<sup>[26]</sup>,表明 2 种疲劳都会使警觉性下降、疲劳积累,认知负担降低,原因可能为无论是 MEF 的低强度高频次运动,还是 MPF 的高强度低频次运动,都消耗身体能量,影响神经系统功能,降低对环境刺激的警觉,使注意力集中度下降。MEF 组平均眨眼次数和眼跳次数显著减少,反映了注意力分配效率的提升和视觉信息整合能力增强,这似乎与瞳孔直径缩小反映的注意力集中度下降存在矛盾,造成这种矛盾的原因可能与 MEF 的诱导方式有关,低强度、高频次运动可能导致中枢神经系统代偿性调节,交感神经活动降低,副交感神经占优,导致瞳孔缩小<sup>[27]</sup>,而在目标任务中,疲劳降低整体认知资源,迫使大脑更严格地分配剩余资源,通过整合多系统反应来减少能量消耗,包括缩小瞳孔和抑制非必要眼球运动,减少眨眼和扫视可避免因眼球运动引起的图像晃动,进一步优

化视觉信息处理<sup>[28]</sup>。可将眨眼和眼跳频率的降低看成对注意力的补偿,但这种补偿机制虽能短暂维持任务表现,但可能加速整体疲劳积累<sup>[29]</sup>。相比之下,MPF 组仅瞳孔直径显著减小( $P<0.01$ ),而眨眼和眼跳次数无显著变化,表明高强度、短时爆发力疲劳主要降低警觉性,但对注意力分配的影响不显著,这可能是因为快肌纤维的快速耗能更易引发局部肌肉疲劳,对持续注意力的影响较小。

MEF 主要影响慢肌纤维,这些纤维负责持续性的、低强度的肌肉活动,长时间的 MEF 可能导致大脑皮层对视觉信息的处理能力下降,从而表现为瞳孔直径减小、眨眼次数和眼跳次数减少,其可能的原因是耐力疲劳涉及长时间的肌肉活动,导致大脑的持续性负荷增加,进而影响注意力的维持,可能导致矿工在工作中更容易分心或忽视潜在危险。MPF 主要影响快肌纤维,这些纤维负责短时间、高强度的肌肉爆发,更多作用于身体的快速反应能力,虽然也会导致疲劳,但可能对视觉注意力的直接影响较小,而对注意力的分散效应不如 MEF 明显。

2) 反应速度。MPF 组的简单反应时和综合反应时均显著缩短,而 MEF 组无显著差异。这可能是 1 h MPF 诱导处于疲劳早期,大脑皮层兴奋性短暂增强,可能与中枢神经试图通过增强驱动来对抗肌肉功能下降有关<sup>[30]</sup>,使得反应速度显著提升;MEF 组的反

应速度未显著变化,可能因低强度、高频次运动未产生类似强烈刺激,耐力疲劳的持续性耗氧代谢降低了神经系统的敏感性,身体适应过程较为平缓,抵消了潜在的代偿效应,未出现明显反应速度变化。

3) 判断能力。2 种疲劳状态下的判断能力均未表现出显著差异,表明生理疲劳对高阶认知功能和判断能力的影响有限。这可能是因为判断能力更多依赖于认知能力和经验,而非单纯的生理状态,这也说明在实际工作中,矿工仅存在生理疲劳的状态下仍能保持同水平的判断能力。

4) 身体协调能力。MPF 组的手眼协调能力和精细操作能力显著下降,表明短时间、高强度的肌肉爆发对快速、精准动作的负面影响较为显著。手眼协调能力和精细操作能力需要高度的肌肉控制和精确的神经传导,MPF 可能干扰了手眼协调和精细操作所需的神经肌肉控制,影响了动作的准确性和协调性,同时肌力下降也有可能导导致动作连贯性降低<sup>[9]</sup>;而平衡能力涉及多个感官和神经系统的综合调节,可能对这种强度刺激的耐受性更强,所以未出现显著变化。MEF 组试验前后身体协调能力无显著性差异,可能是因为 MEF 的低强度、高频次运动对身体协调能力的影响在试验设定的范围内未达到显著水平,身体有足够的适应能力维持身体协调。

5) 行为安全风险分析。综合上述分析得到,MEF 导致的注意力下降可能削弱矿工对危险信号的觉察能力,增加漏检风险和受伤风险;MPF 虽提升了简单反应速度,但手眼协调能力显著下降,可能影响紧急操作的可靠性。从行为安全风险防控的角度来看,MEF 可能通过注意力涣散诱发疏忽型失误,而 MPF 可能通过协调能力下降导致操作型失误,二者均需针对性防控。

3.2 管理建议

从煤矿企业角度,要减轻井下作业人员的生理疲劳对安全行为的影响,需要从 2 方面优化,一是减轻作业人员的生理疲劳,二是降低生理疲劳对不安全行为的作用效应。

减轻生理疲劳,就是要减少作业人员在工作岗位上的疲劳随时间的累积,强化训练作业人员,安排适度休息,并优化作业环境与工具设计。开展针对疲劳与安全行为关系的培训,让员工了解不同类型生理疲劳对自身安全行为能力的具体影响,强化训练需要根据岗位来开展,针对 MEF 敏感岗位(注意力类任务),设计沉浸式虚拟现实培训场景,模拟不同疲劳程度时的应急处置流程,强化注意力资源分

配训练,同时,设计作业人员耐力训练方案,提升耐力水平;针对 MPF 敏感岗位(动作协调类任务),开发基于增强现实的设备操作指导系统,实时校正动作规范性,降低肌肉爆发力损耗,同时,设计作业人员爆发力训练方案,增强肌肉快速恢复能力。适度的休息是减轻疲劳的必要手段,针对 MEF 敏感岗位,采用间歇性工作制,安排短周期和长周期休息,如每工作 45 min 休息 5 min,每工作 4 h 休息 15 min;针对 MPF 敏感岗位,规定 MPF 类任务单次持续时长不超过 30 min,且 24 h 内累计不超过 2 h。优化环境和工具是减轻疲劳的有效方式,在 MEF 敏感区域安装智能照明系统,通过色温动态调节、亮度调节,缓解视觉疲劳;为 MPF 作业岗位配置人体工学辅助设备或机械化工具,降低瞬时肌肉负荷峰值,减少肌肉高负荷工作时长。

降低生理疲劳对不安全行为的作用效应,就是让处于 MEF 或 MPF 的作业人员,从事不受其疲劳状态影响大的工作内容,可优化岗位工作内容,安排岗位轮转或进行岗位调整。优化岗位工作内容就是不要为 MEF 敏感岗位设置需要高度集中注意力的工作内容,不要为 MPF 敏感岗位设置需要高水平身体协调能力的工作内容。优化岗位工作内容存在结构性矛盾时,可基于单班双岗的思路轮岗,在作业人员处于 MEF 状态时安排其从事注意力水平要求低的工作,而在作业人员处于 MPF 时,安排其从事身体协调能力要求低的工作,或者以天或周为周期安排矿工定期轮换至其他类型的工作岗位。对于 MEF 状态敏感的个人,其 MEF 累积较为迅速,通过管理手段进行改善的可能性较低,应调整到非 MEF 敏感岗位,MPF 同理。

4 结 论

1) 高频次、低强度的 1 h MEF,显著降低了井下作业人员的注意力集中度,易诱发疏忽型失误;低频次、高强度的 1 h MPF,则显著提升了反应速度,但会导致身体协调能力下降,也会导致注意力水平降低,其效应没有 MEF 显著,易导致操作型失误。生理疲劳对高阶判断能力无显著影响,表明矿工在短期疲劳状态下仍能依赖经验维持决策水平。

2) 实践中,建议通过控制疲劳程度和降低疲劳影响来降低生理疲劳对不安全行为的影响。可通过强化训练、适度休息和完善作业条件减轻井下作业人员的生理疲劳,通过岗位内容优化和岗位轮转制度降低疲劳人员的安全行为风险。

3) 要减轻井下作业人员的生理疲劳对安全行为的影响,基于管理建议设计一条优化路径十分有必要,这还有待深化研究;井下作业人员不安全行为的发生是一个受多方面因素共同影响的结果,其中,心理疲劳也是一个重要因素,并可能与生理疲劳产生交互作用,这也是未来一个重要研究方向。

参 考 文 献

[1] DEMEROUTI E, BAKKER A. The job demands-resources model: challenges for future research [J]. SA Journal of Industrial Psychology, 2011, 37(2): 1-9.

[2] 任大伟,徐小华,梁亚敏,等. 煤矿井下作业疲劳影响因素及对策研究[J]. 煤矿安全, 2019, 50(3): 231-234.  
REN Dawei, XU Xiaohua, LIANG Yamin, et al. Study on influence factors and countermeasures of underground work fatigue in coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(3): 231-234.

[3] ERIC S, CHARLOTTE A. Mineworkers' perspective of fatigue: a study of the Ghanaian mining industry[J]. Safety Science, 2023, 162: DOI: 10. 1016/j. ssci. 2023. 106095.

[4] 王海军,齐庆杰,梁运涛,等. 我国煤矿重特大事故统计分析及对策建议[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(9): 9-18.  
WANG Haijun, QI Qingjie, LIANG Yuntao, et al. Statistical analysis and countermeasures of major accidents in coal mines in China[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(9): 9-18.

[5] 田水承,赵钊颖,范彬彬,等. 矿工疲劳与不安全行为的 SEM 研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(6): 247-251.  
TIAN Shuicheng, ZHAO Zhaoying, FAN Binbin, et al. Research on fatigue and unsafe behavior of miners based on SEM[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(6): 247-251.

[6] 田水承,高晓颖,冯帅,等. 矿工疲劳状态分析及评定研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(7): 2 721-2 730.  
TIAN Shuicheng, GAO Xiaoying, FENG Shuai, et al. Research on the analysis and assessment of miner's fatigued state[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(7): 2 721-2 730.

[7] 王越,张麟. 矿工肌肉疲劳状况及事故预防研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(3): 191-196.  
WANG Yue, ZHANG Lin. Research on muscle fatigue and accident prevention in coal miners[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(3): 191-196.

[8] 赵川,刘思棋,赵晓一. 手过头姿势下钻孔作业肌肉疲劳 MET 预测模型[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(8): 238-246.  
ZHAO Chuan, LIU Siqi, ZHAO Xiaoyi. MET prediction model of muscle fatigue in drilling with simulated overhand position[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(8): 238-246.

[9] CHEN Ying, TIAN Shuicheng, ZOU Yuan. Modeling of the maximum endurance time of coal miners muscle fatigue for one-handed carrying tasks[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2022, 80(10): DOI: 10. 1016/j. jlp. 2022. 104895.

[10] 胡鸿,易灿南,李开伟,等. 作业人员肌肉施力疲劳评价模型[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(10): 79-85.  
HU Hong, YI Cannan, LI Kaiwei, et al. Evaluation model of muscular fatigue for force exertion task[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(10): 79-85.

[11] JODI P, GILL N. Miner fatigue detection from electroencephalogram-based relative power spectral topography using convolutional neural network[J]. Sensors, 2023, 23(22): DOI: 10. 3390/s23229055.

[12] 叶贵,王妍,任梦雪,等. 体力疲劳对建筑工人不安全行为的影响效应研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(1): 122-127.  
YE Gui, WANG Yan, REN Mengxue, et al. Study on influence effect of physical fatigue on unsafe behavior of construction workers[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(1): 122-127.

[13] 田水承,乌力吉,寇猛,等. 基于生理实验的矿工不安全行为与疲劳关系研究[J]. 西安科技大学学报, 2016, 36(3): 324-330.  
TIAN Shuicheng, WU Liji, KOU Meng, et al. Relationship between miners' unsafe behavior and fatigue based on physiological experiment[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2016, 36(3): 324-330.

[14] ENOKA R, DUCHATEAU J. Muscle fatigue: what, why and how it influences muscle function[J]. The Journal of Physiology, 2008, 586(1): 11-23.

[15] GANDEVIA S. Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue[J]. Physiological Reviews, 2001, 81(4):

1 725–1 789.

[16] HOCKEY G. Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload: a cognitive-energetical framework[J]. *Biological Psychology*, 1997, 45(1/2/3): 73–93.

[17] NASH U, MATTHEW K. Pupillary correlates of lapses of sustained attention[J]. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, 2016, 16: 601–615.

[18] ZHOU Xingcai, CEN Qingya, QIU Hongfei. Effects of urban waterfront park landscape elements on visual behavior and public preference: evidence from eye-tracking experiments[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2023, 82: DOI: 10.1016/j.ufug.2023.127889.

[19] FEDERICO R. Facial expression analysis for cognitive state estimation in aerospace human-machine systems[D]. Torino: Politecnico di Torino, 2020.

[20] TANIA M, ARTHUR R, FERNANDO C, et al. Comparative study of the blinking time between young adult and adult video display terminal users in indoor environment[J]. *Arquivos Brasileiros de Oftalmologia*, 2009, 72(5): 682–686.

[21] ENKELEJDA K, GJERGJI K, ULRICH T, et al. Do your eye movements reveal your performance on an IQ test? a study linking eye movements and socio-demographic information to fluid intelligence[J]. *Plos One*, 2022, 17(3): DOI: 10.1371/journal.pone.0264316.

[22] JESSIE Q, FJORDA K. Sustained attention outcomes of ADHD traits and typically developing participants[J]. *Original Research Article*, 2024, 14(1): 189–200.

[23] JULIA S. The target-step-test (TST) to evaluate locomotory differentiation ability-evaluation of the test and development of norm values for healthy people[D]. Jena: Friedrich-Schiller-Universität, 2023.

[24] MAJID O, MARYAM B, HILDE V, et al. Movement assessment battery for children-second edition (MABC-2): psychometric properties for Iranian children (age band 2)[J]. *Sport Sciences for Health*, 2023(19): 1 185–1 192.

[25] HUA Jing, GU Guixiong, MENG Wei, et al. Age band 1 of the movement assessment battery for children-second edition: exploring its usefulness in Chinese mainland[J]. *Research in Developmental Disabilities*, 2013, 34(2): 801–808.

[26] LERONIE N, HERMANN J, MARKUS C. Changes in attentional breadth scale with the demands of Kanizsa-figure object completion-evidence from pupillometry[J]. *Attention Perception & Psychophysics*, 2024, 86(2): 439–456.

[27] 李勇, 阴国恩, 陈燕丽. 阅读中疲劳、心理负荷因素对瞳孔大小的调节作用[J]. *心理与行为研究*, 2004(3): 545–548, 560.

LI Yong, YIN Guoen, CHEN Yanli. The regulating effect of fatigue and mental load on pupil size in text reading[J]. *Studies of Psychology and Behavior*, 2004(3): 545–548, 560.

[28] FREEK E, GUSTAVO R, IAN G. Purpose-dependent consequences of temporal expectations serving perception and action[J]. *The Journal of Neuroscience*, 2020, 40(41): 7 877–7 886.

[29] 杨晓梦, 王福兴, 王燕青, 等. 瞳孔是心灵的窗口吗? 瞳孔在心理学研究中的应用及测量[J]. *心理科学进展*, 2020, 28(7): 1 029–1 041.

YANG Xiaomeng, WANG Fuxing, WANG Yanqing, et al. Are pupils the window of our mind? pupil-related application in psychology and pupillometry[J]. *Advances in Psychological Science*, 2020, 28(7): 1 029–1 041.

[30] PETRA S, RICHARD L, BRIAN C. Preliminary evidence that anodal transcranial direct current stimulation enhances time to task failure of a sustained submaximal contraction[J]. *Plos One*, 2013, 8(12): DOI: 10.1371/journal.pone.0081418.



作者简介：汪文生（1978—），男，安徽桐城人，博士，教授，主要从事安全与应急管理，能源企业管理方面的研究。E-mail: wws@cumtb.edu.cn。