

不同气压环境下冲击波对人体头颈致伤力学指标的影响规律*

王俊龙, 马天, 向评文, 张林侨, 王亚兵, 康越*

(军事科学院系统工程研究院军需工程技术研究所, 北京 100010)

摘要: 为揭示低气压环境下爆炸冲击波作用于人员头颈时的运动学响应规律, 本研究采用集成超压传感器、加速度传感器、角速度传感器及六轴载荷传感器的高仿真物理假人模型, 依托激波管测试系统, 在4种不同环境气压下依次开展3种不同冲击波强度试验。结果表明: 在54 kPa~101 kPa的环境压力条件下, 自由场冲击波峰值超压随环境气压降低整体呈下降趋势(相较于101 kPa气压环境, 当气压环境为54 kPa时峰值超压下降约16.03%), 头部各测点峰值超压在低气压区间亦呈下降趋势。与此同时, 头部质心 x 、 z 向加速度峰值与颈部 x 、 z 向力峰值整体随环境压力降低呈递减趋势, 而头部质心 y 方向角速度峰值与颈部 y 方向扭矩峰值整体随环境压力降低递增趋势, 表明在本研究工况下, 低气压环境对头颈系统平动与转动响应的影响呈相反变化趋势。研究发现: 基于常温常压条件建立的损伤量化评估方法在高原(低气压)环境下存在适用性偏差, 其原因在于高原(低气压)环境可改变人体生理机能(如低氧、低温降低组织耐受性), 相同冲击波加载工况下伤情往往较平原更重, 故该方法需在低气压工况下进行校准与验证。综上所述, 本研究为高原(低气压)环境下爆炸冲击伤研究及损伤准则适用性评估提供力学参考。

关键词: 爆炸冲击波; 低气压环境; 峰值超压; 致伤指标; 动力学响应; 激波管试验

中图分类号: O384

国标学科代码: 13035

文献标识码: A

Study on the influence of shock waves on human head and neck

mechanical injury indicators under different ambient pressure conditions

WANG Junlong, MA Tian, XIANG Pingwen, ZHANG Linqiao, WANG Yabing, KANG Yue*

(Quartermaster Engineering Technology Research Department, Systems Engineering Institute, AMS, Beijing 100010, China)

Abstract: In recent years, with the widespread application of various explosive weapons, the number of explosion-induced traumatic brain injury (TBI) cases has surged. Current research on explosive blast injuries predominantly focuses on plain environments, while studies on the injury mechanisms, trauma characteristics, and treatment strategies under the special physical and chemical environment of the plateau remain relatively scarce. To investigate the kinematic response of the human head-neck system subjected to blast loading under low-ambient-pressure conditions, this study employed a high-fidelity physical anthropomorphic surrogate instrumented with overpressure transducers, accelerometers, angular-rate sensors, and a six-axis load cell. Experiments were conducted using a shock-tube test system under four different ambient-pressure levels, with three blast overpressure magnitudes applied sequentially for each pressure condition. The results show that, under ambient pressures ranging from 54 kPa to 101 kPa, the free-field peak overpressure decreases with decreasing ambient pressure (relative to 101 kPa, the peak overpressure at 54 kPa is reduced by approximately 16.03%). The peak overpressure measured at multiple locations on the head surface also exhibits a decreasing trend in the low-pressure range. Meanwhile, translational metrics—such as the peak head

*收稿日期: 2026-01-20; 修回日期: 2026-05-24

第一作者: 王俊龙(2000—), 男, 硕士, junlongwang107@163.com

*通信作者: 康越(1989—), 男, 博士, 高级工程师, goodluckky@163.com

center-of-gravity accelerations in the x and z directions and the peak neck forces in the x and z directions—decrease overall with decreasing ambient pressure, whereas rotational metrics—such as the peak head center-of-gravity angular velocity in the y direction and the peak neck torque in the y direction—increase overall with decreasing ambient pressure. These findings indicate that, under the present test conditions, low ambient pressure exerts opposite effects on the translational and rotational responses of the head–neck system. The study reveals that the injury quantification assessment method established under normothermic and normobaric conditions exhibits applicability bias in high-altitude (hypobaric) environments. This bias arises because high-altitude (hypobaric) conditions can alter human physiological functions (e.g., hypoxia and hypothermia reduce tissue tolerance), and under identical blast loading conditions, injuries tend to be more severe than those at plain levels. Therefore, the method requires calibration and validation under hypobaric conditions. In summary, this study provides a mechanics-based reference for blast-induced injury research and for evaluating the applicability of injury criteria in plateau (low-ambient-pressure) environments.

Keywords: Explosion shock wave; Low-pressure environment; Peak overpressure; Injury indicators; Dynamic response; Shock tube testing

近年来,受全球与地区性武装冲突增多影响,爆炸冲击致创伤性脑损伤(blast-induced traumatic brain injury, bTBI)的发生风险与病例数量呈上升趋势^[1-3],并被认为是现代战争中最具有代表性的伤病类型^[4]。然而,现有针对爆炸冲击伤的研究主要以常温常压条件为主^[5,6],针对高原及类似低气压环境下爆炸冲击伤的发生机制、伤情特征(阈值)及救治策略等关键科学问题尚缺系统研究。

调研发现,前期相关研究工作多聚焦于低气压环境下冲击波特征参数的演化规律探索,研究结果显示,不同工况下环境气压降低使冲击波峰值超压与冲量呈下降趋势^[7-9]。Yang等^[10]通过数值模拟研究发现,相同试验条件下,当海拔高度由0 km增至4 km时冲击波峰值超压显著降低;Wang等^[11]在多因素耦合条件下研究表明,在相同TNT当量与测距条件下,高海拔环境冲击波峰值超压低于低海拔环境,且随传播距离的增加,高海拔冲击波峰值超压的衰减更为缓慢,但在比例距离(爆炸半径与TNT装药量的三分之一次方的比值)增大时其衰减效应呈增强趋势。庞春桥等^[12]发现当比例距离(r)满足 $2 \leq r \leq 10$ 时,随着 r 的增加,高原环境对冲击波峰值超压的影响呈增强趋势,即当海拔由200 m增加到4500 m时,爆炸冲击波峰值超压衰减可达20%以上。李福龙等^[13]研究表明,在相同实验条件下随海拔升高(环境气压降低),冲击波峰值超压与比冲量均呈减小趋势,且冲击波峰值到达时刻随测点距离增大而逐步提前。陈龙明等^[14,15]在密封容器内开展了不同环境气压条件下的测试试验并结合数值模拟分析发现,当环境气压每下降20%,冲击波峰值超压、比冲量和峰值到达时间平均降低约9%、10%和6%^[14]。李孝臣等^[16]基于可调真空度球形爆炸容器开展了试验,研究表明,在比例距离分别为2.51、2.87、3.16和3.62的工况下,环境压力每降低20 kPa,冲击波峰值超压平均下降约8.66%。Wang等^[17]利用压力可调的爆炸容器开展了现场测试,研究发现爆炸冲击波峰值超压随初始环境压力降低而整体递减,且在初始压力约为0.6 atm时,超压参数表现出与环境压力参数较强的相关性。

此外,科研工作者还针对包含有气压、温度和湿度等综合低压环境场景下冲击波的传播规律进行了研究。Veldman等^[18]、Liu等^[19]和李志敏等^[20]研究发现,随海拔高度的升高冲击波传播速度呈上升趋势。李瑞等^[21]利用量纲分析与数值模拟研究发现,冲击波传播速度在近场与远场的主导因素存在差异,即近场传播速度随海拔升高(气压降低)呈增大趋势;而在远场冲击波的传播速度更受环境温度影响,且随海拔升高(温度降低)呈下降趋势。Li等^[22]、李瑞等^[23]和Chen等^[24]研究发现,在高海拔环境中,温度的改变对冲击波演化规律的影响变化远高于比环境压力的变化。邓国强^[25]研究发现中低海拔区间标准大气参数(压力、密度、温度等)随海拔增加而减小,但波阵面参数(波速、密度、温度等)却随海拔增加而增大。朱冠南^[26,27]和康越等^[28]亦针对低压环境中的膛口/炮口冲击波开展研究,发现随环境压力的降低,冲击波强度呈线性递减规律^[26-28]。

总体而言, 现有研究已较为充分地揭示了高原(低气压)条件对爆炸冲击波关键特征参数的影响规律^[22-24]。由于高原环境属于多因素耦合环境, 在真实高原条件下开展爆炸冲击波致伤实验, 结果还会受到环境温度、水汽浓度及地形边界条件等因素影响, 干扰单一因素对致伤指标的影响分析。需要指出的是, 低气压是改变冲击波传播特性(如峰值超压、冲量、波阵面速度等)的直接物理原因, 而高原环境主要影响机体代谢与组织耐受性, 属于生物学响应范畴^[29,30]。本研究以高仿真物理假人为对象, 仅关注致伤力学指标, 不涉及生理性损伤评价。基于此, 本文拟采用单因素控制思路, 主要针对不同低压环境这一关键变量在峰值超压为 60 kPa 的强冲击波环境中开展人体头颈损伤评价。通过对高仿真物理假人模型头部表面峰值超压、头部质心运动学响应(加速度、角速度)及颈部运动学响应(力、扭矩)进行对比分析, 揭示强冲击波载荷下不同气压环境对人体头颈致伤指标的影响规律, 为高原(低气压)环境下爆炸冲击伤研究及损伤准则的适用性提供力学参考。

1 实验方法

1.1 实验装置

1.1.1 高仿真物理假人模型

本实验采用高仿真物理假人模型(以下简称“模型”, 见图 1), 该模型基于 50 百分位 Hybrid III 型男性假人制作^[31-33]。结合爆炸冲击波对人体头部的短时致伤效应, 在模型头部表面 6 个特定部位(眼部、前部、前额、头顶、枕部、耳部)各布设一枚超压传感器, 传感器通过螺纹工装与金属颅骨连接, 感应面与模型皮肤齐平; 针对冲击波对人体引发的惯性损伤(长时致伤效应), 在模型头部质心安装三轴加速度传感器与三轴角速度传感器, 在上颈部布设六轴载荷传感器。实验所用模型的生物逼真度、具体结构参数及传感器规格等信息, 可参考我们前期在本期刊发表的文献^[6], 为避免重复, 此处不再赘述。头部表面超压信号通过 SFSC-08 型数据采集仪采集, 采样频率设定为 1 MHz; 加速度、角速度、力及扭矩信号采用 SFSC-34 型数据采集仪采集, 采样频率为 100 kHz。

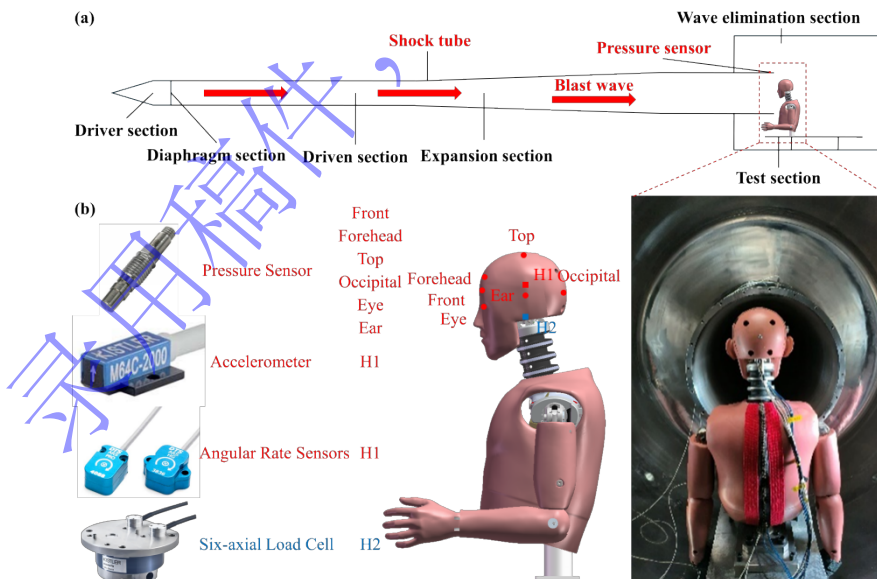


图 1 (a) 激波管示意图及模型布置图^[6], (b) 高仿真物理假人模型及传感器安装位置^[6]

Fig. 1 (a) Schematic diagram and model layout of the shock tube^[6], (b) Realistic physical manikin model and sensor installation position^[6]

1.1.2 激波管

本实验采用激波管装置模拟爆炸冲击波环境，该装置主要由高压驱动段、被驱动段、试验段和消波段构成^[34]，且整个系统为密闭结构，可通过与消波段连接的真空泵调节管内初始大气压（见图 1（a））。消波段管壁装有压力传感器，用于实时监测消波段气压。

在激波管试验段的管壁上布设 2 枚超压传感器，间距 25 cm，借助定制工装使传感器感应面与试验段内表面保持齐平，采用刚性固定方式确保安装稳定性。激波管自由场超压信号通过 DH8305 型动态信号测试分析系统进行采集，采样频率设定为 1 MHz。高压驱动段与被驱动段之间由钢制膜片分隔，以压缩空气作为驱动源；通过调整膜片厚度与驱动段压力，使其破裂并产生特定峰值超压的模拟爆炸冲击波。激波管可以有效模拟真实炸药爆炸产生的冲击波，且重复性较好，性能满足实验需求^[35]。

1.2 实验方案

为探究不同环境气压对头部致伤指标的影响，本研究采用激波管模拟产生爆炸冲击波。实验中保持激波管驱动段破膜压力与膜片材质/厚度一致，以保证破膜前的加载工况一致。在接近标准大气压（约 101 kPa）条件下，通过更换不同厚度的膜片生成三种强度等级的模拟爆炸冲击波，其峰值超压约为 60 kPa、135 kPa 和 200 kPa。考虑到破膜后冲击波传播与衰减受环境气压影响，因此将环境气压作为控制变量，并在相同破膜工况下比较不同环境气压条件下的冲击波加载与致伤响应差异。参考前人研究中的气压环境分级标准^[14,28]，本研究设定 4 种不同气压环境，试验段环境压力分别为 101 kPa、90 kPa、70 kPa 与 54 kPa，每种环境压力下均开展 3 种工况实验，共计 12 类不同条件测试。

本研究分为两部分实验：第一部分，在未放置模型的激波管内开展试验，用于评估不同环境气压条件下冲击波测试环境的可靠性；第二部分，将模型置入激波管试验段进行冲击波试验，并记录模型数据。

1.2.1 自由场环境气压测试

在前期工作中，已对激波管试验段出口附近冲击波波阵面的空间均匀性进行评估，结果表明该区域冲击波均匀性良好^[34]。因此，本实验选取试验段出口附近作为自由场压力测点布置位置，并采用 KD2002L-01 型自由场压力传感器（扬州科动电子有限责任公司）采集模拟爆炸冲击波的超压时程曲线。传感器感应面布置于距试验段出口 1 cm 处（见图 2），用于记录不同工况下的压力响应数据。

实验工况按照前述 12 种组合条件执行并采集压力数据，本实验所在地理位置海拔为 43.5 m，其实际测得的大气压约为 101 kPa。

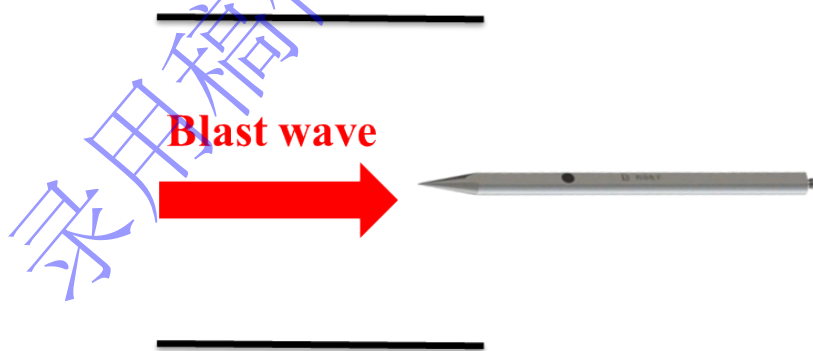


图 2 自由场传感器安装示意图

Fig. 2 Free-Field Sensor Installation Diagram

1.2.2 不同气压环境冲击波测试

所有实验均在室温条件下进行。物理假人模型通过刚性连接方式固定于试验段测试平台，其安装姿态与相对位置参照前期工作^[6]的布置方案，以保证模型正面朝向冲击波来波方向（见图 1（a））。模型头前

部超压传感器的感应面布置于距试验段出口 1 cm 处。实验按前述 12 种组合工况开展测试。每种工况均进行 3 次重复试验，以提高数据稳定性与结果可靠性。

1.3 数据处理与分析

参照相关标准要求^[36]，对加速度、角速度及力信号采用 CFC（channel frequency class）1000 等级滤波处理，扭矩信号则选用 CFC600 等级滤波。

2 结果与讨论

由于实验条件为 135 kPa 和 200 kPa 工况下所获得的各指标变化规律与 60 kPa 工况一致。因此，本文主要展示 60 kPa 工况下的详细测试数据及试验结果。

2.1 试验段出口冲击波参数变化分析

图 3 给出了不同环境气压条件下试验段出口超压时程曲线实测结果。由图 3 可见，各工况下超压时程曲线的波形特征与演化过程整体一致，表明在不同环境气压条件下冲击波生成与传播过程具有良好的稳定性。

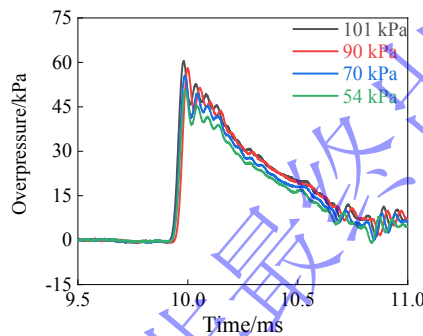


图 3 不同环境气压条件下试验段出口超压时程曲线

Fig. 3 Shock Wave Overpressure Time-History Curves at the Test-Section Exit Under Different Ambient Pressure Conditions

表 1 汇总了各实验工况下驱动段压力 (P_d)、试验段出口压力 (P_t) 和及环境气压 (P_e) 的实测结果。由表 1 可见，在组别 1-4 中，驱动段压力基本一致，变异系数为 3.97%，这一结果表明实验结果具有较高的重复性。随着环境气压降低，试验段实测压力总体呈现逐渐减小的趋势，该规律与已有研究结论一致^[12,25,26,37]，进一步验证了环境气压对冲击波超压峰值的影响规律。当环境气压从 101 kPa 下降至 55 kPa 时，试验段峰值超压下降了约 16.03%，表明该激波管能够较好地实现低气压条件下的冲击波测试。同时，当环境压力为 89 kPa 时，与本研究设定 90 kPa 气压环境存在差异，在实际实验过程中，受真空泵系统的控制精度以及环境因素的微小波动影响，实测环境气压值无法与理论值完全一致，存在 ± 1 kPa 左右的微小波动，在后续假人模型测试中，均在此 4 种气压工况下重复开展实验。

表 1 初始实验条件

Table 1 Initial Experimental Conditions

组别	P_d /kPa	P_t /kPa	P_e /kPa
1	461	59.0	101
2	431	55.1	89
3	431	51.5	70
4	421	48.9	55

表 2 统计了 60 kPa 冲击波工况下，4 种环境气压条件中各 3 次模型实验时所测得的激波管试验段出口压力。由表可知，当环境气压为 90 kPa 时，试验段出口压力的平均值高于 101 kPa 环境气压下的对应值。该现象主要归因于膜片工艺差异所带来的系统误差。

表 2 激波管试验段压力

Table 2 Shock tube test section pressures

P_e /kPa	P_t /kPa		
	第一次	第二次	第三次
101	64.6	56.9	54.3
90	62.9	62.1	57.2
70	50.1	49.4	47.7
54	46.8	46.6	46.1

2.2 不同气压环境下致伤指标变化规律分析

2.2.1 头部表面超压峰值随时间的变化规律

图 4 展示了不同气压环境下模型头部各测点的超压时程曲线。由图 4 可见，当模型正面朝向冲击波来波方向时，不同气压环境下，同一测点的超压时程曲线波形特征与演化过程一致，说明环境气压变化对模型头部表面超压时程曲线影响有限，但峰值超压随着环境气压降低呈下降趋势。

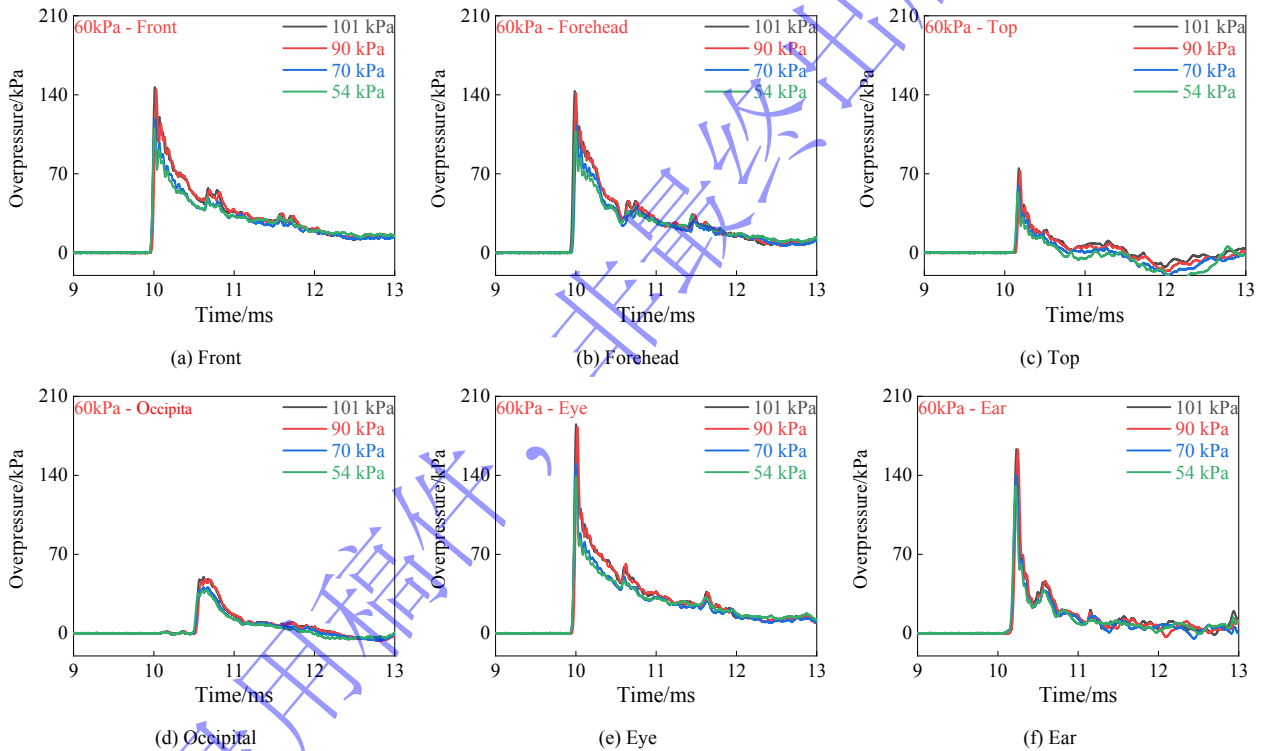


图 4 不同环境气压条件下不同测点的冲击波超压时程曲线

Fig. 4 Shock Wave Overpressure Time-History Curves at Different Measurement Points Under Different Ambient Pressure Conditions

图 5展示了 4 种实验条件下，模型头部各测点峰值超压的统计结果。不同气压环境条件下，头部表面峰值超压分布规律保持一致，即眼部测点峰值超压最高，冲击波沿模型头部表面“前部-前额-头顶-枕部”传播路径呈逐步降低趋势^[38-40]。当环境气压由 101 kPa 降至 54 kPa 时，各测点峰值超压整体降低，例如眼部测点由(167.5±16.1) kPa 降至(140.1±1.6) kPa (降幅约 16.4%)，前部测点由(133.3±12.1) kPa 降至(111.3±1.1) kPa (降幅约 16.5%)，头顶测点由(69.3±5.2) kPa 降至(53.9±0.5) kPa (降幅约 22.2%)，枕部测点由(44.9±4.7) kPa 降至(38.1±0.5) kPa (降幅约 15.1%)。

总体来看，当环境气压由 101 kPa 降至 70 kPa 与 54 kPa 时，各测点峰值超压均呈下降趋势，表明低气

压环境会削弱冲击波在模型表面形成的峰值超压^[37,41]。然而，在环境气压为 90 kPa 的工况下，各测点峰值超压较 101 kPa 基准工况略有升高。该现象主要归因于激波管试验段出口压力的异常增大（见表 2）：该偏差对峰值超压的影响幅度超过了环境气压变化本身所引起的峰值超压变化量，从而导致在该环境气压下本应出现的递减规律未能显现。

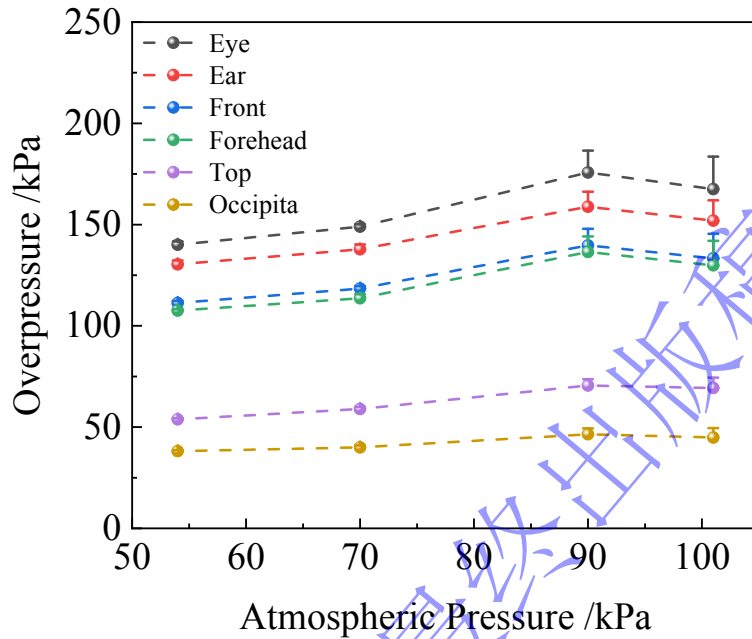
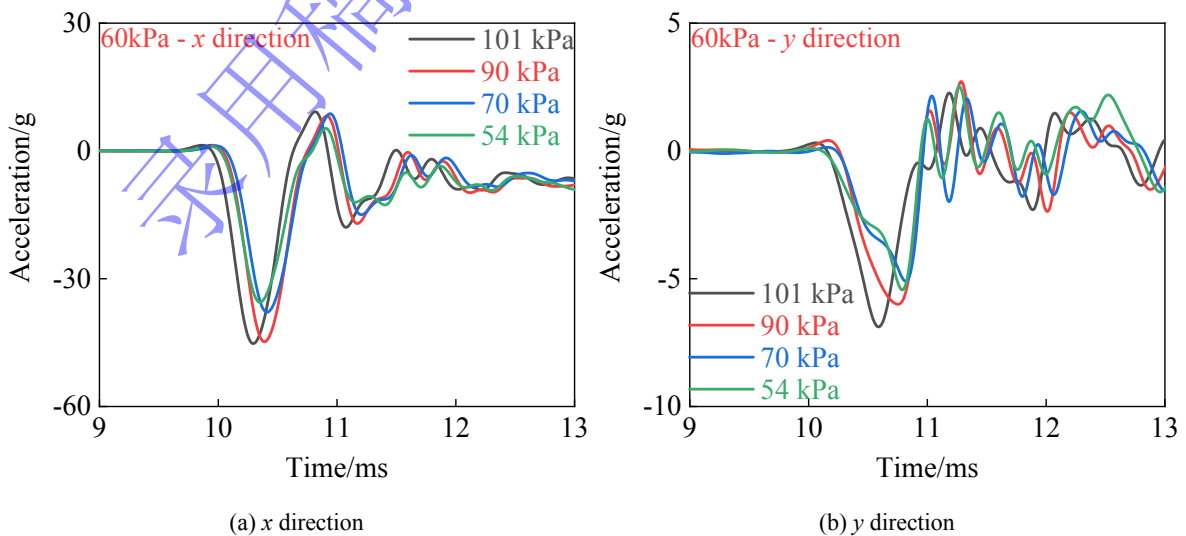


图 5 不同冲击环境下头部表面峰值超压

Fig. 5 Peak Overpressure on the Head Surface Under Different Shock Environments

2.2.2 头部质心加速度和角速度随时间的变化规律

图 6 展示了不同气压环境下模型头部质心线加速度时程曲线。由图可知，当模型正面朝向冲击波来波方向时，不同环境气压下同一方向加速度随时间的变化规律具有较好的一致性，测试结果说明，环境气压变化对加速度时程曲线的变化规律影响较小，但合成加速度峰值（图 6 d）以及 x 方向（图 6 a）和 z 方向（图 6 c）加速度峰值随环境气压的降低整体呈下降趋势。



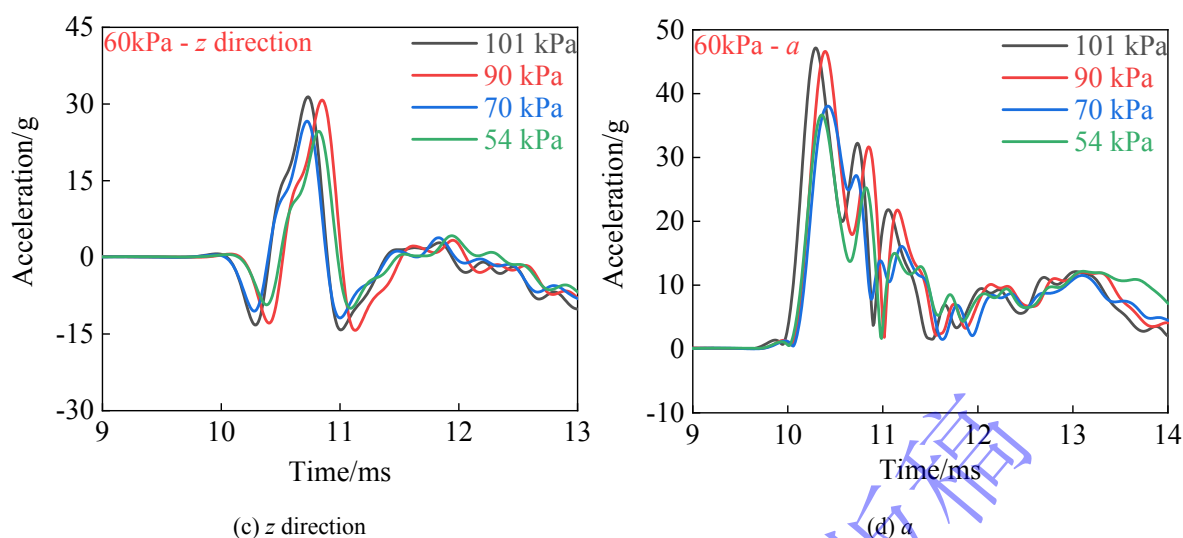


图 6 不同环境气压条件下头部质心加速度时程曲线

Fig. 6 Acceleration Time-History Curves of the Center of Mass of the Head Under Different Ambient Pressure Conditions

图 7 展示了不同气压环境条件下头部质心线加速度峰值的统计结果。由图可知， x 方向峰值最大， z 方向次之， y 方向最小^[6]。该特征表明，在正面冲击波作用下， x 方向和 z 方向的加速度峰值受冲击波来波方向影响较大，而 y 方向加速度峰值受影响较小。当环境气压由 101 kPa 降至 54 kPa 时， x 方向加速度峰值由 $(41.9 \pm 3.3) g$ 降至 $(34.9 \pm 0.7) g$ （下降约 17%）， z 方向加速度峰值由 $(29.1 \pm 2.0) g$ 降至 $(24.5 \pm 0.3) g$ （下降约 16%），而 y 方向加速度峰值维持在约 5-6 g 量级。上述测试数据表明，不同气压环境对头部质心 x 方向和 z 方向加速度影响较大。

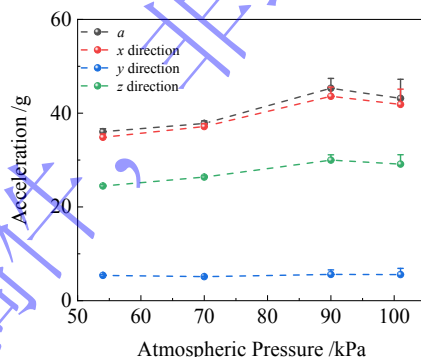
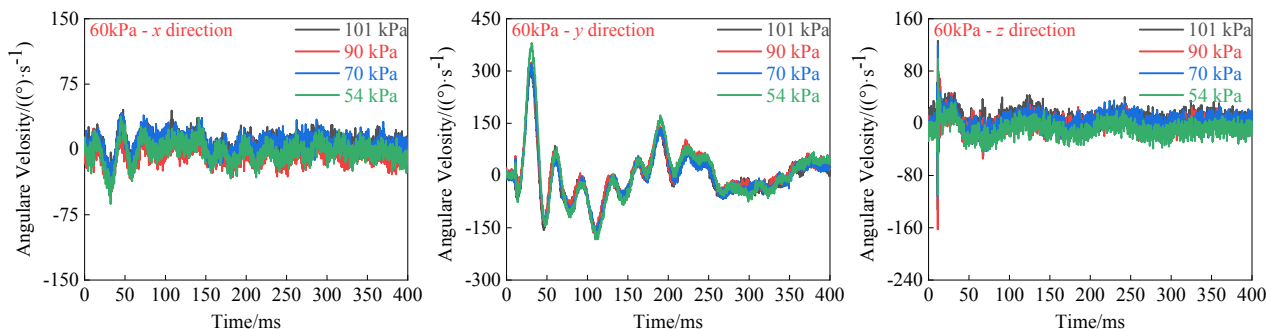


图 7 不同冲击环境下头部质心加速度峰值

Fig. 7 Peak Accelerations of the Center of Mass of the Head Under Different Shock Environments

图 8 展示了不同气压环境下模型质心角速度时程曲线。由图可知，当模型正面朝向冲击波来波方向时，不同环境气压下同一方向角速度随时间的变化规律具有较好的一致性，说明环境气压变化对角速度时程曲线的变化规律影响较小。



(a) x direction (b) y direction (c) z direction

图 8 不同环境气压条件下头部质心角速度时程曲线

Fig. 8 Angular Velocity Time-History Curves of the Center of Mass of the Head Under Different Ambient Pressure Conditions

图 9 展示了 **Error! Reference source not found.** 不同气压环境下头部质心角速度峰值的统计结果，由图可知，在正面冲击波作用下，y 方向角速度峰值受影响较大，而 x 方向和 z 方向角速度峰值受影响较小^[6]。当环境气压由 101 kPa 降至 54 kPa 时，y 方向角速度峰值由(284.5±29.7) ((°):s⁻¹)增至(355.3±23.5) ((°):s⁻¹)，而 x 方向角速度峰值约为 43.8~58.6 ((°):s⁻¹)，z 方向角速度峰值约为 117.6~152.7((°):s⁻¹)。对应地，y 方向角速度峰值约为 x 方向角速度的 6-7 倍、为 z 方向角速度的 2-3 倍，表明头部旋转响应主要体现在 y 方向。因此，正面冲击波作用下，y 方向角速度峰值对环境气压变化更为敏感，宜作为分析环境气压对角速度峰值影响的主要评价指标。相较于 101 kPa 基准工况，y 方向角速度峰值在 90 kPa、70 kPa 与 54 kPa 的气压环境下分别增加约 9.3%、12.5%和 24.9%。

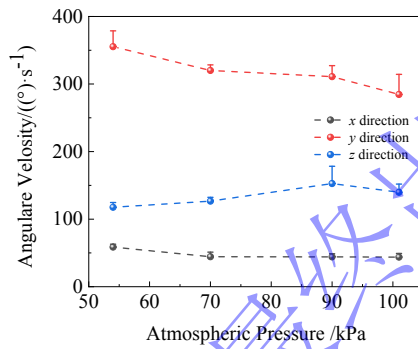


图 9 不同冲击环境下头部质心角速度峰值

Fig. 9 Peak Angular Velocities of the Center of Mass of the Head Under Different Shock Environments

2.2.3 颈部力和扭矩随时间的变化规律

图 10 展示了不同气压环境下模型颈部三向力时程曲线。由图可知，当模型正面朝向冲击波来波方向时，在不同环境气压条件下，同一方向颈部力随时间的变化具有较好的一致性，说明环境气压变化对颈部力响应的影响相对有限。

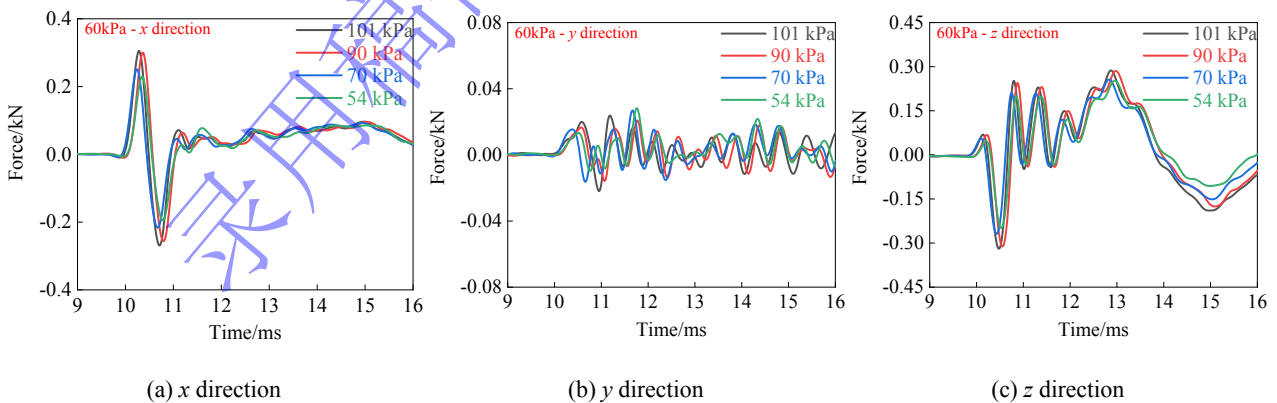


图 10 不同环境气压条件下颈部力时程曲线

Fig. 10 Neck Force Time-History Curves Under Different Ambient Pressure Conditions

图 11 展示了 **Error! Reference source not found.** 不同气压环境下颈部力峰值的统计结果，由图可知，z 方向力峰值最大，x 方向次之，y 方向最小^[6]。该特征表明，在正面冲击波作用下，z 方向和 x 方向的颈部力峰值受冲击波来波方向影响较大，而 y 方向颈部力峰值受影响较小。当环境气压由 101 kPa 降至 54 kPa 时，x 方向力峰值由(280.3±22.8) N 降至(228.3±3.1) N (下降约 18.6%)，z 方向力峰值由(296.7±20.1)

N 降至(253.0±2.0) N (下降约 14.7%)，而 y 方向力峰值维持在约 24-28 N；对应地， x 方向与 z 方向力峰值约为 y 方向的 8-13 倍，进一步说明，在正面冲击波作用下， x 方向与 z 方向力对颈部受力变化更敏感。因此，在分析环境气压对颈部力的影响程度时，应重点关注 x 方向与 z 方向两个分量。

总体来看，以 101 kPa 为基准工况，当环境气压降低至 70 kPa 与 54 kPa 时， x 方向与 z 方向峰值均呈现整体下降趋势，表明低气压环境会削弱冲击波作用下头颈系统的载荷输入与传递水平。该变化趋势与头部质心加速度峰值下降相一致，提示二者可能受共同的载荷形成与传递机制控制。

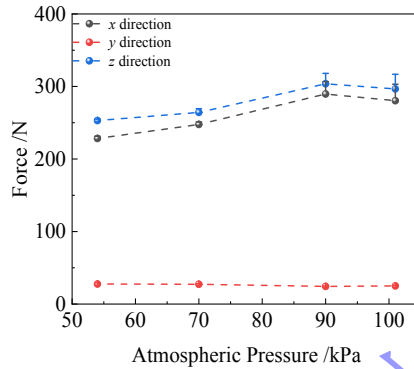


图 11 不同冲击环境下颈部力峰值

Fig. 11 Peak Neck Forces Under Different Shock Environments

图 12 展示了不同气压环境下模型颈部三向扭矩时程曲线。由图可知，当模型正面朝向冲击波来波方向时，在不同环境气压条件下，同一方向颈部扭矩随时间变化具有较好的一致性，说明环境气压改变对高仿真物理假人脖颈部扭矩的响应影响有限。

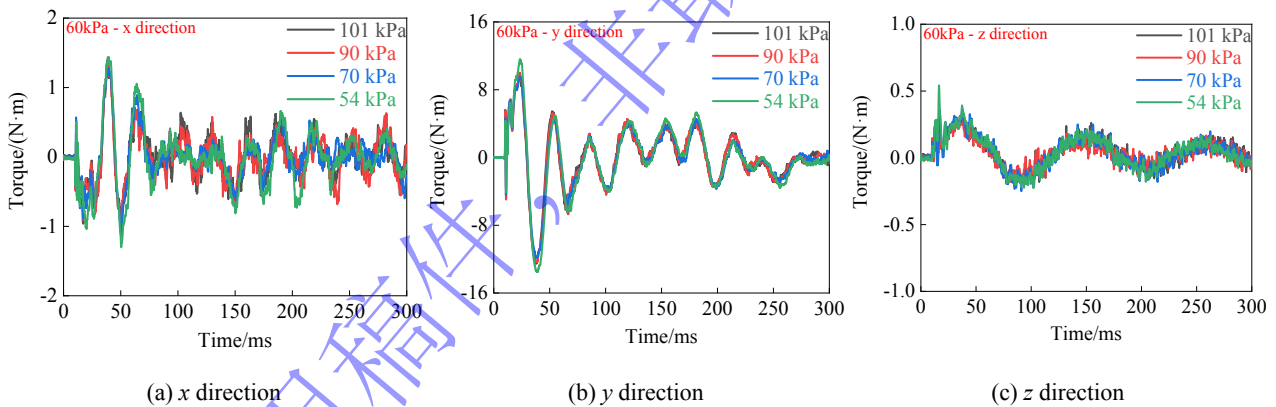


图 12 不同环境气压条件下颈部扭矩时程曲线

Fig. 12 Neck Torque Time-History Curves Under Different Ambient Pressure Conditions

图 13 展示了 **Error! Reference source not found.** 不同气压环境下颈部扭矩峰值统计结果。由图可知，在三个方向上，颈部扭矩峰值与头部质心角速度峰值均呈现出 y 方向响应占主导^[6]。当环境气压由 101 kPa 降至 54 kPa 时， y 方向扭矩峰值由(11.3±1.2) N·m 增至(13.3±0.4) N·m，而 x 方向扭矩峰值约为 1.2~1.4 N·m、 z 方向扭矩峰值约为 0.3~0.5 N·m；对应地， y 方向扭矩峰值约为 x 方向的 9 倍、约为 z 方向的 27-40 倍，进一步说明 y 方向扭矩对环境变化更敏感。因此，在分析环境气压对颈部扭矩峰值的影响时，应重点关注 y 方向扭矩。

随着环境气压的降低， y 方向扭矩峰值呈上升趋势：相较于 101 kPa 基准工况， y 方向扭矩峰值在 90 kPa、70 kPa 与 54 kPa 的气压环境下分别增加约 5.3%、7.1%和 17.7%；该结果与 y 方向角速度峰值的变化趋势一致。

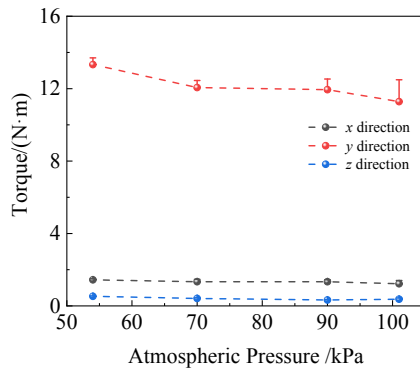


图 13 不同冲击环境下颈部扭矩峰值

Fig. 13 Peak Neck Torques Under Different Shock Environments

2.3 讨论

近年来，现有工作已在接近标准大气压条件下积累了较为丰富的损伤评价认识，但在低气压环境中，爆炸冲击载荷与头颈部动力学响应/致伤效应之间的关联仍缺乏系统实验数据支撑，从而限制了既有损伤准则与防护设计方法的环境适配及其有效性验证。在单因素控制思路下降低环境气压，对比低气压与接近标准大气压条件下头颈部载荷与运动学响应差异。

试验结果表明，随环境气压降低，头部表面峰值超压整体呈下降趋势。需要指出的是，本研究未对温度、声速等参数进行独立控制，后续仍需在更完备的环境参数控制下进行量化验证。在低气压环境中，若温度保持恒定或变化可忽略，环境气压与空气密度近似成正比^[25]。随着环境气压降低，空气密度相应减小，单位体积内的气体分子数急剧减少。在相同实验工况下，冲击波波阵面中参与压缩的分子数减少，导致峰值超压下降^[9,10]。因此，低气压环境下模型头部表面所测得的峰值超压低于常压环境下的对应值。为验证低气压环境下的激波强度，可采用 Rankine-Hugoniot 关系式^[42]进行分析。联立式 (1) 与式 (2) 可得式 (3)，代入实验数据计算，结果见表 3。试验测得值与理论计算结果基本一致。

$$\frac{p_2}{p_e} = 1 + \frac{2\gamma}{\gamma + 1}(M_s^2 - 1) \quad (\text{Error! Bookmark not defined.})$$

$$M_s = \frac{D}{c_1} \quad (\text{Error! Bookmark not defined.})$$

式中， p_2 为激波波后压力， p_e 为被驱动段初始环境压力； γ 是比热容比，对于室温下的空气， γ 取值为 1.40； M_s 为激波马赫数， D 为激波速度， c_1 为声速，单位为 m/s。

$$\Delta p = p_2 - p_e = p_e \left(\frac{p_2}{p_e} - 1 \right) = p_e \cdot \frac{2\gamma}{\gamma + 1} (M_s^2 - 1) \quad (\text{Error! Bookmark not defined.})$$

式中， Δp 为峰值超压。

表 3 激波信息

Table 3 Shock wave information

P_e /kPa	P_t /kPa	D /(m/s)	M_s	Δp /kPa
101	59.0	417.4	1.23	59.63
90	55.1	417.4	1.23	52.39
70	51.5	427.4	1.26	47.15
54	48.9	440.9	1.30	43.58

试验结果表明，随环境气压降低，头部质心 x 方向和 z 方向加速度峰值以及颈部 x 方向和 z 方向力峰值整体呈下降趋势。当冲击波作用于模型表面时，头部所受合力可用式 (4) 描述。对比超压时程曲线与头部质心加速度时程曲线可知，两者在模型头部的作用时间尺度基本一致，表明头部质心加速度主要受头

部超压影响。当冲击波波阵面初始接触模型头部表面时，颈部尚未发生形变，亦未产生颈部反力，且动压效应尚未显现。因此，该阶段头部受力主要取决于峰值超压。低气压环境下峰值超压较低，致使头部受力小于标准大气压环境下的对应值，进而导致头部质心各方向加速度减小（式（5）），同时传递至颈部的力也相应降低。当波阵面传播至耳部（冠状面）时，模型头部所受合力达到最大值。此后，波阵面继续向枕部（冠状面后方）传播，枕部区域超压开始上升，但头部整体由超压引起的合力逐渐减小。在该过程中，超压是头部受力的主导因素，动压产生的力及颈部约束力均小于超压引起的作用力。因此，头部合力的幅值仍受环境气压的影响，表现为随环境气压降低，头部质心 x 方向和 z 方向加速度峰值以及颈部 x 方向和 z 方向力峰值整体呈下降趋势。

$$F(t) = \iint P(t)dS + F_{\text{neck}} + F_{\text{drag}} \quad \#(\text{Error! Bookmark not defined.})$$

式中， $F(t)$ 为头部所受合力， $P(t)$ 为模型表面超压， dS 为表面积分微元， F_{neck} 为颈部约束力， F_{drag} 为动压所产生的力。

$$F = ma \quad \#(\text{Error! Bookmark not defined.})$$

式中， m 为模型头部质量， a 为头部质心加速度。

试验结果表明，随环境气压降低，头部质心 y 方向角速度峰值及颈部 y 方向角速度扭矩峰值呈上升趋势。当冲击波作用于模型表面时，颈部所受扭矩可用式（6）描述，头部质心角速度可用式（7）描述。当冲击波波阵面初始接触模型头部表面时，颈部尚未发生明显形变，该阶段的颈部扭矩主要源于头部表面超压。在此阶段，低气压环境下的角速度峰值亦小于常压环境下的对应值。当冲击波完全通过模型头部后，上颈部扭矩主要由颈部材料特性与空气阻尼共同决定，低气压环境下空气阻尼较小，导致颈部合扭矩高于常压环境，且作用时间延长，进而使角速度峰值亦大于常压环境。此外，低气压环境下作用于躯干的载荷减弱，可能导致躯干整体后仰幅度降低；与此同时，头部在冲击波作用下仍可保持显著的俯仰运动，从而增大头部相对于躯干的相对俯仰角速度与角加速度，并相应提升颈部 y 方向扭矩峰值。

$$\sum M = I \cdot \alpha \quad \#(\text{Error! Bookmark not defined.})$$

式中， $\sum M$ 为合扭矩， I 为转动惯量， α 为角加速度。

$$\omega(t) = \frac{1}{I} \int_0^t \sum M dt \quad \#(\text{Error! Bookmark not defined.})$$

式中， $\omega(t)$ 为角速度， t 为作用时间。

此外，本研究中头部表面峰值超压随环境气压降低一致呈现下降趋势，说明试验工况控制与数据采集具有良好稳定性；结合物理假人模型的生物逼真度标定结果，测试数据具备合理的生物力学解释基础。然而，若仅依据致伤指标“峰值”随气压降低而下降，进而推断低气压环境下损伤风险必然降低，可能导致过度简化。既有生物实验亦提示低气压环境可能降低机体对冲击波的耐受阈值。张雷廷等^[43]在小鼠平原与高原严重冲击伤研究中发现，为制备相同伤情，高原条件下所需试验压力低于平原条件。王峰等^[29,30]依托BST-1型生物激波管开展研究，结果显示随海拔升高，大鼠重度及极重度肺出血发生率、肺水肿病理损伤程度以及死亡率显著增加^[30]，并指出高原低气压环境可显著降低动物对冲击波的耐受阈值^[29]。邓志龙等^[37]亦发现随海拔升高，大鼠肺损伤等级较平原环境提高1~3级，肺功能损伤程度与死亡率均呈逐步加剧趋势。上述发现表明，即使在相同或相近的冲击条件下，低气压环境下的生物效应可能并不减弱；因此，常温常压环境中基于峰值超压构建的损伤量化评估方法在高原环境中需要谨慎外推。

3 结论

本研究基于高仿真物理假人模型与激波管测试系统，构建了四种不同环境气压（101、90、70、54 kPa），获得了低气压条件下头颈部动力学响应的实验数据，主要研究结论如下：

1. 在 54 kPa~101 kPa 的环境压力条件下, 自由场冲击波峰值超压随环境气压降低整体呈下降趋势; 相较于 101 kPa 环境压力, 54 kPa 条件下自由场冲击波峰值超压降低约 16.03%。

2. 当环境气压降低至 70 kPa 和 54 kPa 时, 头部各测点峰值超压整体下降, 表明环境气压主要影响峰值超压幅值; 同时, 在头部表面六个测点中, 眼部测点峰值超压最大, “前部-前额-头顶-枕部”测点峰值超压沿路径依次衰减。

3. 在 54 kPa~101 kPa 的环境压力条件下, 头部质心 x 方向和 z 方向加速度峰值以及颈部 x 和 z 方向力峰值整体随环境压力的降低而减小; 头部 y 方向角速度峰值与颈部 y 方向扭矩峰值整体随环境压力的降低而升高。

尽管本研究在低气压条件下爆炸冲击作用的头颈响应特征方面获得了一定的实验数据与规律性认识, 但仍需在更完善的环境参数控制与更贴近实际的模型与边界条件设置上进一步拓展。总体而言, 本研究为不同气压条件下致伤相关指标的变化规律提供了可重复的实验依据, 并可为高原环境下爆炸冲击伤的防护设计、损伤评估与救治策略制定提供力学参考。

参考文献:

- [1] EPSHTEIN E, SHRAGA S, RADOMISLENSKY I, et al. Blast injury and chronic psychiatric disability in military personnel: Exploring the association beyond posttraumatic stress disorder[J]. *Journal of Psychiatric Research*, 2025, 184: 515-521. DOI:10.1016/j.jpsychires.2025.03.026.
- [2] 胡勇, 马天, 王俊龙, 等. 针对个体防护的冲击波检测评估技术[J]. *爆炸与冲击*, 2025, 45(4): 041101-041132. DOI:10.11883/bzycj-2024-0118.
HU Y, MA T, WANG J L, et al. Shock wave detection and evaluation techniques for individual protection[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2025, 45(4): 041101-041132. DOI:10.11883/bzycj-2024-0118.
- [3] WANG Z, CHENG F, SHI X, et al. Advance on Blast-induced Traumatic Brain Injury[J]. *World Neurosurgery*, 2025: 124115. DOI:10.1016/j.wneu.2025.124115.
- [4] SACHDEVA T, GANPULE S G. Twenty Years of Blast-Induced Neurotrauma: Current State of Knowledge[J]. *Neurotrauma Reports*, 2024, 5(1): 243-253. DOI:10.1089/neur.2024.0001.
- [5] 晁望舒, 费晓炜, 李伟萍, 等. 防护眼镜对眼爆震伤诱导视网膜病理损伤和自噬变化的有效改善[J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44(12): 121441-19. DOI:10.11883/bzycj-2024-0257.
CHAO W S, FEI X W, LI W, P et al. Effective improvement of retinal pathological injury and autophagy changes induced by explosive eye blast injury by protective goggles[J]. *Explosion And Shock Waves*, 2024, 44(12): 121441-19. DOI:10.11883/bzycj-2024-0257.
- [6] 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): 102204-102214. DOI:10.11883/bzycj-2024-0514.
WANG J L, MA T, GUAN J L, et al. Research on the evaluation method of human traumatic brain injury in a strong shock wave environments[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2025, 45(10): 102204-102214. DOI:10.11883/bzycj-2024-0514.
- [7] 李志敏. 负压环境下炸药爆炸冲击波传播特性及有害效应研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2023.
LI Z M. Study on Propagation Characteristics of Explosive Blast Wave and Harmful Effects of Explosive Explosion in Negative Pressure Environment[D]. Huai nan: Anhui University of Science and Technology, 2023.
- [8] 谢雪腾. 高原环境爆炸冲击波传播特性的数值模拟与实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
XIE X T. Numerical simulation and experimental research on propagation characteristics of blast shock wave at plateau environment[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2017.
- [9] 李子涵, 程扬帆, 王浩, 等. 负压环境对乳化炸药爆炸温度场和有害效应的影响[J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(8): 82301-82313. DOI:10.11883/bzycj-2023-0106.
LI Z H, CHENG Y F, WANG H, et al. Influences of negative pressure conditions on the explosion temperature field and

- harmful effects of emulsion explosive[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(8): 82301-82313. DOI:10.11883/bzycj-2023-0106.
- [10] YANG H, JIANG C, DING Y, et al. Research on the influence of high-altitude tunnel environment on gas explosion characteristics and explosion limits[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2025, 159: 106435. DOI:10.1016/j.tust.2025.106435.
- [11] WANG L Q, KONG D R. Research on the distribution characteristics of explosive shock waves at different altitudes[J]. *Defence Technology*, 2023, 24: 340-348. DOI:10.1016/j.dt.2022.03.002.
- [12] 庞春桥, 陶钢, 周佩杰, 等. 高原环境下爆炸冲击波参数的有效预测方法[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(14): 221-226. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2018.14.031.
- PANG C Q, TAO G, ZHOU P J, et al. Effective method for predicting the parameters of shock waves in plateau environment[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(14): 221-226. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2018.14.0a31.
- [13] 李福龙, 孔德仁, 王良全, 等. 海拔高度对化爆冲击波压力分布规律影响分析[J]. *兵器装备工程学报*, 2024, 45(2): 158-165. DOI:10.11809/bqzbgcxb2024.02.020.
- LI F L, KONG D, WANG L Q, et al. Analysis of the effect of altitude on the pressure distribution pattern of chemical explosion shock wave[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2024, 45(2): 158-165. DOI:10.11809/bqzbgcxb2024.02.020
- [14] 陈龙明, 李志斌, 陈荣, 等. 高原环境爆炸冲击波传播特性的实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(5): 114-124.
- CHEN L M, LI Z B, CHEN R, et al. An experimental study on propagation characteristics of blast waves under plateau environment[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(05): 114-124. DOI:10.11883/bzycj-2021-0279
- [15] 陈龙明. 高原爆炸冲击波传播特性研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2023.
- CHEN L M. Propagation characteristics of blast shock waves in plateau environment[D]. Chang sha: National University of Defense Technology, 2023.
- [16] 李孝臣, 汪泉, 谢守冬, 等. 负压条件下球形爆炸容器内乳化炸药冲击波参数研究[J]. *火炸药学报*, 2023, 46(3): 252-259. DOI:10.14077/j.issn.1007-7812.202207001.
- LI X C, WANG Q, XIE S D, et al. Study of shock wave parameters of emulsified explosives in spherical explosive containers under negative-pressure conditions[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2023, 46(3): 252-259. DOI:10.14077/j.issn.1007-7812.202207001.
- [17] WANG F Q, WANG Q, WANG Y J, et al. Propagation rules of shock waves in confined space under different initial pressure environments[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 14352. DOI:10.1038/s41598-022-18567-0.
- [18] VELDMAN R L, NANSTEEL M W, CHEN C C T, et al. The effect of ambient pressure on blast reflected impulse and overpressure[J]. *Experimental Techniques*, 2017, 41(3): 227-236. DOI:10.1007/s40799-017-0171-8.
- [19] LIU C, LI H, WANG Z, et al. Experimental and numerical simulation of the attenuation effect of blast shock waves in tunnels at different altitudes[J]. *Defence Technology*, 2025, 43: 120-141. DOI:10.1016/j.dt.2024.07.005.
- [20] 李志敏, 汪旭光, 汪泉, 等. 负压环境对炸药爆炸冲击波影响的实验研究[J]. *火炸药学报*, 2021, 44(1): 35-40. DOI:10.14077/j.issn.1007-7812.202007025.
- LI Z M, WANG X G, WANG Q, et al. Experimental Study on the Effect of Negative Pressure Environment on Explosion Shock Wave[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2021, 44(1): 35-40. DOI:10.14077/j.issn.1007-7812.202007025.
- [21] 李瑞, 李孝臣, 汪泉, 等. 低温和低压环境下炸药爆炸冲击波的传播特性[J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(2): 18-28.
- LI R, LI X C, WANG Q, et al. Propagation characteristics of blast wave in diminished ambient temperature and pressure environments[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(2): 18-28. DOI:10.11883/bzycj-2022-0188
- [22] LI R, SUN R, HU M hang, et al. Blast characteristics of center-initiated cylindrical charge in high-altitude environments[J]. *AIP Advances*, 2025, 15(3): 035352. DOI:10.1063/5.0267319.

- [23] 李瑞, 杨耀勇, 汪泉, 等. 高海拔环境下运动装药的爆炸冲击波特性[J]. 火炸药学报, 2024, 47(2): 159-171. DOI:10.14077/j.issn.1007-7812.202305014.
LI R, YANG Y Y, WANG Q, et al. Blast Wave Characteristics of Moving Charge at High-altitude Environment[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2024, 47(2): 159-171. DOI:10.14077/j.issn.1007-7812.202305014.
- [24] CHEN L, LI Z, CHEN R, et al. Propagation characteristics of blast shock waves in low-pressure environment[J]. Shock Waves, 2023, 33(1): 61-74. DOI:10.1007/s00193-022-01116-z.
- [25] 邓国强. 常规爆炸空气冲击波参数海拔高度影响分析[J]. 防护工程, 2019, 41(3): 26-32.
DENG G Q. Analysis on the altitude effects of air shock wave parameters of conventional explosion[J]. Protective Engineering, 2019, 41(3): 26-32.
- [26] 朱冠南. 高空环境下膛口流场研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
ZHU G N. Study on Muzzle Flow Field in Simulated Low Pressure Environment[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2014.
- [27] 朱冠南, 王争论, 马佳佳, 等. 低压环境下膛口冲击波实验研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(6): 808-813. DOI:10.3969/j.issn.1000-1093.2014.06.009.
ZHU G N, WANG Z L, MA J J, et al. Research on Muzzle Shock Wave in Low Pressure Environment[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(6): 808-813. DOI:10.3969/j.issn.1000-1093.2014.06.009.
- [28] 康越, 马天, 王俊龙, 等. 不同海拔高度炮口冲击波动态演化特性数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(12): 57-73.
KANG Y, MA T, WANG J L, et al. Numerical simulation study on the dynamic evolution characteristics of muzzle shock waves at different altitudes[J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(12): 57-73.
- [29] 王峰, 杨志焕, 朱佩芳, 等. 高原冲击伤伤情特点的实验研究[J]. 创伤外科杂志, 2008(6): 549-551.
WANG F, YANG Z H, ZHU P F, et al. Experimental study on characteristics of blast injury at high altitude[J]. Journal of Traumatic Surgery, 2008(6): 549-551.
- [30] 王峰. 特殊环境冲击伤的伤情特点和治疗研究[D]. 重庆: 第三军医大学, 2010.
WANG F. The characteristics and interventions study of the blast injury at high altitude and under water[D]. Chongqing: Third Military Medical University, 2010.
- [31] 颜凌波, 解文娜, 许伟, 等. 正面碰撞中基于中国人体尺寸的假人损伤响应研究[J]. 汽车工程, 2019, 41(3): 289-297. DOI: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2019.03.008.
YAN L B, XIE W N, XU W, et al. Injury responses of the dummy based on Chinese anthropometric data in frontal crash [J]. Automotive Engineering, 2019, 41(3): 289-297. DOI: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2019.03.008.
- [32] 汤骏. 基于中国人体尺寸假人头部仿真研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
TANG J. Simulation study on Chinese dummy head model [D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [33] 石波. 爆炸冲击工况下基于中国人体特征的乘员损伤研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2022.
SHI B. Study on occupant injury based on Chinese body signs under blast impact condition [D]. Changsha: Hunan University, 2022.
- [34] WANG J, KANG Y, GUAN J, et al. Investigation of the uniformity of explosive shock wave fronts in variable cross-section shock tubes[C]//2024 4th International Conference on Electronic Information Engineering and Computer (EIECT). Shenzhen, China: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2024: 880-883[2025-02-14]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10867126/keywords#keywords>. DOI:10.1109/EIECT64462.2024.10867126.
- [35] 张仕忠, 李进平, 康越, 等. 激波管模拟产生近场爆炸冲击波[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(12): 121434-12. DOI:10.11883/bzycj-2024-0204.
ZHANG S Z, LI J P, KANG Y, et al. Generation of near-field blast wave by means of shock tube [J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(12): 121434. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0204.

- [36] NORTH ATLANTIC TREATY ORGANIZATION. Procedures for evaluating the protection level of armoured vehicles volume 2 for mine threat: AEP-55 VOL 2[S]. North Atlantic Treaty Organization, 2011.
- [37] 邓志龙. 高原冲击伤伤情特点和治疗研究[D]. 重庆: 第三军医大学, 2006.
DENG Z L. The characteristics and interventions study of the blast injury at high altitude[D]. Chong qing: Third Military Medical University, 2006.
- [38] GANPULE S, SALZAR R, PERRY B, et al. Role of helmets in blast mitigation: insights from experiments on PMHS surrogate[J]. International Journal of Experimental and Computational Biomechanics, 2016, 4(1): 13-31.
- [39] 张文超, 王舒, 梁增友, 等. 爆炸冲击波致颅脑冲击伤数值模拟研究[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(9): 881-890. DOI:10.15918/j.tbit1001-0645.2021.191.
ZHANG W C, WAGN S, LIANG Z Y, et al. Numerical simulation on traumatic brain injury induced by blast waves[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(9): 881-890. DOI:10.15918/j.tbit1001-0645.2021.191.
- [40] SKOTAK M, ALAY E, ZHENG J Q, et al. Effective testing of personal protective equipment in blast loading conditions in shock tube: Comparison of three different testing locations[J]. PLOS ONE, 2018, 13(6): e0198968. DOI:10.1371/journal.pone.0198968.
- [41] 高玉刚, 赵晓莉, 徐龙, 等. 高海拔压力环境对炸药猛度影响的实验研究[J]. 火工品, 2013(5): 36-39.
GAO Y G, ZHAO X L, XU L, et al. Experimental Research on Brisance of Explosive in Simulated High Altitude Environment[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2013(5): 36-39.
- [42] 王正国, 蒋建新. 爆炸冲击伤原理与实践[M]. 人民卫生出版社, [2026].
- [43] 张雷廷, 余静, 王海燕, 等. 基于相同伤情的小鼠平原和高原严重冲击伤致伤参数研究[J]. 中华危重病急救医学, 2022, 34(10): 1076-1081. DOI:10.3760/cma.j.cn121430-20220907-00826.
ZHANG L T, XU J, WANG H Y, et al. Study on injury parameters of severe blast injury in mice at plain and plateau based on equivalent trauma[J]. Chinese Critical Care Medicine, 2022, 34(10): 1076-1081. DOI:10.3760/cma.j.cn121430-20220907-00826.