

中文引用格式:赵树磊,孙兵,陈稳干,等. 超高海拔隧道施工人员生理指标变化及劳动强度研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(4): 239-246.

英文引用格式:ZHAO Shulei, SUN Bing, CHEN Wen'gan, et al. Physiological indicators and labor intensity of tunnel construction workers at ultra-high altitude[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(4): 239-246.

超高海拔隧道施工人员生理指标变化及劳动强度研究*

赵树磊^{1,2}, 孙兵 工程师³, 陈稳干 高级工程师³, 徐寅峰³, 王俊峰³, 郭春^{1,2}教授
(1 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2 西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 3 中铁十局集团第三建设有限公司, 安徽 合肥 230031)

中图分类号: X912 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.04.1748

资助项目: 中国交通教育研究会教育科学研究课题(JT2022YB163, JT2022YB405); 四川省交通运输科技项目(2021-ZL-04); 成都医学院四川应用心理学研究中心资助项目(CSXL-23327)。

【摘要】 为评估超高海拔隧道施工人员劳动强度, 采用理论分析法确定施工人员劳动强度评价指标, 并依托某超高海拔隧道采用可穿戴设备监测分析不同工序施工过程中人员生理指标变化, 进而计算不同工序人员劳动强度及劳动效率。研究表明: 不同工序施工人员劳动过程中生理指标变化存在明显区别, 其中, 二衬钢筋布设人员心血管负荷超过卫生限值, 机械操作人员血氧饱和度(SpO_2)低于规范值; 超高海拔隧道二衬钢筋布设劳动强度为V级, 底板施工与仰拱钢筋绑扎劳动强度等级为III级, 二衬防水布铺设与机械操作人员劳动强度等级为II级; 海拔4700 m时, 隧道施工人员劳动效率仅为平原地区的76%~88%; 完成与平原地区相同的工作量, 相应工序的人工工日消耗需要增加13.63%~31.58%。

【关键词】 超高海拔隧道; 施工人员; 生理指标; 劳动强度; 劳动效率

Physiological indicators and labor intensity of tunnel construction workers at ultra-high altitude

ZHAO Shulei^{1,2}, SUN Bing³, CHEN Wengan³, XU Yin Feng³, WANG Jun Feng³, GUO Chun^{1,2}

(1 School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China;

2 Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China; 3 No. 3 Construction Company of

China Railway No. 10 Engineering Group, Hefei Anhui 230031, China)

Abstract: To assess the labor intensity of construction personnel in ultra-high-altitude tunnels, this study employed theoretical analysis to define evaluation indicators and used wearable devices to monitor physiological changes during various construction phases in a specific ultra-high-altitude tunnel. Subsequently, labor intensity and efficiency of different tasks were calculated. Results reveal that the physiological indicators of different tasks are significantly different. Specifically, cardiovascular loads of the workers installing secondary lining steel bars exceeded the hygienic limits, and peripheral oxygen

saturation (SpO_2) levels of the mechanical operators is lower than the standard values. Labor intensity is classified as Grade V for installing secondary lining steel bars, Grade III for bottom plate construction and arch steel bar binding, and Grade II for installing secondary lining waterproof cloth and for mechanical operations. At an altitude of 4 700 meters, the labor efficiency ranges only from 76% to 88% compared to the plain areas. To match the workload in the plain areas, the labor input must be increased by approximately 13.63% to 31.58% depending on the process.

Keywords: ultra-high-altitude tunnel; construction workers; physiological indicators; labor intensity; labor efficiency

0 引言

近年来,为加快路网建设,我国交通基础设施逐渐往西部艰险山区、青藏高原边缘及腹地深入推进,导致高海拔及超高海拔隧道建设项目逐渐增多。据不完全统计,我国已有高海拔及超高海拔隧道近百座,且海拔高度和建设长度仍在不断增加,高海拔低压低氧的特殊气候环境给隧道工程建设带来严峻挑战^[1]。郑金龙等^[2]根据川藏高原环境特点,将海拔4 200 m以上地区定义为严重缺氧地区。由于超高海拔地区氧气含量较低,相同的劳动内容也会给施工人员带来比平原地区更大的生理负荷,同时,过重的体力劳动也会使施工人员面临高原脑水肿等高原疾病风险,威胁施工人员生命财产安全^[3-4]。因此,有必要探究超高海拔隧道施工关键工序劳动强度,为隧道施工组织优化提供依据。

对高原劳动强度的分级研究,是研究高原劳动生理健康、劳动安全和劳动人员保护工作的不可或缺的部分。叶玉华等^[5]依托青藏铁路部分标段40个典型工作岗位,开展了体力劳动强度测量,并作了施工体力劳动强度分级;李岳等^[6]测定了某省不同海拔高度养路工人劳动强度,发现海拔升高会加重生理负荷,导致劳动强度增大;吴秋军等^[7]依托雀儿山隧道,对比分析了高海拔隧道与平原隧道相同工序的劳动强度,发现高海拔隧道施工工序劳动强度普遍比平原隧道施工劳动强度提升一级;郑鑫等^[8]依托圭嘎拉隧道,评价了高海拔隧道关键工序人员劳动强度,明确了不同工序劳动强度等级;GUO Chun等^[4]研究了人员劳动强度与耗氧量之间的关系,确定了高海拔隧道施工临界供氧高度值及供氧标准;HAN Shurong等^[9]研究了劳动强度、海拔高度、补氧频率、身体质量指数(Body Mass Index, BMI)等之间的相关关系,认为良好的轮岗制度可以有效预防高原疾病发生;LI Zijun等^[10-12]通过改善供氧方式来减小高海拔施工人员劳动强度。

综上所述,虽然诸多学者针对高海拔隧道施工人员劳动强度开展了研究,但是,以往研究只对不同工序的劳动强度作了分级,忽略了劳动过程中施工人员的生理指标变化,导致不能采取针对性的防护措施。鉴于此,笔者拟依托目前正在建的某高海拔隧道,开展施工关键工序劳动强度研究,并监测分析完整劳动过程的生理指标变化,以期保障隧道施工人员生命财产安全,并为高海拔隧道施工组织优化提供参考。

1 劳动强度评价指标与分级

1.1 评价指标

体力劳动过程中,肌肉消耗所需能量源于糖类、脂肪及蛋白质的氧化,劳动强度越高则能量消耗越大。机体的心血管系统、呼吸系统、内分泌系统等系统均在劳动刺激下产生适应性调节,具体体现在每搏输出量、肺通气量、各类激素分泌量等指标的变化。然而,这些生理指标有部分难以测定,不适用于工程应用,如激素水平、血红蛋白数量等,较容易测定且能在一定程度上表示超高海拔隧道施工人员劳动强度的生理指标主要为心率、呼吸频率、血氧饱和度(Peripheral Oxygen Saturation, SpO_2)、摄氧量4种,且已有学者基于心率、摄氧量、平均能量代谢率进行劳动强度分级^[13-15]。

1.2 劳动强度指数计算及分级标准

1.2.1 劳动强度指数计算

目前,超高海拔地区施工人员劳动强度计算依据有《铁道行业体力劳动强度分级》^[16]与国家职业卫生标准《工作场所物理因素测量第10部分:体力劳动强度分级》^[17]。体力劳动强度指数的影响因素主要包括能量消耗以及时间消耗。其中,能量消耗均基于肺通气量(8.0~30.9 L)计算,然而,过往对超高海拔地区的测试结果发现肺通气量远超于30.9 L,因此,规范公式并不适用于超高海拔劳动强度计算。基于此,引入临床医学公式,基于摄氧量测试计算能量代谢

率,该式不存在适用范围,具体见下式:

$$M = (20.19 \times V_{O_2}) \quad (1)$$

式中: M 为工作日平均能量代谢率, $\text{kJ}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$; V_{O_2} 为摄氧量,表示一定时间内被身体吸收和利用的氧气量, L/min ;

劳动时间率 R_t 计算见下式:

$$R_t = \frac{\sum T_{si}}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中: R_t 为劳动时间率, $\%$; T 为工作日总工时, min ,取 8 h ; $\sum T_{si}$ 为纯体力劳动时间, min 。

劳动强度指数 I 计算见下式:

$$I = 3R_t + 1.673M(1 + K) \quad (3)$$

式中 K 为海拔系数。当海拔高度为 $3\ 000 \sim 4\ 000\text{ m}$ 时, $K = 0.56$;当海拔高度 $\geq 4\ 000\text{ m}$ 时, $K = 0.72$ 。

1.2.2 劳动强度分级标准

根据文献[16],将劳动强度分为5级,见表1。

表1 铁道行业体力劳动强度分级

Tab.1 Classification of physical labor intensity in railway industry

体力劳动强度级别	体力劳动强度指数	评价
I	$I \leq 15$	轻
II	$15 < I \leq 20$	中
III	$20 < I \leq 25$	重
IV	$25 < I \leq 30$	很重
V	$I > 30$	极重

2 超高海拔隧道施工人员现场测试

2.1 超高海拔隧道工程概况

某隧道地面高程 $4\ 300 \sim 4\ 600\text{ m}$,平均海拔 $4\ 400\text{ m}$,其中斜井海拔高度 $4\ 700\text{ m}$,为目前世界上在建的海拔最高的铁路隧道。

2.2 超高海拔隧道施工人员生理指标测试设备

2.2.1 超高海拔隧道施工人员生理指标测试仪器

测试仪器为专业运动心肺指标遥测系统,可实时监测运动过程人员生理指标变化,如图1所示。

该系统各组成部分的技术性能指标见表2。

表2 运动心肺指标遥测系统技术性能指标

Tab.2 Technical performance indicators of exercise cardiopulmonary index telemetry system

项目	测量范围	精度
肺通气量/ $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	0~300	2%或者0.05 L/min
摄氧量/ $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	0~7	3%或者0.05 L/min
呼吸交换率	0.6~2.0	4%

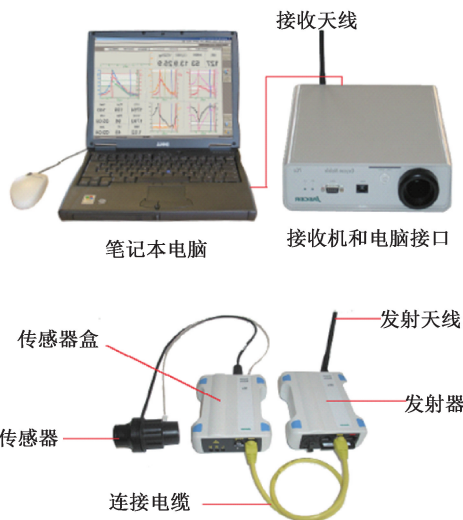


图1 运动心肺指标遥测系统

Fig.1 Exercise cardiopulmonary index telemetry system

2.2.2 超高海拔隧道施工人员生理指标测试步骤

劳动者从事体力作业时,经过短暂热身即可达到与劳动强度相适应的水平,进入作业阶段的稳定期。测试主要分为静息、热身、测试以及恢复4阶段,具体测试步骤如下:①施工人员到达施工地点后,背负运动心肺遥测系统,确保面具等气密性良好,仪器处于工作状态,同时,静坐3 min,保持身体在静息状态;②静息3 min后,工人开始热身,此状态持续1 min;③工人完成静息与热身状态后,开始正式施工,考虑到现场实际情况,心肺指标监测持续10 min;④监测结束时,工人站立休息3 min,保存测试数据。现场测试如图2所示。

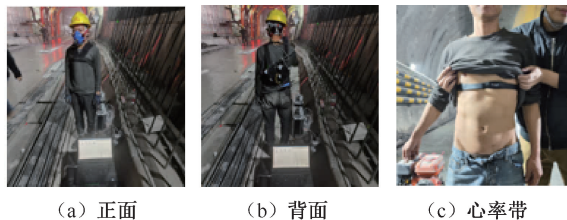


图2 现场测试

Fig.2 Field test images

2.3 超高海拔隧道施工人员生理指标测试方案

考虑到隧道施工各工序下的劳动内容和劳动时间不尽相同,劳动强度存在差异,测试时需加以区分,但由于隧道智能化施工的普及,部分工序已经实现少人化甚至无人化,传统的人工钻炮眼、人工出渣等工序均由机械完成,因此,现场测试过程中挖掘机找顶、凿岩台车钻孔、装载机出渣等工序合并为机械

操作手,综合考虑现场实际施工情况,选取隧道施工的5个主要工序作为测试工序,具体见表3。

表3 测试工序

Tab.3 Testing procedures

测试工序	机械操作手	底板施工	二衬钢筋布设	二衬防水布铺设	仰拱钢筋绑扎
测试人数	5	5	5	5	5

由于测试的主要目的在于探讨不同工序下劳动强度差异造成的心肺指标差异,需要先分析施工人员的年龄、身高、体重等因素对测试的影响。每个工序下的施工人员均为健康汉族男性,通过问询睡眠质量、食欲、呼吸情况的方式确定施工人员基本高原习服。

不同工序下施工人员年龄及身体质量指数(Body Mass Index, BMI)见表4。由于各工序下施工人员的年龄差异及BMI差异不存在统计学意义,因此,未考虑年龄、身高、体质量对测试结果的影响。

表4 不同工序下施工人员的年龄及BMI

Tab.4 Age and BMI of construction personnel under different processes

测试工序	测试人数	年龄	BMI/(kg·m ⁻²)
二衬钢筋布设	5	38.5±5.4	23.3±1.7
二衬防水布铺设	5	44.6±4.5	21.9±1.8
仰拱钢筋绑扎	5	43.0±5.9	21.7±2.6
底板施工	5	40.0±6.8	20.7±1.8
机械操作手	5	36.4±2.9	21.3±2.6

3 超高海拔隧道施工人员测试结果

3.1 超高海拔隧道施工人员生理指标变化分析

3.1.1 超高海拔隧道施工人员心血管负荷分析

人体在进行不同强度的体力活动时,身体各项生理参数都发生着较大变化,心率、呼吸频率和强度都明显增加^[18]。图3为不同工序对应的实时心率变化。由图3可知:在静息状态下,各工序施工人员心率变化均不明显,处于稳定状态,施工人员瞬时心率平均值保持在100次/min左右,为平原地区人员在高原的常规心率。热身状态下,施工人员心率开始缓慢爬升。当工人正式施工时,不同工序施工人员心率变化存在明显差别,其中,以二衬钢筋布设人员峰值心率及平均心率最高,其峰值心率达154次/min,远超正常范围60~100次/min,当这种心动过速持续存在的情况下,有可能诱发急性心力衰竭;其次为二衬挂布人员,其心率平均值为122次/min,但其峰值心率相对较低,为135次/min。这表明:二衬挂布与二衬钢筋布设均为重体力劳动,但危险程度稍低于二衬钢筋布设;底板施工与仰拱钢筋施工人员心率平均值分别为115与112次/min,二者心率相对较低的原因是二者劳动范围相对固定,无攀爬及抬钢筋等重体力劳动;在整个测试过程中,机械操作人员心率最低,平均心率为107次/min,在施工过程中活动范围及强度较小,因此,心率变化与静息状

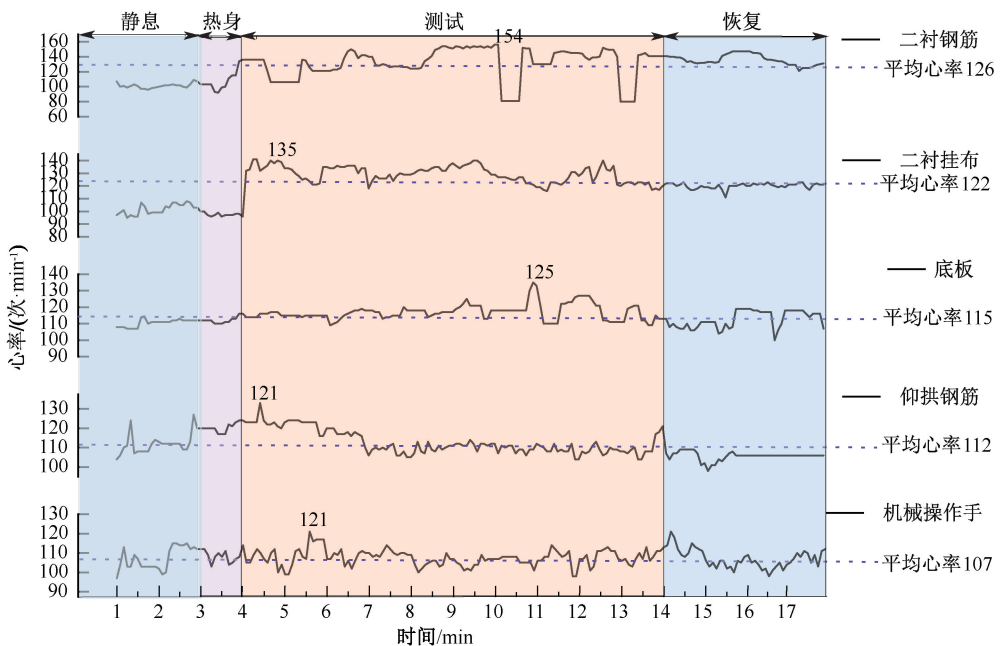


图3 不同工序施工人员心率变化曲线

Fig.3 Heart rate change curve of construction personnel in different processes

态无明显区别。同时,不同工序施工人员恢复时间不同,劳动过程中心率越高,恢复过程心率平均值也相对较高,以二衬挂布为例,劳动结束3 min内,施工人员心率维持在122次/min左右,明显高于底板施工、仰拱钢筋及机械操作等工序人员。

为更好地保障施工人员安全,还需分析其施工状态下的心血管负荷(Cardio Vascular Load, CVL),其计算式^[19]为:

$$CVL = \frac{H_{Rw} - H_{Rr}}{H_{Rmax8h} - H_{Rr}} \quad (4)$$

式中: H_{Rw} 为工作期平均心率; H_{Rr} 为静息状态下的心率; H_{Rmax8h} 为8 h工作班中容许最大心率, $H_{Rmax8h} = 0.7(220 - \text{年龄})$ 。

CVL一般分4级进行控制,具体见表5^[19]。

表5 人员 CVL 分级控制

Tab.5 Classification grade of cardiovascular load of testers

分级	CVL	警报等级	工作方式
I	[0, 0.30)	无危险	无特别危险
II	[0.30, 0.60)	注意	建议采取改进措施
III	[0.60, 1.00)	警戒	短期内采取必要措施
IV	≥ 1.00	危险	不允许,必须立即采取必要措施

综上,计算不同工序心血管负荷程度,结果见表6。由表6可知:不同工序心血管负担程度随劳动强度不同存在明显差别,当隧道施工人员劳动强度较大时,工人心血管负担程度随之加重,其中二衬钢筋布设人员 CVL 等级已经达到IV级,已经影响工人身体健康,但像机械操作等工序,由于劳动强度较小,因此,并不会对心血管造成明显负担。

表6 不同工序心血管负荷程度

Tab.6 Degree of cardiovascular load in different processes

劳动工序	CVL	警报分级
二衬钢筋布设	1.055±0.14	危险
二衬防水布铺设	0.928±0.09	警戒
底板施工	0.466±0.016	注意
仰拱钢筋绑扎	0.154±0.019	无危险
机械操作手	0.028±0.007	无危险

3.1.2 超高海拔隧道施工人员 SpO₂ 分析

SpO₂ 是血红蛋白结合氧和已结合氧的比例,用于反映人体的携氧能力,SpO₂ 对人体的影响是多方面的,包括维持呼吸系统功能、支持心血管系统健康、提供能量和维持脑功能、支持运动和体力活动等。通常情况下,人体动脉 SpO₂ 应该为 94%~100%。然而,随着海拔升高,由于氧气含量减少,血

氧分压和 SpO₂ 一般会呈下降趋势^[20],同时施工工序不同,也会导致 SpO₂ 存在差别。具体现场测试结果如图4所示,由图4可知:不同工序施工人员 SpO₂ 存在明显差别,其中二衬钢筋布设人员 SpO₂ 最高,为 91.4%,机械操作人员 SpO₂ 最低,仅为 78.8%,除机械操作人员 SpO₂ 低于文献^[21]中规定的 82%外,其他工序施工人员 SpO₂ 均属于正常范围内,究其原因因为机械操作过程中会产生大量粉尘,导致车窗紧闭,由此造成的空气不流通导致车内氧气浓度逐渐减小,致使机械操作人员 SpO₂ 远低于正常范围,SpO₂ 低于 80%会导致严重后果,需要及时采取措施提高血氧水平。二衬钢筋布设人员 SpO₂ 较高的主要原因是现场在二衬钢筋布设区域采取弥散式供氧,该区域内氧气浓度明显升高,同时,由于二衬钢筋布设施工人员身体素质普遍较好,身体适应能力较强,因此,该工序施工人员 SpO₂ 明显高于其他工序。且由于弥散式供氧范围有限,成本巨大,因此,未采取供氧措施的底板施工及仰拱钢筋等工序 SpO₂ 范围在 85.9%~89.8%,此结论也与以往研究^[8]相符。测试结果表明:影响 SpO₂ 的主要因素并不是劳动强度,而是工作区域中的氧气浓度。

3.1.3 超高海拔隧道施工人员呼吸频率与摄氧量

机体有氧工作能力的评判指标为摄氧量与呼吸频率量。摄氧量是单位时间内机体摄入或消耗的氧气的量,可评估心肺功能的健康程度以及机体是否能够有效地摄取和利用氧气。呼吸频率和摄氧量共同决定了机体在运动过程中所摄取的氧气含量^[22]。不同工序摄氧量与呼吸频率如图5及图6所示。由图5及图6可知:单次摄氧量与呼吸频率呈反比关系,当单次摄入氧气量减少时,人体就会通过增加呼吸频率的方式来满足身体所需。成年人正常呼吸频率为 12~20 次/min,高原施工会导致呼吸频率大幅增加。其中,二衬钢筋布设过程中单次摄氧量最高,呼吸频率最小,施工中具体表现为以大喘气、深呼吸为主;机械操作人员单次摄氧量最低,导致平均呼吸频率达到 23.6 次/min,具体表现为呼吸急促。值得注意的是,呼吸频率越高,单位时间内吸入的粉尘浓度也随之升高,会大幅增加施工人员尘肺病等职业病的风险。

3.2 超高海拔隧道施工人员劳动强度与效率

3.2.1 超高海拔隧道施工人员劳动强度分级

不同工序劳动强度分级与劳动时间存在紧密联系。现场测试过程中,测试每个工序的总劳动时间与过程中休息时间,两者之差为净劳动时间。取 3 次测试所得的净劳动时间平均值计算劳动时间

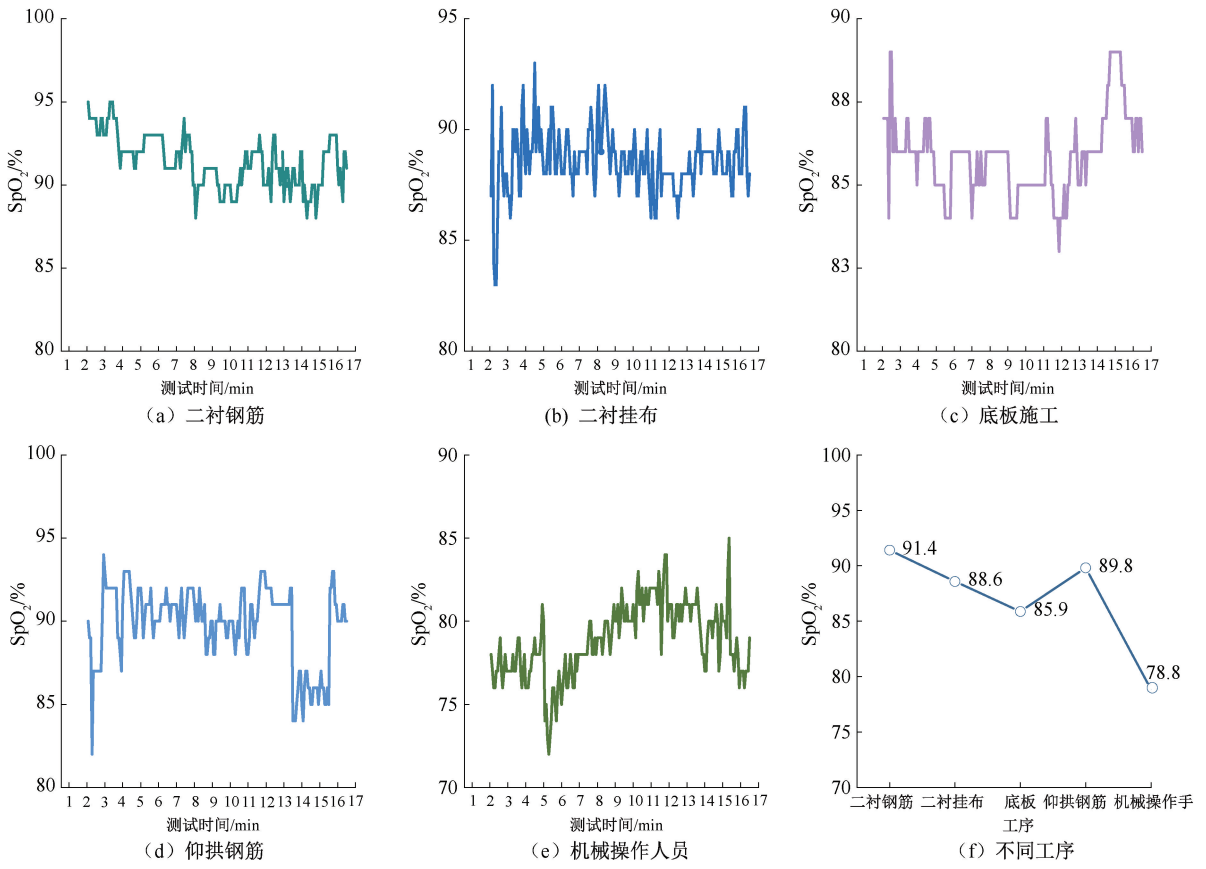


图 4 不同工序施工人员 SpO₂ 变化曲线

Fig. 4 Changes in blood oxygen saturation of construction personnel in different processes

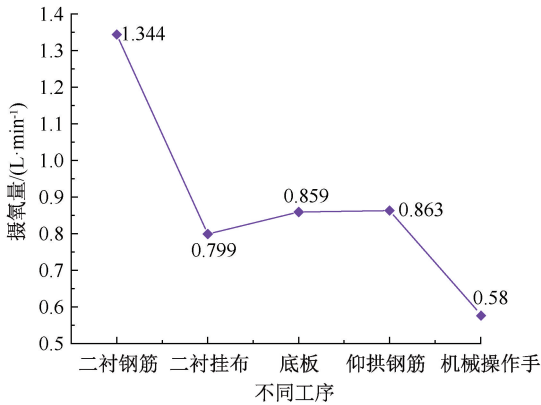


图 5 不同工序施工人员摄氧量变化曲线

Fig. 5 Changes in oxygen uptake by construction personnel in different processes

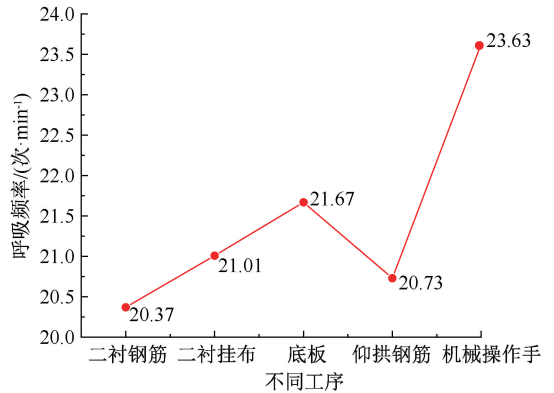


图 6 不同工序施工人员呼吸频率变化曲线

Fig. 6 Changes respiratory frequency of construction personnel in different processes

表 7 不同工序劳动时间率及劳动强度

Tab. 7 Labor time rate and labor intensity of different processes

工序	劳动时间/ min	劳动时间 率/%	劳动强度 指数	劳动 等级
二衬钢筋布设	420	0.875	30.91	V
二衬防水布铺设	400	0.833	18.85	II
底板施工	420	0.875	22.22	III
仰拱钢筋绑扎	320	0.667	23.28	III
机械操作手	300	0.625	16.85	II

率。据式(2)及式(3)计算不同工序劳动时间率及劳动强度指数,见表7。由表7可知:二衬钢筋布设劳动强度指数最高达到为38,达到V级;底板施工与仰拱钢筋绑扎劳动强度指数分别为22.22与23.28,劳动强度为III级;二衬防水布铺设与机械操作人员劳动强度指数范围在15~20,劳动强度指数为II级。

3.2.2 超高海拔隧道施工人员劳动效率

在劳动时间一致的情况下,劳动强度由平均能量代谢率决定。由于单位时间的能量消耗通过机体的能量物质氧化反应实现,所以能量消耗与氧消耗呈正比关系,同时,氧气的消耗量与肺泡的通气量紧密相关,具体见下式:

$$V_{O_2} = 19.9 \times V_e \quad (5)$$

式中 V_e 为肺通气量,表示单位时间内流入或流出肺部的空气总量, L/min。

要得到能量代谢率与海拔高度的关系,必须先得到肺泡通气量与海拔的关系,肺通气量计算公式见下:

$$V_e = (V_t - V_d) \times R_{PM} \quad (6)$$

式中: V_t 为潮气量,表示正常呼吸过程中,每次呼吸时自然吸入或呼出的空气量, L/min; V_d 为解剖无效腔容量,指在呼吸系统中,那些参与气体交换但不进行气体交换的部分的空气容量,取 150 mL; R_{PM} 为呼吸频率,表示每分钟内完成的呼吸周期数,次/min。

由式(6)可知:肺通气量与呼吸频率呈正比。为比较不同海拔相同工序呼吸频率变化,假定个体在高原及超高海拔地区吸收与平原地区同质量的氧气,由上述物理量可构建等式:

$$R_{PM}^H \times \rho'_{O_2} \times SpO_2' = R_{PM}^P \times \rho_{O_2} \times SpO_2 \quad (7)$$

式中: R_{PM}^H 为高原地区呼吸频率,次数/min; ρ'_{O_2} 为高原地区氧气密度, g/L; SpO_2' 为高原地区 SpO_2 , %; R_{PM}^P 为平原地区呼吸频率,次/min; ρ_{O_2} 为标准大气压下氧气密度,取值 1.429 g/L; SpO_2 取值 97%。

变换式(6)可得式(7)。由式(7)可根据 SpO_2 及高原地区环境来计算呼吸频率:

$$R_{PM}^H = \frac{\rho_{O_2} \times SpO_2}{\rho'_{O_2} \times SpO_2'} R_{PM}^P \quad (8)$$

综上,相同工序不同海拔能量代谢率之比可以转换为不同海拔呼吸频率之比。计算平原地区与海拔高度能量代谢率及劳动效率,如图7所示。由图7可知:随着海拔高度的增加,相同工序的工人平均能量代谢率随之增加,对应的劳动效率随之降低。相较于平原地区,海拔4700m时,工人劳动效率仅

为平原地区的76%~88%,其中,海拔高度对于机械操作人员劳动效率影响最大,劳动效率较平原地区降低24%,海拔高度对二衬钢筋布设影响较小,劳动效率仅降低12%,为保证完成工作量的一致,对应工序人工工日消耗则需提升13.63%~31.58%,这进一步导致高海拔及超高海拔隧道施工工期增加。

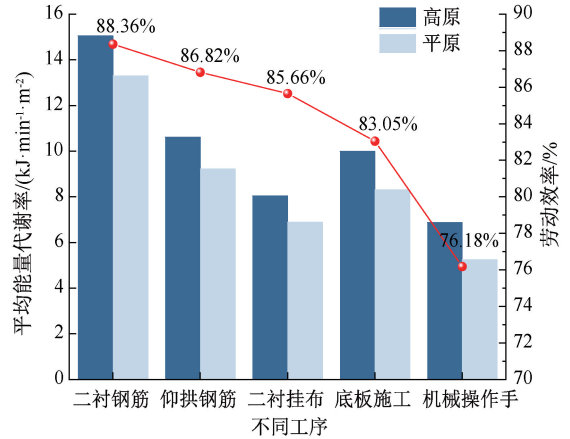


图7 能量代谢率对比及劳动效率

Fig. 7 Comparison of energy metabolism rate and labor efficiency

4 结论

1) 高海拔环境会导致隧道施工人员心血管负荷明显增加,不同工序人员心血管负荷等级由高到低依次为二衬钢筋布设、二衬防水布布设、底板施工、仰拱钢筋绑扎、机械操作手,其中,二衬钢筋布设心血管负荷超过卫生限值。

2) SpO_2 由高到低依次为二衬钢筋布设、仰拱钢筋绑扎、二衬挂布、底板施工、机械操作人员,其中,机械操作人员 SpO_2 低于规范值,隧道供氧能有效提升施工人员 SpO_2 。

3) 超高海拔隧道施工人员劳动强度指数较平原地区提升明显,二衬钢筋布设劳动强度为V级,底板施工与仰拱钢筋绑扎劳动强度等级为Ⅲ级,二衬防水布布设与机械操作人员劳动强度等级为Ⅱ级。

4) 相较于平原地区,海拔4700m时工人劳动效率仅为平原地区的76%~88%,对应工序人工工日消耗则需提升13.63%~31.58%。

参考文献

- [1] 杨枫,郑金龙,蔚艳庆,等.高海拔隧道施工氧含量变化及供氧方法[J].科学技术与工程,2019,19(8):282-288. YANG Feng, ZHENG Jinlong, WEI Yanqing, et al. Oxygen content change and oxygen supply method in high altitude tunnel construction[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(8): 282-288.
- [2] 郑金龙,杨枫,蔚艳庆,等.川西高原公路隧道海拔高度分级[J].科学技术与工程,2019,19(34):369-375.

- ZHENG Jinlong, YANG Feng, WEI Yanqing, et al. Elevation classification of highway tunnel in western Sichuan plateau[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(34): 369-375.
- [3] 湛桂舟, 陈政, 琚国全, 等. 高海拔隧道施工劳动强度与供氧浓度关系研究[J]. *现代隧道技术*, 2022, 59(1): 118-123.
- CHEN Guizhou, CHEN Zheng, JU Guoquan, et al. Study on relationship between labor intensity and oxygen concentration in high-altitude tunnel construction[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2022, 59(1): 118-123.
- [4] GUO Chun, XU Jianfeng, WANG Mingnian, et al. Study on oxygen supply standard for physical health of construction personnel of high-altitude tunnels[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, 13(1): DOI: 10.3390/ijerph13010064.
- [5] 叶玉华, 施红生, 赵亚霖, 等. 青藏铁路施工体力劳动强度分级研究[J]. *铁道劳动安全卫生与环保*, 2004, 31(4): 181-184.
- YE Yuhua, SHI Hongsheng, ZHAO Yalin, et al. Study on physical labor intensity grading for construction of Qinghai-Tibet railway[J]. *Railway Energy Saving & Environmental Protection & Occupational Safety and Health*, 2004, 31(4): 181-184.
- [6] 李岳, 姬红蓉, 史春波, 等. 高原养路工体力劳动强度调查研究[J]. *高原医学杂志*, 2002, 12(1): 34-37.
- LI Yue, JI Hongrong, SHI Chunbo, et al. A survey of work intensity of road maintenance workers at high altitude[J]. *Journal of High Altitude Medicine*, 2002, 12(1): 34-37.
- [7] 吴秋军, 于丽, 谢文强, 等. 高海拔隧道施工关键工序劳动强度分级标准研究[J]. *现代隧道技术*, 2016, 53(6): 44-48, 88.
- WU QiuJun, YU Li, XIE Wenqiang, et al. Study on the labor intensity classification standard for critical construction procedures of high-altitude tunnels [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2016, 53(6): 44-48, 88.
- [8] 郑鑫, 郭春, 王欣, 等. 圭嘎拉高海拔隧道施工人员体力劳动强度评价[J]. *隧道建设: 中英文*, 2019, 39(7): 1141-1146.
- ZHENG Xin, GUO Chun, WANG Xin, et al. Evaluation on labor intensity of workers in Guigala high-altitude tunnel [J]. *Tunnel Construction*, 2019, 39(7): 1141-1146.
- [9] HAN Shurong, ZHOU Di, MA Shiwei, et al. Good vacation and job rotation systems were beneficial for the hemoglobin level of workers at high altitude, a cross-sectional study along the Qinghai Tibet railway, China[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2020, 80: DOI: 10.1016/j.ergon.2020.103055.
- [10] LI Zijun, LI Rongrong, XU Yu, et al. Novel oxygen-enrichment method using annular air curtain for single-head roadway of plateau mine[J]. *Building Simulation*, 2023, 16(7): 1097-1113.
- [11] LI Zijun, LI Rongrong, XU Yu, et al. Study on the oxygen enrichment effect of individual oxygen-supply device in a tunnel of plateau mine[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(16): DOI: 10.3390/ijerph17165934.
- [12] LI Zijun, LI Rongrong, XU Yu, et al. Study on the optimization and oxygen-enrichment effect of ventilation scheme in a blind heading of plateau mine[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(14): DOI: 10.3390/ijerph19148717.
- [13] 廖斌, 杨琴, 高慧. 体力劳动强度评价方法研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2013, 9(2): 162-166.
- LIAO Bin, YANG Qin, GAO Hui. Study on methods for classifying intensity of physical work[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2013, 9(2): 162-166.
- [14] 朱大年, 王庭槐, 罗自强, 等. *生理学*[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2013: 224.
- [15] 王万梁. 单项体力劳动强度分级研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
- WANG Wanliang. Research of single item physical labor intensity classification [D]. Ji'nan: Shandong University, 2007.
- [16] TB/T 2607—2006, 铁道行业体力劳动强度分级, [S].
- TB/T 2607—2006, Classification on intensity of physical work for railway industry [S].
- [17] GBZ/T 189.10—2007, 工作场所物理因素测量第10部分: 体力劳动强度分级[S].
- GBZ/T 189.10—2007, Measurement of physical agents in workplace part 10: classification of physical workload [S].
- [18] 游波, 王思奇, 韩巧云, 等. 矿用通风服对人体热生理反应的影响试验研究[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(6): 223-230.
- YOU Bo, WANG Siqi, HAN Qiaoyun, et al. Experimental study on effect of mine ventilation suit on human thermal physiological response[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(6): 223-230.
- [19] 张超, 唐仕川, 李东明, 等. 高温高湿环境下人员劳动负荷与疲劳水平试验研究[J]. *安全与环境学报*, 2015, 15(4): 176-180.
- ZHANG Chao, TANG Shichuan, LI Dongming, et al. Renovated on-schedule supply regulation model for maritime emergency guarantee resources based on the fuzzy multi-objective programming[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, 15(4): 176-180.
- [20] 邢娟娟. 井下高温作业的矿工生理、生化测定研究[J]. *中国安全科学学报*, 2001, 11(4): 48-51.
- XING Juanjuan. Study on physiological and biological changes for miners exposed to heat in underground pit[J]. *China Safety Science Journal*, 2001, 11(4): 48-51.
- [21] LUFT U C. *Aviation physiology: the effects of altitude*[M]. Washington D. C: American Society, 1965: 152.
- [22] 廖慧敏, 苏红, 朱逸龙, 等. 赤铁矿矿尘在人体呼吸道运动的模拟[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(12): 165-173.
- LIAO Huimin, SU Hong, ZHU Yilong, et al. Movement simulation of hematite ore dust in human respiratory tract[J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(12): 165-173.

作者简介: 赵树磊 (1997—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士研究生, 研究方向为隧道及地下工程防灾减灾与环境控制。E-mail: zhaoshulei_cq@163.com。

