

# 负泊松比高坠防护缓冲系统研究与性能分析\*

鲁超宇<sup>1</sup>, 陈金宝<sup>1,2,3</sup>, 王宸<sup>1,2,3</sup>, 朱锦耀<sup>1</sup>, 王月<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学航天学院 南京, 211106)

(2. 深空星表探测机构技术工信部重点实验室 南京, 211106)

(3. 航天进入减速与着陆技术实验室 南京, 211106)

**摘要** 针对高层建筑火灾救援问题, 提出一种基于负泊松比缓冲网的高坠缓冲防护系统。首先, 设计了六角网眼结构的大变形柔性缓冲网及其配适的多级缓冲机构, 基于有限元方法建立了缓冲网与人体接触冲击过程动力学解析模型; 其次, 建立了缓冲系统有限元模型, 进行冲击动力学仿真分析, 验证缓冲系统对坠落人员防护的有效性; 最后, 利用相似性原理设计了 1/8 缩比模型试验, 以验证系统的实用效果。结果表明: 试验采集人体所受过载数值与仿真较吻合, 验证了缓冲系统的有效性和有限元模型的准确性。缓冲系统可有效保障 30 m 高度以下坠落人员的生命安全, 缓冲过程中人体最大过载不超过 5.5g, 对保障高空作业人员安全和高空救援行动成功具有实际意义。

**关键词** 缓冲系统; 负泊松比结构; 有限元; 缩比试验

**中图分类号** TH6

## 引言

目前, 高层建筑火灾事故的逃生率极低, 应用于高空防坠的装备存在操作复杂、成本高、降落辅助物过多等问题<sup>[1]</sup>, 应用较多的高空坠落保护装置易造成人员悬吊不耐受、肌肉骨骼受伤等情况。因此, 笔者提出一种高坠缓冲系统以弥补现有防护方式的弊端。

泊松比也称为横向变形系数, 数学定义为材料在弹性加载方向上横向正应变与轴向正应变绝对值的比值, 一般大于 0。常见的拉胀性材料在外部载荷的影响下会沿着垂直于受压方向发生膨胀变形效应, 从而出现泊松比小于 0 的现象, 表现出高压痕阻力、高横向剪切模量、动态增强特性和断裂韧性优异等力学特性, 被广泛应用于缓冲吸能系统中。在负泊松比材料和结构研究方面, Glazard 等<sup>[2]</sup>利用纬编横机编织技术, 验证了织物的拉胀性能。BLAGA M 等<sup>[3]</sup>用简单的正反针编制方法, 通过正反线圈的锯齿排列, 使织物在松弛状态发生褶皱收缩, 拉伸状态下织物收缩折叠双向展开, 呈现出负泊松比效果。Wang 等<sup>[4-6]</sup>对常规六角网眼织物进行热处理定型, 使其发生有序的歪斜变形, 呈现出 V 字形排列的平行四边形结构, 发现其负泊松比性能。Ma 等<sup>[7]</sup>设计了一种基于歪斜六边形的二维经编织物结构, 可使组织失去平衡产生歪斜变形, 试验证明了其负

泊松比效应, 且受生产工艺的影响。在冲击防护缓冲机构方面, 骆丽茹等<sup>[8]</sup>提出一种引导式落石防护网系统技术, 分析落石运动路径全程的动能特征并建立主动耗能控制方程。Qi 等<sup>[9]</sup>设计了分为上下两段的防护网系统, 其主要耗能机制来源于多阻尼元件<sup>[10]</sup>, 发现消能器与绳索的摩擦和大位移变形是结构阻尼的主要影响因素<sup>[11]</sup>。郭立平等<sup>[12]</sup>设计了缓冲拦截网环结构, 分析了单元结构力学性能。

笔者提出一种基于负泊松比理论构型的大变形柔性缓冲网高坠防护缓冲系统, 对缓冲网接触冲击动力学进行了分析。有限元模型仿真和缩比试验结果吻合良好, 验证了有限元仿真结果的正确性和缓冲系统结构设计的合理性。研究发现, 以最大过载不超过 5.5g 为指标, 可有效保障 30 m 以下坠落人员的安全。

## 1 高坠防护缓冲系统

### 1.1 高坠防护缓冲装置构型

笔者提出的高坠防护缓冲系统主要吸能部分为一个柔性可大变形的负泊松比缓冲网, 网端通过缓冲弹簧与主轴连接, 可绕主轴转动, 主轴两端各由 3 根支撑杆支撑, 支撑杆底部有缓冲阻尼器, 下方连接固定底座, 防护垫防止人员意外跌落损伤, 可实现高坠人体的

\* 江苏省基础研究计划资助项目(BK20210297); 国家自然科学基金资助项目(52075242)

收稿日期: 2022-03-02; 修回日期: 2022-05-14

快速缓冲耗能,保障人员安全。通过分析缓冲系统承接高坠人体的缓冲过程,为防止坠落人员在缓冲网大变形下跌落地面造成伤害,在网端设计防跌落网兜,人体会在最低点掉进网兜。从缓冲网到达最低点到能量完全耗散为止,人体随网绕主轴旋转,在离心力的作用下被网兜束缚。图 1 为高坠防护缓冲系统构型。

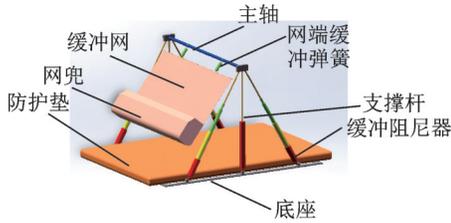


图 1 高坠防护缓冲系统构型  
Fig.1 High fall protection buffer system configuration

### 1.2 负泊松比柔性缓冲网设计

考虑到系统整体缓冲特性,冲击能量大多被缓冲网吸收,设计一种具有前述拉胀效应的负泊松比性质网结构,探索一种在受到冲击载荷影响时,整体材料向冲击部位收缩、材料局部密度增大的效果,以增大受冲击部位的韧性,吸收更多冲击能量<sup>[13]</sup>。旋转六角网眼结构如图 2 所示。

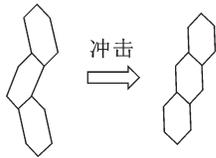


图 2 旋转六角网眼结构  
Fig.2 Rotating hexagonal mesh structure

右侧为标准六角网眼结构,左侧为静态优化后的旋转结构,所设计的六角网眼结构在自然状态下呈现左右歪斜状态,当受到冲击载荷影响时,左右歪斜的六角网眼结构会恢复为规整六角网眼,这种恢复特性越明显,则织物结构的负泊松比效应也就越强,而相比之下织物材料拉伸效果则较小。

图 3 为六角网眼单元结构。单元结构在自然状态下纵向长度与横向宽度分别为

$$h = 3h_1 + 2h_2 = 3l_2 \sin \alpha + 2l_1 \sin \beta \quad (1)$$

$$d = 3l_2 \cos \alpha \quad (2)$$

其中: $l_1$ 为六边形左右侧边长; $l_2$ 为六边形上下边长; $\alpha$ 为上下边与水平线夹角; $\beta$ 为左右侧边与水平线夹角; $h$ 为单元纵向长度; $d$ 为单元横向宽度。

网眼单元受冲击作用,根据泊松比定义为

$$\epsilon = -\Delta h / \Delta d \quad (3)$$

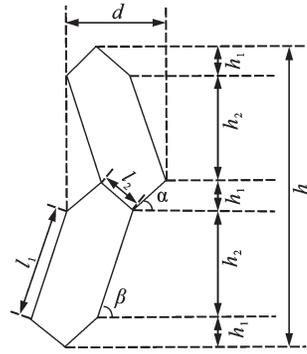


图 3 六角网眼单元结构  
Fig.3 Hexagonal mesh unit structure

将式(1),(2)代入式(3),得到

$$\epsilon = -\frac{3l_2(\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1) + 2l_1(\sin \beta_2 - \sin \beta_1)}{3l_2(\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)} \quad (4)$$

其中: $\alpha_1, \beta_1$ 为初始自然状态下的角度; $\alpha_2, \beta_2$ 为冲击后的角度。

由于冲击过程中,网结构角度时刻变化,假定极端情况 $\alpha_1=45^\circ, \beta_1=45^\circ, \alpha_2=0^\circ, \beta_2=90^\circ$ ,则

$$\epsilon = \frac{3\sqrt{2}l_2 - 2\sqrt{2}l_1(\sqrt{2}-1)}{3l_2(2-\sqrt{2})} \quad (5)$$

可得

$$\begin{cases} \epsilon < 0 & \left( l_1 > \frac{3}{2(\sqrt{2}-1)} l_2 \right) \\ \epsilon = 0 & \left( l_1 = \frac{3}{2(\sqrt{2}-1)} l_2 \right) \\ \epsilon > 0 & \left( l_1 < \frac{3}{2(\sqrt{2}-1)} l_2 \right) \end{cases} \quad (6)$$

根据理论计算结合实际应用需求,设计缓冲网织物结构与单元尺寸如图 4 所示。

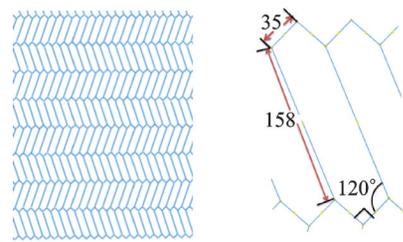


图 4 缓冲网织物结构与单元尺寸(单位:mm)  
Fig.4 Buffer mesh fabric structure and size (unit: mm)

## 2 基于有限元法的缓冲网接触冲击动力学分析

基于有限元理论对坠落人体与缓冲网接触冲击过程进行动力学分析,为求解缓冲过程人体过载,将

其描述为刚柔耦合接触冲击模型。缓冲网接触初始位置坐标为  $X_\alpha$  ( $\alpha = 1, 2, 3$ ), 经过时间  $t$ , 接触点由初始位置运动到点  $x_i$  处, 采用拉格朗日描述为

$$x_i = x_i(X_\alpha, t) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (7)$$

初始时刻接触点运动状态为

$$x_i[X_\alpha, 0] = X_\alpha \quad (8)$$

$$\dot{x}_i(X_\alpha, 0) = V_i(X_\alpha) \quad (9)$$

其中:  $V_i$  为初始速度。

接触点动量方程为

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho \ddot{x}_i \quad (10)$$

接触点连续方程为

$$\rho \gamma = \rho_0 \quad (11)$$

接触点能量方程为

$$\dot{E} = VS_{ij}\dot{\epsilon}_{ij} - (p + q)V \quad (12)$$

其中:  $\sigma_{ij,j}$  为柯西应力;  $f_i$  为当前质量密度;  $\ddot{x}_i$  为接触点的加速度;  $\gamma$  为相对体积;  $\rho$  为当前密度;  $\rho_0$  为初始密度;  $\dot{\epsilon}_{ij}$  为应变率张量;  $S_{ij}$  为偏应力;  $q$  为体积黏性阻力;  $p$  为压力;  $V$  为当前网体积。

刚柔耦合接触冲击问题涉及到接触边界  $S^0$ 、面力边界  $S^1$ 、位移边界  $S^2$  这三种边界条件, 分别为

$$(\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-)n_j = 0 \quad (13)$$

$$\sigma_{ij}n_j = t_i(t) \quad (14)$$

$$x_i(X_\alpha, t) = K_i(t) \quad (15)$$

其中:  $n_j$  为边界法线方向余弦;  $t_i$  为面力载荷;  $X_\alpha$  为  $t=0$  时的位移;  $K_i(t)$  为位移函数。

基于 Calerkin 法求解上述偏微分方程的近似解, Calerkin 弱形式的平衡方程为

$$\int_V (\rho \ddot{x}_i - \sigma_{ij,j} - \rho f) \delta x_i dV + \int_{S^0} (\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-) n_j \delta x_i dS + \int_{S^1} (\sigma_{ij} n_j - t_i) \delta x_i dS = 0 \quad (16)$$

应用高斯公式得

$$\int_V (\sigma_{ij} \delta x_i)_j dV = \int_{S^0} (\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-) n_j \delta x_i dS + \int_{S^1} \sigma_{ij} n_j \delta x_i dS \quad (17)$$

转化分部积分后, 式(16)表示为

$$\delta \pi = \int_V \rho \ddot{x}_i \delta x_i dV + \int_V \sigma_{ij} \delta x_{i,j} dV - \int_V \rho f_i \delta x_i dV - \int_{S^1} t_i \delta x_i dS = 0 \quad (18)$$

离散单元后, 构型上节点的运动轨迹方程为

$$x_i(X_\alpha, t) = x_i(X_\alpha(\xi, \eta, \zeta), t) - \sum_{j=1}^k \phi_j(\xi, \eta, \zeta) x_j^i(t) \quad (19)$$

其中:  $\phi_j$  为参考坐标  $(\xi, \eta, \zeta)$  为形函数;  $k$  为单元节

点数;  $x_j^i$  为单元第  $j$  个节点在  $i$  方向上的位移。

利用虚功原理对整个系统求和并转换为矩阵形式, 即

$$\sum_{m=1}^n \left\{ \int_{v_m} \rho N^T N \ddot{x}^e dv + \int_{v_m} B^T \sigma dv - \int_{v_m} \rho N^T b dv - \int_{S^1} N^T t ds \right\}^m = 0 \quad (20)$$

其中:  $N$  为形函数矩阵;  $B$  为应变矩阵;  $\ddot{x}$  为节点加速度;  $b$  为体积向量;  $t$  为面力向量;  $\sigma$  为柯西应力。

$$\sigma^T = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}) \quad (21)$$

单元内任一点加速度为

$$[\ddot{x}_1, \ddot{x}_2, \ddot{x}_3]^T = N[\ddot{x}_1^1, \ddot{x}_2^1, \dots, \ddot{x}_2^k, \ddot{x}_3^k]^T = N \ddot{x}^e \quad (22)$$

单元质量矩阵为

$$m = \int_{v_m} \rho N^T N dv \quad (23)$$

通过矩阵合并进一步进行单元计算和组集后, 得到离散后的接触冲击系统平衡方程

$$M \ddot{x}(t) = P(x, t) - F(x, \dot{x}) \quad (24)$$

其中:  $M$  为组集后的整体对角质量矩阵;  $\ddot{x}(t)$  为总体节点加速度矢量;  $P$  为总体载荷向量。

$F$  为节点应力场的等效节点矢量组集, 表示为

$$F = \sum_{m=1}^n \int_{v_m} B^T \sigma dv \quad (25)$$

### 3 人体高坠缓冲系统动力学仿真

#### 3.1 缓冲系统有限元建模

为了验证缓冲系统设计方案的可行性, 同时获取缓冲系统缓冲特性和极限应用高度, 利用有限元软件进行动力学冲击仿真分析。针对缓冲系统的强非线性(大位移、大应变和大转动)等复杂问题, 采用显式动力学方法求解。

建立负泊松比结构缓冲网, 模型为各向同性的线弹性材料, 展开尺寸为  $4 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ , 四角处各设置牵连点。人体有限元模型位于柔性缓冲网中部区域并与网接触, 接触力计算采用罚函数法建立网体自接触、网绳与人体接触, 防止法向嵌入的穿透问题。结合人体  $25 \sim 35 \text{ m}$  高度自由落体运动速度, 赋予人体有限元模型在接触柔性网时相应竖直向下的初速度。柔性缓冲网轴端两点通过缓冲弹簧连接于主轴, 主轴仅释放竖直方向位移, 并通过 6 个缓冲阻尼器与地面固连在一起, 模拟实际作业中的辅助缓冲手段, 在人体质心处设置采样点集, 并输出点集的三向加速度和速度, 设仿真时间为  $0.9 \text{ s}$ 。仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数  
Tab.1 Simulation parameters

参数	数值
缓冲网展开尺寸/m	4×8
缓冲网材料密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	1 320
缓冲网材料弹性模量/MPa	25
缓冲网材料泊松比	0.3
网端弹簧刚度系数/(N·m <sup>-1</sup> )	1.5×10 <sup>6</sup>
地面缓冲器阻尼系数/(N·s·m <sup>-1</sup> )	0.4

### 3.2 仿真过程与结果分析

人体坠落过程缓冲网结构变化如图 5 所示。人体坠落过程中,缓冲网六角网眼结构变形巨大,出现了明显的材料向冲击部位聚集效果,局部密度增大,韧性增加,呈现出预期的负泊松比效果,可显著吸收更多冲击动能。负泊松比性能越好,冲击载荷作用在织物结构上时,受冲击部位就会更加紧密,吸收更多冲击能量的同时也会延长织物的耐冲击时间,从而使其可承受更大的冲击极限位移<sup>[14]</sup>。

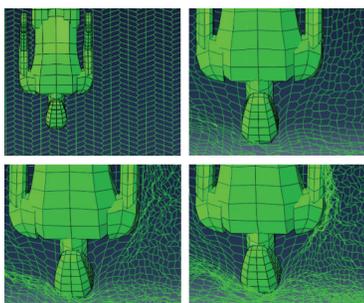


图 5 人体坠落过程缓冲网结构变化

Fig.5 Structure change of buffer net during human fall

为验证缓冲系统的性能,选取 25,30 和 35 m 3 种典型工况进行仿真分析,得到 3 种高度人体竖直过载曲线和水平速度曲线如图 6,7 所示。由于下文试验中是由人员手动释放人体模型跌落触网,释放高度的微小误差会导致各关键时间点的相对滞后或提前。为确保接下来仿真与试验数据对比分析中时间点的吻

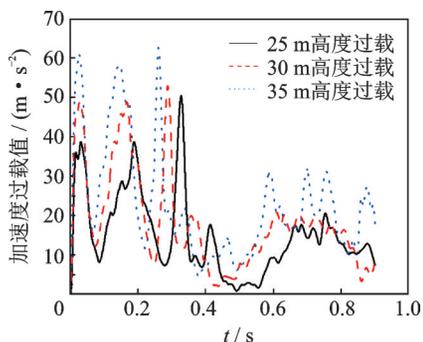


图 6 3 种高度人体竖直过载曲线

Fig.6 Three heights human vertical overload curve

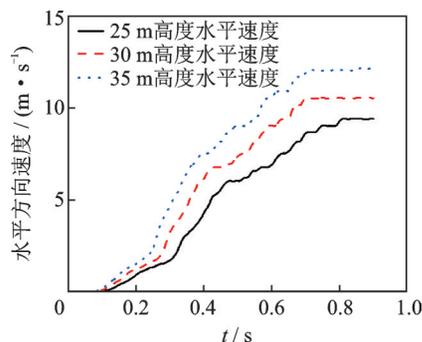


图 7 3 种高度人体水平速度曲线

Fig.7 Three heights of human horizontal speed curve

合,以过载为 0 的时间节点作为 0 时刻进行数据分析。

以 30 m 高度为例,冲击动力学仿真关键时间节点如图 8 所示。0 s 开始人体高速接触缓冲网,在高初始速度下迅速达到阶段过载极大值,随着接触震荡,人体与缓冲网的相互作用力不断发生改变,在 0.29 s 出现最高过载,此时缓冲网对人体的缓冲力达到最大,也是人体承受过载最危险的时刻。在 0.61 s 时,人体过载达到平稳前的最后一个极大值,此时柔性缓冲网达到最大变形量,之后缓冲网结构轻微恢复,逐渐趋于稳定。

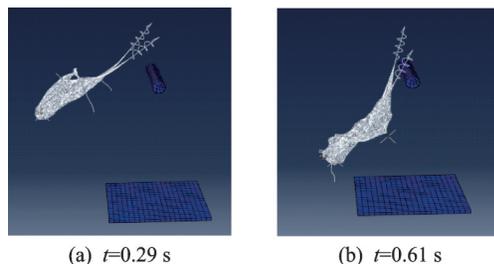


图 8 冲击动力学仿真关键时间节点

Fig.8 Critical time nodes for impact dynamics simulation

仿真结果可以看出,随着坠落高度的升高,下坠人体相应过载波峰均有所提前但基本同步。这种现象的出现是由于高度的提升,人体触网初速度显著提高,导致相应波峰波谷和达到缓冲网最大变形量的时间都有所缩短。30 m 高度坠落人体过载值为 5.45g,接近设定的过载极限指标。缓冲系统消耗高坠人体动能的同时,将竖直方向速度转为水平方向速度,随后人体会跟随缓冲网绕主轴旋转,并进一步消耗动能,直到稳定。根据仿真结果判断缓冲系统有效极限高度约为 30 m。

## 4 缓冲系统缩比试验

### 4.1 缓冲系统相似性分析

根据设计结果,缓冲系统整体尺寸较大,加工 1:1 模型试验难度较高,基于相似性原理设计缩比

试验模型对于验证系统可行性是现阶段一种行之有效的办法。在一般冲击响应分析中,描述各物理参数之间的一般关系形式为

$$f(L, v, a, \dot{\omega}, \rho, M, J, E, c, T, \omega, \sigma, F) = 0 \quad (26)$$

其中: $L$ 为尺寸; $v$ 为速度; $a$ 为加速度; $\dot{\omega}$ 为角加速度; $\rho$ 为密度; $M$ 为质量; $J$ 为惯性积; $E$ 为弹性模量; $c$ 为阻尼系数; $T$ 为时间; $\omega$ 为角速度; $\sigma$ 为应力; $F$ 为力。

在本试验方案中,选择 $L, T, M$ 作为基本量纲。为保证原模型与缩比模型之间具备相同的研究基础条件,几何相似是相似性分析中最基本的单值相似条件。为保证缩比模型与原模型所承载荷条件一致,两者还需在力学特性上存在同比例相似关系。综合考虑仿真与试验环境,确定相似常数为

$$\lambda = L_o/L_m = 8 \quad (27)$$

其中: $\lambda$ 为相似常数; $L$ 为模型所有方向的线性尺寸;下标 $o$ 表示原模型;下标 $m$ 表示缩比模型。

所涉及到的相似常数均为原模型的物理量与缩比模型的物理量之比。试验中各参数缩放比例如表2所示。

表2 参数缩放比例

Tab.2 Scale of parameter scaling

参数	量纲	原型	1/8缩比模型	比例
缓冲网尺寸	$L$	$L$	$L/\lambda$	$1/\lambda$
人体尺寸	$L$	$l$	$l/\lambda$	$1/\lambda$
下落高度	$L$	$H$	$H/\lambda$	$1/\lambda$
时间	$T$	$T$	$T$	$1$
人体质量	$M$	$M$	$M/\lambda^3$	$1/\lambda^3$
人体体积	$L^3$	$V$	$V/\lambda^3$	$1/\lambda^3$
过载/加速度	$LT^{-2}$	$a$	$a/\lambda$	$1/\lambda$
阻尼	$MT^{-3}$	$c$	$c/\lambda^3$	$1/\lambda^3$
弹性模量	$ML^{-1}T^{-2}$	$E$	$E/\lambda^2$	$1/\lambda^2$

#### 4.2 缩比试验与结果分析

图9为传感器采集系统。采用PCB-353B13压电式加速度传感器连接信号采集系统进行试验,传感器量



图9 传感器采集系统

Fig.9 Sensor acquisition system

程为100g,灵敏度为50 mV/g,温度范围为-54~121℃。人体模型配平如图10所示。根据相似性分析,人体模型和加速度传感器总质量约为157 g,为了平衡重力加速度,基于吊挂配平法,利用100 g砝码绕过定滑轮连接在人体模型一端,结合摩擦力影响,实现人体模型约1/8g重力加速度的等效模拟。图11为缓冲网。通过调节网端钢索的张紧度对缓冲机构等效简化。



图10 人体模型配平

Fig.10 Mannequin balance



图11 缓冲网

Fig.11 Buffer net model

根据相似理论分析结果,试验模拟人体30 m跌落高度触网缓冲工况。试验结果与仿真结果对比如图12所示。

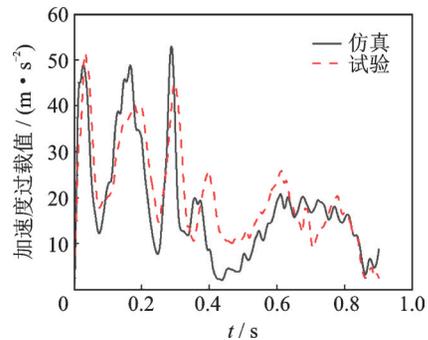


图12 试验结果与仿真结果对比

Fig.12 Comparison of test results and simulation results

可见,过载变化趋势一致性较好,主要差别在于试验数据后续2个波峰相对仿真数值较低且相位相对延后。这是由于试验中缓冲网重力无法忽略,导致人体模型与缓冲网接触后缓冲网振幅相对较小,对人体模型后续承接效果较弱,且综合考虑试验中存在设施摩擦、模型释放时机与落点差异等因素,增

加了模型接触缓冲网之后缓冲时间的迟滞。试验过载最高点处与仿真误差约为5.8%,趋势基本吻合且没有超过人体耐受指标,证明了有限元模型的正确性和缓冲系统的有效性。

## 5 结束语

针对高坠人员救援场景设计了一套防护缓冲系统,所设计的六角网眼负泊松比结构缓冲网在动力学仿真分析中有效体现了冲击聚集、局部密度增大的负泊松比效应,可增大局部韧性,有效吸收更多动能。仿真分析结果表明,缓冲系统可有效将30 m高度以下跌落的人体垂直方向速度转化为水平方向速度,并在此期间消耗动能。在整个过程中人体最大过载不超过5.5g。缩比试验结果证明,加速度传感器输出结果趋势与动力学仿真基本一致,试验最大过载处与仿真误差约5.8%,验证了有限元模型的准确性。所设计缓冲系统可有效保障30 m以下跌落人员安全。

## 参 考 文 献

- [1] 魏捍东,张智.从央视大火探讨超高层建筑灭火对策[J].消防科学与技术,2010,29(7):606-612.  
WEI Handong, ZHANG Zhi. Study of countermeasure on fire extinguishing of super high-rise building though CCTV conflagration[J]. Fire Science and Technology, 2010, 29(7): 606-612. (in Chinese)
- [2] GLAZZARD M, BREEDON P. Weft-knitted auxetic textile design [J]. Physica Status Solidi (b), 2014, 251(2):267-272.
- [3] BLAGA M, CIOBANU A, PAVKO-CUDEN A, et al. 在电脑横机上编织负泊松比可折叠纬编针织结构[J].国际纺织导报,2014(6):54-56.  
BLAGA M, CIOBANU A, PAVKO-CUDEN A, et al. Production of foldable weft knitted structures with auxetic potential on electronic flat knitting machines[J]. Melliland China, 2014(6): 54-56. (in Chinese)
- [4] WANG Z, HU H. 3D auxetic warp-knitted spacer fabrics [J]. Physica Status Solidi(b), 2014, 251(2):281-288.
- [5] WANG Z, HU H, XIAO X. Deformation behaviors of three-dimensional auxetic spacer fabrics [J]. Textile Research Journal, 2014, 84(13): 1361-1372.
- [6] WANG Z, HU H. A finite element analysis of an auxetic warp-knitted spacer fabric structure[J]. Textile Research Journal, 2015, 85(4): 404-415.
- [7] MA P, CHANG Y, JIANG G. Design and fabrication of auxetic warp-knitted structures with a rotational hexagonal loop [J]. Textile Research Journal, 2016, 86(20): 2151-2157.
- [8] 骆丽茹,余志祥,金云涛,等.高陡边坡引导式落石防护

网系统原位冲击试验[J].土木工程学报,2021,54(11):119-128.

LUO Liru, YU Zhixiang, JIN Yuntao, et al. In situ impact test of guided rockfall protection net system on high and steep slopes [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(11): 119-128. (in Chinese)

- [9] QI X, PEI X J, HAN R, et al. Analysis of the effects of a rotating rock on rockfall protection barriers [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2018, 36(5): 3255-3267.
- [10] 齐欣,许浒,余志祥,等.柔性拦截结构中减压环动态力学性能试验研究[J].工程力学,2018,35(9):188-196.  
QI Xin, XU Hu, YU Zhixiang, et al. Experimental research on dynamic mechanical properties of decompression rings in flexible intercepting structures[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(9): 188-196. (in Chinese)
- [11] 余志祥,严绍伟,许浒,等.活塞杆点支式柔性缓冲系统冲击力学行为[J].土木工程学报,2018,51(11):61-69.  
YU Zhixiang, YAN Shaowei, XU Hu, et al. Impact mechanical behavior of piston rod point-supported flexible cushioning system [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(11): 61-69. (in Chinese)
- [12] 郭立平,余志祥,骆丽茹,等.基于力流等效的环形网顶破力学行为解析方法[J].工程力学,2020,37(5):129-139.  
GUO Liping, YU Zhixiang, LUO Liru, et al. Analytical method of mechanical behavior of annular net bursting based on force-flow equivalent [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(5): 129-139. (in Chinese)
- [13] 常玉萍,马丕波,钟文鑫,等.基于经编网眼结构的负泊松比织物设计[J].纺织学报,2016,37(2):44-49.  
CHANG Yuping, MA Pibo, ZHONG Wenxin, et al. Design of negative poisson's ratio fabric based on warp knitted mesh structure [J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(2): 44-49. (in Chinese)
- [14] HASAN K, ADEEL Z, HONG H. Deformation behavior of auxetic woven fabric based on re-entrant hexagonal geometry in different tensile directions [J]. Textile Research Journal, 2020, 90(3-4): 410-421.



**第一作者简介:**鲁超宇,男,1995年8月生,博士生。主要研究方向为着陆缓冲结构机构技术。曾发表《基于知识元描述的模型参数化设计交互式创建系统研究》(《农业机械学报》2021年第52卷)等论文。

E-mail:luchaoyu824@163.com

**通信作者简介:**王宸,男,1992年2月生,讲师。主要研究方向为航天器结构与机构技术、航天器结构动力学。

E-mail:nuaawangchen@nuaa.edu.cn