

基于有限元的 MEMS 惯性传感器保护装置研究

Research on Finite Element based MEMS Inertial Sensor Protection Device

马连成¹, 陆占国¹, 杨兴月¹, 刘洪臻¹, 荆洪迪^{2,3}, 张兴帆^{2,3}, 江海志¹, 刘德华⁴

(1. 鞍钢矿业齐大山分公司, 辽宁 鞍山 114000; 2. 东北大学, 辽宁 沈阳 110819;

3. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 4. 鞍钢集团矿业设计研究院有限公司, 辽宁 鞍山 114004)

摘要:本文基于齐大山现场爆破中的 MEMS 惯性传感器保护装置崩落的现场情况, 对该崩落撞击过程中的动力学特征进行了分析研究, 并利用有限元软件 Solidworks/Simulation, 对该 MEMS 惯性传感器保护装置进行模拟、仿真, 得出了 MEMS 惯性传感器保护装置结构件在崩落撞击过程里的应力、应变云图, 和不同结构件的加速度随时间变动轨迹的测量数据。通过模拟仿真结果, 系统分析了 MEMS 惯性传感器保护装置结构件受崩落撞击影响情况, 从而为矿山爆破时的 MEMS 惯性传感器保护装置抗崩落、撞击研究提供重要参考和依据。

关键词:露天矿; 爆破; 惯性传感器; 保护装置; 仿真

中图分类号: TD854

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2022)06-0024-06

Abstract: Based on the on-site situation of the caving of the MEMS inertial sensor protection device in the field blasting of Qidashan, this paper analyzes and studies the dynamic characteristics of the caving impact process and simulates and emulates the MEMS inertial sensor protection device using the finite element software Solidworks/Simulation, and derives the stress and strain clouds of the structural components of the MEMS inertial sensor protection device in the process of collapse impact, as well as the measurement data of the acceleration trajectory of different structural components as a function of time. On the basis of the simulation and emulation results, the system analyzes the structural components of the MEMS inertial sensor protection device affected by caving impact, thus providing an important reference and basis for the research on the performance of the MEMS inertial sensor protection device against caving and impact during mine blasting.

Key words: open-pit mine; blasting; inertia sensor; protection device; emulation

1 前言

在矿山开采中, 爆破是一个受诸多因素共同影响、内在规律十分复杂的工程, 其效果的优劣将直接影响后续作业的生产工艺, 以及企业的经济效益与生产安全。在矿山爆破中, 如果大块数量过多, 铲装效率就会降低, 二次破碎量增大, 铲装成本也会随之增加。因此, 利用 GPS 空间定位技术, 结合惯性导航技术, 研发一次性 MEMS 惯性传感器, 将该特定编号的 MEMS 惯性传感器置于炮孔特定深度之中,

利用无线通信技术, 实时获取爆破过程中各个传感器的运行轨迹, 即为传感器放置点爆破抛掷轨迹, 进而描绘出整个爆破抛掷过程, 以实现最佳的爆破效果, 其难点在于传感器的保护, 爆破过程中, 保护装置受力情况极为复杂, 保护装置崩落到地面时的瞬间冲击力对保护装置内部传感器的影响至关重要^[1]。爆破是一个快速过程, 对崩落到地面时的冲击力计算是一个非常复杂的力学问题, 保护装置在爆破崩落冲击力的作用下, 保护装置的三层缓冲介质层的塑性起主要作用, 三层缓冲介质层在冲击力作用下被压缩、扭曲等, 以上情况与材料性质、各种相关条件的设定及保护装置设计的形式和尺寸等相关。计算的方式很难完全考虑上述的各种因素, 所以研究崩落撞击时传感器保护装置的三层缓冲介质层的受力情况, 对传感器保护装置的爆破崩落撞击

[作者简介] 马连成(1970-), 高级工程师, 从事智慧矿山建设方向研究。

[引用格式] 马连成, 陆占国, 杨兴月, 等. 基于有限元的 MEMS 惯性传感器保护装置研究[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(6): 24-29.

力的建模及模拟分析研究成为关键问题,利用 Solidworks/Simulation 软件进行模拟分析^[2]。

利用 Solidworks/Simulation 软件对 MEMS 惯性传感器保护装置进行崩落分析,针对于具体 MEMS 惯性传感器保护装置,通过有限元软件的建模、分整个崩落的过程,得到传感器保护装置的三层缓冲结构的受力和变形等情况,对后续 MEMS 惯性传感器保护装置的可行性、合理性研究提供理论基础,对模拟过程中保护装置的薄弱环节进行重点分析研究。本文针对某矿山某次开采爆破时 MEMS 惯性传感器的崩落情况进行分析研究,模拟了在 MEMS 惯性传感器保护装置崩落撞击过程中的受力及变形情况,模拟了保护装置内 MEMS 惯性传感器的受力情况及与运动过程,利用 Solidworks/Simulation 软件模拟 MEMS 惯性传感器保护装置内部三层缓冲介质层在崩落撞击事的运动规律,得到保护装置对 MEMS 惯性传感器的保护的可靠性,验证了 MEMS 惯性传感器保护装置设计研制的可行性。

2 MEMS 惯性传感器保护装置崩落过程的动态特性

MEMS 惯性传感器保护装置主要包含了三层:内部缓冲介质层、中间骨架保护层、外部缓冲介质层,保护装置内外部缓冲介质层采用 PE 珍珠棉材料,能够在很大程度上减小振动动能,并且由材料本身的性质形变来实现传递和释放因崩落撞击产生的振动强度,在爆破过程中对 MEMS 惯性传感器进行有效的保护^[3]。

MEMS 惯性传感器保护装置的组成为外包装缓

冲介质层、中间骨架保护层、内包装缓冲介质层。其中传感器壳体材料为 ABS 塑料,传感器自带 PE 珍珠棉缓冲介质保护层,中间骨架保护层是基于 3D 打印的 PLA 塑料保护装置,外部缓冲介质层材料采用 PE 珍珠棉,PE 珍珠棉材料具有抗撞击力强、可塑性好、韧性强、防震性好等优点。

爆破崩落撞击是一个受力极其复杂、破坏极其短暂的过程,由材料本身的性质形变来实现传递和释放振动强度,减小振动动能。崩落过程中的动力学问题有以下 3 个主要方面:第一是崩落时的动力学特征,将崩落和撞击最开始的情况作为最初考虑的因数;第二是崩落和撞击运动中的动力学问题,将崩落运动过程结束作为最初考虑的因素;第三是具有一定减振特性材料的自由运动特征,将崩落撞击停止作为最初考虑的因素。

传感器保护装置崩落撞击分析时,简化为具有一定减振特性的弹性系统与刚体, MEMS 惯性传感器保护装置从如下图所示的高度 H 处崩落,崩落的过程共经过 3 个撞击阶段。

(1)自由下落运动时期:传感器保护装置开始自由下落运动,根据热力学能量守恒的动量守恒,重力势能转化为传感器保护装置运动的动能。如图 1(a)、1(b)所示,传感器保护装撞击地面的速度 $V_0 = \sqrt{2gH}$ 。

(2)撞击形变运动时期:撞击地面后,传感器保护装置与地面碰撞,也就是传感器保护装置对大地的崩落撞击,传感器保护装置的动能作为主要考虑的因素,变化趋势由开头的最大值降到零,靠近传感

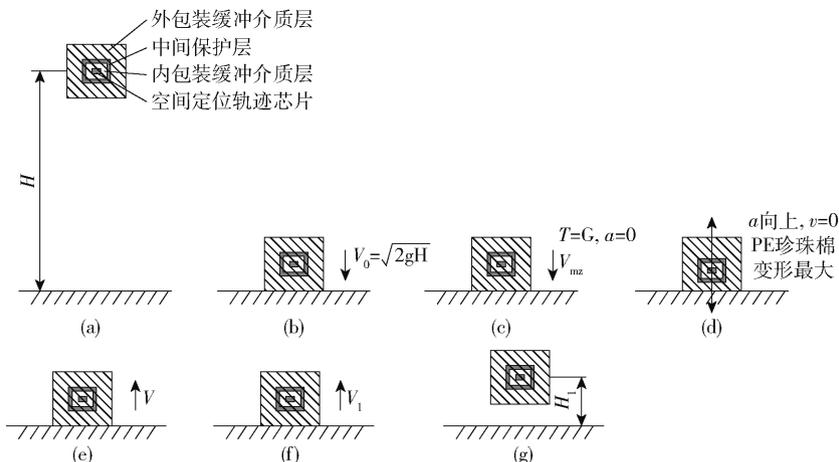


图1 保护装置崩落撞击的振动过程

器的介质层形成由于外力压缩等因素产生形变,具体如图1(c)所示,随之产生弹力 T ,因此传感器保护装置最内的缓冲介质层产生形变,变化趋势由零增加到最大。此时,传感器保护装置最中心位置的传感器加速度值不断增大,达到峰值,具体如图1(d)所示。

(3) 撞击复原运动时期: 传感器保护装置最内的缓冲介质层的弹力逐步释放,传感器保护装置最中心位置的传感器动能的变化趋势为由零逐渐增大,并且随之产生方向向上的运动,刚体地面由于传感器保护装置最内的缓冲介质层产生形变作用于传感器,将振动作用力传递给传感器。具体如图1(e)、1(f)、1(g)所示。

采用能量强度理论、功能平衡理论和振动波理论等对崩落撞击时的物体进行分析,研究表明,物体崩落时的位置距离地面越高,物体撞击时的受力和加速度也随之增大,如果崩落高度一定的前提下,保护装置在爆破时因撞击等因素引起振动后,撞击开始时的加速度和受力情况与保护介质层材料有着密切关系。所以,研究保护装置介质层材料的受力变形等情况非常重要,由于常规计算无法考虑到全部的影响因素,更加无法确定各种系数,所以,应用Solidworks/Simulation软件进行模拟分析,解决保护装置设计过程的问题^[4]。

3 MEMS 惯性传感器保护装置崩落仿真

传感器保护装置的爆破崩落模拟可以确定保护装置的结构形式,尺寸及受力情况。针对现场试验某次矿山开采爆破时MEMS惯性传感器应用情况,考虑MEMS惯性传感器保护装置的爆破崩落全程的各种外界因素进行模拟,通过Solidworks/Simulation软件模拟结果,对MEMS惯性传感器保护装置组成、各缓冲层的结构形式和尺寸等方面的安全性进行模拟分析检验^[5]。

3.1 仿真工况

实际应用的传感器结构几何模型比较复杂,通常将传感器实物简化成相对简单的结构形式。某MEMS惯性传感器主体材料为ABS塑料,使用ABS塑料材质的简单结构形式替代实际应用的MEMS惯性传感器,通常将大地作为刚性的物体,MEMS惯性传感器保护装置崩落至大地的过程就是整个崩落的模拟过程。通过传感器在爆破过程中的情况可

知,该MEMS惯性传感器保护装置从约10 000 mm的高度掉落地面,以等效崩落高度为10 m、初速度为零的初始状态开始崩落撞击的运动过程。

3.2 有限元模型

使用SolidWorks软件建立MEMS惯性传感器保护装置模型,具体如图2所示。传感器保护装置模型主要包含了三层,MEMS惯性传感器为PE珍珠棉缓冲介质保护层整体包围式包装,内置于PLA塑料保护装置中,外保护材料为PE珍珠棉材料。为了充分的验证出传感器保护装的结构尺寸设计的合理性,将Solidworks软件建模时的MEMS惯性传感器结构尺寸与试验过程中应用的相同,PLA塑料保护装置厚度与试验过程中应用的相同,外层保护装置的减振材料PE珍珠棉对传感器进行保护时每个面的厚度方向尺寸不少于10 mm^[6]。

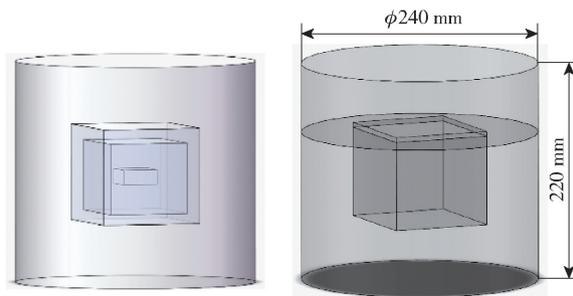


图2 内外多层减震复合结构

传感器保护装置模型各结构件的材料参数见表1。PE珍珠棉为保护装置模型中的主要材料,对传感器保护装置模型里的各材料参数进行修正,使模拟仿真更加符合试验工况,并依据试验现场的工况进行研制。传感器保护装置划分的网格数量对计算

表1 传感器保护装置模型的材料参数

名称	外部缓冲介质层	中间保护骨架
建模示图		
使用材料	高密度 PE (SS)	聚乳酸 polylactic acid
模型类型	线性弹性同向性	线性弹性同向性
默认失败准则	最大 von Mises 应力	最大 von Mises 应力
屈服强度	6.894 76e + 06 N/m ²	3.189e + 08 N/m ²
张力强度	3.4e + 07 N/m ²	3e + 07 N/m ²
弹性模量	1.723 69e + 08 N/m ²	2e + 09 N/m ²
泊松比	0.3	0.394
质量密度	905 kg/m ³	1 020 kg/m ³

精度有影响,网格数量过多或多少都不利于模拟分析,选取合适的网格数量对后续模拟非常重要,传感器保护装置模型网格如图 3 所示。传感器在爆破过程中崩落撞击时, MEMS 惯性传感器保护装置的撞击方向为大地,所以可以将大地作为固定的刚体。保护装置与大地间的接触设置为棱边与面撞击,保护装置以圆柱棱边与大地发生撞击。

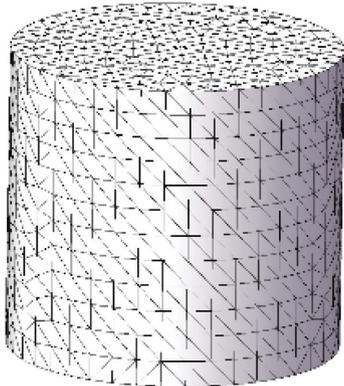


图 3 网格剖分图

4 仿真结果分析

图 4 所示为传感器保护装置的等效应力云图,传感器保护装置的最大应力集中在最外保护层 PE 珍珠棉棱边中心位置,最大值是 4.438×10^{-6} MPa,从图中可以看出最外层 PE 珍珠棉上的应力并不大,处于 4.438×10^{-6} MPa 以下(可是因为未涉及试验过程中 MEMS 惯性传感器保护装置内的结构件之间面接触的摩擦等情况,模拟结果比试验现场数值略大)。

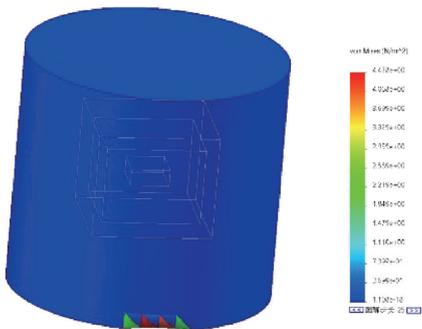


图 4 保护装置的等效应力云图

保护装置的应变主要表现在保护装置最外层保护层 PE 珍珠棉上,撞击过程中最大的应变发生在保护装置最外层 PE 珍珠棉棱边与大地接触的位置,保护装置最外层 PE 珍珠棉棱边发生较大的形变,以此来吸收掉由爆破撞击传递进来的能量,撞击仿真模拟符合试验的工况。图 5 所示为保护装置的

等效应变云图。

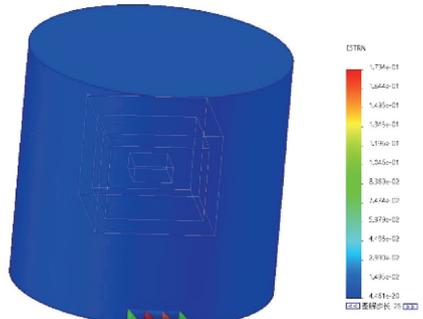


图 5 保护装置的等效应变云图

节点 75121 位于保护装置最外层 PE 珍珠棉棱边应力最大的位置,图 6 所示为节点 75121 的加速度响应曲线。节点 32 位于保护装置最外层 PE 珍珠棉棱边中间位置,如图 7 所示是节点 32 处的加速度响应曲线。保护装置最外层 PE 珍珠棉节点上的加速度响应的变化规律是剧烈震荡后,急剧减小,但是保护装置最外层 PE 珍珠棉中间位置的加速度的变化规律在撞击发生后,一直持续震动,从最开始的缓慢直至后来的急剧变大,最后震荡幅度降低,传感器保护装置最内部缓冲介质层的加速度对比于传感器保护装置最外层急剧降低,所以,保护装置介质层 PE 珍珠棉能够减小振动动能,由材料本身的性质形变来实现传递和释放振动强度,传感器保护装置最外层传到传感器保护装置内部介质层后,受力和加速度均大幅度降低,对 MEMS 惯性传感器进行防护。

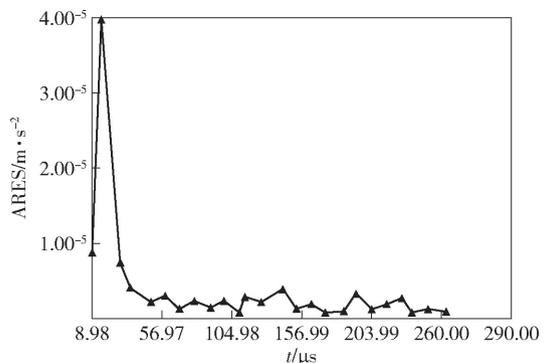


图 6 节点 75121 加速度响应曲线

5 现场试验

5.1 试验基础条件介绍

实验场地是鞍钢齐大山铁矿-105 m 水平采区,在实验前对采场基本参数进行采集,爆破类型为压渣爆破,共计 62 炮孔,采用矩形布孔方式,孔距 7.5 m,排距 6 m,逐孔起爆,炮孔直径 250 mm,炮孔

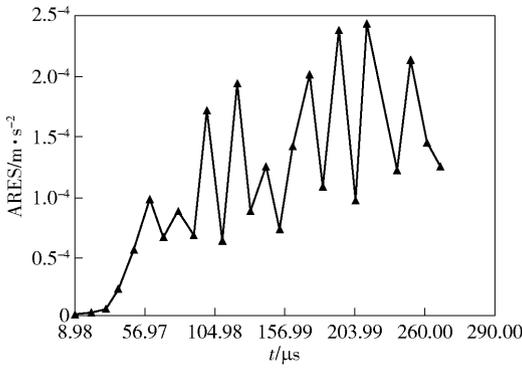


图7 节点32加速度响应曲线

深度 17.5 m,超深 2.5 m,阶段高度 15 m,炸药类型为乳化炸药和铵油炸药,单孔最大药量为 650 kg,设计总药量为 37 000 kg。

5.2 芯片保护装置布置方案

本实验位置在-120 m 水平,为了更好的研究矿岩运动规律,分别在采区选取了 8 个炮孔作为试验炮孔,全部放置 SD 卡芯片,共放置 12 个,编号分别为 1-1、1-2、1-3、1-4、2-1、2-2、2-3、2-4、2-5、2-6、2-7 和 2-8,其中 1-1、1-2、1-3、1-4 放置在第一排炮孔外部边坡的地表附近,用来测量边坡附近的飞石运动轨迹,2-1、2-2、2-3 和 2-4 放置在第二排炮孔地表附近,2-5、2-6、2-7 和 2-8 布置在地下 5 m,现场芯片保护装置安装如图 8 所示。

本次实验爆破芯片均成功获取了爆破轨迹信息,保护装置效果良好,下面选取芯片 1-1 获取的数据进行演示,其中:芯片 1-1 位于第一排第一列炮孔外的边坡地表附近,由图 9 可知,其隆起高度约 2.7 m,X 正方向水平位移约为 11 m,Y 负方向水平

位移约为 2.3 m,属于第一排炮孔的前冲,符合齐大山露天矿爆破实际情况。

6 结论

根据矿山爆破 MEMS 惯性传感器的试验应用情况,对传感器保护装置崩落撞击时受力情况及各方面因素总结研究,通过使用 Solidworks/Simulation 软件对矿山爆破 MEMS 惯性传感器进行崩落撞击模拟仿真,因此获得如下结果,对该传感器保护装置安全性进行了充分的验证,为后期研究抗撞击、抗崩落的传感器保护装置结构件与试验应用推广提供有益的理论基础。

(1)在全部崩落撞击运动中,崩落运动过程中传感器保护装置受力主要集中在保护装置最外层 PE 珍珠棉上,传感器保护装置产生的应力均小于 4.438×10^{-6} MPa,远小于传感器主体材料的屈服强度,因此传感器不会发生破坏,传感器保护装置材料选取、外形尺寸研制合理。

(2)崩落过程中传感器保护装置形成的应变大部分体现在在保护装置介质层,因此保护装置介质层可以由材料本身的性质形变来实现传递和释放振动能量,传感器保护装置采用的介质层 PE 珍珠棉,可以有效的保护传感器不被撞击损坏,传感器保护装置结构尺寸及材料设计在试验过程中能有效保证传感器正常工作。

通过 Solidworks/Simulation 软件对矿山爆破 MEMS 惯性传感器保护装置进行模拟分析,方便、高效,对现场试验提供理论支撑,对传感器保护装置在实际生产和设计提供理论指导。

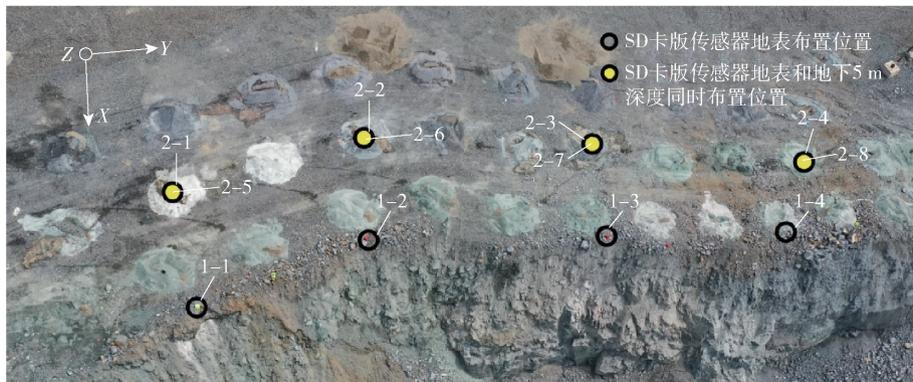


图8 现场爆破定位芯片埋置方案设计

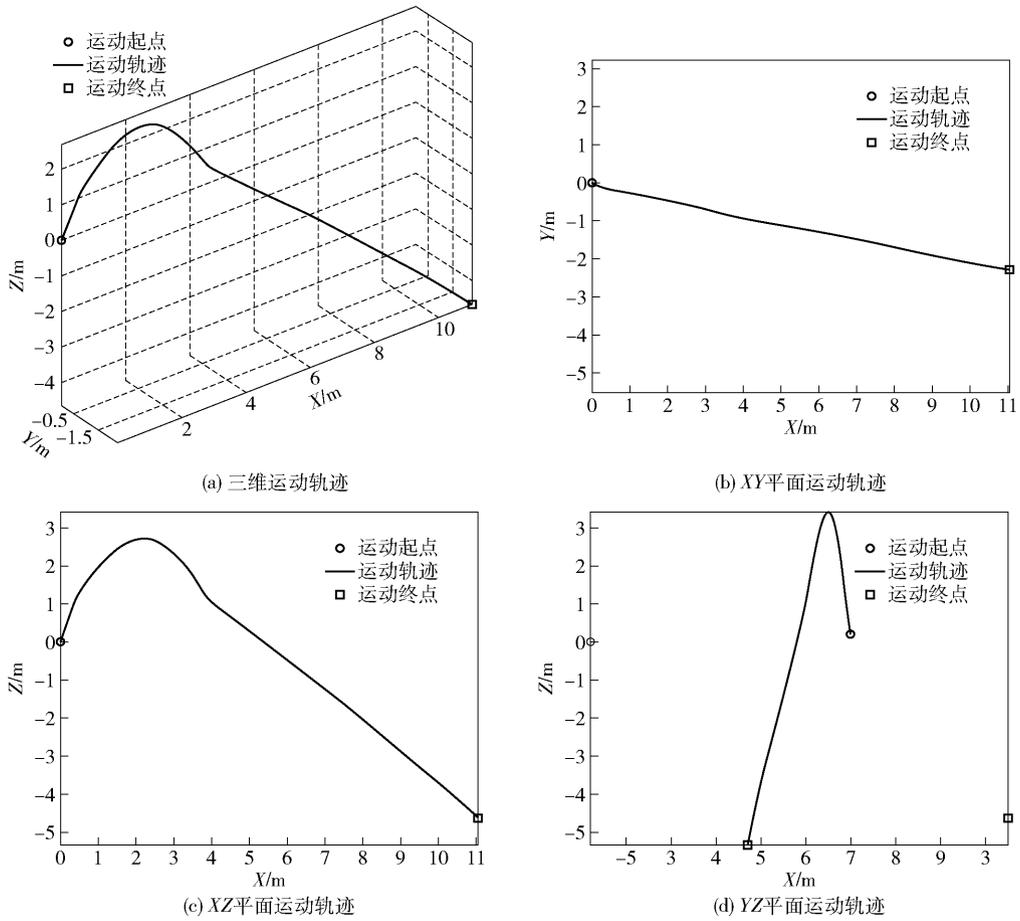


图9 芯片1-1 三维和二维运动轨迹

[参考文献]

[1] 刘梦真. “组合材料+缓冲结构”的包装设计方法研究[D]. 西安:西安理工大学, 2021.

[2] 罗思源, 兀光波, 王延琦, 等. 某运输包装件的跌落冲击仿真分析[J]. 机械与电子, 2016, 34(8):16-20.

[3] 彭国勋. 缓冲包装动力学[M]. 长沙:湖南大学出版社, 1989.

[4] 路乐意, 孙忠伟, 卢强, 等. 电机包装件跌落分析及仿真[J]. 微电机, 2021, 54(4):108-110, 114.

[5] Wang Y Y, Lu C, Li J, et al. Simulation of drop/impact reliability for electronic devices [J]. Finite Elements in Analysis & Design, 2005, 41(6):667-680.

[6] 车宪香. 包装件崩落模拟计算与缓冲结构优化[D]. 济南:山东大学, 2013.