

文章编号: 1004-7220(2024)01-0145-06

# 消防员负重训练姿势仿真分析

陈娜<sup>1</sup>, 梁漫<sup>1</sup>, 胡毅彤<sup>1</sup>, 袁英峰<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 力学与安全工程学院, 郑州 450001; 2. 河南省消防救援总队, 郑州 450004)

**摘要:** **目的** 研究消防员负重状态下不同训练姿势的损伤风险和疲劳状况,降低其身体损伤和职业病的发生。**方法** 采用调查问卷对某消防救援大队消防员的训练损伤情况进行详细调查;针对引起损伤原因中占比最高的运动疲劳因素,使用 Jack 软件中的下背部分析、静态强度分析、疲劳度分析、舒适度分析等人因分析工具,对消防员的4种常用射水训练姿势,以及5层楼负重跑、挂钩梯攀爬科目的训练姿势进行仿真分析。**结果** 调查问卷统计显示,该消防大队消防员损伤的最主要因素是运动疲劳,其引起的损伤占比为69.8%。4种射水姿势均会造成膝、踝关节受伤的风险增加,4种射水姿势的舒适度从高到低依次为肩扛式、站立式、单膝跪地式、卧倒式。对于5层楼负重跑和挂钩梯攀爬的整个动态训练过程,消防员下背部均不会有增加的损伤风险,但踝、膝关节均有增加的损伤风险。**结论** 消防员负重训练存在某些训练姿势和部位不适、损伤风险增加等现象。研究结果为预防和降低消防员训练损伤、制定合理的训练计划以及有针对性的防护措施,提供科学的参考依据。

**关键词:** 消防员; 训练姿势; 损伤风险; 问卷调查; Jack 仿真; 职业病

**中图分类号:** R 318.01 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.16156/j.1004-7220.2024.01.021

## Simulation Analysis of Firefighter Training Postures with Loads

CHEN Na<sup>1</sup>, LIANG Man<sup>1</sup>, HU Yitong<sup>1</sup>, YUAN Yingfeng<sup>2</sup>

(1. School of Mechanics and Safety Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Fire and Rescue Team of Henan Province, Zhengzhou 450004, China)

**Abstract:** **Objective** To study the injury risk and fatigue status of firefighters with different training postures under load-bearing conditions to reduce the occurrence of physical injuries and occupational diseases. **Methods** First, a questionnaire was administered to investigate the training injury conditions of firefighters in a fire-rescue brigade. Considering the exercise fatigue factor, which accounts for the highest proportion of injury causes, lower back analysis, static strength analysis, fatigue analysis, comfort analysis, and other human factor analysis tools in Jack software were used to analyze four common firefighter water-shooting training postures. Training postures while climbing a five-storey building with loads and a hooked ladder were also simulated. **Results** Injury caused by exercise fatigue accounted for 69.8% of injuries and was the most important injury-causing factor. The risk of knee and ankle joint injuries increased in all four water-shooting postures. The comfort levels of the four water-shooting postures from high to low were shoulder, standing, kneeling, and lying postures. For the entire dynamic training process, while climbing the five-storey building with loads and climbing the hooked ladder, firefighters did not have an increased risk of lower back injury but had an increased risk of ankle and knee joint injuries. **Conclusions** Some training postures are uncomfortable for firefighters, and they experience body discomfort

收稿日期: 2023-04-07; 修回日期: 2023-06-03

基金项目: 中国职业安全健康协会创新创业项目(CXCY-2021-01), 郑州大学基础研究培育基金项目(JC21532027)

通信作者: 陈娜, 副教授, E-mail: nchen@zzu.edu.cn

during firefighting training with loads, thereby increasing injury risk. These results provide scientific references for the prevention and reduction of firefighter training injuries, and the formulation of reasonable training plans and targeted protective measures.

**Key words:** firefighter; training posture; injury risk; questionnaire; Jack simulation; occupational diseases

消防事故繁杂多样,火灾救援现场又极具危险性<sup>[1-2]</sup>。为提高基层消防员的综合素质和战斗力,对消防员开展日常规律性的高强度体能和专业训练必不可少。然而,长时间高强度的训练极易引发身体职业损伤,成为影响消防员职业健康和战斗力的主要因素<sup>[3-4]</sup>。牛素玲<sup>[5]</sup>利用问卷调查分析得出:消防员存在四大类职业损伤,其中训练致伤是消防员职业损伤中最普遍、最突出的因素。过去 20 年间,美国消防员在火灾现场受伤人数逐年下降,但在非火灾紧急情况下的受伤人数却一直维持在 1.2 ~ 1.6 万人,没有递减趋势<sup>[6]</sup>。Carr-Pries 等<sup>[7]</sup>研究发现,消防员训练任务的特点可能会引发肌肉骨骼损伤,较差的身体素质会增加受伤的风险。而与消防相关的任务(如繁重的搬运、不安全的工作姿势和过度训练)都与消防员高的受伤率相关<sup>[8-9]</sup>。Taylor 等<sup>[10]</sup>研究表明,消防员最多的损伤机制是肌肉疲劳。Pau 等<sup>[11]</sup>报道显示,疲劳引发平衡失调,并可能进一步引起相关的训练损伤或火场受伤。Frost 等<sup>[12]</sup>研究发现,消防员主要的损伤类型为扭伤和拉伤,最常见的受伤部位为膝关节、背部、肩部和脚踝。Horn 等<sup>[13]</sup>研究了消防员和消防教官在 3 种训练场景下的生理反应,探讨训练环境和强度对消防员生理状态的影响,并强调科学合理组织训练的重要性。刘毅<sup>[14]</sup>通过研究消防员运动损伤发生率、受伤部位、类型、原因,提出损伤预防及恢复措施。张立安<sup>[15]</sup>总结了消防员面临的训练损伤等职业安全健康风险,并提出一系列保障措施。本文利用调查问卷研究基层消防员训练损伤状况,以及 Jack 人体建模与仿真软件<sup>[16]</sup>模拟仿真消防员不同科目的训练姿势,分析其对身体部位造成的损伤,并讨论其应对措施,以期为基础消防队伍减少训练损伤的发生提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查问卷

对河南省内某消防救援大队所有消防员的总

体训练损伤情况进行问卷调查,共收到 43 份有效问卷。消防员均为男性,包括合同制、现役转改人员(正式)、2018 年以来新招人(非现役正式)消防员,并采用 SPSS 26.0 软件对问卷数据进行统计分析。

### 1.2 Jack 仿真

利用 Jack 软件对消防员负重训练姿势进行仿真分析和评估,仿真流程如图 1 所示。其中,下背部分析工具利用复杂生物力学模型,可以实时评估人体模型任意姿势和负载条件下的下背部受力情况。此工具可以计算 L4~5 脊椎处的压力,并将其与 NIOSH 标准进行比较,来判断动作的风险性。静态强度预测工具利用动力学原理评估在某种姿势强度下,每个关节部位都能够完成任务的百分比。疲劳度分析利用静态生理模型得到肌肉所受转矩,计算每个任务需要的恢复时间,该恢复时间能够反映肌肉承受的强度。舒适度分析工具能够计算数字人在给定的姿势下,整体姿势的舒适度<sup>[17]</sup>。

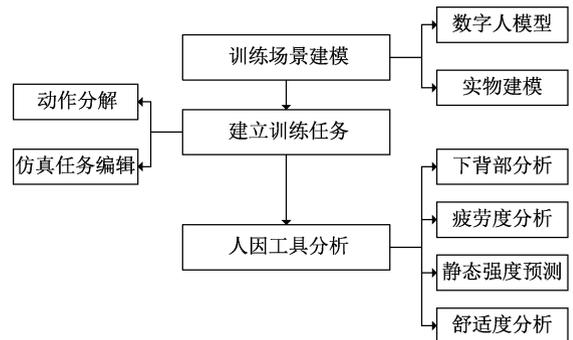


图 1 仿真流程

Fig. 1 Simulation flow

以消防员在日常训练中常见的射水、5 层楼负重跑和挂钩梯攀爬训练科目为例,利用 Jack 软件对各训练姿势的疲劳度、舒适度、损伤风险等进行分析,并讨论其相应的预控措施。现场调研发现,消防员的防护装备有防护头盔、战斗服、腰包(内含腰斧、安全绳、毛巾、防穿刺手套、挂钩、阻燃头套)、防护靴、包括面罩在内的空气呼吸器等,经现场测量,消防员穿戴完整这些防护设备共负重 28 kg。以消防员训练姿势为

研究对象,利用问卷所得的消防员人体尺寸数据结果,在 Jack 软件中建立男性消防员第 50 百分位<sup>[18]</sup> 人体模型(身高 170.6 cm,体质量 60.0 kg)。

通过观看现场射水训练和阅读相关文献,发现消防员常用的持枪射水姿势有 4 种,分别为站立式、单膝跪地式、卧倒式和肩扛式。通过改变第 50 百分位人体模型主要关节(肩部、肘部、手腕、躯干、踝部)的角度,模拟消防员 4 种射水姿势(见图 2)。进行射水训练时,除穿戴上面完整的防护装备外,消防员还需手持消防水枪。以 1 个接口直径 65 mm、当量喷嘴直径 19 mm、射程 28 m 的消防水枪为例,工作状态下其产生的负载为 6 kg 左右<sup>[19]</sup>。以此为基准,设置人体模型在 4 种射水姿势下的基本负重为 28 kg,双手承担的重量为 6 kg。

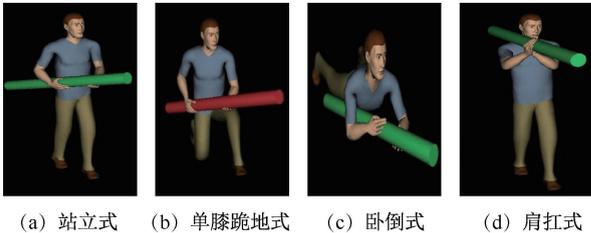


图 2 不同射水姿势仿真模型

Fig. 2 Simulation models of different water-shooting postures

(a) Standing posture, (b) Kneeling posture, (c) Lying posture, (d) Shoulder posture

## 2 结果及分析

### 2.1 问卷调查结果

由统计结果可知,该大队消防员平均身高 170.6 cm;平均体质量 60.0 kg;平均年龄(23.4±4.7)岁,最大 44 岁,最小 19 岁;平均工作年限(3.1±2.3)年,最短 1 年,最长 9 年。

被调研的消防员中,发生过训练损伤的高达 67.4%;消防员损伤部位中,下肢(足部、小腿、膝关节和踝关节等部位)受伤人数占 62.8%;背部(胸背部和腰背部)受伤人数占 34.9%;上肢(肩关节、手、上臂和肘部等部位)受伤人数占 32.6%;头面部、颈部以及躯干和内脏的受伤人数均在 15.0% 以下。损伤类型主要为肌肉劳损(46.9%)、擦伤(43.8%)、挫伤(34.4%)、关节扭伤(28.1%),以及疲劳性骨膜炎(28.1%)。从问卷中对该大队消防员损伤原因的统计结果可见,运动疲劳引起的损伤占比 69.8%,是导

致该消防大队消防员损伤的最主要因素(见图 3)。该调研结果与邵辉<sup>[20]</sup>的研究结论一致。

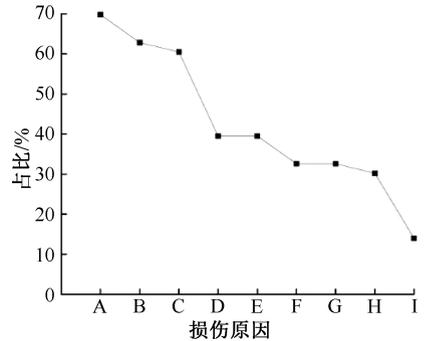


图 3 损伤原因统计

Fig. 3 Statistics of injury causes

注:A-运动疲劳,B-身体素质,C-训练季节,D-准备活动,E-心理情绪,F-训练计划,G-运动预防与处理,H-训练设施与设备,I-专业教练员。

### 2.2 仿真结果

**2.2.1 射水姿势结果分析** 对建立的站立式、单膝跪地式、卧倒式和肩扛式人体模型进行下背部分析,4 种射水姿势下的下背部受压分别为 956、1 227、2 931、1 430 N。其中,卧倒式的下背部受压最大,受伤风险高于其余 3 种姿势,但均未超过 NIOSH 规定的极限压力(3.4 kN)<sup>[21]</sup>,说明 4 种持枪射水姿势的下背部受压值均在可接受范围内,都不会对人体下背部造成增加的损伤风险。NIOSH 指南规定如果一项任务不能由 75% 的女性和 99% 的男性完成,此工作将有损伤增加的风险<sup>[22]</sup>。对站立式、单膝跪地式、卧倒式和肩扛式人体模型进行静态强度预测分析,不同射水姿势下未达到 99% 标准的完成任务人口占比如表 1 所示。其中,占比越低,表示执行任务的效果越差、损伤风险越高。结果表明,4 种射水姿势均会造成消防员膝关节、踝关节受伤的风险增加,且卧倒式姿势下膝关节和踝关节的受伤几率最高;除了膝、踝关节外,卧倒式姿势下消防员的髌关节和躯干也会有增加的受伤风险。

对于卧倒式人体模型,由于膝、踝关节的载荷超过最大强度能力,其疲劳度分析超出了 Jack 软件的分析范围,所需恢复时间最长。对站立式、单膝跪地式、肩扛式姿势下的人体模型进行疲劳度分析,分别设置姿势保持时间为 10、20、30、60 s。结果表明,随着姿势保持时间的增加,不同射水姿势所需的恢复时间也均会增加;在相同的保持时间下,

表 1 不同射水姿势的静态强度预测结果

Tab.1 Static strength prediction results for different water-shooting postures

姿势	关节执行任务人口占比
站立式	98% (膝)、96% (踝)
单膝跪地式	81% (膝)、83% (踝)
卧倒式	95% (髋)、<50% (膝、踝、躯干)
肩扛式	98% (膝)、96% (踝)

单膝跪地式所需的恢复时间最长,其次为肩扛式,站立式所需的恢复时间最短(见表 2、图 4)。综上所述,在 4 种射水姿势保持相同时间时,所需恢复时间从长到短依次为卧倒式、单膝跪地式、肩扛式、站立式。

表 2 不同射水姿势的疲劳度分析结果

Tab.2 Fatigue analysis results for different water-shooting postures

姿势保持 时间/s	恢复时间/s		
	站立式	单膝跪地式	肩扛式
10	3.69	21.81	4.19
20	19.46	115.13	22.11
30	51.49	304.67	58.49
60	271.75	1 608.04	308.73

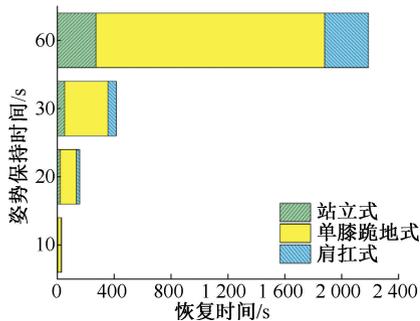


图 4 不同射水姿势和保持时间下恢复时间对比

Fig.4 Comparison of recovery time for different water-shooting postures and holding time

选择基于多关节舒适度分析的 Krist 数据源对不同射水姿势下的人体模型进行舒适度分析,给出了 0~80 中的 1 个数字作为舒适度评分,分数越低代表舒适度越高<sup>[23]</sup>。疲劳指数用来衡量个体在某种姿势下感到疲劳的速度,数值越高,代表越容易感到疲劳。对于建立的卧倒式人体模型,其 Krist 数据源的舒适度分析超过了 Jack 软件的分析范围,其最不舒适、最容易疲劳。针对其他 3 种姿势的舒适度分析结果表明,在站立式、单膝跪地式、肩扛式 3 种射水姿势中,肩扛式的整体舒适度评分为 12.1,

分值最低,舒适度最高;疲劳指数为 34.3,分值最小,说明该姿势不易使身体感到疲劳;相比其他部位,该姿势下肩、颈、左腿的不舒适感最高,跟模型中肩、颈是受力部位且左腿前弯受力保持一致。站立式的整体舒适度评分为 23.3,姿势比较舒适,疲劳指数为 35.2,较不易疲劳,不适感最高的关节依次为左臂、肩、颈。单膝跪地式的整体舒适度评分为 39.2,处于中等偏下舒适水平范围内,相比其他两种姿势分值也最高;该姿势疲劳指数为 39.8,与站立式和肩扛式相比分值最高,说明该姿势较易引起身体疲劳;同时,该姿势左腿、臀、肩的不适感最高。综合上述舒适度分析结果,不同射水姿势的舒适度从高到低依次为:肩扛式、站立式、单膝跪地式、卧倒式(见表 3)。

表 3 不同射水姿势的舒适度分析结果

Tab.3 Comfort assessment results of different water-shooting postures

指标	站立式	单膝跪地式	肩扛式
整体舒适度评分	23.3	39.2	12.1
疲劳指数	35.2	39.8	34.3
关节不舒适感排名	左臂、肩、颈	左腿、臀、肩	肩、颈、左腿

注:关节不舒适感只列出了排名前 1~3 名。

**2.2.2 5 层楼负重跑姿势结果分析** 在 5 层楼负重训练中,消防员需穿戴完整以上防护设备(共计负重 28 kg),双手各持 1 卷水带(每卷重 7.5 kg)完成登楼负重跑训练,该项科目对于提升消防员腿部爆发力和耐力有显著效果。利用 Jack 软件的仿真任务编辑器(TSB)建立人体模型部分的负重登楼动态仿真场景(从 1 层到 2 层),以模拟消防员整个负重登楼跑的训练过程。下背部分析结果表明,在负重登楼跑训练过程中,腰背部最高受力为 1 946 N,未超过 NIOSH 规定的极限压力(3.4 kN),说明该训练项目下消防员的腰背部受力合理,不会对下背部造成增加的损伤风险。

对整个动态训练过程进行静态强度预测分析,结果表明,膝关节完成任务的人口占比为 91%,踝关节为 98%;两者完成任务的人口占比均不足 99%,说明在登楼负重跑训练过程中,消防员踝、膝关节均有遭受损伤的风险。以 5 层楼负重跑为例,某个登台阶瞬间的姿势舒适度分析结果表明,该姿势的舒适度评分为 32.1,疲劳指数为 36.5,说明该

姿势处于中等舒适水平,且较容易感到疲劳;对比其他关节,该姿势下右腿、肩部的舒适度评分较高,不舒适感最强(见图5)。

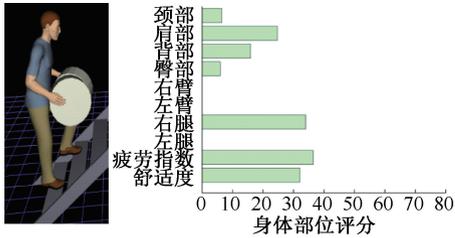


图5 5层楼负重跑中某姿势仿真模型的舒适度分析结果

Fig.5 Comfort assessment results of certain posture simulation model during climbing five-storey building with loads

**2.2.3 挂钩梯攀爬姿势结果分析** 挂钩梯攀爬是消防员专业基础训练科目之一,训练时消防员须穿戴完整上述防护设备(共计负重28 kg)。挂钩梯的特点是下部无支撑,仅靠顶部挂钩和窗台贴合,利用消防员自身体重压紧挂钩齿,迅速搭建1条向上的通道,并在无外力协助下实现连续向上攀登。利用Jack软件建立完整的挂钩梯攀爬动态仿真训练场景。仿真分析结果表明,整个动态训练过程中,人体模型腰背部受到的最大压力为2 291 N,未超过NIOSH规定的极限压力(3.4 kN),说明下背部不会有增加的损伤风险。静态强度预测分析结果表明,对于挂钩梯攀爬的动态仿真训练,膝关节执行任务的人口占比为94%,踝关节为96%;两个关节执行任务的人口占比均不足99%,有增加的损伤风险。

以挂钩梯攀爬为例,某爬梯瞬间姿势的舒适度分析结果表明,该姿势的舒适度评分为8.9,舒适水平较高;疲劳指数为21.4,较不容易感到疲劳;对比其他关节,该姿势下肩部的舒适度评分较高,不舒适感较强(见图6)。

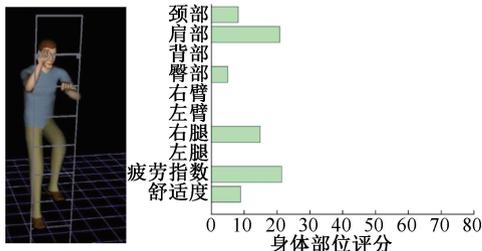


图6 挂钩梯攀爬训练中某姿势仿真模型的舒适度分析结果

Fig.6 Comfort assessment results of certain posture simulation model during climbing hooked ladder

### 3 讨论

根据站立式、单膝跪地式、卧倒式、肩扛式4种射水姿势的仿真分析结果,建议消防员在进行射水训练时应注意膝、踝关节的防护,采用卧倒式姿势时还要额外注意避免躯干和髋关节的受伤。采用单膝跪地式姿势时消防员要注意避免长时间保持固定姿势而引发肌肉疲劳和身体损伤。管理部门可为消防员提供护膝、护腰等装备以保护关节。训练结束后,消防员可通过温水浴、按摩、针灸等方式调节身体机能,缓解肩、颈、臀、手臂、腿部等关节的不适感,最大程度地预防损伤的发生<sup>[14]</sup>。

根据5层楼负重训练姿势挂钩梯攀爬训练姿势的仿真分析数据,建议消防员按照生物力学原理和人体活动特性科学施力,避免多余或不合理的动作,提高身体各部位完成任务的人口占比,减少膝关节和踝关节患肌肉骨骼损伤的风险;同时,建议组训人员充分遵循运动训练学、生理学的规律,合理安排训练负荷和强度,进行充分的热身运动和放松活动,使肌肉群轮换休息<sup>[15]</sup>;训练过程中能量消耗较大,消防员应注意及时补充能量,保持体力,注重膝关节和踝关节的保护以及肩部肌肉的放松;另外,在不影响防护和训练效果的前提下,应注重考虑减轻消防员自身佩戴防护设备的重量,相关领域专家应加快科技研发,研究功能更齐全、重量更轻的防护设备,减少负荷过大对消防员身体造成的不舒适和疲劳感<sup>[24]</sup>。

综上所述,不论以何种训练姿势,都应科学安排任务时间和负荷,减轻负重,设定合适的训练强度和休息时间,进行合理的间歇休息,积极进行疲劳恢复,以减少损伤的发生,保障基层消防员的职业健康水平,促进消防救援队伍的健康持续发展。

### 4 结论

(1) 通过调查问卷对某消防救援大队基层消防员的训练损伤情况进行详细调查,发现运动疲劳引起的损伤比例占69.8%,是导致该消防大队消防员损伤的最主要因素。

(2) 对相同负重下消防员不同射水训练姿势的仿真分析结果表明,4种持枪射水姿势的下背部受压均在可接受范围内,均不会对人体下背部造成

增加的损伤风险;采用4种不同射水姿势进行作业时,消防员均应注意膝、踝关节的防护,卧倒式姿势除此以外还有较大的髋关节、躯干受伤的风险,应注意这些部位的防护;4种射水姿势保持时间相同时,人体所需恢复时间从长到短依次为卧倒式、单膝跪地式、肩扛式、站立式;不同射水姿势的舒适度从高到低依次为肩扛式、站立式、单膝跪地式、卧倒式。

(3) 对于5层楼负重跑的整个动态训练过程,消防员的下背部受力合理,不会造成损伤风险的增加,但踝、膝关节均有遭受损伤的风险。该训练中某登楼姿势处于中等舒适水平,且较易感到疲劳,对比其他关节,该姿势的右腿、肩部的不舒适感最强。

(4) 对于挂钩梯攀爬的整个动态训练过程,下背部不会有增加的损伤风险,但踝、膝关节均有增加的损伤风险。该训练中某爬梯姿势的舒适度处于较高舒适水平,较不容易感到疲劳,对比其他关节,该姿势下肩部的不舒适感较强。

**利益冲突声明:**无。

**作者贡献声明:**陈娜负责选题、研究设计、现场调研、问卷调查、资料收集、论文修改和审阅,以及整个过程的指导;梁漫负责现场调研、问卷调查、资料收集、论文初稿撰写、数据处理和分析、图表初步绘制;胡毅彤负责图表修改绘制和论文修改;袁英峰负责现场调研的协助和消防员训练项目的选取咨询等。

## 参考文献:

[1] 鞠浪. 消防员灭火救援伤亡的原因及对策探讨[J]. 今日消防, 2021, 6(1): 63-64.

[2] KONG PW, KAN T, MOHAMED JR, *et al.* Functional versus conventional strength and conditioning programs for back injury prevention in emergency responders [J]. *Front Bioeng Biotech*, 2022, 10: 918315.

[3] 靳萌萌, 王家涛, 郭攀, 等. 持续性过载条件下飞行员峡部裂腰椎的动力学响应及损伤预测[J]. 医用生物力学, 2023, 38(1): 77-83.

JIN MM, WANG JT, GUO P, *et al.* Dynamic response and injury prediction for lumbar vertebrae of pilots with spondylolysis under persistent overload [J]. *J Med Biomech*, 2023, 38(1): 77-83.

[4] 王家涛, 包佳仪, 周前祥, 等. 飞行员机动飞行过程中颈椎动力学响应仿真及损伤预测[J]. 医用生物力学, 2022, 37(2): 262-267.

WANG JT, BAO JY, ZHOU QX, *et al.* Dynamic response simulation and damage prediction of pilot cervical vertebra during maneuver flight [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(2): 262-267.

[5] 牛素玲. 某市219名消防员职业损伤情况调查分析[J]. 中

国职业医学, 2011, 38(6): 475-477.

[6] LAVENDER SA, SOMMERICH CM, BIGELOW S, *et al.* A biomechanical evaluation of potential ergonomic solutions for use by firefighter and EMS providers when lifting heavy patients in their homes [J]. *Appl Ergon*, 2020, 82: 102910.

[7] CARR-PRIES NJ, KILLIP SC, MACDERMID JC. Scoping review of the occurrence and characteristics of firefighter exercise and training injuries [J]. *Int Arch Occup Environ Health*, 2022, 95(5): 909-925.

[8] NEGM A, MACDERMID J, SINDEN K, *et al.* Prevalence and distribution of musculoskeletal disorders in firefighters are influenced by age and length of service [J]. *J Mil Veteran Fam Health*, 2017, 3(2): 33-41.

[9] DU B, BOILEAU M, WIERTS K, *et al.* Exploring the need for and application of human factors and ergonomics in ambulance design: Overcoming the barriers with technical standards [J]. *Appl Ergon*, 2020, 88: 103144.

[10] TAYLOR NAS, DODD MJ, TAYLOR EA, *et al.* A retrospective evaluation of injuries to Australian urban firefighters (2003 to 2012) [J]. *J Occup Environ Med*, 2015, 57(7): 757-764.

[11] PAU M, KIM S, NUSSBAUM MA. Fatigue-induced balance alterations in a group of Italian career and retained firefighters [J]. *Int J Ind Ergon*, 2014, 44(5): 615-620.

[12] FROST DM, BEACH TAC, CROSBY I, *et al.* The cost and distribution of firefighter injuries in a large Canadian fire department [J]. *Work*, 2016, 55(3): 497-504.

[13] HORN GP, STEWART JW, KESLER RM, *et al.* Firefighter and fire instructor's physiological responses and safety in various training fire environments [J]. *Safety Sci*, 2019, 116: 287-294.

[14] 刘毅. 消防员常训科目的运动损伤分析与对策研究[J]. 今日消防, 2021(1): 78-79.

[15] 张立安. 消防员职业安全健康风险及保障措施研究现状与建议[J]. 环境与职业医学, 2021, 38(2): 163-168.

[16] 孙瑞山, 魏家兴, 陈毅. 基于JACK的机务人员上肢职业性损伤的仿真与评估[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(8): 222-227.

[17] 钮建伟, 张乐. JACK人因工程基础及应用实例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.

[18] 赵天娇. 消防作业动作分析与工效学评价方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

[19] 刘瑾瑜. 武警消防部队基层官兵体能训练手段实施效果的研究[D]. 北京: 首都体育学院, 2017.

[20] 邵辉. 消防职业训练运动损伤与预防研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2019.

[21] HARARI Y, BECHAR A, RIEMER R. Simulation-based optimization methodology for a manual material handling task design that maximizes productivity while considering ergonomic constraints [J]. *IEEE Trans Hum Mach Syst*, 2019, 49(5): 440-448.

[22] ZHANG Y, WU X, GAO J, *et al.* Simulation and ergonomic evaluation of welders' standing posture using Jack software [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2019, 16(22): 4354.

[23] 刘力卓, 赵义格, 韩玉琪, 等. 基于Jack远程监控操作台人机工效评价[J]. 工业工程, 2019, 22(5): 25-31.

[24] 许世虎. 消防救援单兵装备概念设计[J]. 机械设计, 2016, 33(2): 122-125.