

· 资助成果 ·

## 飞机拦阻系统模型研究

姚红宇<sup>1</sup> 孔祥骏<sup>2\*</sup> 王淑敏<sup>2</sup> 曾亮<sup>2</sup> 赵阳<sup>2</sup>

1. 中国民航科学技术研究院, 北京 100028
2. 航科院(北京)科技发展有限公司, 北京 100028

**[摘要]** 为了研究特性材料拦阻系统(Engineered Material Arresting System, EMAS)的动力学模型,创造性地研究了泡沫混凝土材料的力学特性,建立了机轮/拦阻材料之间的静力学模型和拦阻系统的动力学模型,设计建造了专门的实验装置并用 B737 飞机对模型进行了试验验证。本研究提出的双侵入实验方法可以较好地表征材料的力学性能;设计建造的台架实验装置能够研究机轮对拦阻材料的碾压机理;建立的机轮/拦阻材料间力学模型和飞机拦阻动力学模型通过了一系列试验验证。以该研究为基础形成 EMAS 产品,已经在 8 家机场安装了 9 套,创造直接经济效益 2.9 亿元。

**[关键词]** 特性材料拦阻系统;模型;真机验证;双侵入实验

国际上由于飞机冲出跑道造成的事故不在少数,2018年3月12日,尼泊尔加德满都机场,一架客机冲出跑道,造成49人死亡。2020年8月7日,印度喀拉拉邦机场,一架飞机冲出跑道,造成17人死亡,120多人受伤。2001年以来,我国民航运输飞行共发生飞机冲出跑道事件8起,距离最远的一起,飞机冲出跑道339 m。我国有相当数量的机场建在山区,跑道端外存在危险地形,加之山区多存在净空障碍物问题、气象条件复杂,飞机一旦冲出跑道就可能导致灾难性后果。

特性材料拦阻系统(Engineered Material Arresting System, EMAS)是国内外公认的解决这一问题的安全设施。EMAS的原理是将一定长度、一定厚度的具有特定力学性能的泡沫混凝土材料设置在跑道端外,飞机冲出跑道后便进入其中。泡沫混凝土材料被飞机的机轮压溃、吸收飞机的动能,使飞机在安全的前提下逐渐减速并最终停止。

该系统的核心技术之一就是系统的力学模型,涉及材料力学性能表征、机轮/材料间力学模型和飞机拦阻动力学模型等内容。Matthew等<sup>[1]</sup>归纳了拦阻材料力学性能表征方法,但这些方法与实际机



**姚红宇** 中国民航科学技术研究院副院长。材料学科博士后,研究员。国务院政府特殊津贴获得者。民航卫星应用工程技术研究中心主任,民航跑道安全领域创新团队负责人。中国航空学会科技奖励评审委员会委员,中国航空学会航空器适航分会副主任委员。长期从事航空器维修与适航研究、航空器事故调查分析、航空安全装备与技术研发、航空材料研究工作。主持或参加国家级、省部级科研项目十余项。主持研发了“飞机拦阻系统(EMAS)”,并获得规模化应用。获省部级科技奖8项,获中国专利优秀奖1项,出版学术专著2部,发表学术论文百余篇,获发明专利授权十余项。



**孔祥骏** 飞行器设计专业博士,研究员,航科院(北京)科技发展有限公司技术总监,中国民航青年五四奖章获得者。他先后从事飞机飞行仿真、无人机自主飞控、跑道安全、空地宽带系统应用、飞机记录器等方面的技术研发和成果转化工作。他参与研发的特性材料拦阻系统技术及产品,打破了国外厂家对该项技术的垄断,形成了我国自主知识产权的产品,创造经济效益2.9亿元。

轮碾压材料情况不符,传统的力学性能表征方法不能准确描述材料的拦阻力学特性<sup>[1, 2]</sup>;国内外学者

收稿日期:2021-06-17;修回日期:2021-08-19

\* 通信作者,Email:kongxj@mail.castc.org.cn

本文受到国家重点研发计划项目(2017YFB0309903)和国家自然科学基金项目(U1233203)资助。

建立了机轮碾压材料的力学模型,但涉及的参数过于复杂,无法满足实际应用的需求<sup>[3-5]</sup>。

本文从机轮碾压材料实际情况入手,研究材料力学性能表征方法和测试方法;面向工程应用,根据材料力学特性建立机轮与材料之间的力学模型和飞机拦阻动力学模型,并开展实/试验验证。

## 1 拦阻材料的力学性能表征

为解决特性材料力学性能表征问题,本研究提出了双侵彻实验方法,即在单侵彻实验形成的孔附近与之相切的位置进行第二次侵彻实验,第二次侵彻时溃缩区中的部分材料粉末可以挤破与第一个孔相邻的部分孔壁而流入第一个孔中,在一定程度上减小了对溃缩区的约束,更加接近飞机轮胎碾压材料时的工况。

双侵彻实验所得到的力学性能曲线如图1所示,与单侵彻曲线类似,仍然呈现三个阶段。双侵彻曲线第二阶段的斜率更小,因而相同应变处的应力更小,第三阶段开始点略微推后。将双侵彻实验得到的压缩曲线用于拦阻力计算,得到了较为满意的计算准确度。因此双侵彻曲线更好地表征了泡沫混凝土材料在用于拦阻目的时的力学性能。

上述实验都是在准静态下进行的,是材料的基本力学性能。飞机在EMAS中速度可达130 Km/h,这种速度条件显然与准静态条件有很大差异。为了研究材料在高速加载下的力学性能。本研究利用Instron高速试验机在不同速度下测试了材料的力学性能,通过回归分析,就可以根据材料在准静态下的力学性能,得到材料在高加载速度下的力学性能。

研究中还发现泡沫混凝土材料的溃缩具有高度的局部性,应变的概念不再适用,而应采用位移来表征材料的压缩程度。材料的弹性对于拦阻力起反作

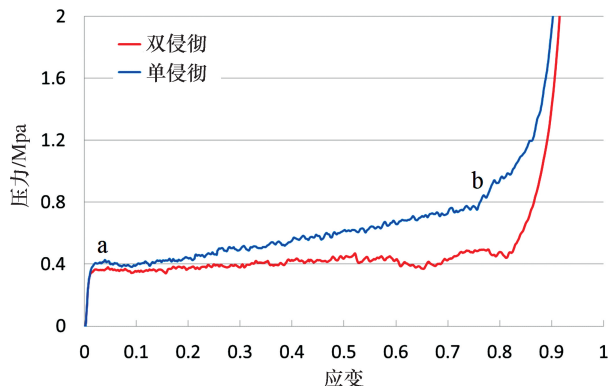


图1 单孔和双孔侵彻实验结果对比

用,应将其控制在很低的水平。研究表明,依据准静态下材料的单侵彻曲线,经修正后可以得到材料在高加载速度下的单侵彻力学性能曲线。

## 2 机轮/材料间的力学模型与实验验证

飞机拦阻过程的实质是机轮对拦阻材料碾压的力学过程,本研究建造了实验装置,研究碾压机理,建立力学模型<sup>[6]</sup>,并对模型的准确度进行了实验验证。

### 2.1 机轮与拦阻材料之间的静力学模型

机轮与材料的碾压情况如图2所示,碾压过程主要发生在机轮与拦阻材料的接触面即弧a-b,且从a至b的过程中,机轮与材料接触深度的增加,材料接触应力P增加(P的变化由材料力学性能决定)。当P增加达到胎压 $P_0$ 时,机轮在材料中的深度不再增加,其底部变为水平面,水平面的长度为L。机轮保持胎压 $P_0$ 不变,对地面(实际为材料粉末)的压强为 $P_0$ 。

若机轮的宽度为B,那么机轮在碾压过程中受到的拦阻力为

$$F_D = B \int_a^b P \sin \alpha ds \quad (1)$$

垂向力为

$$F_V = P_0 BL + B \int_a^b P \cos \alpha ds \quad (2)$$

### 2.2 实验装置与实验方法

为了研究和验证力学模型,专门设计并建造了实验装置。装置的照片如图3所示,台架与地面固定,台架中间设置吊篮,用于放置配重,模拟不同载荷作用在机轮上的情况。吊篮下方安装机轮,之间设置测量传感器。平台车用于放置拦阻材料,在牵引装置牵引下,模拟机轮碾压拦阻材料的过程<sup>[7]</sup>。

实验装置可以模拟不同重量飞机机轮碾压拦阻材料的情况,测量包括机轮受力、机轮压入拦阻材料

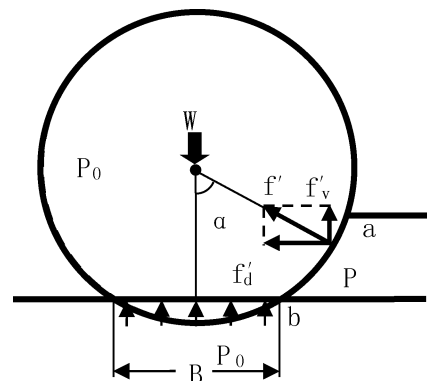


图2 机轮碾压拦阻材料的力学分析



图3 EMAS台架实验装置照片

的深度、平台车水平位移、机轮的转速、平台车的移动速度、对平台车的牵引力等参数。

### 2.3 实验结果

利用 B737 飞机机轮进行实验,通过模拟不同飞机重量来研究力学模型适用性<sup>[8]</sup>。图 4 给出主轮在不同厚度拦阻材料中的拦阻力  $F_D$  无量纲值与垂直力  $F_V$  无量纲值的模型计算值和实验实测值的对比(曲线为模型计算结果,数据点为实验结果)。图中每条曲线对应不同厚度的材料,而这些材料具有相同的应力-压入深度特性。

由图 4 可见,对于一定的材料厚度,在第一段,随着  $F_V$  值的增加, $F_D$  值逐渐增加, $F_V$  值增加至一定程度,进入第二段  $F_D$  值趋向于稳定。不同厚度的材料在第一段  $F_D$  值曲线是重合的,反映出在这一阶段材料的利用率低的特点。进入第二段后,材料厚度越大, $F_D$  值越大。

图 4 中还给出了模型计算结果与实验结果的对比,除轻于 B737 飞机最小重量的两个数据点因  $F_D$  值的绝对值很小、较小的绝对偏差导致较大的相对偏差外,其余各数据点  $F_D$  值的模型计算值与实测值之间相对偏差的平均值为 7%,最大偏差 15%。

通过实验发现:

(1) 拦阻材料的强度对拦阻力的影响是复杂的,增加材料强度可能因降低了机轮在材料中的压入深度而降低拦阻力。

(2) 机轮刚进入拦阻材料以及机轮从低强度的材料进入高强度的材料时,拦阻力会出现较大的峰值。分析起落架的结构安全时应考虑到这个峰值。

(3) 建立的拦阻力模型较好地反映了实验现象。在实验的范围内,模型对机轮所受拦阻力计算

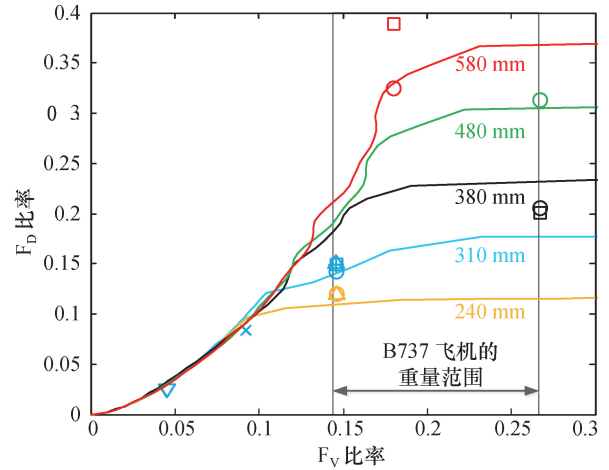


图4 B737主起落架机轮台架实验结果分析图

结果的相对偏差的平均值小于 10%。

### 3 全机模型与真机试验验证

飞机在拦阻材料中运动,可以认为飞机机身作为刚性体,拦阻材料对机轮的作用力通过起落架传到机身上。起落架减震支柱垂直于地面,减震器仅对作用力的垂向分量有作用,对于作用力的航向分量则表现为刚性体。拦阻材料对机轮的作用力等效为作用在轮轴上的集中力,并关于机身纵剖面对称,因此可将飞机看做只在其对称面内做二维运动<sup>[9]</sup>。飞机发动机无正向推力,也无反向推力,并忽略飞机受到的气动力和其他外力。

试验所用飞机为 B737 飞机,空机重 35.9 吨。为了测试拦阻过程中各起落架承受的各向载荷,在各起落架上布设了多组应变计,并设置线位移传感器测量减震支柱的伸缩量<sup>[10]</sup>。在接近飞机重心的位置安装 RT2000-GPS/INS 型组合惯性导航系统,测量飞机的运动参数。为了测量机上人员在拦阻过程中承受的惯性载荷,在客舱的前部和后部座椅上各安装一具测试假人。图 5 为真机试验后的照片。



图5 B737飞机试验后的照片

全停试验一共开展了四次,主要结果见表1。4#试验中,飞机冲入拦阻系统的速度为60.6 kn,实测停止距离为111 m,模型计算的停止距离为116 m,绝对偏差5 m,相对偏差4%。6#试验的冲入速度为23.9 kn,实测停止距离为28.2 m,模型计算的停止距离为28.1 m,绝对偏差0.1 m,相对偏差0.4%。全部试验中,模型对停止距离的计算误差都不大于7%。

表1 真机试验拦停距离情况

试验标号	3#	4#	5#	6#
进入拦阻材料时飞机速度/kn	44.0	60.6	27.7	23.9
计算的停止距离/m	68.6	116.0	35.7	28.1
实测的停止距离/m	70.9	111.0	33.3	28.2
停止距离相对偏差	3%	-4%	-7%	0.4%

图6给出了4#试验中,模型计算结果与实测结果的对比,图6中各分图可见:(1)在飞机速度由60.6 kn到最终停止的过程中,(2)飞机加速度不超过1.5 g,(3)测试假人承受的加速度不超过2.5 g,对于(4)前起落的拦阻力、(5)垂直力、(6)机轮压入材料的深度,和(7)主起落的拦阻力、(8)垂直力和(9)机轮压入材料的深度,模型计算结果与实测结果接近。拦阻试验后飞机与机组人员均安全。试验表明,所建立的模型较好地反映了飞机在拦阻过程中起落架机轮压入深度、垂向力、阻力等参数变化。

试验中发现,飞机拦阻力主要由主起落架提供,但前起落架强度较低。考虑到前起落架结构安全要求限制了全机拦阻力的水平,在拦阻力需求大、一旦不能拦停安全风险很高的机场,应该放弃对前起落架结构安全要求,保证对飞机的拦停。

#### 4 成果与应用

依据本项研究成果,中国民航制订行业标准1项:《特性材料拦阻系统(MH/T 5111—2015)》。该标准是国际上关于EMAS的第一份技术标准。目前该标准已经写入国际民航组织有关EMAS系统的指导材料,成为全世界民航业该项技术的指南。

研究成果成功转化为具有自主知识产权的LANZU-1型EMAS产品。2013年,民航局发布《特性材料拦阻系统(EMAS)规划建设指导意见》,在我国二十家民航机场开展EMAS系统建设试点。目前已经为国内外超过30家机场完成EMAS设计工作,完成国内8个机场9套EMAS系统设计和建

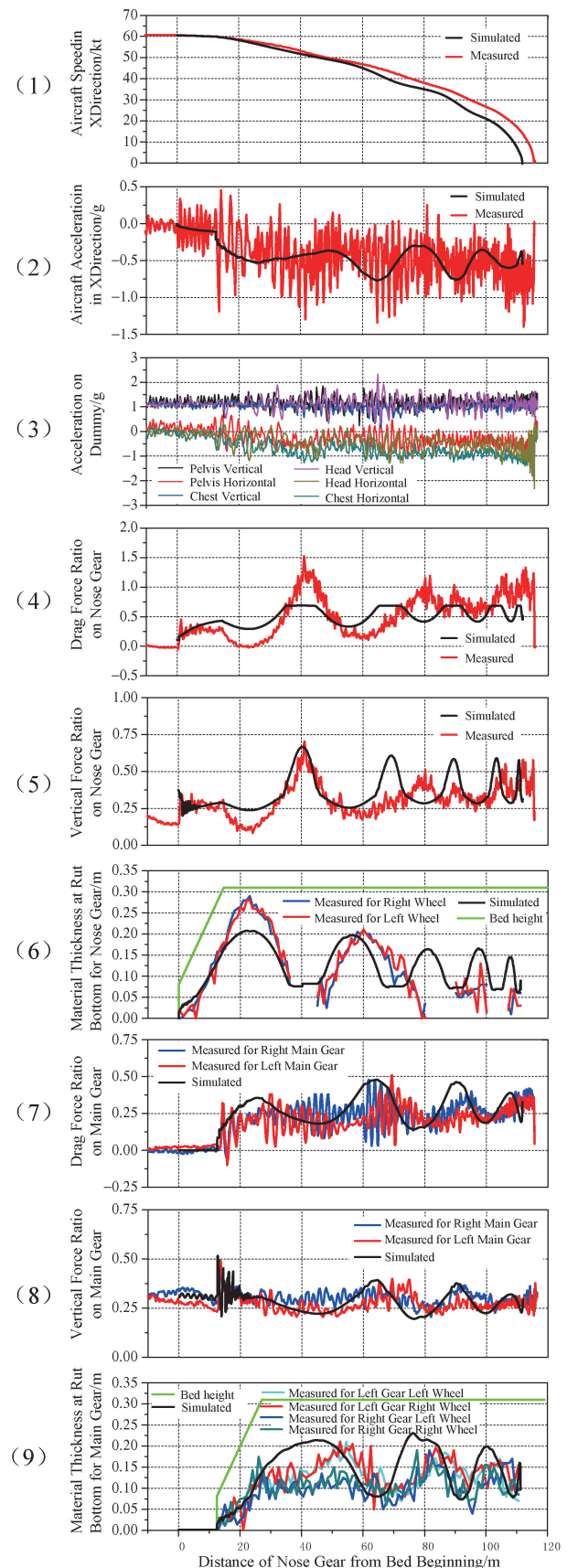


图6 4#试验中模型计算结果与实测结果对比

设工作,创造直接经济效益超过 2.9 亿元。

我国有相当数量机场建在山区,一些机场跑道紧邻水面,这些机场跑道端外存在危险地形,并且往往气象条件复杂,一旦飞机冲出跑道,容易出现灾难性后果。为了降低飞机冲出跑道的风险,民航局将 EMAS 系统列入了《机场新技术名录指南(2018—2020 年度)》,鼓励发挥科技创新引领作用,提升机场运行保障能力。

## 5 结 论

本研究建立了 EMAS 的力学模型,为评价 EMAS 拦阻材料力学性能建立了依据,为拦阻材料研制提供了基础;为 EMAS 系统设计提供了理论方法和工具,极大地促进了 EMAS 产品应用;充分研究了 EMAS 拦阻机理,为出台技术标准奠定理论基础。同时,该项研究工作也探索了一条从基础科研、产品研发到产品应用推广的创新之路。

## 参 考 文 献

- [1] Matthew AB, John MHP, David JS. Developing improved civil aircraft arresting systems// Airport Cooperative Research Program report 29. Washington: National Academies Press, 2019.
- [2] 姚红宇, 史亚杰, 肖宪波, 等. 飞机拦阻用泡沫混凝土材料压缩性能表征. 失效分析与预防, 2015, 10(2): 83—86.
- [3] Zhang ZQ, Yang JL, Li QM. An analytical model of foamed concrete aircraft arresting system. International Journal of Impact Engineering, 2013, 61: 1—12.
- [4] Li FY, Jiao ZX, Gui YQ. Modeling and simulation of soft ground arresting system for aircraft. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(8): 945—948.
- [5] Heymsfield E. Performance prediction of the strong company's soft ground arrestor system using a numerical analysis. Atlantic: Mack-Blackwell Rural Transportation Center, University of Arkansas, 2009.
- [6] 姚红宇, 孔祥骏, 史亚杰, 等. 飞机拦阻系统拦阻力模型的实验研究. 工程力学, 2015, 32(8): 243—249.
- [7] 孔祥骏, 史亚杰, 肖宪波, 等. 特性拦阻材料的台架实验装置研制. 实验力学, 2014, 29(1): 83—88.
- [8] Jiang CS, Yao HY, Xiao XB, et al. Phenomena of foamed concrete under rolling of aircraft wheels. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 495: 012035.
- [9] Yao HY, Kong XY, Shi YG, et al. Aircraft test of engineered material arresting system. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2018, 90(1): 229—236.
- [10] Kong XJ, Le NN, Li CS, et al. Landing gear ground load measurement and verification test for a large passenger jet. Procedia Engineering, 2015, 99: 1426—1433.

## Aircraft Arresting System's Model Study

Yao Hongyu<sup>1</sup> Kong Xiangjun<sup>2\*</sup> Wang Shumin<sup>2</sup> Zeng Liang<sup>2</sup> Zhao Yang<sup>2</sup>

1. China Academy of Civil Aviation Science and Technology, Beijing 100028

2. Hangke Technology Development Co. Ltd., Beijing 100028

**Abstract** For the modeling of the Engineered Material Arresting System (EMAS), the research creatively studied the mechanical properties of foamed concrete material, established the static model of LDG wheel/arresting material interface and the dynamic model of the arresting system, set up a special experimental facility, and used a Boeing 737 aircraft to verify the models. The double penetration test was proposed to characterize the mechanical properties of the material; the experimental facility was set up to study the rolling compaction of the wheel on the arresting material; a series of tests verify the mechanical model of wheel/arresting material and kinetic model of aircraft arresting. Based on this research, EMAS products have been formed, and 9 sets have been applied in 8 airports, creating direct economic benefits of RMB 290 million.

**Keywords** Engineered Material Arresting System; model; aircraft test verification; double penetration test

(责任编辑 姜钧译)

\* Corresponding Author, Email: kongxj@mail.castc.org.cn