

面向 C 型货包的短距加速撞击试验装置及应用

王军评¹, 彭湃¹, 黄海莹¹, 毛勇建¹, 李翀¹, 张军¹, 许晓东²

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999;

2. 中国船舶重工集团公司第 704 研究所, 上海 200031)

摘要: **目的** 为 C 型货包 90 m/s 撞击试验提供新的试验方法和手段。**方法** 采用基于压缩空气驱动和反向牵引的短距加速技术, 以及基于阻尼缓冲缸—迪尼玛绳的短距拦阻技术, 建立新型高速重载撞击试验方法, 并形成试验装置。**结果** 实现了负载大于 5 t、速度大于 90 m/s 的大质量试件短距发射和撞击。**结论** 该试验装置与以往常用于 C 型货包撞击试验的火箭橇和高空缆绳相比, 具有占地少、建设成本低、可调性和重复性好、测试方便、运行经济安全等特点, 为 C 型货包的空运事故场景模拟与考核提供了一种新手段, 同时也可为其他类型货包或装备的公路、铁路等运输事故场景模拟与考核提供试验技术支撑。

关键词: 放射性物品; 运输容器; C 型货包; 撞击试验; 试验设施

中图分类号: TB485

文献标识码: A

文章编号: 1001-3563(2022)23-0244-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.23.029

Facility and Its Application in Impact Test of C-type Package by Short-distance Launch

WANG Jun-ping¹, PENG Pai¹, HUANG Hai-ying¹, MAO Yong-jian¹, LI Chong¹,
ZHANG Jun¹, XU Xiao-dong²

(1. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Sichuan Mianyang 621999, China;

2. No.704 Research Institute, China Shipbuilding Industry Group Co., Ltd., Shanghai 200031, China)

ABSTRACT: The work aims to provide a new method for 90 m/s impact test of C-type package. The short-distance launch technique based on compressed air driving and reversed traction and the short-distance arrest technique based on damp buffer cylinder and dyneema rope were applied to establish a new high velocity impact test method for heavy load and form a test facility. The short-distance launch and impact of a large mass specimen with a load more than 5 t and a velocity more than 90 m/s were realized. Compared with rocket sled and high-altitude cable commonly used in C-type package impact test in the past, this test facility has the characteristics of less occupied land, low construction cost, good adjustability and repeatability, convenient testing, economical and safe operation, etc., which provides a new way for simulating air accidents and testing the performance of C-type packages and also supplies a new supporting technique for performance simulation and testing of other types of packages and equipment under other kinds of accidental transportation conditions on roads, railways, etc.

KEY WORDS: radioactive material; transportation container; C-type package; impact test; test facility

收稿日期: 2022-06-15

基金项目: 国防科技工业技术基础科研项目 (JSHS2019212C001)

作者简介: 王军评 (1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为冲击动力学与环境试验技术研究。

通信作者: 毛勇建 (1976—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为冲击动力学与环境试验技术研究。

放射性物品安全运输是发展核能和核技术的必备条件之一^[1]。随着核能开发和核技术应用研究的快速发展,放射性物品的运输活动愈加频繁,运输方式也愈加多样化,涉及公路、铁路、海运、空运等。由于放射性物品具有辐射危害性,其运输安全得到了国际原子能机构 (IAEA) 和各相关国家的广泛关注。为了减少放射性物品的危害、确保人类生命健康与生态环境安全,国际原子能机构^[2]、美国^[3]、俄国^[4]、中国^[5-6]等国际组织或国家都制定了专门的法律、法规和技术标准,对放射性物品的运输活动进行严格监管和规范。

放射性物品的运输需采用运输容器进行包装,因此货包适应运输环境和抵抗事故的能力直接决定了运输过程的安全性。国际原子能机构《放射性物质安全运输条例》^[2]和我国《放射性物品安全运输规程》^[6]对 A 型、B 型、C 型等货包,规定了一系列的试验要求,以考核其适应正常环境和抵抗事故环境的能力。这些试验主要包括正常运输条件下的喷水、自由下落、堆积和贯穿试验,以及运输事故条件下的力学试验 (自由下落 I、II、III)、耐热、水浸没、撞击试验等。国内外相关机构和学者针对货包安全性和合规性开展了一系列的研究工作^[7-13],建立了相应的试验技术与设施。其中,主要用于空运大量放射性物品或运输高活度放射性物品的 C 型货包,由于对防护能力与安全等级要求最高,除了需经受正常运输条件的试验考核外,还需经受 9 m 自由下落、动态压碎、击穿-撕裂、强化水浸没、强化耐热和不少于 90 m/s 的撞击试验。这些试验中,90 m/s 撞击试验可以说是最严酷、最重要的考核试验。

目前,国内外实现 C 型货包撞击试验的设施主要是火箭橇^[14]和高空缆绳^[15]。火箭橇的速度可以在每秒几十米至几千米的范围,高空缆绳通过自由跌落和火箭复合加速后最大速度可达 244 m/s,这 2 类设施皆可满足 C 型货包的撞击试验考核需求,但这 2 种试验设施占地面积大、造价昂贵、单次使用成本高,且加速距离较长、测试不便。

文中介绍一种基于压缩空气驱动的短距离加速撞击试验装置。该装置利用压缩空气来推动试件向前运动并达到一定的速度,从而完成对试件的发射和撞击试验。这种加载方式具有较强的通用性,可以在较短距离内获得每秒几十米到百米左右的发射速度,试件速度和姿态的可控性和重复性好,测试方便,试验实施也具有较好的经济性和安全性,可为 C 型货包的撞击试验提供一种新手段。

1 试验装置工作原理及概况

1.1 工作原理

基于经济、安全和试验对象多样性等考虑,短距

离加速撞击试验装置采用压缩空气加速和直线轨道方式。开放的轨道式设计 (而不是封闭的管道设计),可以适应试件的不同外形、尺寸及安装姿态,见图 1。短距加速撞击试验装置通过发射系统快速释放压缩气源的气体推动活塞-往复车系统,带动承载小车和试件在轨道上运动,达到目标速度后,通过一级和二级制动系统分别制动往复车-活塞系统和承载小车,使试件与承载小车分离,并由于惯性继续飞行直至撞击固定靶体。

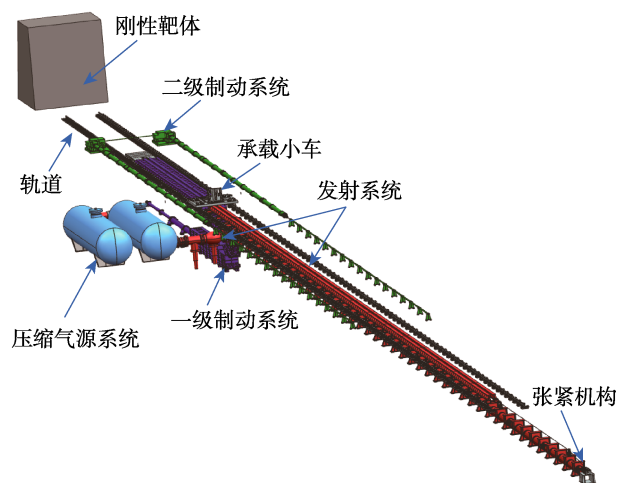


图 1 撞击试验装置
Fig.1 Impact test facility

1.2 主要技术指标

短距加速撞击试验装置的主要技术指标如下。

- 1) 最大加速能力。试件质量不小于 5 t、速度不小于 92 m/s。
- 2) 速度控制精度。在 30 ~ 100 m/s 内,速度目标值与实际值的偏差不大于 5%。

2 试验装置系统组成及结构

试验装置由压缩气源系统、发射系统、一级制动系统、二级制动系统、液压系统、润滑系统、控制系统、测试系统、轨道、刚性靶体等构成。其主要构成部分介绍如下。

2.1 压缩气源系统

压缩气源系统由空压站、储气罐、管路、测压仪表等组成。

空压站为试验系统提供最大压力为 6 MPa 的气源,并配备干燥和过滤装置。储存压缩空气的储气罐是装置的主要动力源,由 2 台卧式储气罐组成,总容积为 60 m³。

2.2 发射系统

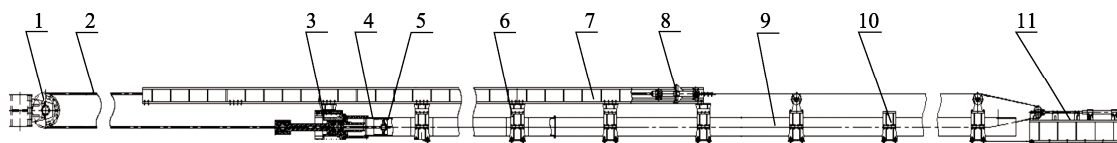
发射系统主要由气缸组件、排气缸组件、活塞组

件、往复车组件、张紧机构、主滑轮组、开关阀和发射阀等组成,气缸筒和排气缸筒总长为 100 m,具体结构组成见图 2。以储气罐内的压缩空气为动力,发射系统可将 5 t 以上的负载(包含承载小车和试件)在 75 m 内加速到 92 m/s 以上。

发射系统通过开关阀和发射阀控制压缩空气进入气缸的流量和时间,从而达到控制试件和承载小车末速的目标。由于发射阀需具备快速响应功能,为提高密封寿命,采用金属密封;但由于金属密封无法实现完全密封,存在一定泄漏,故增设前道开关阀,采用非金属密封,实现无泄漏。在充压过程中,开关阀处于关闭状态,

在发射前首先开启开关阀,然后再开启发射阀,发射完毕后迅速关闭开关阀和发射阀。发射阀主要由发射阀芯、阀体及发射油缸等组成,其控制系统将电信号转化为液压系统的流量和速度,液压油进入发射阀油缸,通过油缸控制发射阀的开度大小及开启时间。

由于主牵引绳自重原因,在复位或低速运行时会产生摩擦气缸内壁,因此设计张紧机构,用来预紧主牵引绳。张紧机构主要由张紧蓄能器、张紧油缸、导向滑轮、导向架等组成。工作时,启动液压系统为其提供张紧力,拉紧主牵引绳,减小垂荡,防止活塞运行时主牵引绳和缸筒内壁产生摩擦。



1.主滑轮组; 2.主牵引绳组件; 3.推力架; 4.气缸组件; 5.活塞组件; 6.气缸安装座; 7.轨道; 8.往复车; 9.排气缸; 10.排气缸安装座; 11.张紧机构。

图 2 发射系统示意图

Fig.2 Sketch of launch system

2.3 一级制动系统

一级制动系统主要由滑轮缓冲缸、钢索、滑轮组、主缓冲缸、制动轨道等组成,其结构和原理见图 3。

一级制动系统采用钢丝绳阻拦,可将速度为 92 m/s 以上的往复车与活塞组件在短距离内(15 m 以内)完全制动。其工作原理为:往复车触碰第一制动系统钢索后减速,承载小车与往复车脱离,并继续向前运动;第一制动系统的滑轮缓冲缸与主缓冲缸先后动作,滑轮缓冲缸迅速伸出,在较小的惯性作用下,滑轮速度迅速提升,同时带动主缓冲缸,将高速运动的往复车速度减为零,完成制动。阻拦结束后,主缓冲缸和滑轮缓冲缸在背压气的带动下复位。

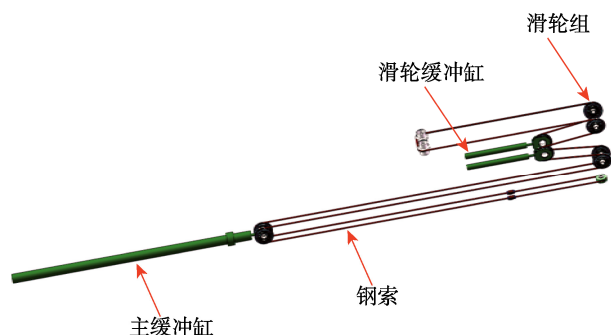


图 3 一级制动系统示意图

Fig.3 Sketch of the 1st arrest system

2.4 二级制动系统

二级制动系统采用直接阻拦方式,主要由水缸、迪尼玛绳及相关安装架等组成。将 2 个行程为 16 m

的水缸分别安装于轨道两侧,阻拦绳采用迪尼玛绳,直径为 52 mm,其最小破断力达到 2 150 kN。实验前,基座水箱和水缸内充满水,制动时,高速运动的承载小车受阻拦绳阻拦,带动活塞在节流管内运动,并推动管内工作腔一侧的缓冲介质(水)通过节流孔向外部流动,从而产生制动力,使承载小车-阻拦绳-活塞组成的质量系统制动。二级制动系统见图 4。

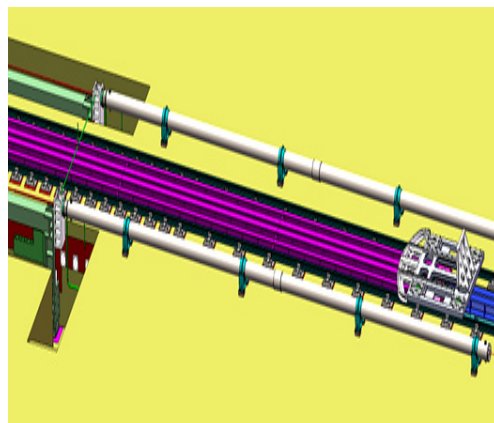


图 4 二级制动系统

Fig.4 Sketch of the 2nd arrest system

2.5 液压系统

液压系统由油源、冷却系统、控制系统组成。液压泵启动后,油源为各执行元件(开关阀、发射阀、张紧机构和润滑系统等)提供动力。当油温升到 50 °C 时,冷却油泵启动,高温液压油通过冷却器与空气进行热交换,从而降低油温。液压控制系统包括发射液

压控制系统和张紧机构液压控制系统,前者主要为摆动马达提供设定的压力油,控制发射阀的开启,后者为张紧油缸提供压力油,保证张紧机构随迪尼玛绳张力的变化实时响应。

2.6 润滑系统

在试验过程中,活塞在气缸中高速运动,为减小活塞和气缸的磨损及运动阻力,故设置润滑系统,每段缸上开有 5 对润滑油喷油口。在试验准备过程中,先对润滑缸补油,发射前用压缩空气作为动力,驱动活塞喷出润滑油并雾化,在气缸壁内形成油膜。

2.7 控制系统

控制系统用于控制试验装置各系统的工作,使其按规定步骤协调动作,同时获取和显示各系统、关键部件的工作状态和性能参数。控制系统主要由试验装置主控台、压缩气源系统控制台、液压系统控制台、液压系统电机启动柜和相关测试系统组成。

2.8 测试系统

撞击试验的测试主要针对加速度、应变、速度、气压、过载等物理量,配套了基于电测、光测的有线及无线测试系统。

有线测试系统包括加速度、应变、气压等基于电测的测试系统以及高速摄影、运动跟踪、数字散斑等基于光测的测试系统。应变测量系统共有通道 56 路,其连续采样频率最大为 1 MHz,微应变量程范围 0~20 000。加速度测量系统采集通道为 56 路,连续采样频率最大为 1 MHz,加速度传感器量程范围 0~100 000g,频响大于 10 kHz。高速摄影在 1 280×800 分辨率时拍摄速率可达 25 600 幅/s,最高拍摄速率为 10⁶ 幅/s(分辨率为 256×32)。数字散斑用于全场三维形状、位移及应变测量,测量对象尺寸为 0.001~10 m,应变量程为 0.005%~2 000%,一维精度微应变为 5,二维精度微应变为 10,三维精度微应变为 50。运动跟踪装置扫描比(试件运动速度与运动轨道到转镜垂直距离之比)为 0.1~100。

无线嵌入式测试系统可实现多通道的过载、应变、温度、速度、加速度等信号的测试,如图 5 所示,主要用于容器有密封要求时的内部测试。通过电源程控待机以及低功耗设计技术,实现全系统待机时间达 20 d 以上,满足试验件装配或试验安装时间不确定的需求;通过多层电路板设计、超小型模块电路设计和内部多层减振抗冲击防护结构设计,实现了 40 000g 以上的高过载冲击环境测试,其采样频率为 0.1~1 MHz,通道数为 1~44,存储容量为 512 kB~16 GB。

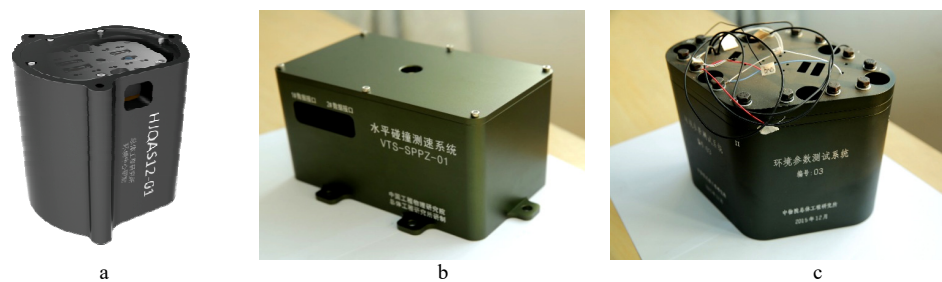


图 5 无线嵌入测试系统
Fig.5 Wireless embedded measurement system

2.9 靶体

试验装置的刚性靶体为钢筋混凝土结构,其高度为 8 m(其中 2.5 m 位于水平面下)、宽度为 5 m、厚度为 4.2 m,总质量约为 520 t,靶体的总质量大于最大加速能力(负载 5 t,速度 92 m/s)时试验件质量的 100 倍,由文献[1]可知,符合刚性靶体的要求。

3 关键技术

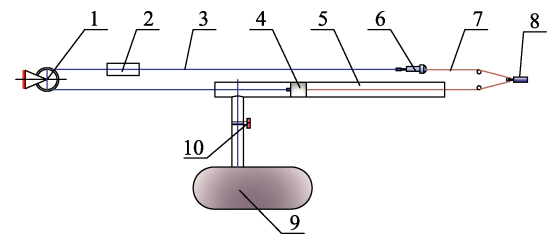
在撞击试验装置的研制过程中,重点解决了以下 2 项关键技术。

3.1 基于反向牵引的短距离加速技术

为控制运行成本,试验装置以低成本压缩空气为动力源,结合活塞与往复车的分体式设计思路、动力气缸的闭合结构设计形式,并利用牵引绳与定滑轮实现了对往复车及负载的反向牵引,见图 6。解决了单次试验成

本高、设备维护费用昂贵、开口气缸动态密封难的问题。

为控制建设成本,需在较短的距离将至少 5 t 的负载加速至 92 m/s 以上,基于气体膨胀的热力学方程、发射阀流量方程、活塞-试件动力学方程,对系统进行了仿真与设计,见图 7,确定储气罐容积为 60 m³,气缸的行程仅为 75 m。



1.定滑轮;2.制动系统;3.牵引绳;4.活塞;5.闭合气缸;6.往复车;
7.张紧绳;8.张紧机构;9.压缩气源系统;10.发射阀。

图 6 反向牵引示意图
Fig.6 Sketch of reversed traction

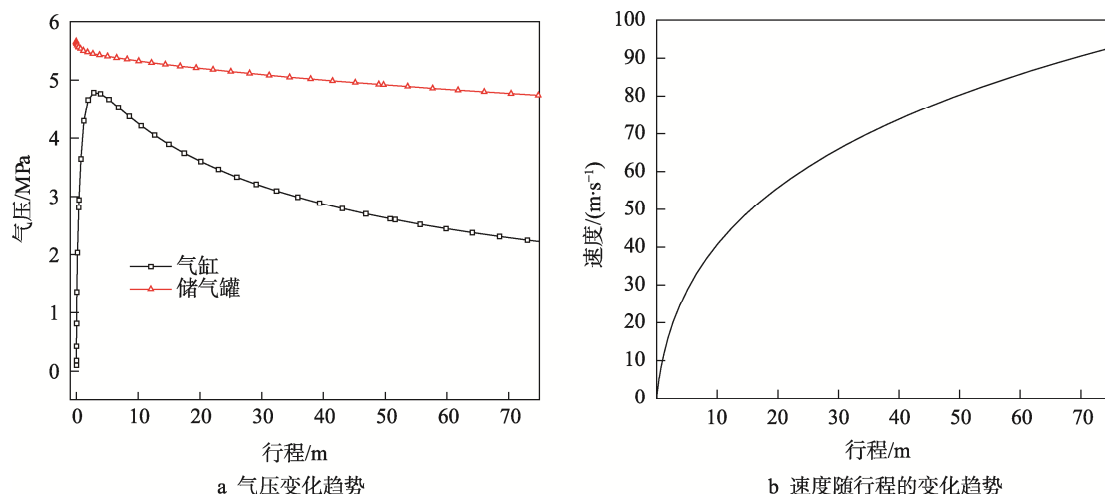


图 7 发射系统设计仿真结果

Fig.7 Simulation results of design for the launch system

3.2 短距离制动技术

承载小车通过二级制动系统制动,使试件与其分离,随后试件自由飞行至撞击靶体。制动距离的长短直接影响飞行距离,而飞行距离以及飞行中空气阻力和重力的影响,使得试件的实际撞靶姿态与初始姿态会存在偏差,因此,为了实现试件碰靶姿态的精确控制,需在尽量短的距离内实现承载小车的平稳制动,这就需要解决高速短距离制动的难题。

目前火箭橇主要通过末端弯轨使试验件与橇车分离,承载橇车采用破坏性制动;航母制动系统主要基于液压缓冲阻拦技术,其密封要求、维护成本高,且制动距离较长,约为 100 m。为此,针对短距离制动的需求,研制了一套新型高速阻拦装置,见图 8。该装置摒弃了结构复杂、维护成本高的传统液压缓冲阻拦技术,采用了非密封型阻尼缓冲缸结构,以廉价的水为缓冲介质,使加工成本、维护成本大幅降低,使用更加便捷。同时,摒弃了传统的钢丝绳阻拦方式,采用了轻质、高强度、低刚度的迪尼玛绳作为阻拦绳,在提高最大阻拦能力的同时,大幅降低了承载小车与阻拦绳初次碰撞时的瞬态冲击载荷。在设计时,通过编程对理论模型进行了仿真,见图 9。由图 9a 可知,由于钢丝绳刚度较大,阻拦时会出现瞬态冲击载荷过大的现象,极易造成钢丝绳断裂

(承载小车质量为 1.5 t 时,制动过载接近 150g,钢丝绳张力在 1 000 kN 以上,超过了目前使用的高强阻拦钢索的破坏强度,美国 MK7-3 型液压阻拦器高强阻拦钢索直径为 36 mm,破坏强度为 911 kN),采用迪尼玛绳有效解决了这一难题。此外,通过对节流孔布局的优化设计,降低了拦阻过程制动加速度的峰值均值比。采用以上技术,实现了 15 m 的距离内高速(92 m/s 以上)承载小车(质量为 1.5 t)的平稳制动。

4 应用情况

利用文中介绍的撞击试验装置,先后对在公路、铁路和空运事故下不同试件进行了多次试验,详见表 1。其中,试件 1[#]分别开展了铁路运输和空运事故验证考核;试件 2[#]为某 C 型货包,开展了空运事故试验;试件 3[#]开展了铁路运输事故考核;试件 4[#]、5[#]分别开展了货包整车公路运输事故考核(无承载小车);试件 6[#]开展了空运事故考核;试件 7[#]为试验系统调试试验。试验中承载小车均成功制动,试件撞靶姿态良好;根据不同的需求,采用有线、无线嵌入式测试系统开展了气压、加速度、过载等物理量的测试。试件 2[#]、5[#]的高速摄影照片见图 10 和图 11。

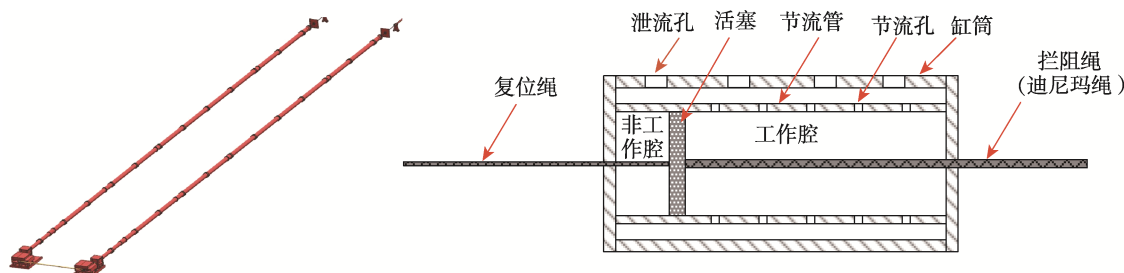


图 8 二级制动系统中使用的高速阻拦装置

Fig.8 High-velocity block device used in the 2nd arrest system

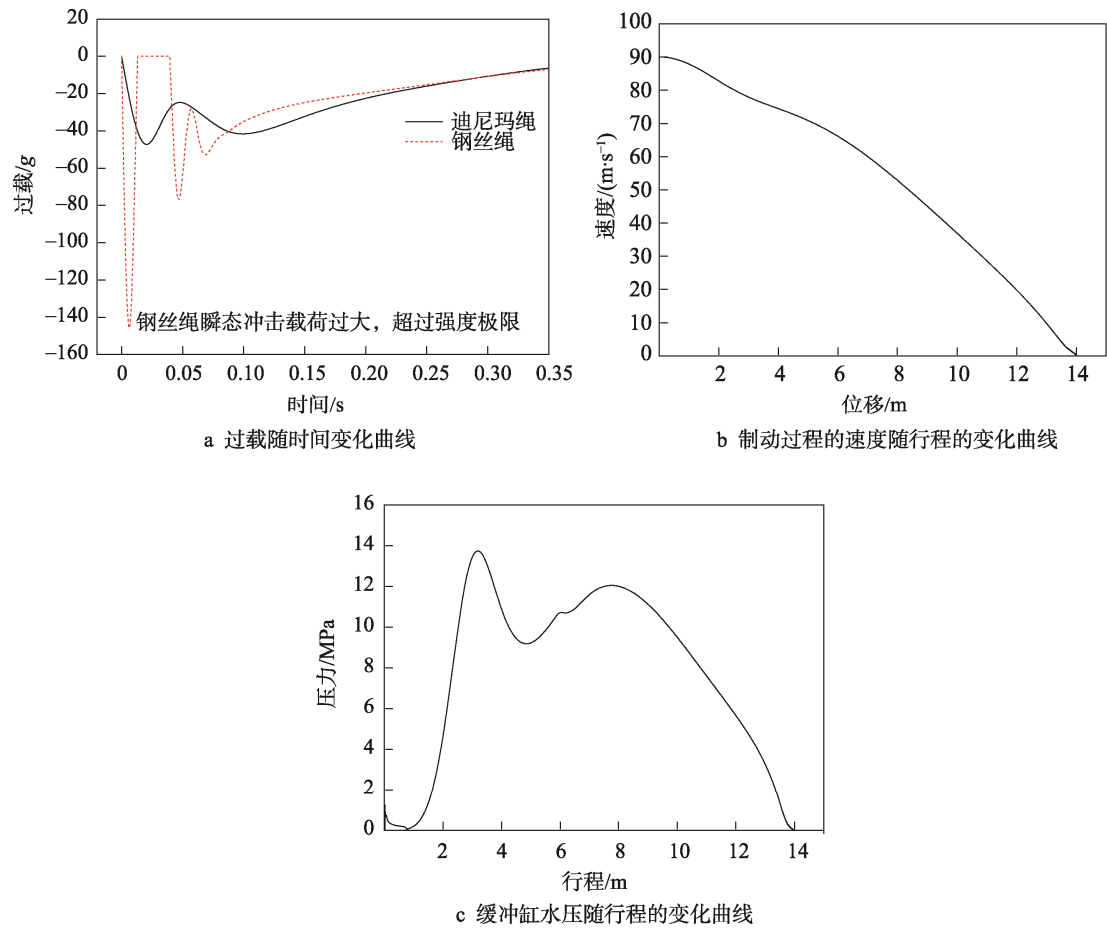


图 9 仿真设计结果
Fig.9 Results of simulation design

表 1 试验装置应用实例相关数据
Tab.1 Relevant data in application of the test facility

产品编号	负载质量/t	气压/MPa	目标速度/(m·s ⁻¹)	实测速度/(m·s ⁻¹)	速度偏差/%	小车制动行程/m
1 [#]	2.5	0.66	45	46.3	2.89	13.8
	2.5	1.66	70	68.7	-1.86	14.1
	2.5	2.63	85	84.5	-0.59	14.4
2 [#]	5.1	5.56	90	91.2	1.33	14.8
3 [#]	4.1	1.78	58	60.0	3.45	14.0
4 [#]	8.8	1.05	32	32.3	0.94	
5 [#]	18.4	2.35	33	32.9	-0.30	
6 [#]	1.7	1.88	80	79.3	-0.88	14.5
	1.7	2.13	90	88.9	-1.22	14.8
7 [#]	1.0	0.63	60	58.5	-2.50	12.9
	1.0	1.02	70	71.5	2.14	13.2
	1.0	1.62	85	87.6	3.06	14.3

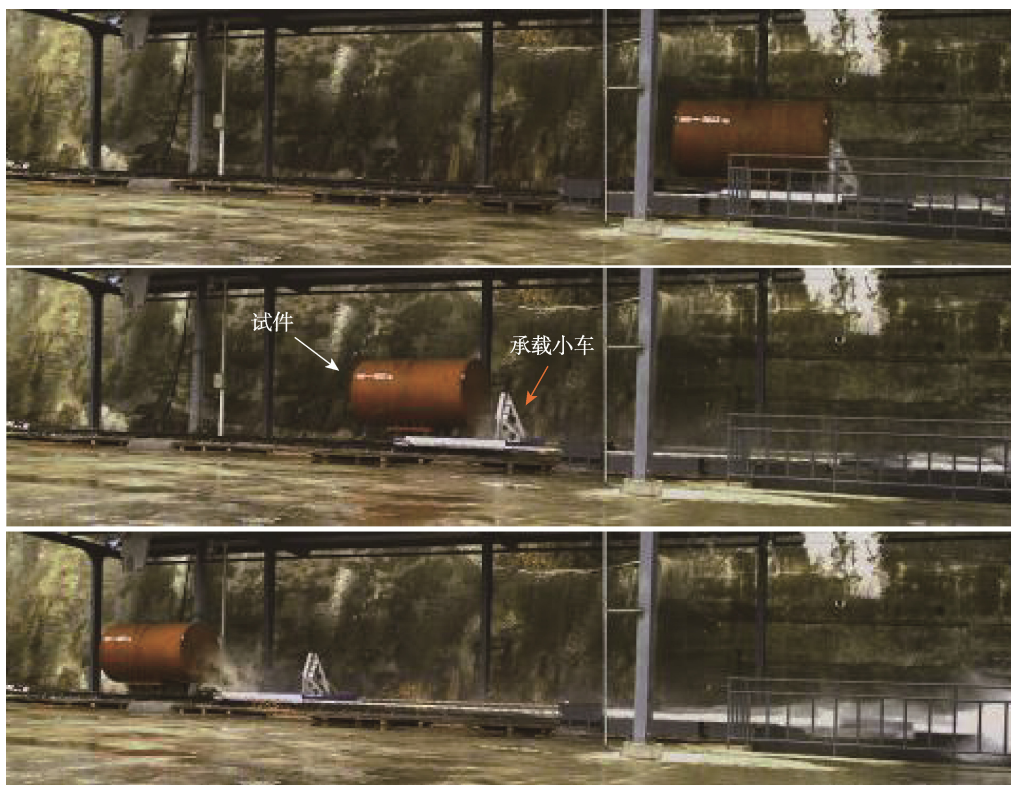


图 10 某 C 型货包撞击试验的高速摄影 (表 1 中试件 2[#])
Fig.10 High speed photos of impact test for C-type package (2[#] specimen in Tab.1)

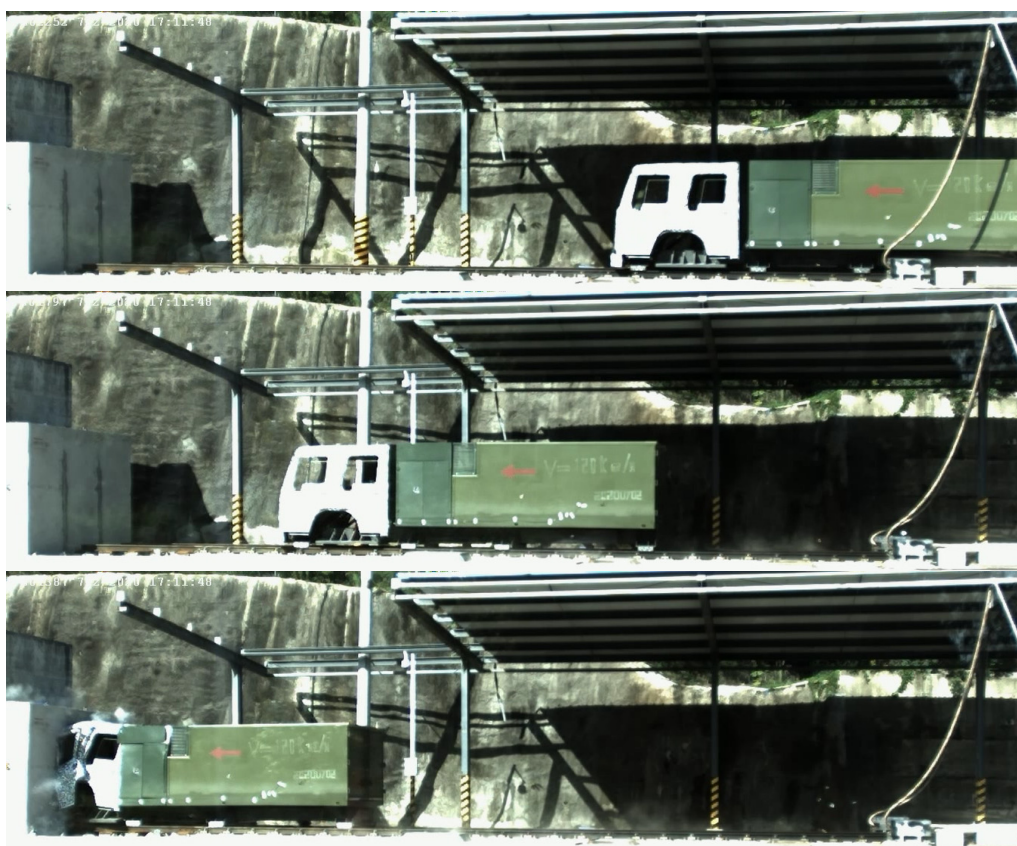


图 11 某货包整车撞击试验的高速摄影 (表 1 中试件 5[#])
Fig.11 High speed photos of impact test for a full truck package (5[#] specimen in Tab.1)

5 结语

面向 C 型货包的短距加速撞击试验装置, 作为新型高速重载撞击试验设施, 采用了基于空气驱动-反向牵引的短距加速技术、基于阻尼缓冲缸-迪尼玛绳的新型高速拦阻技术, 实现了大质量试件的高速发射与承载小车的短距制动。该试验装置可调性和重复性好, 测试方便, 发射经济、安全, 为 C 型货包的空运事故的模拟与考核提供了一种新手段, 同时也可为相关货包与装备的公路、铁路运输事故的模拟与考核, 以及同类装置设计和测试技术发展提供支撑和参考。

参考文献:

- [1] 刘新华. 放射性物品安全运输概论[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
LIU Xin-hua. Introduction to Safe Transportation of Radioactive Materials[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [2] SSR-6, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials[S].
- [3] 10 CFR Part 71, Packaging and Transportation of Radioactive Material[S].
- [4] HII-053-04, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials[S].
- [5] 中华人民共和国国务院令, 第 562 号. 放射性物品运输安全管理条例[S].
Order of the State Council of the People's Republic of China, No.562. Regulations on the Safety Administration of the Transport of Radioactive Materials[S]
- [6] GB 11806—2019, 放射性物品安全运输规程[S].
GB 11806-2019, Regulations for the Safety Transport of Radioactive Material[S].
- [7] BANG K S, LEE Ju-chan, SEO C S, et al. Comparison of the Thermal Performance of Damaged and Intact Shock Absorber[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME, 2013, 135(5): 051601.
- [8] 周寅鹏, 汪军, 张强, 等. 某核电厂辐照监督管运输容器的研制[J]. 核科学与工程, 2020, 40(5): 777-782.
ZHOU Yin-peng, WANG Jun, ZHANG Qiang, et al. Development of Transport Vessel for Irradiation Monitoring Pipe of Nuclear Power Plant[J]. Nuclear Science and Engineering, 2020, 40(5): 777-782.
- [9] 周江, 蒲江, 李坤锋, 等. 中低放射性废物包装容器试验台架的研制[J]. 中国塑料, 2020, 34(11): 48-51.
ZHOU Jiang, PU Jiang, LI Kun-feng, et al. Research and Development of Test Bench for Low and Medium Level Radioactive Waste Packaging Container[J]. China Plastics, 2020, 34(11): 48-51.
- [10] VIERU G. Qualification Testing Facility for Packages to be used for Transport and Storage of Radioactive Materials[C]// Proceedings of ICAPP '09, Tokyo, Japan, 2009.
- [11] 李国强, 张建岗, 罗晓渭, 等. 放射性物质运输货包力学试验评价技术[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(4): 762-768.
LI Guo-qiang, ZHANG Jian-gang, LUO Xiao-wei, et al. Assessment Technology on Mechanical Test of Package for Radioactive Material Transport[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(4): 762-768.
- [12] 王学新, 潘玉婷, 庄大杰, 等. 乏燃料容器设计中组件包壳的氢脆特性影响分析[J]. 包装工程, 2021, 42(3): 93-99.
WANG Xue-xin, PAN Yu-ting, ZHUANG Da-jie, et al. Influence of Hydrogen Ductile-Brittle Transition Characteristics of Cladding on Design of Spent Fuel Transport Container[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(3): 93-99.
- [13] LI Z C, YANG Y H, DONG Z F, et al. Safety Assessment of Nuclear Fuel Reprocessing Plant under the Free Drop Impact of Spent Fuel Cask and Fuel Assembly Part I: Large-Scale Model Test and Finite Element Model Validation[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2021, 53(8): 2682-2695.
- [14] 李娜, 张青平, 张思才, 等. 放射性物品 C 型货包密封结构设计及性能研究[J]. 包装工程, 2020, 41(1): 180-185.
LI Na, ZHANG Qing-ping, ZHANG Si-cai, et al. Sealing Structural Design and Performance of Radioactive Material Type C Packages[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(1): 180-185.
- [15] SORENSON K B, AMMERMAN D J, UNCAPHER W L. Test Facilities for Radioactive Materials Transport Packages at Sandia National Laboratories, USA[J]. International Journal of Radioactive Materials Transport, 2001, 12(2/3): 169-174.

责任编辑: 曾钰婵