# 小型航天精密仪器运输包装箱设计及试验

### 孙福佳,杨明,陈然,陈娟芳,张永琴

(天津航天机电设备研究所,天津 300458)

摘要:目的 针对传统小型航天精密仪器铝制运输包装箱加工周期长、研制成本高、定制化产品多导致 外形尺寸大小不一致,存在不易管理和运输的问题,设计一种新型包装箱。方法 通过选择新型箱体材 料、设计包装箱箱体结构、更改加工工艺形式、改变产品安装方式和内部防护减振材料,自主研发一种 适用于商业运输的非金属精密仪器运输包装箱。结果 经过模拟严苛商业环境运输试验,该小型航天精 密仪器运输包装箱可实现一箱多装,对产品具有隔振、防潮防护等功能,且节约成本、缩短研制周期, 便于管理、易于运输。结论 该包装箱可满足小型航天精密仪器的运输和贮存,其结构形式及试验结果 可为后续此类包装箱的研制提供参考。

关键词: 航天精密仪器;运输包装箱;设计;试验 中图分类号: TB485.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2022)23-0259-09 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.23.031

# Design and Experiment of Distribution Packaging Box for Small-sized Aerospace Precision Instrument

SUN Fu-jia, YANG Ming, CHEN Ran, CHEN Juan-fang, ZHANG Yong-qin

(Tianjin Institute of Aerospace Mechanical and Electrical Equipment, Tianjin 300458, China)

**ABSTRACT:** The work aims to design a new type of packaging box in view of the long processing cycle, high development cost and inconsistent dimensions and difficult management and transportation caused by many customized products of the traditional aluminum distribution packaging box for small-sized aerospace precision instrument. A non-metallic precision instrument distribution packaging box suitable for commercial transportation was designed by selecting new box materials, designing the box structure, altering the form of processing technology, changing the way of product installation and internal protective damping materials. Through the simulation test on harsh commercial transportation, the small-sized aerospace precision instrument distribution packaging box could realize multiple packing in one box, had the functions of vibration isolation, moisture protection, etc. and saved the cost, shortened the development cycle, and was easy to manage and transport. The packaging box can meet the transportation and storage of small-sized aerospace precision instrument, and its structure and test results can provide reference for the subsequent development of this kind of packaging box.

KEY WORDS: aerospace precision instrument; distribution packaging box; design; experiment

小型航天精密仪器在运输及贮存过程中,一般对 振动冲击、温度、湿度、防静电等环境条件有一定要

求<sup>[1]</sup>,因此需要设计一个具有防尘、防雨、防静电、 缓冲隔振、恒温、恒湿等功能的包装容器用于小型精

收稿日期:2022-04-18 作者简介:孙福佳(1991-),女,本科,工程师,主要研究方向为航天器包装运输防护。 密仪器的运输及贮存。

传统小型航天精密仪器包装箱多采用铝合金材 质,根据所装产品的尺寸及形状,单独定制包装箱 及内部产品固定接口。导致每次运输时,会有多个 不同尺寸的小包装箱一起运输,不仅浪费运输工具 空间,还不易管理和运输固定。为了满足小型航天 精密仪器的运输和贮存,并优化传统精密仪器箱的 结构形式,通过调研分析并结合用户需求,设计一 款非金属箱体和非金属减振材料相结合的包装箱, 全面突破传统包装箱金属材料的形象,其适用于星 上中小型设备的运输,具备防静电、抗高温、抗冲 击、质量轻、易运输、研制周期短,成本低等特点<sup>[2]</sup>。 基于某型号任务,产品需通过商业飞机由国内运输 至国外,模拟商业运输的严苛环境开展了一系列试 验验证,试验结果证明其功能、性能安全可靠,并 成功完成某型号的运输工作。

# 1 包装箱结构设计

### 1.1 箱体设计

小型航天精密仪器运输包装箱(以下简称包装 箱)设计需考虑兼容性高、操作简单、轻便便携、成 本低、研制周期短、安全可靠等因素。

该包装箱材料选择线性低密度聚乙烯(LLDPE), 采用滚塑工艺一体成型。使用滚塑工艺制作的包装 箱质量小、坚固经久耐用、维护成本低;密封性能 良好,具有较好的防尘、防雨、防沙尘、防污染、 防盐雾和防霉菌等功能;研制周期短、成本低,适 合批量生产<sup>[3]</sup>。材质性能稳定,无挥发性,具有较 好的环境适应性;箱子结构强度好,轻便便携<sup>[4]</sup>。 非金属材料包装箱由于其材料的特性,具备可重复 使用的特点,可提高使用效率。

箱体由箱盖、箱底两部分构成, 箱盖、箱底间有 密封圈,通过蝴蝶搭扣进行闭合压紧,有防雨、防尘功 能(图1)。包装箱外型尺寸为901mm(长)×752mm (宽)×615 mm (高), 质量约 15 kg, 该包装箱尺寸 具有一定的兼容性,可满足不同型号小型产品的运 输<sup>[5]</sup>。箱体是一体成型的凹凸肋条结构,具有足够强 度。箱盖两侧设计4个与箱体一体式的把手,方便箱 盖开合、搬运。箱底设置4个军用级搬运把手,可用 于箱体搬运、起吊及运输时固定。包装箱底部设置叉 车槽,可进行叉车搬运。箱盖箱底设置码垛接口,满 足多层码垛运输。为防止运输过程中由于箱内外压强 的变化导致箱体因内外压差较大而变形或损坏,包装箱 侧壁设置螺纹式防水、防尘透气阀,保证箱内、外气压 平衡。包装箱箱体具有防静电功能,箱体表面电阻率可 达到 10<sup>8</sup>~10<sup>9</sup> Ω,体积电阻率可达到 10<sup>9</sup>~10<sup>10</sup> Ω·m, 可满足精密仪器的防静电要求。



1.箱盖; 2.提手&吊点; 3.箱底; 4.防水透气阀; 5.蝶形搭扣。
 图 1 包装箱结构
 Fig.1 Structure of the packaging box

### 1.2 防护隔振设计

小型航天精密仪器具有数量多,尺寸多样、形状 复杂等特点,为了充分利用包装箱内部空间,使包装 箱具有一定的兼容性,选用防静电高密度发泡手撕海 绵填充包装箱(图2)。

防静电手撕海绵可根据产品形状随意手撕成型, 然后将产品放进手撕出来的形状内固定。手撕海绵 选择格子的规格为 15 mm×15 mm,单张海绵厚度为 25 mm,每台包装箱内可放置 15 层海绵。手撕海绵 具有高强缓冲和抗震能力,其手感细腻,具有较强的 回弹性,除起到一般海绵的缓冲减振作用外,还具有 防静电作用,可对敏感器件起到有效防护<sup>[6-9]</sup>。手撕 海绵是一种环保型材料,保温、防潮、抗老化、抗腐 蚀,且防静电海绵采购周期短、易操作,可根据产品 的形状安装固定产品,对精密仪器可起到很好的隔振 和防护作用。防静电手撕海绵可有效解决小型精密仪 器产品数量多、种类杂的装箱难题。

### 1.3 产品安装固定

根据产品大小尺寸的不同,包装箱内部设计2种 固定方式,一种为单层固定,另一种为双层固定。产 品装箱时以"高度相近产品装在同一包装箱,单层装 箱产品质量要均匀,双层装箱遵循下重上轻、下大上 小"的原则设计产品装箱方案。

1)单层固定。内部为单层结构的包装箱用于放置尺寸较大的产品。由于包装箱底部为凹凸不平的结构,为了给防护海绵提供一个平面,在包装箱底部放置一层 10 mm 的 PE 海绵, PE 海绵材质较硬,可有效弥补不平的箱底,PE 海绵顶部再放置防护海绵,然后根据产品的尺寸直接将防护海绵撕成产品的形状,最后将产品放置在已成型的防护海绵内即可。

2) 双层固定。内部为双层结构的包装箱用于放 置尺寸较小的产品。为防止运输途中由于冲击较大导 致上、下层产品之间发生碰撞,两层产品之间放置一 层 5 mm 的塑料板和 10 mm 的 PE 板,塑料板两端各



图 2 箱内防护海绵 Fig.2 Protective sponge in the box

设置一条环形布带作为提手,用于整体拿出上层产品,PE板质地较硬,可起到减缓压强的作用。

3)装箱清单设计。由于每台包装箱内放置多种产品,为了快速方便地找到所需产品,在包装箱箱盖内部 及箱体外侧侧壁均设置装箱清单,装箱清单设计为标签 式,防潮防水、易更换。装箱清单内容包含产品位置、 产品代号、产品名称和产品数量,并注明相关人员的联 系方式,方便查找,简单明了,便于操作人员查看。

# 2 试验验证

以某型号航天精密仪器从中国运输到国外为背景,包装箱会通过公路、空运2种运输方式转运到国外,厂房内通过叉车进行转运。经过与用户方沟通,包装箱在公路运输过程中会有专人护送运输,到达机场后则交给机场人员负责转运及装机,因此机场转运及装机过程为不可控路段,此试验用于模拟商业飞机转运途中可能经历的较为严苛的运输、转运状况,因此根据用户方提出的研制要求开展了模拟公路运输试验<sup>[10-11]</sup>、模拟运输过程中的跌落试验<sup>[12]</sup>、码垛强度验证试验、高低温存储试验和湿度控制试验,进一步评估方案的可行性,并为后续此类产品设计提供经验。

### 2.1 公路跑车试验

公路跑车试验选用一量卡车,检测设备使用 DH5902 动态信号采集分析系统,包装箱分2种状态 放置于车厢前端部。一种为2台包装箱并排放置,另 一种为2台包装箱码垛放置,通过栓紧带将包装箱固 定在车厢上,随机选择3种不同精密仪器模拟件,在 其特定的装箱状态下进行试验,见图3。

1)试验条件。试验选用2台包装箱,其中1号 包装箱内安装2件较小模拟件,2号包装箱内安装1 件较大模拟件。1号箱内1件模拟件顶部中心和底部 中心位置各布置1个传感器,2号箱内在模拟件底部 中心位置布置1个传感器。

2)试验过程。跑车试验路线分别包括三级公路、 二级公路、高速公路、减速带。共试验2种装车状态, 每种状态跑车路线及速度相同。第1种状态是2台包 装箱并列平放于运输车车厢前端;第2种状态是2台 包装箱叠放在一起固定于运输车车厢前端。

3)试验结果。试验过程中最大加速度为2台箱子并列放置运输,并在高速公路刹车时,加速度值为4.18g;最小加速度值为2台箱子码垛运输,并在高速公路刹车时,加速度值为1.1g(表1和表2)。



图 3 包装箱跑车试验 Fig.3 Test of packaging box in running truck

公路级别	速度/(km·h <sup>-1</sup> )	箱子	最大加速度/g		
	30	1号上部传感器	2.96		
		1号下部传感器	3.52		
一石工人口		2号	3.39		
二级公路		1号上部传感器	3.10		
	40	1号下部传感器	3.65		
		2 号	3.60		
二级公路	40	1号上部传感器	3.26		
		1号下部传感器	2.77		
		2 号	2.25		
高速公路	80	1号上部传感器	2.88		
		1号下部传感器	2.46		
		2 号	1.66		
高速公路刹车	80~0	1号上部传感器	3.82		
		1号下部传感器	4.18		
		2号	3.83		
减速带		1号上部传感器	3.60		
	40	1号下部传感器	3.87		
		2号	3.36		

表 1 2 台箱子并列放置跑车数据 Tab.1 Data for two boxes placed side by side in running truck

# 表 2 2 台箱子码垛放置(1号在上、2号在下)跑车数据 Tab.2 Data for two boxes stacked ( $1^{#}$ up and $2^{#}$ down) in running truck

公路级别	速度/(km·h <sup>-1</sup> )	箱子	最大加速度/g
		1号上部传感器	2.74
	30	1号下部传感器	2.96
一切人口		2号	2.68
二级公路		1号上部传感器	2.87
	40	1号下部传感器	2.88
		2 号       1 号上部传感器       1 号下部传感器       2 号	3.47
	40	1号上部传感器	2.86
二级公路		1号下部传感器	2.84
		2号	1.59
高速公路	80	1号上部传感器	2.96
		1号下部传感器	3.11
		2号	2.26
		1号上部传感器	2.21
高速公路刹车	80~0	1号下部传感器	2.28
		2号	1.10
减速带		1号上部传感器	3.49
	40	1号下部传感器	3.98
		2号	3.78

### 2.2 跌落试验

跌落试验参照 GB/T 4857.5—1992《包装运输包装件跌落试验方法》开展。试验设备使用法国 SEREME(1 500 kg)脱落吊钩试验机,开展跌落试验;通过使用2t叉车叉包装箱模拟在厂房内通过叉 车转运的工况。

试验继续使用1号箱和2号箱,增加3号箱,3 号箱内安装1件模拟件,传感器布置于模拟件底部中 心位置,开展跌落试验(图4)。

试验要求如下。

 1)执行垂向、棱边(长边)跌落各 5 次,跌落 高度为 25 mm。

2)执行垂向、棱边(长边)跌落各 5 次,跌落 高度为 50 mm。

3)利用叉车抬起包装箱(单个包装箱)到 600 mm 高度,以正常操作停放到地面上,该种操作 5 次。

4)利用叉车抬起包装箱(单个箱)到 600 mm 高度,以最快降落速度的操作方式将包装箱停放到地 面上,该种试验5次。

5)两层码垛状态执行状态见图 4。

试验结果如下。

2种跌落试验测试后,包装箱未发生任何破损和 变形。跌落机跌落时,3种配重分别执行25、50mm 面跌落和棱边跌落,以及2台包装箱码垛一起进行面 跌落和棱跌落,此试验过程中平均加速度最大值为7.94g,最小值为2.74g,试验结果见表3和表4。 叉车跌落时,3种配重分别执行600 mm快速降落和 慢速降落,以及2台包装箱码垛一起快速、慢速降落, 试验过程中:3种配重分别单独快速降落,平均加速 度最大值为4.25g,最小值为2.25g;3种配重分别单 独慢速降落,平均加速度值均小于0.5g;1号箱在上、 2号箱在下码垛快速降落时,平均加速度值最大为1 号箱的1.24g,最小值为2号箱的0.76g;1号箱在上、 2号箱在下码垛慢速降落时,平均加速度值最大为1 号箱的0.76g,最小值为2号箱的0.29g。

### 2.3 码垛强度验证试验

包装箱在运输过程中为了节省空间,存在码垛运 输的工况。为了充分验证包装箱箱体的强度,开展包 装箱码垛强度验证试验。

经了解,包装箱在运输时最多会存在3层码垛的 工况,因此,此次试验随机选取3台包装箱开展试验。 试验配重以包装箱内所装产品的最重情况为参考,选 取配重块单块质量为35kg,试验过程如下。

将3块35kg 配重块分别放置于3台包装箱内, 合箱,扣紧搭扣。将第1台包装箱放置于平坦地面上, 将第2台包装箱放置于第1台之上,再将第3台包装 箱放置于第2台之上,2台包装箱摆放整齐、平稳, 静置2h。



图 4 跌落试验现场 Fig.4 Drop test site

表 3 跌落机跌落试验数据 Tab.3 Test data from drop tester				
试样编号	跌落高度/mm	平均加速度/g		
	25	3.54(上部传感器)		
	25	4.07(下部传感器)		
1 日	50	4.61(上部传感器)		
15	50	5.04(下部传感器)		
	25	2.74(上部传感器)		
	25	4.57(下部传感器)		
	25	5.63		
2号	50	7.94		
	25	2.83		
	25	3.39		
3号	50	4.05		
	25	5.29		
	50	6.97		
	25	3.18(1号上部传感器)		
	25	3.64(1号下部传感器)		
1、2号摞在一起,1号在上、2	25	5.73(2号传感器)		
号在下	50	4.93(1号上部传感器)		
	50	5.62(1号下部传感器)		
	50	7.81(2号传感器)		

### 表 4 叉车跌落试验数据 Tab.4 Drop test data from forklift truck

试样编号	速度	加速度平均值/g
1号	慢速	未触发
	快速(上部传感器)	2.81
	快速下部传感器	3.23
2 号	慢速	无
	快速	4.25
3号	慢速	无
	快速	2.25
1、2 号摞在一起,1 号 在上、2 号在下	慢速 1 号上部传感器	0.6
	慢速 1 号下部传感器	0.76
	慢速 2 号	0.29
	快速 1 号上部传感器	1.18
	快速 1 号下部传感器	1.24
	快速 2 号	0.76

试验结果: 2h 后将包装箱打开, 经观察 3 台包 装箱箱体均无任何破损和永久变形。

# 2.4 高低温试验

包装箱本体材料为线性低密度聚乙烯<sup>[13-14]</sup>,为了充 分验证材料的抗高、低温性能,依据 GB/T 4857.2—2005 《包装运输包装件基本试验第 2 部分:温湿度调节处 理》将包装箱分别开展低温和高温试验<sup>[15]</sup>。试验前, 将 2 台包装箱在常温环境下静置 24 h 后,然后分别 放入高低温湿热试验箱 (SDJ625A)内。低温试验温 度设置为-45 ℃,试验时间为 8 h;高温试验温度设 置为 55 ℃,试验时间为 8 h。

试验后对包装箱表面及其金属件进行检查,结果显示包装箱表面及其金属件表面均无任何破损和永 久变形。

## 2.5 控湿能力验证试验

包装箱箱盖和箱底间设计有一条密封圈,合箱后 通过合箱搭扣压紧密封圈,使包装箱具有防尘防雨的 功能。由于包装箱无主动控湿功能,因此要想使包装 箱内保持一定的湿度来满足精密仪器的贮存要求,包 装箱内需放入一定干燥剂来控制箱内湿度。包装箱箱 体由滚塑工艺一体成型,箱体本身不会进入水或水蒸 气,唯一可能存在缝隙会进入水蒸气的地方只有箱 盖、箱底合箱的法兰处。另箱体侧壁设置有一防水透 气阀,主要用于平衡箱内外气压,此处也有可能进入 少量水蒸气,因此选择合箱法兰处和透气阀处作为放 置干燥剂的地方。此试验主要用于检验包装箱内放置 干燥剂的量对包装箱内湿度的的影响,为后续包装箱 使用提供参考。

1)试验条件。试验设备依然使用"高低温湿热试 验箱(SDJ625A)",继续选择1号箱和2号箱开展 试验。试验前,1号箱内放置5包干燥剂(50g/包), 分别放置于合箱法兰四周和透气阀处。2号箱内放入 10包干燥剂(50g/包),摆放位置与1号箱相同,但 数量增加1倍。1号箱和2号箱内各放置2台温湿度 表,1号、2号温湿度表放置于1号箱内,3号、4 号温湿度表放置于2号箱内。试验前将2台包装箱 放置于常温环境24h后,扣紧箱盖,再放入恒温 (32°C)、恒湿(相对湿度为96%)的环境中,持续 试验7d。

2)试验结果。试验完成后,将每台包装箱内的 温湿度表取出,通过专用软件将温湿度表内试验数据 导出并整理:由于1号温湿度表试验过程中电池电量 不足,导致试验数据紊乱,试验数据不作为参考;试 验结果证明,包装箱在使用时,放置干燥剂对控制湿 度有显著效果;针对本体积包装箱,分散放置500 g 干燥剂即可将箱内相对湿度控制在40%以内。试验结 果见图 5—8。 经分析 2 号温湿度表显示相对湿度最大值为 63.4%,温度最大值为 31.4 ℃。



Fig.5 Data of hygrometer in 2<sup>#</sup> box

经分析 3 号温湿度图显示相对湿度最大值为 31.6%,温度最大值为 31 ℃。



Fig.6 Data of hygrometer in 3<sup>#</sup> box

经分析 4 号温湿度表显示湿度最大值为 34.9%, 温度最大值为 30.9 ℃。





图 8 2、3、4 号温湿度表数据汇总 Fig.8 Summary of data of hygrometers in2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup> and 4<sup>#</sup> boxes

### 2.6 小结

经过以上试验可以看出,包装箱码垛强度、抗高 低温性能和控湿能力均可满足精密仪器的使用要求。 针对跑车试验和跌落试验,该精密仪器要求经包装箱 隔振后传到产品上的最大加速度值不大于 3g,包装箱 经过公路跑车试验和跌落试验验证后,试验结果大部 分满足技术要求,但部分结果存在超差情况,经过与 用户方一起分析试验数据,认为包装箱的减振性能可 以满足产品使用,部分超差项可作为禁止运输工况对 运输方提出运输要求。

# 3 结语

小型航天精密仪器包装箱箱体材质及内部防护 材料均选用了异于传统形式的非金属材料。与以往传 统包装箱相比,此包装箱在方便标准化管理、提升产 品形象、提高产品防护能力等方面效果明显,且成本 低、研制周期短、兼容性高、简易便携,可解决小型 精密仪器数量多、种类杂的装箱难题。经过试验验证, 可看出此形式包装箱适用于小型航天精密仪器的运 输和贮存。此外,此类包装箱还可以应用于航空、航 海领域装备配套,部队后勤、科学探测、影视器材等 领域也可应用,市场前景非常广阔。

#### 参考文献:

 [1] 肖刚,郝文宇,张国芬,等. 航天器空运包装箱的研制及其运输试验评价[J]. 航天器环境工程,2010, 27(6):795-799.

XIAO Gang, HAO Wen-yu, ZHANG Guo-fen, et al. The Development of Containers for AirTransport of SpacecraftandanEvaluation[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(6): 795-799.

 [2] 王庆元. 一种用于商业航天卫星运输的智能包装箱设计[J]. 科技视界, 2019(27): 15-16.
 WANG Qing-yuan. A SmartPacking Box Design for Commercial Space Satellite Transportation[J]. Science

& Technology Vision, 2019(27): 15-16.

- [3] RAMKUMARPL, KULKARNID M, CHAUDHARI V V. Parametric and Mechanical Characterization of Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) Using Rotational Moulding Technology[J]. Sadhana, 2014, 39(3): 625-635.
- [4] 廖承生,赵雪梅,武致军.新型航天全塑包装箱的应用研究[J]. 军民两用技术与产品,2017(11): 56-58.
  LIAO Cheng-sheng, ZHAO Xue-mei, WU Zhi-jun. Application Research of New Space All-Plastic Packing-Box[J]. Dual Use Technologies & Products, 2017(11): 56-58.
- [5] 李海连,李建永,罗春阳,等.大型精密仪器运输包装箱设计及试验[J].包装工程,2018,39(17):124-128.
  LI Hai-lian, LI Jian-yong, LUO Chun-yang, et al. Design and Experiment of theTransportation Packaging Box for Large-Scale Precision Instruments[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(17): 124-128.
- [6] LIU Chun-chuan, JINGXing-jian, DALEY S, et al. Recent Advances in Micro-Vibration Isolation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 56/57: 55-80.
- [7] 刘继飞. 缓冲包装材料性能的分析方法与研究进展
  [J]. 包装工程, 2014, 35(7): 149-155.
  LIU Ji-fei. Analysis Method and Research Progress in Cushioning Performance of Cushion Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(7): 149-155.
- [8] 刘文华. 泡沫塑料在缓冲包装上的应用及设计[J].塑料科技, 2015, 43(12): 62-65.
   LIU Wen-hua. Application and Design of Foamed Plastics in CushionPackaging[J]. Plastics Science and Technology, 2015, 43(12): 62-65.
- [9] 卢富德,张绍云,杜启祥.发泡聚乙烯隔振性能研究
  [J].包装工程,2011,32(11):1-4.
  LU Fu-de, ZHANG Shao-yun, DU Qi-xiang. Study of Vibration Isolation Performance of EPE[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(11): 1-4.
- [10] 刘广通,陈畅宇,万毕乐,等. 航天器运输包装箱仿 真验证平台技术研究[J]. 宇航学报,2021,42(4): 531-538.

• 267 •

LIU Guang-tong, CHEN Chang-yu, WAN Bi-le, et al. Research on Simulation and Verification Platform Technology for Spacecraft Transport Container[J]. Journal of Astronautics, 2021, 42(4): 531-538.

- [11] 张利,齐晓军,付国庆. 卫星运输振动响应分析[J].航 天器环境工程, 2009, 26(S1): 55-61.
  ZHANG Li, QI Xiao-jun, FU Guo-qing. Vibration Response Analysis of SatelliteTransportation[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(S1): 55-61.
- [12] 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.
  LUO Si-yuan, WU Guang-bo, WANG Yan-qi, et al.
  Drop Impact Simulation Analysis for a Transport Package[J]. Machinery & Electronics, 2016, 34(8): 16-20.
- [13] MAHADIH S, ZHAO Jing-wei, ZHENG Yi-jiang. Micro-Manufacturing of Composite Materials: a Review[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2019(1): 65-90.
- [14] JORDANJL, CASEM D T, BRADLEY J M, et al. Mechanical Properties of Low Density Polyethylene[J].Journal of Dynamic Behavior of Materials, 2016, 2(4): 411-420.
- [15] 苏新明,付仕明, 裴一飞. 航天器运输用包装箱被动保温性能分析[J].宇航学报, 2012, 33(9): 1334-1340.
  SU Xin-ming, FU Shi-ming, PEI Yi-fei. Passive Heat-PreservationAnalysison Spacecraft Transportation-Package[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(9): 1334-1340.

责任编辑:曾钰婵