

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0229

垂向冲击下穿戴装备对乘员损伤影响研究*

尹宁, 王洪亮, 张进成, 彭兵, 叶龙学

(南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 军事人员在战斗中需要穿戴装备, 穿戴装备后对车内乘员承受车辆底部爆炸垂向冲击时的损伤有影响。通过垂向冲击试验与仿真模拟的方法, 研究了穿戴装备在身上的分布对于乘员损伤的影响。根据 AEP55 乘员伤害准则, 以盆骨 z 向加速度和腰椎轴向力为乘员损伤的参考目标, 首先通过垂向冲击试验的进行, 研究了不同穿戴装备质量对于乘员损伤的影响; 接着通过有限元模型对试验进行验证和优化, 进而研究穿戴装备位置与松紧度对于垂向冲击下乘员损伤的影响。结果表明随着穿戴装备质量的增加, 乘员腰椎损伤加重, 脊柱损伤概率减小; 装备分布在躯干位置越靠近上部, 与身体接触松紧度越紧, 乘员腰椎与脊柱的负荷越小, 越不易受伤。

关键词: 底部爆炸冲击; 垂向冲击试验方法; 穿戴装备; 乘员响应

中图分类号: O383; U463.83

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Research on the effect of wearing equipment on occupant injury under vertical impact

YIN Ning, WANG Hongliang, ZHANG Jincheng, PENG Bing, YE Longxue

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: Military personnels need to wear equipment in combat, which will affect the damage to the occupants of the vehicle when they are subjected to the vertical impact of the explosion at the bottom of the vehicle. Through the method of vertical impact test and simulation, the influence of the distribution of the wearable equipment on the occupant injury is studied in the three directions of the weight of the wearable equipment, the position of the wearable equipment, and the tightness of the contact between the wearable equipment and the body. According to the AEP55 occupant injury criterion, the pelvic z -direction acceleration and the axial force of the lumbar spine are the reference targets for occupant injury. First, through the vertical impact test, the impact of different wearing equipment weight on occupant injury is studied; then the finite element model is used. The test is verified and optimized, and the influence of the position and tightness of the worn equipment on the occupant damage under vertical impact is studied. The results show that as the weight of wearing equipment increases, the lumbar spine injury of the occupant increases, and the probability of spinal injury decreases; the closer the equipment is to the upper part of the torso, the tighter the contact with the body, the smaller the load on the lumbar spine and the spine of the occupant, the less likely to be injured. On the contrary, the closer the equipment is to the upper part of the trunk, the tighter the contact with the body, the greater the load on the lumbar and spine of the occupant, the more likely to be injured. However, compared with the other two, the effect of tightness coefficient on the results is even less obvious. The results obtained above will provide reference for the subsequent research on reducing the impact of wearing equipment on occupant injury during the vertical impact of the bottom explosion of the vehicle.

Keywords: bottom explosion impact; vertical impact test method; wearing equipment; occupant response

* 收稿日期: 2020-07-08; 修回日期: 2020-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(51405232, 11802140); 中央高校基本科研业务费专项资金(30918011303); 道路交通安全公安部重点实验室开放基金(2018ZDSYSKFKT09)

第一作者: 尹宁(1996—), 男, 硕士研究生, 1142984459@qq.com

通信作者: 王洪亮(1984—), 男, 博士, 副教授, whl343@163.com

在当前各国的武装冲突和反恐战争中,地雷和简易爆炸装置(improvised explosive device, IED)是军用车辆面临的巨大威胁^[1]。车辆结构在爆炸冲击下遭受到极大的垂向负荷,进而导致乘员伤亡^[2]。近些年来,很多研究者对于改善装甲车辆在遭受地雷和简易爆炸装置的威胁时所提供的保护已经做出重大努力。目前已有众多方案解决车辆装甲穿透带来的伤害,但是车辆底部爆炸引起的车辆垂直瞬时加速度造成的冲击还没有很好的解决方法。爆炸事件中乘员的胸、腰、盆骨和下胫骨等部位均会受到严重损伤。

车辆投入使用前需要经过整车抗爆炸试验,但是由于整车爆炸试验成本高、偶然性大且可重复性差,一般通过有限元方法虚拟分析整车防护性能,配合垂向冲击座椅跌落试验验证车内乘员保护系统性能,以缩短前期研发周期和降低研发成本。座椅跌落试验虽然无法完全模拟车辆底部爆炸事件,但在试验过程中,速度的总绝对变化与真实爆炸情况下的速度变化十分相似^[3]。吕平华^[4]根据设计和研制的工作实践,对100 kg冲击试验机进行了设计和计算,根据跌落原理分析并构建了试验机的力学模型,研究了跌落高度和脉冲持续时间与加速度峰值的经验公式。于治会对跌落试验台的结构特点进行研究,认为不同产品的冲击装置技术要求存在差异,同时提出了小型跌落试验台结构上应具有的特点,从工作原理和脉冲发生器波形特点两方面进行了研究^[5]。这些研究都帮助我们发现可以通过座椅跌落试验来模拟实际车辆底部爆炸事件。

军事人员在战斗中需要穿戴一定质量的装备,以便为突然出现的紧急情况做出应对。人员的装备一般都放置在背心,并将其穿在衣服外面,该背心主要分布在人体躯干部位。然而在底部爆炸事件发生时,该部分载荷的分布以及它如何影响战士的损伤情况,目前在很大程度上还是未知的。不过,对于该方面的研究已经存在。Zhang等^[6]使用LS-DYNA来模拟盆骨在低加速析进行了仿真,并没有试验验证。Cheng等^[7]仅使用理论模型探究了装备质量对动态响应指数(dynamic response index, DRI)的影响,而对腰椎等其他部位的影响并未涉及。

本文通过垂向冲击试验和有限元仿真分析,研究乘员分布在躯干部位的装备质量、具体位置、松紧程度分别是如何对于乘员的损伤产生影响的。

1 垂向冲击试验

此次垂向冲击试验为刚性座椅跌落试验,在刚性座椅上放置拟人测试装备(下文简称假人)为Hybrid III 50百分位假人。利用背心和条形配重块来模拟乘员执行任务时所穿戴装备,进行同一高度不同装备质量下的座椅跌落试验,通过采集并对比不同工况下假人损伤响应数据,研究乘员穿戴的装备质量对于乘员躯干损伤的影响。

1.1 座椅跌落试验台介绍

座椅跌落试验台系统如图1所示,包括跌落平台举升机构、跌落平台、电动释放锁、悬挂带、吊带、刚性座椅、假人以及底部的橡胶垫。试验时利用举升机构将跌落平台(包含平台上的刚性座椅和假人)举升到某一高度后释放,冲击时,橡胶垫提供一个接触缓冲,以控制施加在工作台上的力,从而使平台减速。跌落平台与带有橡胶垫的底部支座碰撞产生加速度信号,来实现加载加速度冲击载荷。

座椅跌落试验布置如图2所示,采用刚性座椅,以尽量减少试验中的可变性。然而,在撞击过程中假人骨盆和刚性座椅底座之间会产生高脉冲,为避免假人损伤严重,采用100 mm泡沫坐垫提供保护。跌落高度和波形发生器的选择共同影响加速度脉冲的形状和特性。图3为平台中央测得的加速度脉冲。加速度脉冲由跌落高度决定,以模拟真实地面爆炸过程中车体所经历的加速度脉冲。每次平台以同一高度下落,且脉冲发生器不变,另外每次试验假人坐姿相同,并通过四点式安全带将其与刚性座椅固定,保证刚性座椅边界条件的统一。

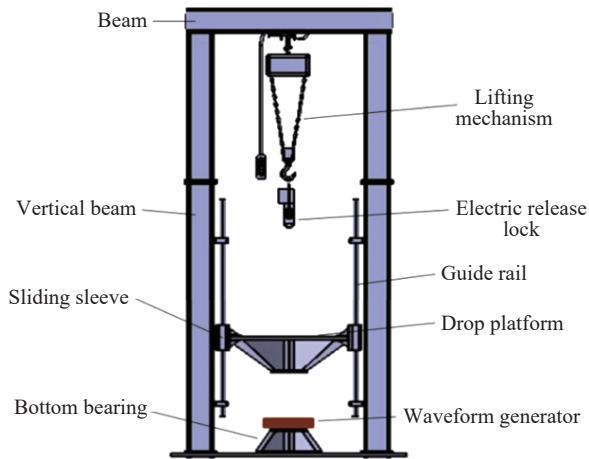


图 1 跌落冲击试验台总体结构

Fig. 1 Overall structure of drop impact test stand

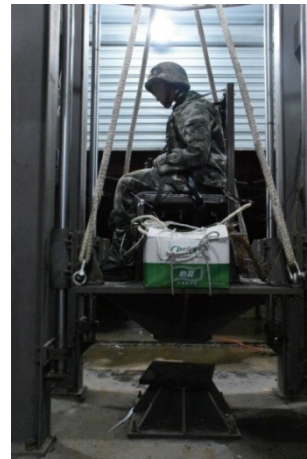


图 2 座椅跌落试验布置

Fig. 2 Seat drop test arrangement

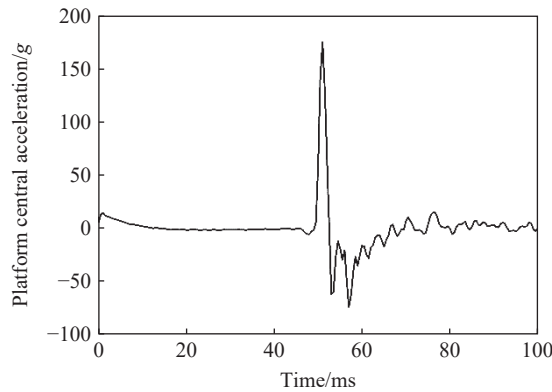


图 3 跌落试验过程中平台中央加速度

Fig. 3 Central acceleration of the platform during the drop test

1.2 假人损伤指标说明

试验中考虑假人穿戴装备质量主要集中在躯干部分,且结合北约 AEP55 卷 2^[8]底部爆炸工况下假人损伤评判标准,选择假人腰椎力和 DRI 作为研究指标。

DRI 是应用最广泛的与盆骨 z 向加速度和脊柱压缩相关的损伤标准。DRI 用于量化基于腰椎压缩的脊柱损伤概率^[9],盆骨 z 向加速度是求解 DRI 的必要输入,而腰椎力与 DRI 不存在正相关关系。DRI 的计算包括求解以骨盆 z 向加速度为激励的二阶微分方程的强迫响应。DRI 模型是一个代表乘员躯干的质量-弹簧-阻尼器系统,结构如图 4 所示。

该单质量弹簧-阻尼器系统的运动方程可表示为:

$$\ddot{y}(t) + 2\xi\omega_n\dot{y}(t) + \omega_n^2y(t) = \ddot{z}(t) \quad (1)$$

式中: m 为质量; k 为弹簧刚度; c 为阻尼系数; $y=y_1-y_2$ 为系统的相对位移,当 $y>0$,表示脊柱受到压缩; $\xi=c/(2m\omega_n)$ 是阻尼系数比,值为 0.224; $\omega_n=\sqrt{k/m}$ 是系统的固有频率,其值为 52.9 rad/s; $\ddot{z}(t)$ 是盆骨在 z 方向上的加速度。以上均在 AEP55^[8] 中进行了说明。

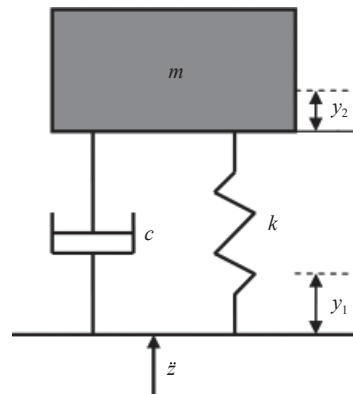


图 4 应用 DRI 损伤标准的脊柱压缩模型

Fig. 4 Spinal compression model using DRI injury standard

用 η 表示 DRI, 其计算公式为:

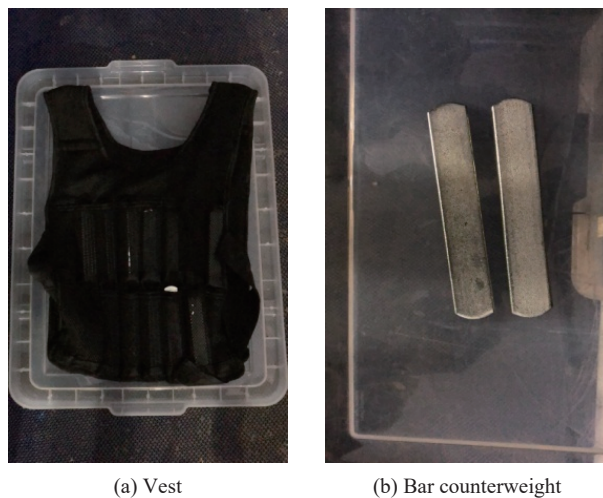
$$\eta = \omega_n^2 y_{\max} / g \quad (2)$$

式中: y_{\max} 为最大的相对位移, ω_n 为固有频率, g 为重力加速度。在 AEP55 中规定 DRI 的安全阈值为 17.7。低于该值时乘员发生 AIS2+ 级别伤害的概率小于 10%。目前 Hybrid III 50th 假人腰椎并不具备较好的生物逼真度^[10], 碰撞和冲击环境的标准和法规也没有关于腰椎的损伤准则, 国外生物力学工作者在重力跌落测试平台中得到的腰椎力耐受极限值为 5.2~7.8 kN。

1.3 试验设置

本次试验穿戴装备通过织布材料背心和条形配重块模拟, 如图 5 所示。通过增减条形配重块数量来调节模拟重量, 其中条形配重块每一块质量为 0.5 kg, 背心质量约为 1 kg。

如表 1 所示, 本次试验进行了 500 mm 高度的座椅跌落试验, 配重情况分别为无配重、11 kg 配重、16 kg 配重和 21 kg 配重。为避免试验偶然性导致的误差, 每种工况试验进行三次。



(a) Vest

(b) Bar counterweight

图 5 座椅跌落试验中模拟穿戴装备

Fig. 5 Simulated wearable equipment in a seat drop test

表 1 不同配重下的座椅跌落试验

Table 1 Seat drop test under different weights

试验	配重质量/kg	高度/mm
1	0	501
2	0	501
3	0	499
4	11	499
5	11	498
6	11	502
7	16	501
8	16	502
9	16	499
10	21	499
11	21	501
12	21	498

每次试验记录假人数据, 拍照记录试验前后状态并通过高速摄像记录试验过程。试验结束后收集所有试验数据, 其中假人的相关损伤数据在 AEP55 中被规定为乘员安全性的重要评价指标, 严格参照相关标准对试验数据进行处理。

1.4 试验结果分析

为了更清晰地从试验数据中得到规律性, 选择无配重、11 kg 配重和 21 kg 配重三组试验数据进行讨论。

图 6(a) 比较了不同配重下假人腰椎力的曲线, 可以看到, 随着穿戴装备质量的增加, 腰椎力有变大趋势, 峰值依次为 5 525、5 640、5 779 N。说明穿戴装备质量的增加会加重乘员腰椎的轴向负荷, 从而使乘员腰椎损伤的概率更大。

经过处理后的 DRI, 如图 6(b) 所示, 随着穿戴装备质量的增加, 假人 DRI 逐渐变小, 依次为 18.9、16.6、15.5; 结合 DRI 的定义, 说明穿戴装备质量的增加减小了乘员脊柱压缩损伤的概率, 尤其是 18.9 超过安全阈值, 通过改变穿戴装备质量使得 DRI 处于安全范围内。DRI 与盆骨 z 向加速度曲线历程相关, 图 6(c) 显示了不同穿戴装备质量下的假人盆骨 z 向加速度, 当增加穿戴装备的质量时, 盆骨加速度脉宽无明显变化, 峰值略有减小, 整体曲线面积减小。

据图 7 和表 2 所示, 根据四组数据拟合得到曲线, 可以看出随着质量的增加, 腰椎力峰值呈现增大趋势, 且变化速度逐渐变大, 而 DRI 峰值呈现减小趋势, 变化速度逐渐变小; 其中相比没有穿戴装备的情况, 21 kg 质量的增加最大导致腰椎力变大 4.4%, DRI 减小 17.9%

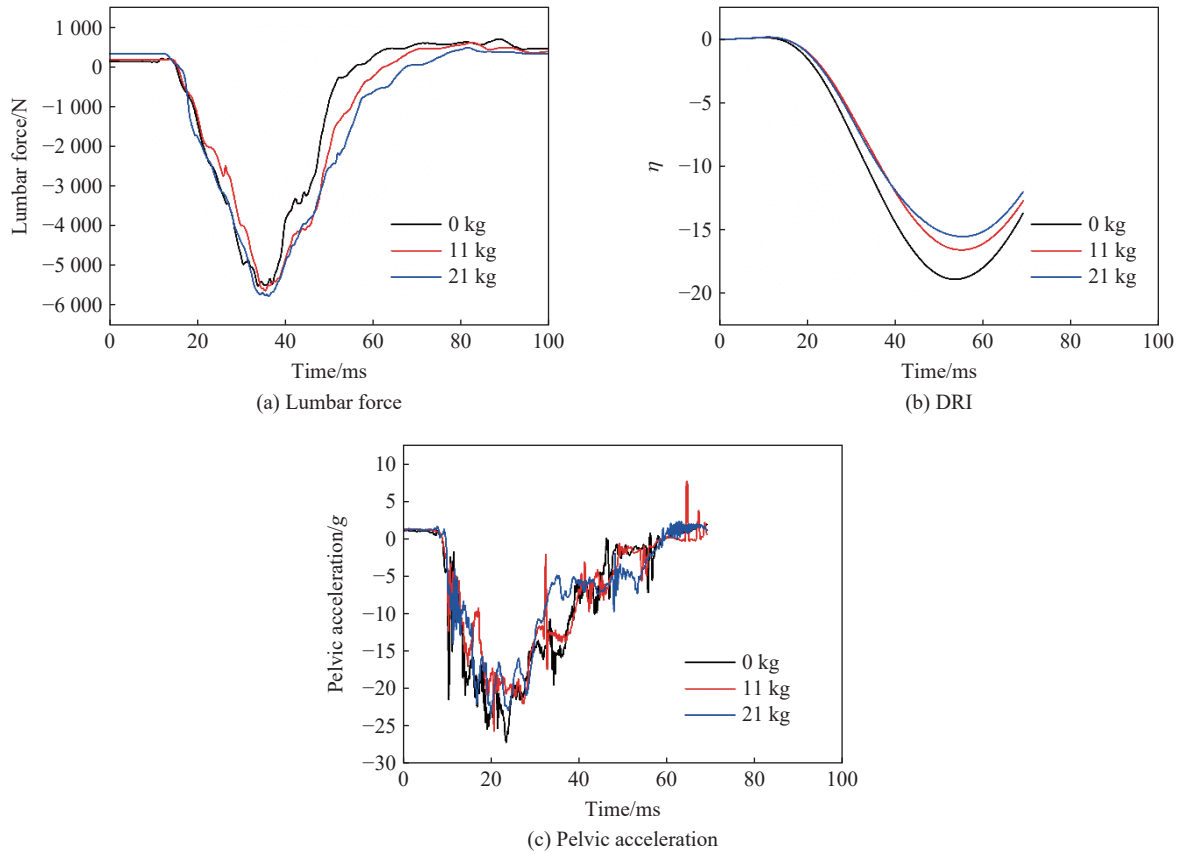


图 6 座椅跌落试验中不同配重下假人损伤值曲线

Fig. 6 Dummy damage value curve under different weights in the seat drop test

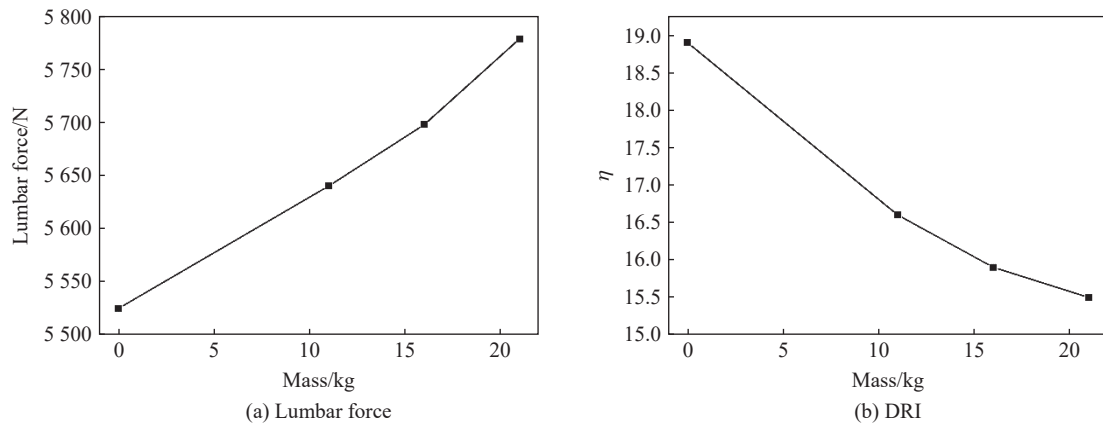


图 7 座椅跌落试验中不同重量下假人损伤峰值拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of the peak value of dummy damage under different weights in the seat drop test

表 2 座椅跌落试验中不同配重下假人损伤对比

Table 2 Comparison of dummy damage under different weights in the seat drop test

配重/kg	腰椎力峰值/N	盆骨加速度峰值/g	DRI
0	5525	27.3	18.9
11	5640	25.8	16.6
16	5698	24.6	15.9
21	5779	23.3	15.5
最大相对差值	4.40%	14.60%	17.90%

2 有限元仿真与试验验证

虽然相比较整车爆炸,垂向冲击试验已经方便了很多,但是仍然耗费较多时间和精力,因此在探究过程中不可能总是通过试验进行,而有限元仿真技术可以高度还原真实情况且效率高、重复性好,因此有限元仿真成为重要手段。

2.1 有限元模型的建立

为了避免重复性建模,对跌落试验台关键部分、刚性座椅及假人进行模块化建模,在未来的设计和改进过程中只需要对子模块进行相应的改动即可。每个模块根据相应的 CAD 模型进行建模,模型中包括各个零件的单元、节点信息,不同模块之间的单元、节点编号不能出现重复,否则会造成节点信息混乱,计算报错。

准确的材料参数是有限元仿真的关键因素,直接影响仿真计算结果的准确性。跌落试验台中,底部支座和跌落平台在试验中不允许出现变形,两个部件体积大,且刚度和强度较大,因此材料模型选用 LS-DYNA 中的 20 号刚体材料 *MAT_RIGID。脉冲发生器为橡胶材料,脚垫,座椅部件也均按照实际试验情况赋予相应的材料属性,包括密度、弹性模量、泊松比、屈服强度、应力-应变曲线等。

仿真中考虑焊点失效,采用 beam 模拟;另外在 primer 中进行假人与座椅系统的预压,安全带建模,安全带与座椅骨架连接处采用 1D 单元模拟,安全带主体使用 2D 壳单元建模,采用织布材料 *MAT_FABRIC_TITLE 模拟。对于座椅骨架结构采用 2D 壳单元建模,选用 3 号材料 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC,座椅坐垫用 LS-DYNA 中的 57 号材料 *MAT_LOW_DENSITY_FOAM,该材料为可以恢复到原始形状的低密度泡沫,座椅坐垫和跌落平台等采用六面体实体单元建模。仿真中使用的假人为 LSTC 公司的 Hybrid III 型 50 百分位的男性假人模型,该假人已被 Lou 等^[1]验证在垂向冲击环境中与试验数据具有良好吻合度。整个模型单元总数为 250 738,节点总数为 253 051,网格单元的尺寸为 10 mm,翘曲度、雅格比参数等均符合质量检验标准。

在仿真过程中,为了节省时间简化了实际的跌落台试验装置的辅助机构,最终只保留跌落试验台中跌落平台、底部支座和橡胶垫部分;将跌落实际过程简化为瞬间过程,根据 500 mm 跌落的高度等效计算得到跌落台与底部支座碰撞一瞬间的速度为 3.13 m/s,计算公式为

$$v^2 = 2gh \quad (3)$$

式中: v 为平台接触到支座的速度, h 为跌落高度。

考虑到座椅跌落的边界条件,使用关键字 “INITIAL_VELOCITY_GENERATION” 对跌落台、座椅和乘员系统施加跌落后的触地速度使得跌落过程瞬间发生。具体构建的模型如图 8 所示。

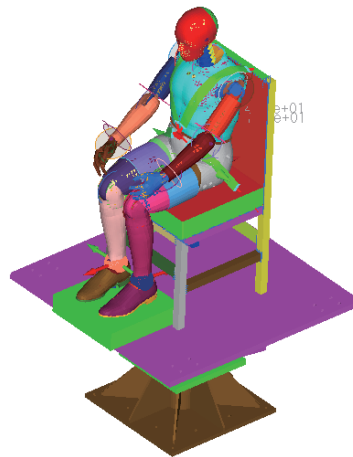


图 8 跌落台-座椅-乘员系统有限元模型

Fig. 8 FEM model of drop table-seat-occupant system

2.2 试验与仿真结果对比

通过将实验与仿真中采集到的数据进行对比,来验证仿真建模的准确性,以便进行接下来的研究。目前用于评价乘员腰椎损伤准则有两项指标,分别是动态响应指数 DRI 和腰椎轴向力,这两种指标主要用于预测乘员在垂直冲击环境中的损伤。

图 9 为腰椎力和盆骨加速度历程曲线,从图中可以看出两种情况下乘员响应几乎一致。从表 3 看到仿真得到的腰椎力峰值约为 5 299 N,试验得到的腰椎力峰值约为 5 525 N,相对误差为 4.1%;仿真得到的盆骨加速度峰值约为 28.7g,试验得到的盆骨加速度峰值约为 27.3g,相对误差为 4.9%。

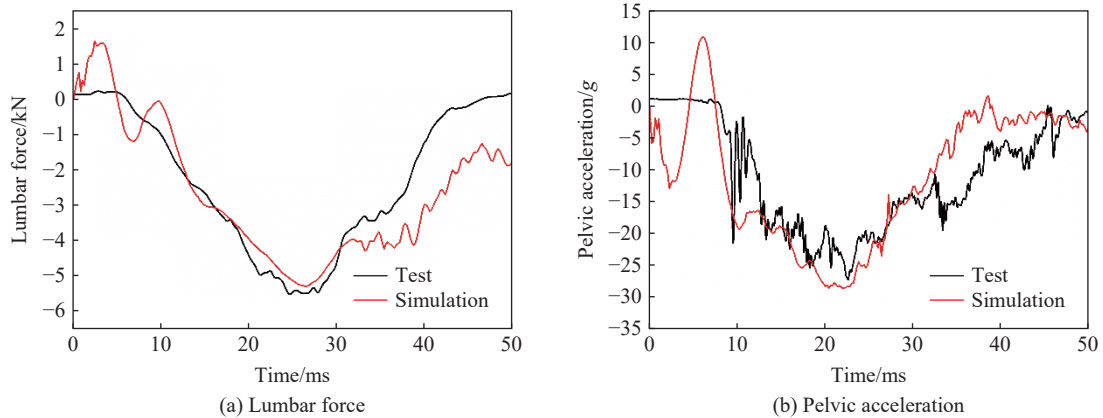


图 9 座椅跌落试验与仿真中的假人损伤值对比曲线

Fig. 9 Comparison curve of dummy damage value in seat drop test and simulation

表 3 座椅跌落试验与仿真中的假人损伤对比

Table 3 Comparison of dummy injury in seat drop test and simulation

方法	腰椎力峰值/N	盆骨加速度峰值/g
试验	5 525	27.3
仿真	5 299	28.7
相对误差	4.1%	4.9%

给简化后的跌落试验台及座椅和假人等加载一个初速度 3.13 m/s 进行仿真来模拟 500 mm 高度垂向冲击试验,很好的模拟了试验中的乘员损伤,验证了仿真得到的结论。

3 装备分布位置及松紧度对乘员损伤影响研究

通过试验已经得到在垂向冲击工况下不同质量的穿戴装备对于乘员损伤的影响。下面通过仿真探究装备在躯干的分布位置以及装备在乘员身上的松紧程度对于乘员损伤的影响。此时乘员穿戴背心通过 2D 壳单元表示,赋予实际的材料属性参数;其他装备质量通过给节点加载的方式配重,并通过调节背心与身体的接触参数来还原实际情况。在假人胸前与背后选取相应位置节点赋予总质量 10 kg 进行研究,具体模型如图 10 所示。其中绿色为背心,红色为配重点;共选中 1023 个节点,每个节点质量为 0.0097 kg。

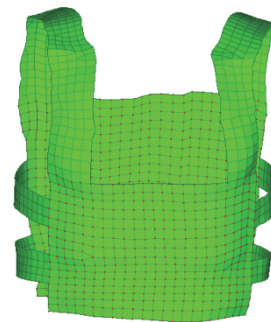


图 10 仿真中躯干部配重背心有限元模型

Fig. 10 The finite element model of the torso weight vest in the simulation

3.1 配重位置研究

Richards 等^[12] 在研究中对于国外士兵穿戴装备分布进行了详细的描述,包括头盔、急救包、弹药匣、枪、气瓶等多种装备,其分布位置也不统一,有的在躯干上部,有的在躯干下部。考虑到在作战时,军事人员穿戴装备位置可能会有所差异,并结合爆炸事件中乘员上半身损伤部位多为腰部和脊柱,因此希望通过研究探索在垂向冲击工况下穿戴装备重量集中在躯干上部和下部对于乘员损伤是否存在影响以及如何影响。

如图 11(a) 所示仿真中将背心的配重点集中在躯干的上部,以此来模拟穿戴装备重量集中在上部的情况,共选中 506 个节点进行加载重量,每个节点赋予 0.0198 kg 重量;如图 11(b) 所示选中下部的 506 个

节点进行配重加载,以此来模拟穿戴装备重量集中在下部的情况。其中假人中心位置的 z 向坐标为 684,上部配重点相对应质心位置 z 向坐标为 981,下部配重点相对应质心位置 z 向坐标为 855。

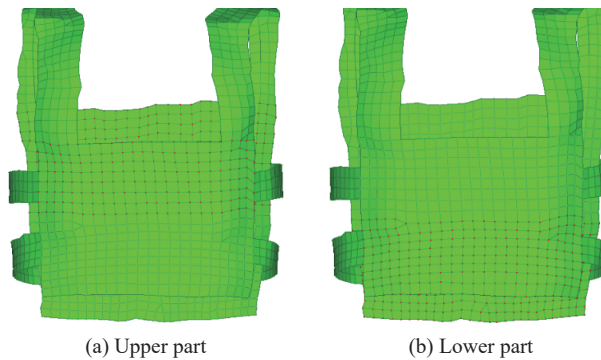


图 11 躯干不同位置配重背心有限元模型

Fig. 11 The finite element model of the weight vest at different positions on the torso

根据历程曲线图 12 和表 4 可以看出,穿戴装备重量集中在躯干上部位置时,腰椎力峰值为 5 938 N,盆骨加速度峰值为 29.7g;穿戴装备重量集中在躯干下部位置时,腰椎力峰值为 5 708 N,盆骨加速度峰值为 28.4g。分布位置位于躯干上部相对于下部腰椎力峰值和盆骨加速度峰值均略有增加,相对差值为 3.9% 和 4.3%。该分析表明,当穿戴装备质量集中在躯干上部时,乘员会产生较高腰椎负荷与盆骨加速度峰值,此时乘员危险概率增大。

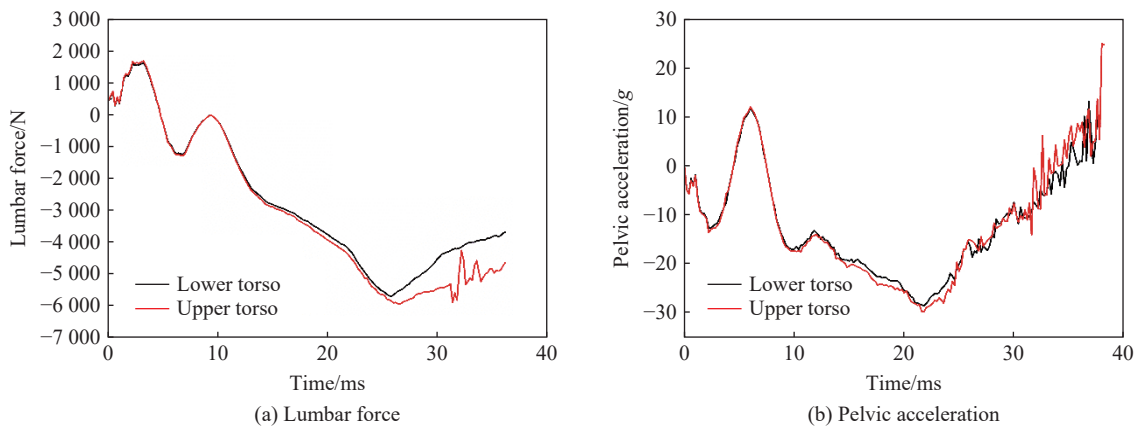


图 12 仿真中穿戴装备不同分布位置假人损伤值曲线

Fig. 12 Dummy damage value curves of different distribution positions of wearable equipment in the simulation

表 4 仿真中穿戴装备不同分布位置假人损伤对比

Table 4 Comparison of dummy damage in different distribution positions of wearable equipment in simulation

位置	腰椎力峰值/N	盆骨加速度峰值/g
躯干上半部	5938	29.7
躯干下半部	5708	28.4
相对差值	3.90%	4.30%

3.2 装备松紧度

由于每一个军事人员身形不完全一样,所以在穿戴装备时难免松紧程度有所差异,而松紧度是通过摩擦因数来表征的,背心与身体之间的摩擦因数对测量的损伤标准会有影响^[13]。因此通过改变仿真中

背心与假人躯干接触的摩擦因数,来研究穿戴装备的松紧程度对于乘员损伤的影响。

之前通过仿真与试验验证的过程得到摩擦因数为 0.4,现在通过增加计算 0.2、0.6 和 0.8 三种摩擦因数的情况进行探索,参考损伤指标不变。

对于不同摩擦因数下的腰椎力和盆骨加速度历程曲线如图 13 所示,其中在摩擦因数为 0.2 情况下,腰椎力峰值为 5 831 N,骨加速度峰值为 29.2g;在摩擦因数 0.8 情况下,腰椎力峰值为 5 484 N,盆骨加速度峰值为 28.7g。另外据表 5 可以看出,随着摩擦因数的增大,腰椎力峰值呈现减小趋势,变化速度逐渐变大,盆骨加速度峰值呈减小趋势,但腰椎力最大相对差值为 5.9%,而盆骨加速度只有 1.7%。因此摩擦因数的变化对于结果影响较小。

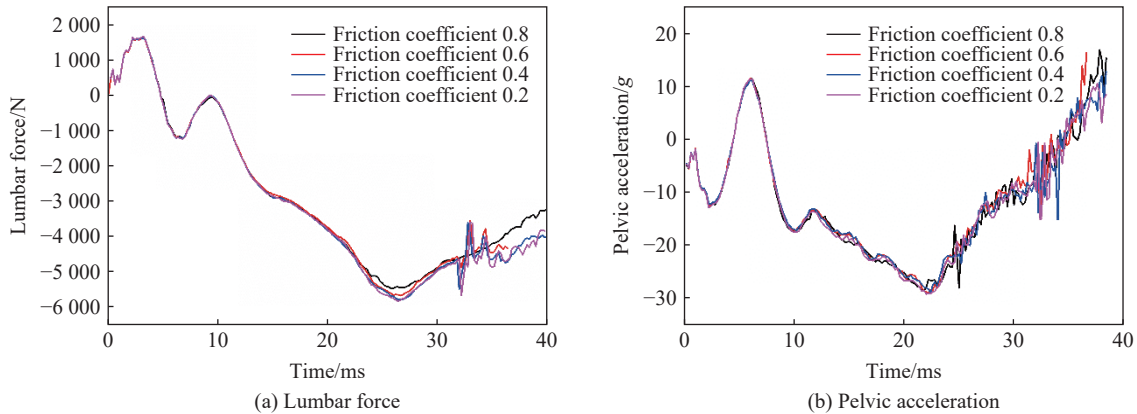


图 13 仿真中穿戴装备与身体接触不同摩擦系数假人损伤值曲线

Fig. 13 Dummy damage value curve of different friction coefficients between the wearing equipment and the body in the simulation

表 5 仿真中穿戴装备与身体接触不同摩擦系数假人损伤对比

Table 5 Comparison of dummy damage with different friction coefficients between the wearing equipment and the body in the simulation

摩擦因数	腰椎力峰值/N	盆骨加速度峰值/g
0.2	5 831	29.2
0.4	5 786	29.0
0.6	5 677	28.9
0.8	5 484	28.7
最大相对差值	5.90%	1.70%

试验过程中安全带带动身体下落,穿戴装备由于惯性向上滑动,当穿戴装备摩擦因数变大时,装备不易向上滑,导致装备质量主要由躯干下半部承载,此时腰椎力峰值和盆骨加速度峰值均有降低,其中盆骨加速度峰值减小不明显。说明随着穿戴装备的紧固减缓了乘员脊柱与腰椎的损伤,同时再一次验证了由于配重位置的不同对于乘员损伤带来的影响。

4 结论

以垂向冲击下的刚性座椅为研究对象,验证了仿真模型的准确性。同时通过试验与仿真探究了穿戴装备对于乘员盆骨加速度及腰椎力损伤的影响,有如下结论。

(1)在垂向冲击试验中,随着穿戴装备质量的增加,乘员盆骨 Z 向加速度峰值有减小趋势,积分得到的 DRI 明显减小,当重量相差 21 kg 时,最大相差 17.9%,而腰椎力峰值逐渐增大,最大相差 4.4%。说明穿戴装备质量增加会减缓乘员盆骨以及脊柱的损伤概率,但会加剧腰椎的损伤概率;且 DRI 相对变化值比腰椎力大很多。

(2)在垂向冲击条件下,装备分布位置位于躯干上部相较于下部会加重乘员在跌落工况下腰椎和脊柱损伤发生的几率;其中腰椎力峰值最大相对差值为3.9%,盆骨加速度峰值最大相对差值为4.3%。

(3)在垂向冲击条件下,通过研究承载装备的背心与身体接触的摩擦因数来表征穿戴装备松紧度,发现当摩擦因数变小时乘员的最大腰椎负荷更大,而盆骨加速度峰值也有变大趋势,但影响不明显。

参考文献:

- [1] 李红勋,谭柏春,贾楠,等.美军战术轮式车辆发展策略研究[J].*军事交通学院学报*,2012,14(10):83-87. DOI: 10.3969/j.issn.1674-2192.2012.10.022.
LI H X, TAN B C, JIA N, et al. Research on US military tactic wheeled vehicle strategy [J]. *Journal of Academy of Military Transportation*, 2012, 14(10): 83-87. DOI: 10.3969/j.issn.1674-2192.2012.10.022.
- [2] BOSCH K, HARRIS K, MELOTIK J. Blast mitigation seat analysis—drop tower data review [C]// Proceedings of 2014 NDIA Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium. Novi, Michigan, 2014.
- [3] CHENG M, DIONNE J P, MAKRIS A. On drop-tower test methodology for blast mitigation seat evaluation [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(12): 1180-1187. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.08.002.
- [4] 吕平华. 100 kg 冲击试验机的设计分析与计算 [J]. *试验技术与试验机*, 1995, 35(1/2): 12-16, 22.
LV P H. Design analysis and calculation of 100 kg impact test machine [J]. *Test Technology and Test Machine*, 1995, 35(1/2): 12-16, 22.
- [5] 于治会. 一种跌落冲击台的设计原则 [J]. *上海计量测试*, 2000(3): 23-26.
YU Z H. Design principle of a drop impact table [J]. *Shanghai Measurement and Testing*, 2000(3): 23-26.
- [6] ZHANG J, MERKLE A C, CARNEAL C M, et al. Effects of torso-borne mass and loading severity on early response of the lumbar spine under high-rate vertical loading [C]// International Research Council on the Biomechanics of Injury Conference (IRCOBI). Gothenburg, Sweden, 2013: 111-123. .
- [7] CHENG M, DIONNE J, MAKRIS A. Use of the dynamic response index as a criterion for spinal injury in practical applications [C]// Personal Armour Systems Symposium (PASS). QuebecCity, QC, Canada, 2010. .
- [8] NATO. Procedures for evaluating the protection level of logistic and light armored vehicles: AEP-55, Vol 2, mine threat [R]. Brussels: Allied Engineering Publication, 2011.
- [9] PAYNE P R, STECH E L. Dynamic models of the human body: AMRL-TR-66-157 [R]. Aerospace Medical Research Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, OH, 1969.
- [10] 杨冲. Hybrid III 50th 假人腰椎力学特性测试方法研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2017: 5-8.
YANG C. The research on test methods of hybrid III 50th dummy lumbar spine's mechanical properties [D]. Changsha: Hunan University, 2017: 5-8.
- [11] LOU K A. Simulation of various LSTC dummy models to correlate drop test results [C]//Proceedings of the 13th International LS-DYNA Users Conference. Michigan, USA: Livermore Software Technology Corporation, 2013: 1-12.
- [12] RICHARDS M, SIEVEKA E. The effects of body-borne equipment weight on ATD lumbar loads measured during crashworthy seat vertical dynamic tests [R]. American Helicopter Society 67th Annual Forum, 2011.
- [13] AGGROMITO D, THOMSON R, WANG J, et al. Effect of body-borne equipment on injury of military pilots and aircrew during a simulated helicopter crash [J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2015, 50: 130-142. DOI: 10.1016/j.ergon.2015.07.001.

(责任编辑 王小飞)