

爆破振动作用下人体动态响应与感知心电变化的原位试验*

刘万通¹, 蒋楠^{1,2}, 贾永胜^{1,2,3}, 李宏¹, 姚颖康^{1,2},
张永鑫¹, 姚建平⁴

(1. 江汉大学精细爆破全国重点实验室, 湖北 武汉 430056;

2. 江汉大学工程爆破湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430056;

3. 武汉爆破有限公司, 湖北 武汉 430056

4. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074)

摘要: 复杂敏感环境爆破施工过程, 最大限度控制爆破振动对周边居民的干扰(扰民)是其核心。为探索爆破振动作用下人体动态响应的量化评价方法, 本研究在严格安全控制条件下开展单受试者原位爆破试验, 结合数字图像相关技术(DIC)与心电变化(ECG)同步测量系统, 分析不同强度爆破振动作用下人体结构体表动态响应特征, 并建立了本试验条件下考虑身高影响的人体分区(腰部以下、腰部以上)峰值振速(PPV)拟合关系; 鉴于原位爆破试验的安全性制约, 进一步借助室内振动台试验, 基于心率变异性(HRV)评价指标的对比分析, 论证振动台模拟爆破振动开展人体感知试验的可行性。研究结果表明: 人体垂直振速显著高于水平振速, 垂直方向为主振方向; 垂直方向振速则呈现“腰部以下衰减、腰部以上放大”的特征, 与地表振速相比, 腰部以下区域衰减率为55.7%~65.9%, 腰部以上区域振速放大1.25~1.74倍; 水平向振速自脚部至头部呈衰减趋势, 衰减率达52.6%~60%; 原位试验与振动台试验所获心率变异性指标(HRV)误差小于10%, 证实了采用振动台模拟爆破振动研究人体感知的可行性。本探索性原位试验可为爆破振动作用下人体振动响应量化及感知心电变化研究提供方法参考。

关键词: 爆破振动; 爆炸-生物耦合效应; 工程爆破; 爆破原位试验

中图分类号: TD235; X951

国标学科代码: 44045

文献标识码: A

In-Situ experiment on human dynamic response and perceived ECG changes under blasting vibration

LIU Wantong¹, JIANG Nan^{1,2}, JIA Yongsheng^{1,2,3}, LI Hong¹, YAO Yingkang^{1,2}, ZHANG Yongxin¹, YAO Jianping

(1. State Key Laboratory of Precision Blasting, Jianghan University, Wuhan 430056, China,

2. Hubei Key Laboratory of Blasting Engineering, Jianghan University, Wuhan 430056, China,

3. Wuhan Blasting Co., Ltd., Wuhan 430056, China

4. China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: In complex and sensitive environments, minimizing the disturbance of blasting vibration to surrounding residents is the primary concern during blasting construction. To explore a quantitative evaluation method for human dynamic response under blasting vibration, this study conducted a single-subject in-situ blasting test under strictly controlled safety conditions. By integrating digital image correlation (DIC) with a synchronous electrocardiogram (ECG) measurement system, the dynamic response characteristics of the human body surface under varying

*收稿日期: 2026 01 16; 修回日期: 2026 05 25;

基金项目: 湖北省自然科学基金杰出青年项目(2024AFA092)、国家自然科学基金资助项(52578584、U25A20355、52478525)、湖北省“智能建造”青年科技人才联合项目(No. 2025DJA118)

第一作者: 刘万通(1999—), 男, 博士研究生. E-mail: lwtsklpb@stu.jhun.edu.cn;

通信作者: 蒋楠(1986—), 男, 博士, 教授, 博士生导师. E-mail: jiangnan@jhun.edu.cn.

blasting vibration intensities were preliminarily analyzed. A height-dependent fitting relationship for peak particle velocity (PPV) was established under the present test conditions, with the body divided into two regions: below the waist and above the waist. Given the safety constraints of in-situ blasting tests, laboratory shake table tests were further conducted. A comparative analysis based on heart rate variability (HRV) evaluation indices was performed to preliminarily demonstrate the feasibility of using shake tables to simulate blasting vibration for human perception studies. The preliminary results indicate that under the present test conditions, the vertical vibration velocity of the human body is significantly higher than the horizontal velocity, with the vertical direction identified as the dominant vibration direction. The vertical vibration velocity exhibits a characteristic pattern of "attenuation below the waist and amplification above the waist": compared with the ground surface velocity, the attenuation rate in the lower body region ranges from 55.7% to 65.9%, while the vibration velocity in the upper body region is amplified by a factor of 1.25 to 1.74. The horizontal vibration velocity shows a decreasing trend from the feet to the head, with an attenuation rate of 52.6% to 60%. The error in HRV indices obtained from the in-situ and shake table tests is less than 10%, preliminarily confirming the feasibility of employing shake tables to simulate blasting vibration for human perception research. This exploratory in-situ test provides a methodological reference for quantifying human vibration response and studying perceived ECG changes under blasting vibration.

Keywords: Blasting vibration; Blast-biological coupling effect; Engineering blasting; In-situ blast test

引言

爆破作业广泛应用于地下工程、隧道开挖及建筑拆除等领域^[1,2],其产生的振动不仅会干扰甚至损伤周边建(构)筑物,同时会引起人体不适^[3,4],影响人体健康。现有研究多聚焦于爆破振动对建筑结构的安全影响,以及交通、机械等持续振动对人体的影响,却忽视了爆破振动对人体响应的影响。

近期研究多集中于结构类引起的持续性的低频振动对人体响应的研究,卢壮旗等^[5]研究全身振动环境下头部不同部位的响应特性,构建了一个包含精细骨骼与肌肉软组织的全人体有限元模型,并运用模态分析法与随机响应分析法,分别计算、分析了头-椅振动传递率。陈兆玮等^[6]研究了车辆段地铁运行所引发的上盖建筑振动及二次噪声特性,并分析了二者对人体舒适度的影响。范威等^[7]研究了振动载荷对腰椎生物力学特性的影响机制,同样确认了振动暴露是引发腰椎退行性病变及下腰痛的重要诱因。Moore等^[8]通过在头部不同位置安装多种测量系统,研究了暴露于垂直全身振动(WBV)的坐姿人体受试者的座椅到头部振动传递特性。Dong等^[9]确定了人体振动传递率与驱动点响应函数(DPRFs)之间的理论关系,该研究可作为人体振动模型进一步发展和验证的理论基础。Zhang等^[10]研究了横风对车辆和人体振动的影响,分析了人体头部在不同位置时振动特性的差异,人体头部的垂直振动显著大于横向振动。Johanning等^[11]人在其研究中发现,全身振动(WBV)强度和持续时间的增加会导致脊柱的肌肉骨骼或神经系统疾病。这些低频振动可引发人体变化,包括心率升高和脑电(EEG)突变^[12,13]。然而,目前关于爆炸效应致人体影响的研究,主要集中于冲击波的作用。王俊等^[14]利用假人模型、传感系统进行激波管实验,系统获取模型头面部超压、质心加速度和角速度及头颈扭矩随时间的变化过程。李桂兵等^[15]通过数值模拟典型底部爆炸冲击下乘员脊柱的动态响应过程,研究脊柱的损伤行为。Zhou等^[16]探究爆炸波入射方向对胸腔损伤的影响,阐明了胸腔爆炸损伤机制与作用方向的相关性。Tang等^[17]建立了高保真的人体躯干有限元模型,描述了人体器官在爆炸载荷下的损伤过程,分析了爆炸载荷对人体器官的响应,提出了人体器官的应力阈值。

综上所述,目前研究多集中于结构振动和爆炸冲击波对人体响应,但对爆破振动下人体动态响应则相对缺乏,有待深入探究。基于真实人体的爆破振动原位试验存在显著的安全约束:必须在远低于人体损伤阈值的振动强度内进行,且单次爆破工况受爆源参数、地

形条件和人员暴露时间等多重限制，如何在确保受试者绝对安全的前提下获取有效数据，是该方向面临的关键难题。鉴于此，本研究作为一项突破性工作，在严格保障受试者安全的受控条件下，以单受试者、有限爆破工况为基础，通过数字图像相关技术（DIC）与心电变化（ECG）同步测量系统，初步研究爆破振动经地表传播至人体的振动传递趋势及体表各部位的响应特征；同时借助室内振动台试验，对比分析心率变异性（HRV）指标，初步论证振动台模拟爆破振动开展人体感知试验的可行性。本研究旨在为爆破振动作用下人体响应量化评价探索技术路线和方法参考，为后续安全可控条件下系统深入的研究提供基础。

1 真实人体的原位爆破响应试验

1.1 试验场地及仪器

1.1.1 试验场地

本试验在精细爆破全国重点实验室江夏野外实验基地进行。该场址长约 500 m，宽约 400 m，是华中地区首个集爆破工程研究、振动效应检测与安全评估于一体的综合性开放平台，具备开展多尺度爆破试验的能力，可满足《爆破安全规程》中 A 级爆破工程的模拟需求，试验场地分布如图 1，试验区域位于④号试验地。

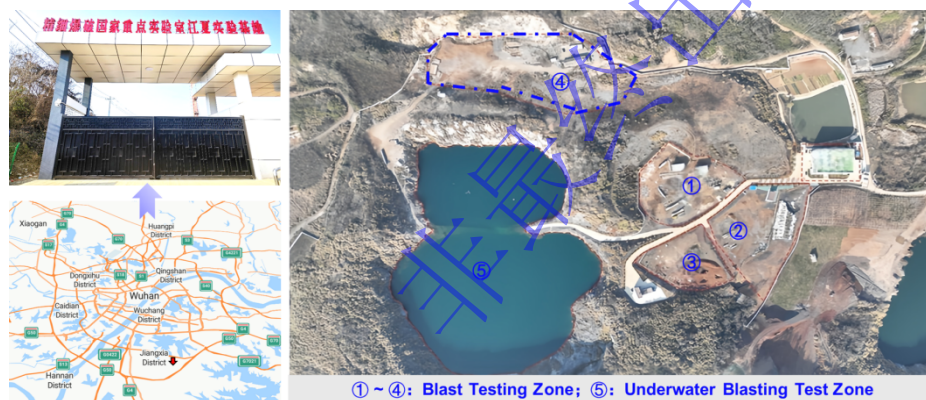


图 1 爆破试验场地

Fig. 1 Blasting test range

试验场的地层物理力学特性是影响爆破振动效应的关键因素。场地勘察报告揭示，该区域地层结构较为单一，表层为 50 cm 厚素填土，其下为粉质黏土层，且未受明显工程扰动。为精确获取地层参数，试验前实施了深度为 4 m 的钻孔取样，所得物理力学参数详见表 1。

1.1.2 试验仪器

试验采用数字图像相关法（DIC）测量系统，研究爆破振动作用下的人体动态响应。该方法通过高速摄像机连续采集物体表面随机散斑在变形前后的图像序列，并利用相关算法对子区进行匹配，重建物体表面计算点的三维坐标，进而获取位移与应变场，实现结构动态响应的全场测量 [18,19]。试验硬件主要包括 Phantom v1612 高速摄像机、长焦镜头及辅助照明设备；数据处理采用 GOM 公司开发的 GOM Correlate 专业分析软件，实现从图像标定、预处理到位移与应变计算、结果可视化的全流程处理 [20]。DIC 技术通过识别物体表面特征计算变形，因此需预先在被测物体表面制作高质量的散斑图案。理想的散斑应具备良好的随机性、均匀分布性及高对比度，以避免识别误差。本试验研究对象为人体，试验前充分告知受试者试验内容、潜在风险（主要是心理紧张），并获得书面知情同意，确保所有试验在绝对安全振动阈值内进行，参试人员高 180 cm，体重 80 kg，身体健康，未经常暴露于振动环境。鉴于无法直接在皮肤表面制斑，且为保障 DIC 数据可靠性，采用高弹

性白色紧身衣并直接绘制散斑图案，通过预试验验证其中低频振动下与体表运动具有良好的跟随性。试验设备及参试人员如图 2。

为确保 DIC 测量结果的可靠性，试验前在与实际拍摄相同距离和视场条件下，采用 GOM Correlate 软件内置标定模块和标准标定板进行系统标定，以校正镜头畸变并确定相机内外参数。同时，针对人体无法直接皮肤制斑的特殊性，通过将微型标记点粘贴于踝、膝关节等骨性突起处皮肤表面，与紧身衣同位置散斑进行位移对比，两者偏差小于 5%，验证了紧身衣散斑对体表运动具有良好的跟随性，表明该方法可满足爆破振动下人体体表响应测量的精度要求。

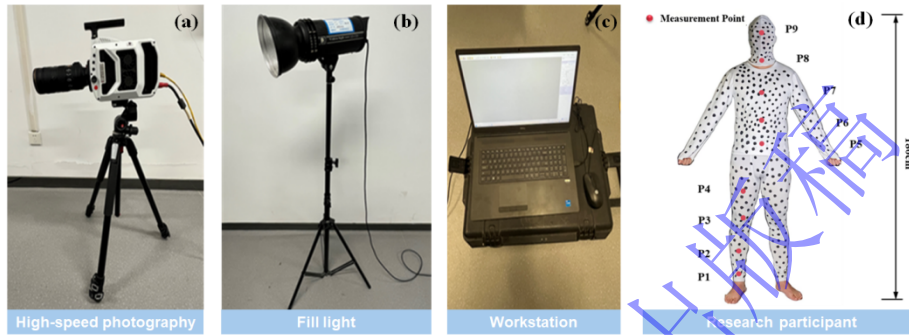


图 2 试验测试系统及参试对象

Fig. 2 Experimental equipment and test subjects

表 1 试验场地物理力学参数

Table 1 Geotechnical Parameters

地层	泊松比	天然重度 $\rho / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	初始内聚力 c / kPa	初始内摩擦角 $\varphi / ^{\circ}$
素填土 (0~0.5 m)	/	18.0	4	18
粉质黏土 (0.5~3.5 m)	0.3	19.0	34	13.8
粉砂 (3.5~4 m)	0.25	19.1	0	28

1.2 试验方案设计

现场原位试验布置示意图如图 3 所示，工况设置见表 2。计划共布置 4 个炮孔，孔深 2.5 m，孔间距 2.5 m，单孔装药 500 g，4 个炮孔按照图 3 所示顺序依次起爆，采用细砂填充炮孔，被测人体站立在距离最近炮孔 10 m 处，DIC 高速摄影仪布置于距离人体 5 m 处，为了防止爆破产生的飞石对试验人员造成伤害，以确保试验人员在爆破区域内的安全，使用防护箱进行保护，防护箱底部进行特殊处理，切除箱底钢板，仅保留框架支撑，使受试者足部能够直接接触原状地面，确保振动传递路径与正常行人站立状态一致，并在试验开始之前，在被测人体下方布置爆破振动测振仪，测量传播至脚部的振动速度。同时，受试者手持心电感知系统，测量不同工况下，心电变化。

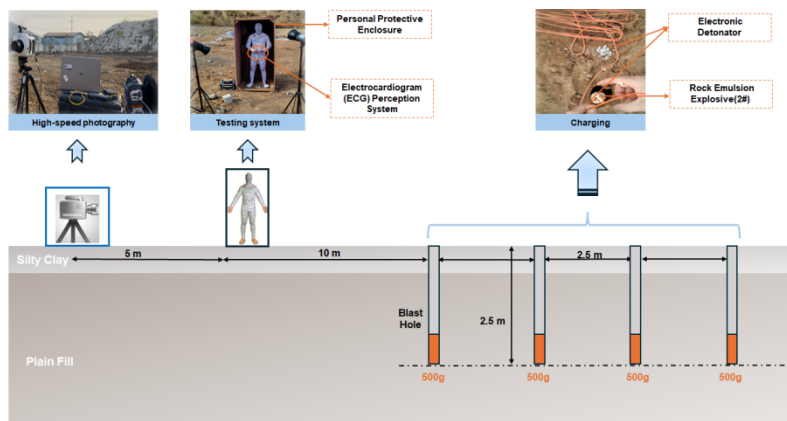


图 3 爆破振动人体感知原位试验布置示意图

Fig. 3 Layout diagram of in-situ test for human perception of blast-induced vibration

表 2 现场原位试验工况设置

Table 2 Geotechnical Parameters

工况	爆破位置	爆心距/m	单段药量/kg
1	1#	17.5	0.5
2	2#	15	0.5
3	3#	12.5	0.5
4	4#	10	0.5

1.3 试验流程

本次试验采用爆破施工时人体最常见的站立姿势作为测试体位，具体流程如图 4 所示。首先，依据试验方案确定炮孔位置，使用钻孔设备按设计深度钻孔；随后将电子雷管装入 2 号岩石乳化炸药，置入炮孔，装药完成后以细砂堵塞炮孔，并用木夯锤人工捣实，最后连接起爆网路。接着，在预定位置架设三角架，安装带长焦镜头的高速摄像机以确保拍摄稳定，调整支架高度与镜头角度使人体位于画面中心，微调焦距至图像最清晰，同时开启两台大功率光源进行均匀补光；随后将相机连接至工作站，设置采集参数为分辨率 1280 px×800 px、帧率 1000 fps、曝光时间 90 μs，总拍摄时长为 10 s。完成架设后，清退场地无关人员，调试 DIC 测试系统并确认其正常运行，开启 TC-4850-3 爆破振动测振仪的触发模式，并于无振动静息状态下采集心电图信号。



图 4 爆破原位试验试验流程

Fig. 4 Blasting In-situ test procedure

正式试验阶段，起爆前启动高速摄影触发模式开始图像采集；振动结束后保存图像与心电图数据，并依照具体流程图 4 所示的起爆顺序重复上述步骤，直至全部工况测试完成。

最后，在所有试验结束后，截取 3000 帧稳定的振动图像导入 GOM Correlate 软件进行计算分析。

2 人体动态响应变化分析

2.1 爆破振动作用人体体表响应规律分析

本次试验采用单目 DIC 技术，仅使用单一相机进行图像采集，所得数据仅限于二维 yoz 平面内，仅能对水平切向与垂直方向上的质点峰值振速（PPV）分布特征进行分析。基于 DIC 采集的数据，利用 GOM Correlate 软件计算得到工况 4 下人体体表在 y 方向（水平）与 z 方向（垂直）的振速云图，如图 5 所示。从中可以看出，沿人体高度方向，水平方向振动分量自脚部向头部逐步递减；而垂直方向振动分量则在腰部较小、头部较大，呈现出明显的分布差异。

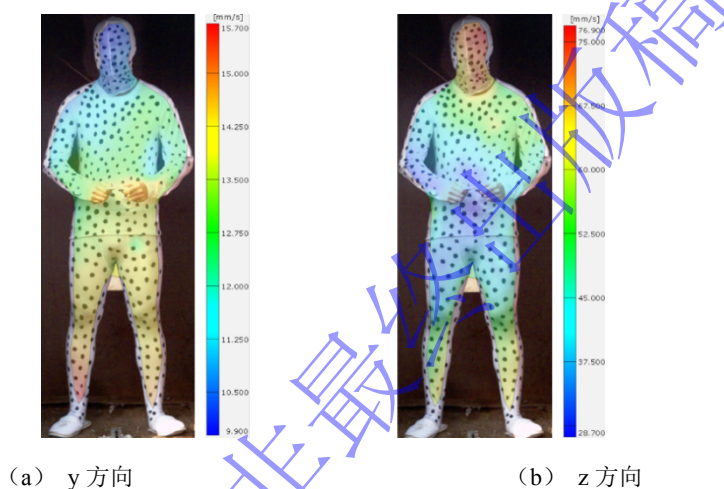


图 5 人体体表振动速度云图

Fig. 5 Vibration velocity contour map of the human body surface

为得到人体在爆破振动作用下的振动响应规律，对 DIC 测试不同工况下被测人体脚部 P1、小腿 P2、膝盖 P3、大腿 P4、腰部 P5、腹部 P6、胸部 P7、脖颈 P8、头部 P9 九个位置（如图 2 所示）以及地表在 y 方向与 z 方向上的振速数据进行统计分析。其中，工况 4 被测人体膝盖 P3、腹部 P6、头部 P9 与地表的振速时程曲线如图 6 所示，可以看出，人体体表的振动速度衰减规律与地表基本一致，头部存在放大效应，并且振动持续时间相较于地表振动更长。这一结果初步验证了采用 DIC 技术测量人体表面振速的可靠性。

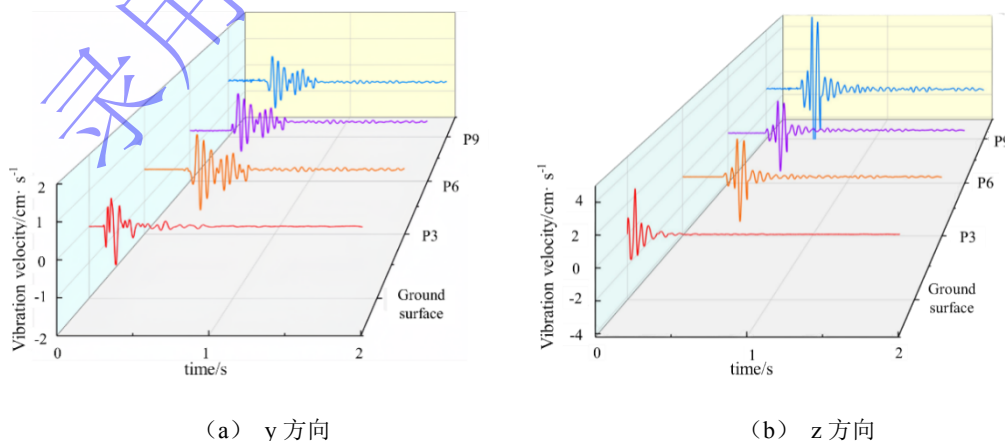


图 6 观测点 P3、P6、P9 及地表振速时程曲线

Fig. 6 Time history curves of surface vibration velocity at observation points P3, P6, and P9

现对 4 种工况下各监测点 y 向与 z 向的 PPV 进行统计对比, 统计结果如图 7 及表 3 所示。由图可知, 人体在爆破振动波的影响下, 垂向振动响应大于水平振动响应, 垂直方向为主振方向。水平方向上各监测点的峰值振速沿脚部至头部呈现递减趋势, 峰值衰减率 ($\frac{ppv_{地表}-ppv_{测点}}{ppv_{地表}}$) 范围为 52.6% ~ 60%; 垂直方向上各监测点的峰值振速沿脚部至头部呈现先衰减后放大的趋势, 在腰部以下表现出衰减特性, 峰值衰减率范围为 55.7% ~ 65.9%, 而在腰部以上则表现出放大特性, 增大倍数 ($\frac{ppv_{测点}}{ppv_{地表}}$) 为 1.25~1.74。

初步分析其可能机制, 主要在于人体不同部位的力学特性差异。初始衰减区的形成可能源于两方面因素: 其一, 足部、小腿及大腿的肌肉与脂肪组织构成高阻尼层, 通过黏弹性形变将振动能量转化为热能; 其二, 踝关节与膝关节内的软骨和滑液形成类似低频滤波器的结构, 对振动起到削弱作用。二者共同导致振动在传递至腰腹部前持续衰减。腰部以上的振动放大现象则可能由生物力学共振主导: 当振动传递至脊柱时, 其轴向固有频率与爆破振动频带可能存在部分重叠, 引发结构共振; 同时, 头颈部系统因自身惯性效应进一步增强了振动响应, 形成自腰部向头部的阶梯式放大趋势。

受限于原位爆破试验中严格的安全保障要求 (振动强度需远低于人体损伤阈值、单次试验窗口有限), 本试验未同步布设多通道测振系统以获取定量的频域数据, 上述机理解释主要基于现有生物力学文献与现场观测结果的定性推断, 其定量验证有待后续可控振动台试验结合频域分析完成。

表 3 各工况下 y 向与 z 向 PPV 统计表 (cm·s⁻¹)

Table 3 Statistical table of peak particle velocity (ppv) in y-direction and z-direction under various test conditions

振动方向	监测点	PPV/cm·s ⁻¹			
		工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
y 向	地表	0.57	0.77	1.08	1.65
	P1	0.54	0.73	1.01	1.55
	P2	0.5	0.65	0.87	1.42
	P3	0.45	0.59	0.78	1.30
	P4	0.42	0.54	0.74	1.14
	P5	0.37	0.52	0.68	1.08
	P6	0.34	0.51	0.63	1.05
	P7	0.32	0.50	0.57	1.03
	P8	0.31	0.47	0.53	1.00
z 向	地表	1.58	2.09	2.93	4.42
	P1	1.43	1.98	2.72	4.16
	P2	1.21	1.65	2.46	3.53
	P3	1.08	1.63	2.18	3.37
	P4	0.93	1.44	2.01	3.06
	P5	0.88	1.27	1.93	2.87
	P6	1.04	2.03	2.36	3.51
	P7	1.12	2.75	2.99	4.89
	P8	1.89	3.25	3.47	6.22
P9	1.98	3.43	4.07	7.69	

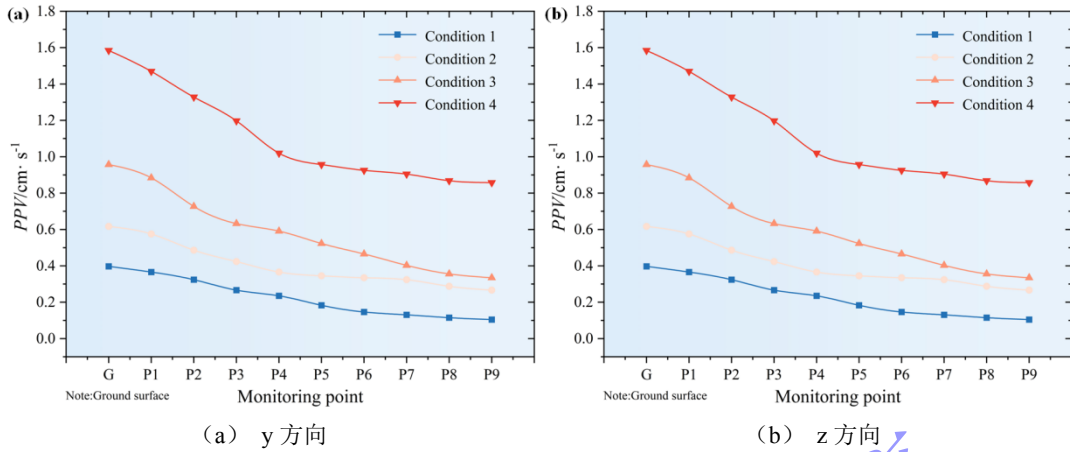


图 7 不同工况下各监测点 PPV 对比

Fig. 7 Comparison of PPV at various monitoring points under different working conditions.

2.2 爆破振动作用人体 PPV 衰减规律分析

开展上述现场原位爆破试验，得到不同爆心距传播至被测人体脚部的地表振速数据，测试结果见表 4。根据相关研究，爆破振动地表振速与最大单段药量、爆心距、场地条件之间的关系可由萨道夫斯基公式^[21,22]描述，由式 1 确定：

$$v = k \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中， v 为质点峰值振速， $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ； Q 为最大单段药量， kg ； R 为爆心距； k 、 α 为场地系数。根据表 3 中的测试数据，拟合得到试验场地 y 、 z 方向上的地表峰值振速衰减公式，见式 (2)、(3)：

$$v_y = 198.64 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.89} \quad (2)$$

$$v_z = 467.83 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.84} \quad (3)$$

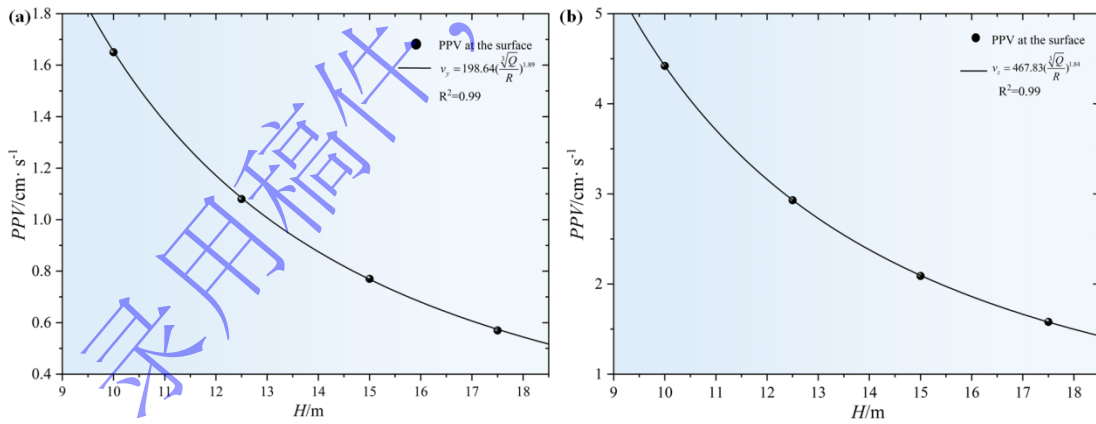


图 8 y 、 z 方向上的地表峰值振速衰减规律

Fig. 8 The attenuation law of ground peak vibration velocity in the y and z directions.

为了获取更准确的人体表面的爆破振动衰减规律，考虑身高的影响，对含高度影响的修正公式^[23,24]对试验数据进行拟合，见式 (4)：

$$v = k \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{H} \right)^\beta \quad (4)$$

式中， H 为测点与爆心之间的相对高差， m ； β 为与 H 有关的衰减系数；其余参数与上述一致。针对水平方向，将表 3 中的数据按照式 (4) 进行拟合，修正公式见式 (5)，拟合

参数见表 5:

$$v_y = 136.63 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{1.90} \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{H}\right)^{0.22} \quad (5)$$

针对垂直方向, 由以上分析, 在爆破振动作用下人体体表峰值振速沿垂直方向先减后增, 且变化趋势发生改变的界限基本都在腰部 P5, 因此, 将振速变化分为两个部分: 腰部以下、腰部以上, 结合表 3 中的数据按照式 (4) 进行拟合, 拟合参数见表 5, 修正公式见式 (6)、(7)。根据表 5 中拟合结果, R^2 均在 0.9 以上, 拟合精度较高, 拟合效果较好, 说明修正公式对于反映该次试验条件下爆破振动人体响应规律具有一定的可靠性, 其外推适用性有待更多工况验证。

$$v_z = 512.47 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{2.02} \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{H}\right)^{0.19} \quad (\text{腰部以下}) \quad (6)$$

$$v_z = 556.23 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{2.15} \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{H}\right)^{-1.37} \quad (\text{腰部以上}) \quad (7)$$

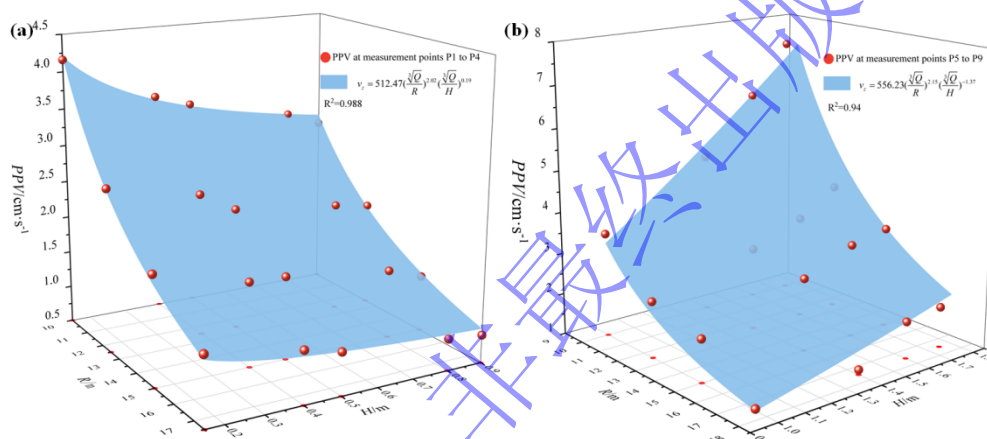


图 9 人体体表的 PPV 随爆心距和相对高差的变化规律

Fig. 9 The variation pattern of PPV on the human body surface with blast distance and relative height difference

表 4 现场原位试验爆破振动测试结果

Table 4 In-situ blasting vibration test results

爆破点号	爆心距/m	单段药量/kg	峰值振速/cm·s ⁻¹		
			x	y	z
1#	17.5	0.5	1.60	0.57	1.58
2#	15	0.5	2.09	0.77	2.09
3#	12.5	0.5	3.28	1.08	2.93
4#	10	0.5	4.63	1.65	4.42

表 5 考虑身高的修正公式拟合参数

Table 5 Considering height for the modification formula's fitting parameters

振动方向		k	α	β	R^2
y 向	\	136.63	1.90	0.22	0.975
z 向	腰部以下	512.47	2.02	0.19	0.988
	腰部以上	556.23	2.15	-1.37	0.940

3 人体感知室内振动台试验的可行性论证

3.1 人体感知室内振动台试验

爆破振动的复杂性为人体响应研究，尤其是心电变化的频次测定带来了诸多挑战。尽管可调整装药参数来控制振动，但实际中仍难以精确调控以满足试验要求，同时存在极大的安全性。鉴于此，采用室内振动台试验方法，通过精确控制振动参数来有效模拟真实的爆破振动环境^[25]。

室内振动台试验采用 ZD/AB-ATP 型触屏电磁式振动台模拟爆破振动环境，如图 10 (a)。该振动台能够产生水平、垂直与纵向三个方向的振动，加载频率范围为 0.1~1000 Hz；振动荷载由 TC-4850-3 型爆破振动测振仪进行标定。原位试验与振动台试验的心电信号采集均使用乐普（北京）医疗科技股份有限公司生产的一款高性能便携式心电图监测设备如图 10 (b)。该设备内置高灵敏度传感器，可捕捉心脏电活动的细微变化，支持 12 导联心电图记录，满足试验实时性与精度要求。测量时，受试者双手分别握持设备两侧电极并保持稳定，单次测量约 30 秒即可完成，能够有效满足试验需求。

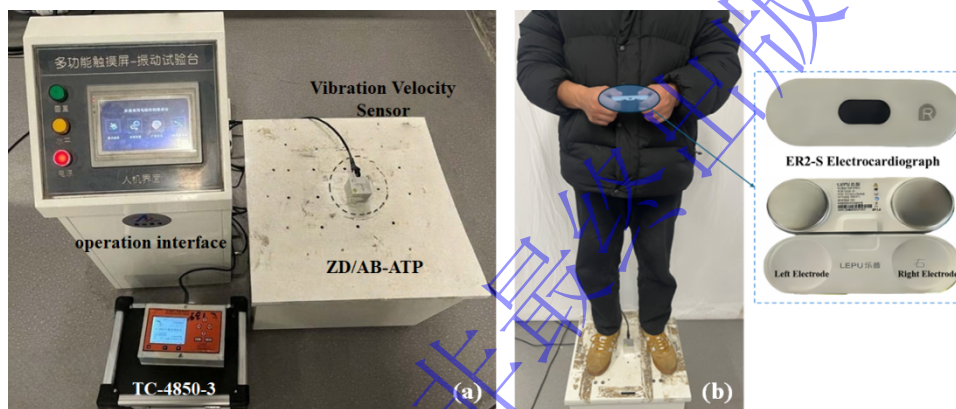


图 10 室内振动及心电采集系统

Fig. 10 Laboratory vibration and electrocardiogram (ECG) acquisition system

3.2 可行性论证分析

由于振动台在加载过程中输出的是恒定的正弦波 (b)，与爆破振动波形有较大差异 (a)，且只能进行一个方向的振动，如图 11 所示，因此，对人体感知和心电变化可能存在较大影响，需要对振动台模拟爆破振动进行可靠性验证。

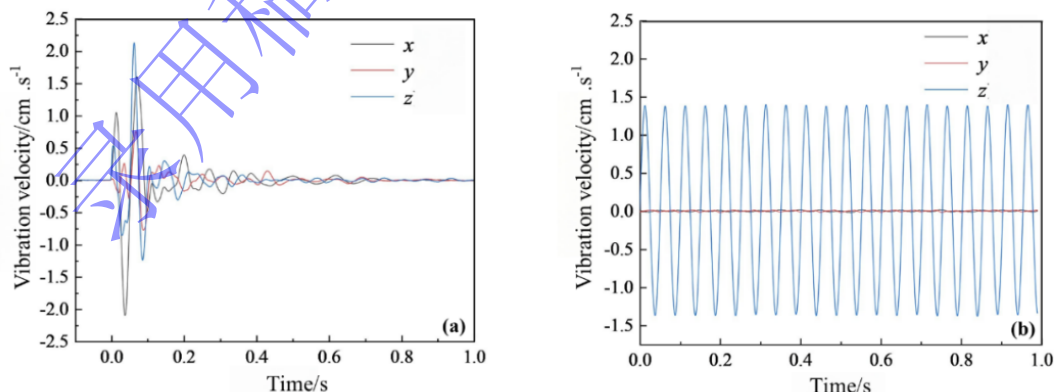


图 11 爆破振动与振动台振动对比

Fig. 11 Comparison between Blast-Induced Vibration and Shaker-Generated Vibration

前期进行现场原位爆破试验测试心率，选取同一愿者，将实测爆破振动数据作为振动台输入参数，并依据人体对爆破振动响应以垂向为主的特征，将激振方向设定为垂直向，

同步采集心电信号并提取心率变异性 (HRV) 指标进行对比。HRV 反映自主神经系统 (ANS) 对心脏的调节作用, HRV 与个体健康、心理状态及生理适应能力密切相关, 是评估身体舒适度及应激反应的重要指标 [26,27]。本文采用 HRV 的频域指标 LF (低频成分) 与 HF (高频成分) 的比值 LF/HF 作为人体心电响应的评价指标。

心电信号采集后需进行预处理以保证 HRV 分析的可靠性。原始 ECG 信号首先经 0.5~40 Hz 带通滤波去除基线漂移和高频肌电噪声, 随后采用 Pan-Tompkins 算法进行 R 波自动检测, 提取逐次心跳的 R-R 间期序列; 对检测结果进行人工复核, 剔除异位搏动及伪差造成的异常间期。为满足频域分析的等间隔采样要求, 采用三次样条插值将非等间隔 R-R 间期序列重采样为 4 Hz 的等间隔时间序列。在此基础上, 采用 Welch 周期图法进行功率谱估计 (窗宽 256 点, 50%重叠), 按标准定义在 0.04~0.15 Hz 频带积分得到低频功率 (LF), 在 0.15~0.4 Hz 频带积分得到高频功率 (HF), 以 LF/HF (低频功率与高频功率之比) 值作为人体心电响应的评价指标。上述处理流程参考欧洲心脏病学会与北美起搏与电生理学学会推荐的 HRV 测量标准 [28,29]。具体计算如下:

$$X(f) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi fn/N} \quad (8)$$

式中, $X(f)$ 为频率 f 下傅里叶变换的频域信号; $x(n)$ 为 R-R 间期数据; N 为 R-R 间期个数; f 为频率。

$$PSD(f) = |X(f)|^2 \quad (9)$$

式中, $PSD(f)$ 是在频率 f 上的功率谱密度, 用于表示各频率成分的能量分布。

$$LF = \int_{0.04}^{0.15} PSD(f) df \quad (10)$$

$$HF = \int_{0.15}^{0.4} PSD(f) df \quad (11)$$

结果如表 6, 振动台试验所引发的人体心电变化略大于原位试验。推测其原因, 可能与人体在持续振动环境中舒适度显著下降有关, 而实际爆破振动为瞬时衰减过程, 对人体影响相对较小。同时可以发现, 爆心距越近, LF/HF 的值越高, 表明其对人体心电变化的影响更为明显。尽管如此, 两类试验结果的整体误差均控制在 10% 以内, 表明采用振动台模拟爆破振动具有一定可靠性, 后续可基于振动台试验开展爆破振动对感知心电的研究。

表 6 原位试验与振动台试验心电变化对比分析

Table 6 Comparative analysis of electrocardiographic changes in in-situ versus shake table trials

工况	LF/HF (原位试验)	LF/HF (振动台试验)	误差/%
静息状态	1.28	1.28	0
1	1.45	1.56	7.6
2	1.52	1.61	5.9
3	1.58	1.65	4.4
4	1.70	1.80	5.9

3 结论

针对爆破振动环境中引起人体响应问题, 本研究作为一项突破探索性试验, 引入数字图像相关技术 (DIC) 与心电变化 (ECG) 同步测量系统, 初步探明了单受试者在有限爆破工况下站姿人体全身振动传递的基本趋势, 建立了本试验条件下考虑身高影响的人体分

区峰值振速拟合关系；同时初步论证了振动台模拟爆破振动开展人体感知试验的可行性。研究成果可为爆破振动作用下人体振动响应量化评价提供方法参考，主要结论如下：

(1) 在本试验条件下，DIC 测试结果表明，人体体表振动速度随时间衰减趋势与地表基本一致，但在头部呈现可能的放大效应，且振动持续时间较地表更长。该结果初步验证了 DIC 技术用于人体体表振速测量的可行性。

(2) 在本试验工况下，人体垂直振速显著高于水平振速，垂直方向为主振方向。水平峰值振速自脚部至头部逐次递减，衰减率达 52.6%~60%；垂直峰值振速沿人体高度呈“腰部以下衰减、腰部以上放大”的特征：下肢区域衰减率为 55.7%~65.9%，上体区域振速较地表放大 1.25~1.74 倍。

(3) 上述振动传递差异的可能机制在于：下肢软组织的阻尼耗散与关节的低通滤波效应可能解释了振动向腰部传递时的持续衰减；而脊柱的固有频率与爆破振动频带部分重叠引发的共振，加之头颈部的惯性效应，进一步增大了上体振动响应。

(4) 基于上述体表振速分布特征，以腰部为界，分别建立了本试验条件下人体腰部以下和以上区域的振速拟合关系。在本试验数据范围内可较好地反映各测点振速变化趋势。

(5) 基于心率变异性 (HRV) 评价指标 (LF/HF) 的对比分析，原位试验与振动台试验结果误差小于 10%，在本试验工况下初步验证了采用可控振动台进一步研究人体感知心电变化的可行性。

参考文献

- [1] 夏宇馨,蒋楠,姚颖康,等.粉质黏土层预埋承插式混凝土管道对爆破振动的动力响应[J].爆炸与冲击, 2020, 40(4):11.Doi:10.11883/bzycj-2019-0207.
- [2] 刘义佳,卢文波,陈明,等.结构爆破振动响应的频率与持续时间依赖性分析[J].爆炸与冲击, 2019, 39(8):11.Doi:CNKI:SUN:BZCJ.0.2019-08-017.
- [3] 苏恒儒,李志洋,杜现平,等.爆炸冲击波致颅脑损伤数值模拟[J].爆炸与冲击, 2025(10). Doi: 10.11883/bzycj-2024-0298.
- [4] 栗志杰,由小川,柳占立,等.爆炸冲击波作用下颅脑损伤机理的数值模拟研究[J].爆炸与冲击, 2020, 40(1):12.Doi:CNKI:SUN:BZCJ.0.2020-01-013.
- [5] 卢壮旗,姜辉,董瑞春,等.竖直坐姿人体头部振动响应的有限元法研究[J].应用力学学报, 2025(5). Doi:10.11776/j.issn.1000-4939.2025.05.022.
- [6] 陈兆玮,李松松,徐鸿,等.大型车辆段上盖建筑振动噪声特性及人体舒适度研究[J].振动工程学报, 2025, 38(7):1363.Doi:10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.202308024.
- [7] 范威,张驰,张东祥,等.基于三维有限元模型的人体全腰椎振动特性研究[J].中国生物医学工程学报, 2024, 43(2):196-203.Doi:10.3969/j.issn.0258-8021.2024.02.007.
- [8] Moore M ,Vatandoost H ,Yao Y , et al.Characterization of seat-to-head vibration transmissibility responses of a seated human body: the significance of the measurement location[J].Measurement,2026,261 119827-119827.Doi:10.1016/J.MEASUREMENT.2025.119827.
- [9] Dong G R ,Welcome E D ,McDowell W T , et al.Theoretical relationship between vibration transmissibility and driving-point response functions of the human body[J].Journal of Sound and Vibration,2013,332(24):6193-6202.Doi:10.1016/j.jsv.2013.07.017.
- [10] Zhang Z ,Xiao X ,Xu H , et al.Analysis of human body vibration response on high-speed trains under crosswinds[J].Mechanical Systems and Signal Processing,2025,223111863-111863.Doi:10.1016/J.YMSSP.2024.111863.
- [11] Eckardt J .Whole-body vibration-related health disorders in occupational medicine--an international comparison.[J].Ergonomics,2015,58(7):1239-52.Doi:10.1080/00140139.2015.1005170.
- [12] Smith G M ,Croy I ,Ogren M , et al.On the influence of freight trains on humans: a laboratory investigation of the impact of nocturnal low frequency vibration and noise on sleep and heart rate.[J].PLOS ONE,2017,8(2):e55829.Doi:10.1371/journal.pone.0055829.
- [13] Waddington ,Woodcock ,Smith , et al.CargoVibes: human response to vibration due to freight rail traffic[J].International Journal of Rail Transportation,2015,3(4):233-248.Doi:10.1080/23248378.2015.1076623.
- [14] 王俊龙, 马天, 关家乐,等.强冲击环境下人员颅脑损伤的评价方法[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(10): 1022-1034. Doi: 10.11883/bzycj-2024-0514
- [15] 李桂兵, 李文博, 汪国胜,等.底部爆炸冲击下乘员脊柱的损伤行为和风险分析[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(12): 1214-1222. Doi: 10.11883/bzycj-2024-0211
- [16] ZHOU M, LIANG M, LIN Y, et al. Directional effects of blast waves on human thorax: Dynamic response and injury mechanisms[J]. Defence Technology, 2025. Doi: 10.1016/j.dt.2025.12.011
- [17] Tang F ,Guo Z ,Yuan M , et al.Mechanical response of human torso under blast loading[J].Safety Science,2020,131DOI:10.1016/j.ssci.2020.104936.
- [18] 吝曼卿,卢祥龙,夏元友,等.缓倾结构面岩体在梯度应力作用下的岩爆模型[J].爆炸与冲击, 2025(6).Doi:10.11883/bzycj-2024-0466.

- [19] 陈徐东,王许阳,季韬,等.基于 DIC 的冲击劈拉荷载作用下 UHPC 动态抗拉力学性能研究[J].工程科学与技术, 2024, 56(6):103-112.DOI:10.12454/j.jsuese.202300153.
- [20] Guo T ,Liu K ,Wang H , et al.Mechanical characteristics and fracturing behavior of rock-concrete composite specimens with two pre-existing parallel flaws under uniaxial compression based on AE and DIC systems[J].Theoretical and Applied Fracture Mechanics,2025,136104866-104866.DOI:10.1016/J.TAFMEC.2025.104866.
- [21] Nan J ,Bin Z ,Chuanbo Z , et al.Safety criterion of gas pipeline buried in corrosive saturated soft soil subjected to blasting vibration in a coastal metro line[J].Thin-Walled Structures,2022,180DOI:10.1016/J.TWS.2022.109860.
- [22] Nan J ,Yongsheng J ,Yingkang Y , et al.Experimental investigation on the influence of tunnel crossing blast vibration on upper gas pipeline[J].Engineering Failure Analysis,2021,127DOI:10.1016/J.ENGFAILANAL.2021.105490.
- [23] 唐海,李海波.反映高程放大效应的爆破振动公式研究[J].岩土力学, 2011, 32(3):5.DOI:10.3969/j.issn.1000-7598.2011.03.030.
- [24] Zhao F ,Chen M ,Wang Y , et al.A new attenuation model for the surface blast vibration induced by underground blasting[J].Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research,2026,167107076-107076.DOI:10.1016/J.TUST.2025.107076.
- [25] 张继奎,蒋楠,周传波,等.爆破振动影响下人体舒适度振动台试验及其评价体系构建[J].工程科学学报,2023,45(02):326-335.DOI:10.13374/j.issn2095-9389.2022.04.20.001.
- [26] Maura Y D I ,Mora I E J ,Monaco M , et al.Physiological impact of the facial mask at rest (2): Modification of Cardiac Variability (HRV) in young athletes[J].Apunts Sports Medicine,2025,60(226):100472-100472.DOI:10.1016/J.APUNSM.2024.100472.
- [27] Chand K ,Chandra S ,Dutt V .A comprehensive evaluation of linear and non-linear HRV parameters between paced breathing and stressful mental state.[J].Heliyon,2024,10(11):e32195-e32195.DOI:10.1016/J.HELIYON.2024.E32195.
- [28] Zhu H ,Wang H ,Liu Z , et al.Experimental study on the human thermal comfort based on the heart rate variability (HRV) analysis under different environments[J].Science of the Total Environment,2018,616-6171124-1133.DOI:10.1016/j.scitotenv.2017.10.208.
- [29] Tan Q ,Zhou M ,You X , et al.Association of ambient ozone exposure with early cardiovascular damage among general urban adults: A repeated-measures cohort study in China.[J].The Science of the total environment,2024,957177380.DOI:10.1016/J.SCITOTENV.2024.177380.