

手机屏幕跌落安全性研究

唐 崛, 姬国勋, 孙新利, 杭贵云
(火箭军工程大学, 西安 710025)

摘要: **目的** 研究智能手机以不同方式跌落时屏幕的安全性, 根据跌落时力的传递方式和主要应力集中部位设计简单有效的防护措施, 节约包装成本。**方法** 基于 SolidWorks 和 Ansys Workbench 软件对无防护智能手机水平跌落、竖直跌落和倾斜 45°跌落等 3 种极限情况进行仿真, 根据结果设计防护措施, 并进行仿真验证。**结果** 在水平、竖直、倾斜 45°等 3 种跌落工况下, 手机屏幕均会发生应力集中, 应力大小分别为 80, 800, 120 MPa, 屏幕出现破碎, 在手机的 4 个角安装三角形泡沫能够使冲击应力小于屏幕的强度极限。**结论** 在手机屏幕材料的选择时, 要选择强度高、弹性好的玻璃材料, 对手机进行包装运输时, 对 4 个角安装三角形泡沫防护垫可以有效地保护手机。

关键词: 手机屏幕; 跌落; 应力; 安全

中图分类号: TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)11-0115-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.11.020

Security of Mobile Phone Screen under Dropping Loadings

TANG Jue, JI Guo-xun, SUN Xin-Li, HANG Gui-yun
(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

ABSTRACT: The work aims to research the security of the screen when the smart phone drops in different ways, and save the packaging cost by designing simple and effective protection measures according to the transmission mode of the drop force and the main stress concentration point. Based on the SolidWorks and Ansys Workbench software, three kinds of limit scenarios of unprotected smart phone falling horizontally, falling vertically and tilting 45 degrees were simulated. According to the result, protective measures were designed and simulation verification was conducted. The stress (80, 800, 120 MPa) would concentrate on the mobile phone's screen and the screen would be broken when the phone dropped in above-mentioned three ways. Installing triangle foam in the four corner of the phone enabled the impact stress to be less than the ultimate strength of the screen. In the selection of mobile phone screen material, the glass materials of high strength and good elasticity should be selected. Installing triangle foam protective pad for the four corners can effectively protect the phone when the phone is packaged and transported.

KEY WORDS: mobile phone screen; falling; stress; security

随着社会的发展, 人们的生活越来越离不开手机, 携带手机让人们的生活更加方便、快捷, 同时其安全性问题已成为全世界关注的焦点。调查发现, 大部分电子产品的损坏都与跌落碰撞有关^[1], 90%以上的手机损坏都是因为屏幕的损坏。生活中手机碎屏的现象时常发生, 手机在携带过程中会发生跌落和碰撞, 这种剧烈冲击会使得手机屏幕的运动状态在较短时间内发生较大的变化^[2], 从而造成手机屏幕的破

碎。手机屏幕是主要零部件之一, 屏幕的破坏将影响手机的美观和使用, 而且屏幕的维修费用也较为高昂^[3], 因此, 对手机跌落后屏幕的安全性进行分析和设计简单有效的防护措施非常有意义。

由于跌落实验历程短, 条件苛刻, 难度较高, 耗资不菲的原因, 传统的跌落实验逐渐被跌落冲击仿真所取代^[4], 通过查阅文献, 国内外的学者对产品包装件的仿真跌落做了很多详尽的研究。Jason Wu, Guoshu

收稿日期: 2017-12-26

基金项目: 唐崛 (1994—), 男, 火箭军工程大学硕士生, 主攻跌落可靠性。

通信作者: 姬国勋 (1977—), 男, 火箭军工程大学副教授, 主要研究方向为跌落可靠性。

Song^[4]等利用有限元方法研究了便携式通信设备遭受撞击的情况。山东大学的段良^[2]通过实验结合仿真研究了手机跌落的力学效应,对手机跌落的安全性做出了系统的分析,但他研究的对象仅为非智能机,研究结论对目前普遍的智能手机不能使用,但是研究方法可以借鉴。韩克明^[5]等利用仿真的方法分析了手机触摸屏跌落时的受力情况,但他考虑的跌落方式比较单一,且材料数据与现代相比出入较大。孙亮^[6]等都曾利用有限元仿真方法对修枝机、包装件、洗衣机、高脚杯等物品做了跌落仿真分析,得出了比较可靠的结论。目前关于智能手机屏幕的跌落分析研究较少,在以上分析结论的基础上,可以利用仿真方法对手机的跌落安全性进行研究。

文中以国内华为荣耀8手机为研究对象,结合生活中使用手机的实际情况,利用Ansys Workbench显示动力学模块,仿真研究手机在3种不同方式跌落时手机的应力分布情况,并通过查阅资料,对比屏幕的极限应力,分析手机跌落后屏幕的安全性,在仿真分析的基础上设计一种简单有效的防护措施。研究成果可以为手机包装运输及手机保护套的制作提供重要参考。

1 手机跌落理论分析

1.1 跌落冲击原理

跌落冲击原理最早由牛顿提出,一直作为动力学的基本原理之一。假设一质量为 m 的物体从高度为 h 处自由下落,不计空气阻力,物体接触地面的速度由能量守恒求得 $v_0 = \sqrt{2gh}$ 。从接触地面开始物体受到地面给它向上的作用力,迫使物体的速度逐渐减小,直至为0,由于物体和地面在这一阶段里都产生了压缩变形,两者之间的相互作用力随着变形的增大而增大,因此,从物体与地面接触到物体速度为0,是跌落冲击的第1阶段,称为变形阶段。物体由静止变为向上运动,直至离开地面,这是跌落冲击的第2阶段,称为回复阶段。第1阶段里,物体的动能转化为物体与地面的变形能,包括弹性变形能和塑性变形能等。

1.2 强度理论

伽利略提出的最大拉应力理论又叫第一强度理论^[7],理论认为,材料最大拉应力 σ_1 是引起材料破坏的主要原因,也就是说,不论在什么样的复杂应力状态下,只要最大的拉应力 σ_1 达到材料的极限应力值 σ_u 时,材料就将发生断裂破坏,断裂表达式为:

$$\sigma_1 = \sigma_u \quad (1)$$

按照最大拉应力理论所建立的强度条件为:

$$\sigma_{r1} = \sigma_1 \leq [\sigma] \quad (2)$$

式中: σ 为指第一强度理论的相当应力。 σ_{r1} 对于在单向拉伸试验中,试件沿横截面发生脆性断裂的材料,可用其拉断时横截面上的正应力作为这类材料的强度极限,也称极限应力 σ_u 。第一强度理论适用于脆性材料,脆性材料是指在力的作用下发生微小变形就会发生断裂的这样一类材料。玻璃就属于脆性材料,因此,在考虑手机屏幕安全性的问题上,第一强度理论是适用的。

1.3 显示动力学分析原理

求解碰撞问题一般选择Ansys Workbench显示动力学模块,其显示动力学分析的特点为:用中心差分法求解 t 时刻的加速度。其碰撞方程为:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = [F_t^{\text{ext}}] \quad (3)$$

式中: $[M]$, $\{\ddot{u}\}$, $[C]$, $\{\dot{u}\}$, $[K]$, $\{u\}$, $[F_t^{\text{ext}}]$ 分别为质量矩阵、节点加速度的向量、阻尼矩阵、节点加速度的向量、刚度矩阵、节点位移的向量和包括碰撞力的外力矢量。

令:

$$[C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = [F_t^{\text{int}}] \quad (4)$$

则碰撞运动方程为:

$$M\{a_t\} = ([F_t^{\text{ext}}] - [F_t^{\text{int}}]) \quad (5)$$

则加速度为:

$$\{a_t\} = [M]^{-1}([F_t^{\text{ext}}] - [F_t^{\text{int}}]) \quad (6)$$

其中, $\{F_t^{\text{int}}\}$ 由式(7)求得:

$$F_t^{\text{int}} = \sum \left(\int_{\Omega} B^T \sigma_n d\Omega + F^{\text{hg}} \right) + F^{\text{constant} \tan t} \quad (7)$$

式中: $\int_{\Omega} B^T \sigma_n d\Omega$, F^{hg} , F^{constant} 分别为单元应力的等效节点力,沙漏阻力和接触力。速度和位移的公式分别为:

$$\{v_{t+\frac{\Delta t}{2}}\} = \{v_{t-\frac{\Delta t}{2}}\} + \{a_t\} \Delta t \quad (8)$$

$$\{v_{t+\Delta t}\} = \{u_t\} + \{v_{t+\frac{\Delta t}{2}}\} \Delta t \quad (9)$$

运用上述方法能够很好地解决非线性动力学问题。

2 结构优化仿真模型建立

2.1 建立 SolidWorks/Ansys workbench 联合仿真优化平台

在以往的有限元分析中,都是在3D绘图软件中建完模型后,通过保存固有的格式,然后导入Ansys有限元分析软件中,此种方法在导入的过程中,部分模型的信息容易失真,并且操作比较麻烦,一旦模型需要修改,工作量极大^[8-10]。在此基础上,文中将SolidWorks软件与Ansys workbench软件进行关联,将SolidWorks中建立的模型直接转入到Workbench

界面，同时在 SolidWorks 软件中对模型的修改能直接映射到 Workbench 中，分析、优化后的结果也能同时驱动 CAD 模型做出相应的更新，大大提高了工作效率。

2.2 实体模型的建立

文中以华为荣耀 8 为样机进行跌落研究，研究的重点是手机屏幕的安全性，手机内部零部件繁多，结构复杂。考虑到计算时间，文中将主板上的细小零部件不予考虑，这些部件在跌落时对屏幕受力的影响不大。在进行建模时，对模型进行适当的简化，在不影响力的传递方式的前提下，将手机模型简化为框架、电池、主板、屏幕和后壳 5 个部分。具体模型尺寸^[11]见表 1。

表 1 模型参数
Tab.1 Model parameters

名称	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm
框架	145.5	71	6.5
电池	60	30	3
主板	124	66	1.5
后壳	145.5	71	0.5
屏幕	145	71	0.5

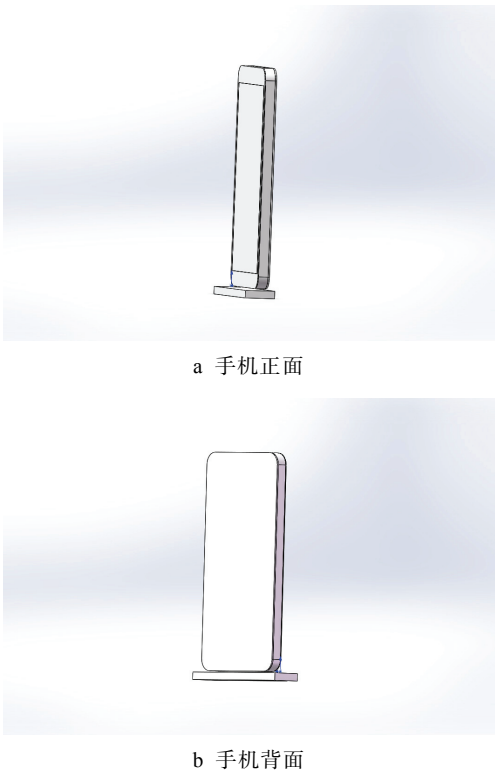


图 1 手机三维模型
Fig.1 Three-dimensional model of mobile phone

2.3 有限元模型及网格划分

将绘制好的三维手机模型在 Ansys Workbench 中

打开，通过查阅资料得出，华为荣耀 8 的屏幕采用的是大猩猩玻璃，手机壳体采用 PC+ABS 塑料，具体参数见表 2。网格划分时，由于系统的最小时间步长与单元大小密切相关，根据式（10—11）选择划分网格的合适尺寸。

$$\Delta t_{\min} = \frac{l_{\min}}{c} = \frac{l_2}{c}$$
(10)

$$c = \sqrt{\frac{E}{(1-\nu^2)\rho}}$$
(11)

式中： $l_{\min}$ 、 E 、 ν 、 ρ 分别为单元的最小边长、弹性模量、泊松比和密度。利用控制网格大小的方式进行网格的划分^[12—14]，为了保证足够的精度，网格单元尺寸选择 1 mm，最终得到的有限元模型共有 14 133 个单元，6481 个节点。

表 2 材料参数
Tab.2 Material parameters

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服应力/ MPa
大猩猩玻璃	2460	69	0.23	62
后壳	1200	2.19	0.35	90
框架	1200	2.19	0.35	90
主板	2400	11	0.25	70
电池	2570	70	0.29	100
地面	7850	200	0.3	
泡沫	1150	0.0061	0.49	

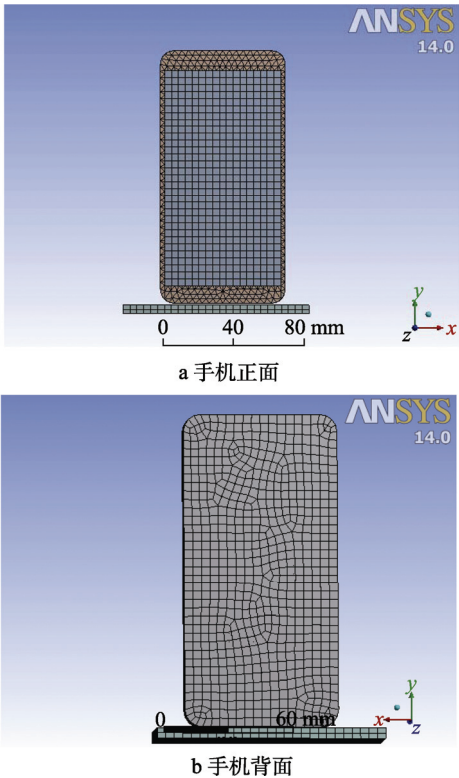


图 2 手机跌落有限元模型
Fig.2 Finite element model of mobile phone drop

3 跌落仿真分析

3.1 跌落姿态

结合实际情况,文中主要分析手机跌落的高度和跌落的方式。为了提高计算效率,文中将跌落的高度等效为手机落地前的初速度,这样,可以大大节省计算的时间,在高度值的选择上,文中以手机在1 m的高度跌落为分析条件,具有一定的代表性。手机跌落时的状态大致可以分为3种,水平跌落、竖直跌落和以一定的角度跌落,分析水平跌落时,文中将手机的屏幕作为冲击面,水平向下跌落。倾斜跌落角度很多,文中主要考虑手机以45°角跌落。

3.2 选取单元类型及材料属性

在建立手机有限元模型时,手机各部件所选单元类型是否合适,直接关系到模拟数据的精确性和计算时间。选取单元类型一般考虑2个方面:模拟分析物体适合的单元类型以及其材料属性;单元类型自身独有的性质特点、算法以及该单元类型适合分析的模型。手机屏幕、后壳属于薄壁类物体,针对这种类型的材料,为避免单元数量多影响计算时间,因此,选用壳单元比较合适。对于框架、主板、电池则选用实体单元比较合适。单元选取手机模拟仿真见表3,需要定义材料属性,文中选取双线性随动硬化和线弹性2种材料模型,电池选用线弹性 Linear Isotropic 材料模型^[11],屏幕、框架、主板、后壳则选用双线性随动硬化 Bilinear Kinematic 材料模型。

表3 手机部件单元模型
Tab.3 The element model of phone parts

名称	大猩猩玻璃	后壳	框架	主板	电池	地面
单元类型	Shell 163	Shell 163	Solid 164	Solid 164	Solid 164	Solid 164

3.3 条件设置

运用 Ansys Workbench 的 Explicit Dynamics 模块对手机的跌落进行仿真研究,考虑到手机零部件的连接关系,面与面的接触采用 bond 接触^[15]。为了节省计算时间,将跌落高度等效为撞击初速度,对手机施加初速度,右键点击 initial condition,在 invert 中选择 velocity,并在 definition 中选择 components,选择 Y component,输入速度值大小,需要注意速度的方向,对于倾斜跌落时的速度设置,添加 X 和 Y 负方向的速度值,保证其合速度方向垂直于地面。另外,需要对被撞击的地面施加约束,保证其固定不动,单击 support,分别对地面的4个面施加 Fixed Support。在计算时间上,为了节省计算时间,总分析时间设置为0.5 ms,对所有物体施加竖直向下的重力加速度,重

力加速度取为 9.806 m/s^2 。

3.4 仿真计算

图3—5中,水平撞击时,手机应力分布比较均匀,撞击过程持续约为0.2 ms,最大应力值出现在0.3 ms时刻,在整个撞击过程中,手机屏幕受到的应力值最大,最大应力为80 MPa,超过了屏幕的屈服极限,屏幕会发生破碎。其余部件受到的冲击小,不会产生大的影响。在倾斜跌落时,应力集中在手机与地面的接触点上,力的传递由点逐渐扩散,从应力分布图中可以看出,手机以倾斜45°跌落时,接触点周围的应力非常大,最大值为1085 MPa,而屏幕受到的应力最大值为800 MPa,远远超过了屏幕的屈服极限,且屏幕中应力集中在左下角与地面最近的位置,除屏幕外,其他零部件也受到较大影响,框架、主板受到的冲击应力都超过了其屈服极限。整个撞击过程持续约0.25 ms,最大值出现在0.33 ms的时刻。竖直跌落时,应力主要集中在与地面的接触面上,且在力的传递过程中,能量的损失非常大,从屏幕的应力分布图中可以看出,应力集中的部位不在与手机接触的部位,反而在屏幕的中下部,屏幕受到的应力最大值为127.5 MPa,屏幕会破碎。

从仿真结果可以发现,跌落的方式不同,力的大小和传递方式也不同,斜45°跌落对手机影响最大,水平跌落对手机的影响最小。材料的不同,受到的冲击影响也不同,从最大应力折线图可以看出,跌落过程中,弹性模量小的材料在冲击时受到的冲击影响较

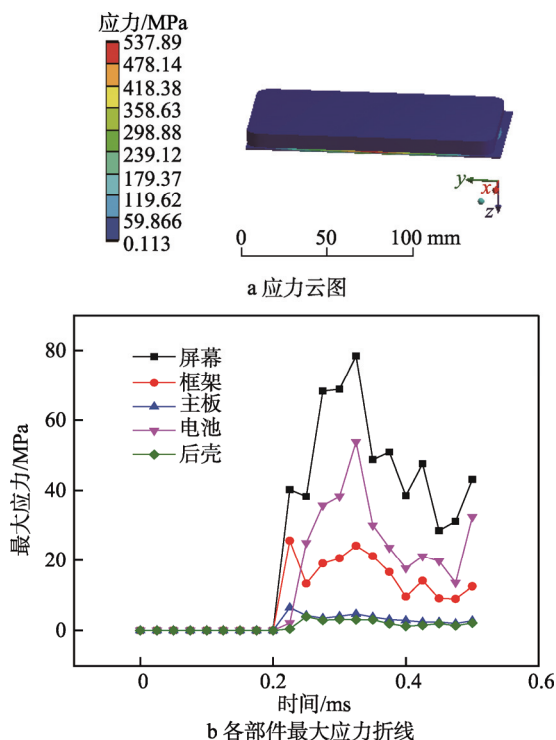


图3 水平跌落应力

Fig.3 Stress in horizontal falling

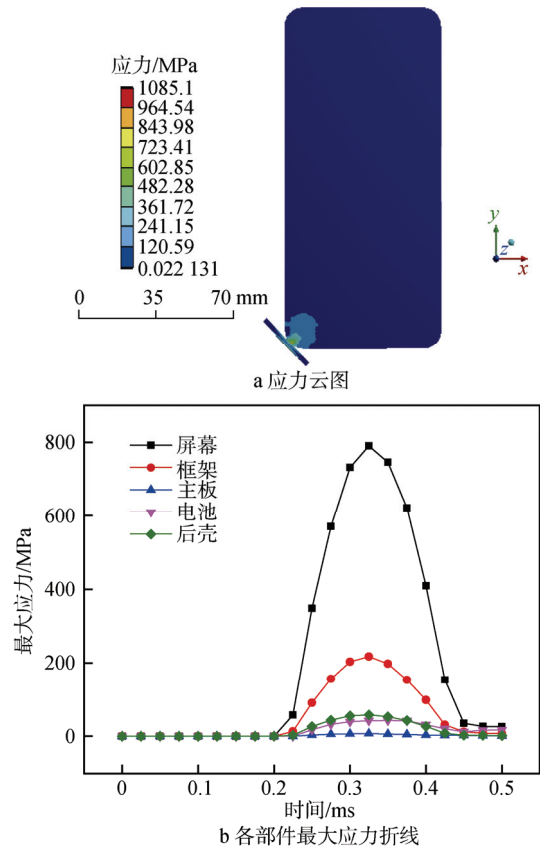


图 4 倾斜 45° 跌落应力
Fig.4 Stress in 45° tilt falling

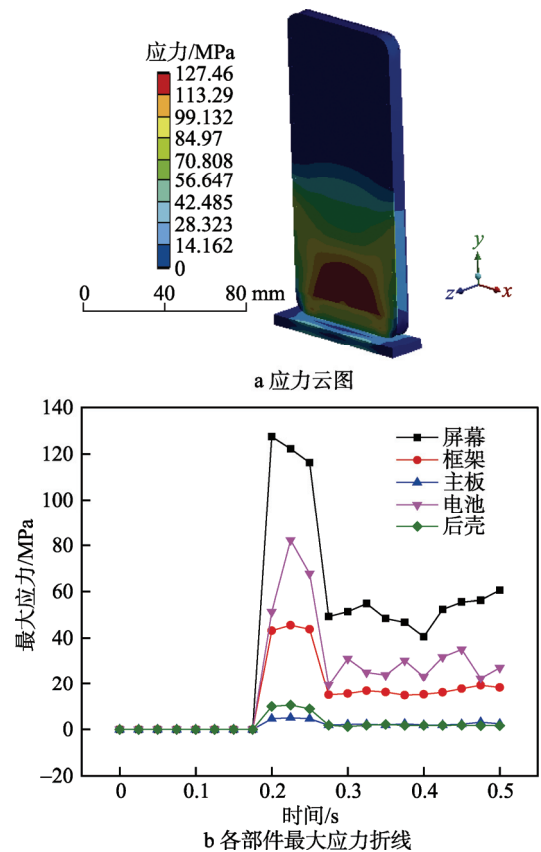


图 5 竖直跌落应力
Fig.5 Stress in vertical falling

小，屏幕和电池这种弹性模量大的材料在跌落时，受到的冲击较大，另外，屏幕的屈服极限小，这也就很好地解释了手机跌落损坏大部分都是屏幕摔碎的原因。

通过模拟 3 种不同的跌落方式可以看出跌落时手机应力的集中情况，在实际运输过程中，跌落高度远不止 1 m，为了保证手机的安全，选择合适的防护措施非常重要。

4 包装设计及仿真分析

结合仿真中力的传递方式，可以选择一种很好的缓冲材料添加到手机的关键部位，这样可以大大减轻跌落时手机受到的冲击。泡沫作为目前较廉价的缓冲保护材料，在物流业广泛应用^[16—18]，因此，可以在手机运输时添加泡沫。也不可随意乱加泡沫，这样不仅增加了工作量，还会带来不必要的浪费，可以考虑在手机 4 个角落铺设一定厚度的泡沫。通过调查，手机在运输时可能跌落的高度一般不超过 5 m，以 5 m 为极限高度，仿真分析在包装条件下手机跌落时屏幕受到的应力值，有限元仿真模型见图 6。选择 0.5 cm

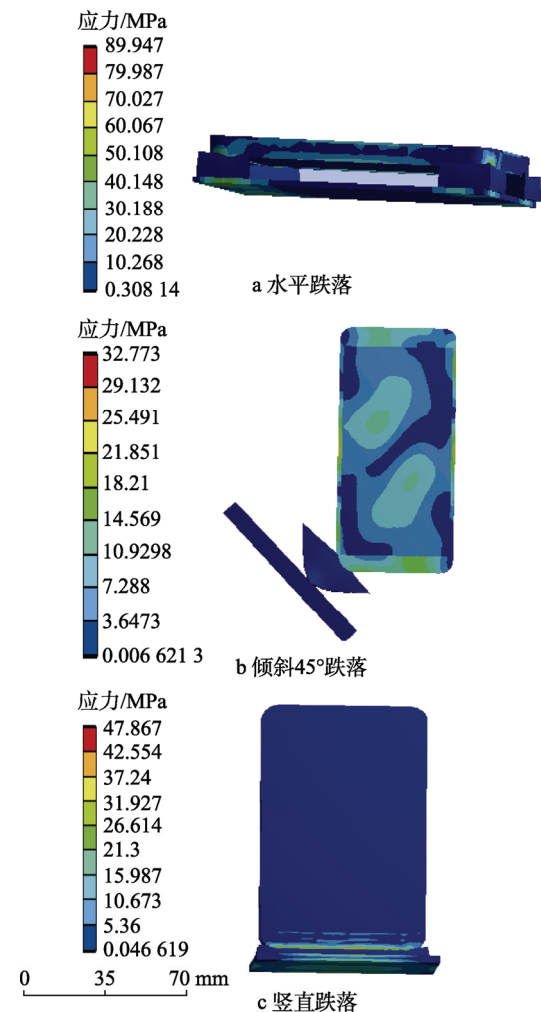


图 6 添加泡沫后手机跌落应力云图
Fig.6 Mobile phone falling stress diagram after adding foam

厚的泡沫材料,材料模型选择双线性随动硬化 Bilinear Kinematic 材料模型,分别对手机的 4 个角进行包装,以 10 m/s 撞击地面,仿真结果见图 6。

从仿真云图中可以看出,添加 0.5 cm 厚的泡沫材料后,手机从 5 m 高度水平、倾斜 45°、竖直跌落时屏幕受到的最大应力不超过 30 MPa,手机受到的冲击大大减小,缓冲效果明显,对手机的屏幕保护作用好。缓冲材料越厚,缓冲效果越明显,因此,在手机运输中对四角安装泡沫能够很好地保护手机。

5 结语

基于 Ansys workbench 平台,仿真计算了手机以 3 种不同方式从 1 m 高度跌落时受到的应力值,计算结果表明,跌落方式不同,手机屏幕受到的应力值的大小也不同,倾斜跌落时,屏幕受到的冲击应力最大,水平跌落时屏幕受到的冲击应力最小,在手机的 4 个角安装泡沫能够起到很好的保护作用,保证手机从 5 m 高度以任何方式跌落时手机屏幕不会摔碎。在今后的产品设计中,要选择强度高弹性模量小的玻璃材料作为屏幕材料。此外,建议在手机运输包装时,对手机的 4 个角安装一定厚度厚的三脚架泡沫,可以起到很好的防护作用。文中的研究成果可以为手机跌落安全性的研究提供参考,为手机的包装运输提供帮助。

参考文献

- [1] 祖景平,薛澄岐.手机跌落破坏仿真分析研究[J].中国制造业信息化,2006,35(11):68—70.
ZU Jing-ping, XUE Cheng-qi. Simulation Analysis of Mobile Phone Drop Failure[J]. China Manufacturing Informatization, 2006, 35(11): 68—70.
- [2] 段良.手机跌落实验及其计算机模拟技术研究[D].济南:山东大学,2009.
DUAN Liang. Mobile Phone Drop Experiment and Computer Simulation Technology Research[D]. Jinan: Shandong University, 2009.
- [3] 刘子尚,王飞,付志一,等.手机保护套防屏幕跌落破坏分析研究[C]//全国结构工程学术会议,2016.
LIU Zhi-shang, WANG Fei, FU Zhi-yi, et al. Analysis Of Screen Drop Damage By Mobile Phone Protective Sleeve[C]// 2016.
- [4] WU J, SONG Guo-shu, YE H C P, et al. Drop/Impact Simulation and Test Validation of Telecommunication Products[C]// Intersociety Conference on Thermal Phenomena, 1998.
- [5] 韩克明,孙志刚,林墨洲.手机触摸屏抗跌落仿真分析[J].计算机辅助工程,2013,22(2):418—420.
HAN Ke-ming, SUN Zhi-gang, LIN Mo-zhou. Simulation of Anti-drop of Mobile Phone Touch Screen[J]. Computer-Aided Engineering, 2013, 22(2): 418—420.
- [6] 孙亮,陈希良,奇明思.基于 LS-DYNA 的修枝机跌落仿真分析[J].包装工程,2017,38(3):33—37.
SUN Liang, CHEN Xi-liang, QI Ming-si. Simulation Analysis of Pruning Machine Drop Based on LS-DYNA[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(3): 33—37.
- [7] 陈佳.钢化玻璃安全性能的理论分析和实验研究[D].杭州:浙江大学,2014.
CHEN Jia. Theoretical Analysis and Experimental Study on the Safety of Tempered Glass[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [8] 辛文彤. Solidworks2012 中文版从入门到精通[M].北京:人民邮电出版社,2013.
XIN Wen-tong. Solidworks 2012 Chinese Version from Entry to Proficiency[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2013.
- [9] 鄂玉萍,王志伟.纸质缓冲材料能量吸收特性研究进展[J].振动与冲击,2010,29(5):40—45.
E Yu-ping, WANG Zhi-wei. Research Progress on Energy Absorption Characteristics of Paper Cushioning Materials[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(5): 40—45.
- [10] 邵毅明,肖凯.某重型汽车驱动桥壳结构优化设计建模[J].计算机仿真,2017,34(6):152—155.
SHAO Yi-ming, XIAO Kai. Optimization Design Modeling of a Heavy Duty Truck Drive Axle Housing[J]. Computer Simulation, 2017, 34(6): 152—155.
- [11] 蒲雪.基于 ANSYS/LS-DYNA 的电子产品跌落仿真[D].兰州:兰州交通大学,2016.
PU Xue. An Electronic Product Drop Simulation Based on ANSYS/LS-DYNA[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016.
- [12] 李旦,赵廷渝,王永虎.全尺寸手机跌落的 LS-DYNA 数值模拟[J].宜宾学院学报,2017(12):1—6.
LI Dan, ZHAO Ting-yu, WANG Yong-hu. LN-DYNA Numerical Simulation of Full-size Mobile Phone Drop[J]. Journal of Yibin University, 2017(12): 1—6.
- [13] 王永茂,申展.基于 Ansys 的不同截面密封圈密封性能仿真分析[J].包装工程,2017,38(19):158—163.
WANG Yong-mao, SHEN Zhan. Simulation Analysis of Sealing Performance of Seal with Different Sections Based on Ansys[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(19): 158—163.
- [14] 储雨奕.笔记本电脑的跌落仿真研究[D].南京:东南大学,2016.
CHU Yu-yi. Laptop Drop Simulation[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [15] 刘翔. HTR-PM 乏燃料贮罐跌落工况的安全性分析与计算[D].北京:清华大学,2015.
LIU Xiang. HTR-PM Spent Fuel Tank Drop Case Safety Analysis and Calculation[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [16] 高德,卢富德.聚乙烯缓冲材料多自由度跌落包装系统优化设计[J].振动与冲击,2012,31(3):69—72.
GAO De, LU Fu-de. Optimization Design of Multi-freedom Drop Packaging System for Polyethylene Cushioning[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(3): 69—72.
- [17] 叶翀,庄文娟,陈婷.我国物流包装的发展现状及问题初探[J].物流工程与管理,2012,34(5):3—5.
YE Chong, ZHUANG Wen-juan, CHEN Ting. Study on the Current Situation and Problems of Logistics Packaging in China[J]. Logistics Engineering and Management, 2012, 34(5): 3—5.
- [18] 董文亮.物流包装在汽车制造业入厂物流中的应用研究[J].中国包装工业,2016(4):147—149.
DONG Wen-liang. Study on the Application of Logistics Packaging in Logistics into Auto Industry[J]. China Packaging Industry, 2016(4): 147—149.