

# 航空结构冲击动力学技术的发展与展望



刘小川<sup>2,\*</sup>, 王彬文<sup>2</sup>, 白春玉<sup>1,2</sup>, 惠旭龙<sup>1,2</sup>, 陈熠<sup>1,2</sup>, 张宇<sup>1,2</sup>

1. 中国飞机强度研究所, 陕西 西安 710065

2. 结构冲击动力学航空科技重点实验室, 陕西 西安 710065

**摘要:**航空结构冲击动力学主要关注军民机服役或运营过程中可能遭遇的典型冲击问题。按冲击场景分,主要包括飞机正常着陆/非正常着陆、飞鸟与冰雹等离散源撞击、发动机包容性、战斗损伤或客舱内的最小风险炸弹位置等;从研究对象分,主要包括材料级的动态力学性能、结构件级的能量耗散和动态响应、整机级的动态载荷与应力波传递等;从研究方法分,主要有理论建模方法、数值计算方法和试验研究方法等。航空结构冲击动力学专业主要研究结构在冲击载荷作用下的运动、变形和破坏规律,考虑这些载荷和结构耦合效应的动态响应分析方法,以及减缓或控制冲击损伤的设计方法,同时开发在实验室内再现这些冲击现象或验证结构设计的试验装置和试验方法。本文对结构冲击动力学航空科技重点实验室近年来的专业发展情况和主要研究工作进行总结,梳理了主要领域的研究热点,并展望了未来的发展重点。

**关键词:**航空结构; 冲击动力学; 适坠性; 起落架; 离散源

中图分类号: TB122

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2020.03.001

从学科定义出发,结构冲击动力学是固体力学的一个分支,它涉及物理、力学和材料科学等多个学科,主要研究固体或结构在瞬变、动载荷作用下的运动、变形和破坏规律,主要关注应力波的传递和结构的动态响应<sup>[1]</sup>。在航空工程中,飞机服役和运营过程中可能遭遇一系列冲击动力学问题,如飞机正常着陆/非正常着陆、飞鸟等离散源撞击、发动机包容性、战斗损伤或客舱内的最小风险炸弹位置等<sup>[2]</sup>。对于相关的问题,军用飞机结构强度规范、民用飞机适航标准、发动机适航标准都有明确的要求,都要在设计中考虑可能的冲击载荷影响,并采取减缓冲击损伤的结构设计手段和系统布置方案,并对冲击损伤后剩余强度和安全性进行评估,如果有必要,还需要进行物理试验验证。

航空结构冲击动力学主要研究典型场景下冲击载荷高精度预计方法、冲击载荷和结构之间的耦合效应、动态响应的高精度分析方法与工具,以及减缓或控制冲击损伤的设计方法,同时开发在实验室内再现这些冲击现象或验证结构设计的试验装置,并提供标准化的试验方法。

航空结构冲击动力学涉及到材料非线性、结构大变形、动态断裂与失效、接触、摩擦等复杂力学问题,一直是固体力学与相关交叉学科的研究热点。特别是近20年,一批重大军民机型号相继立项,相关问题的重要性更加凸显,航空结构冲击动力学研究获得了更多的关注和更高的重视。

为推动技术的进步和支撑型号的研制,迫切需要建立航空结构冲击动力学技术研究体系和试验验证能力体系,结构冲击动力学航空科技重点实验室(简称实验室)的设立恰逢其时,实验室于2015年挂牌成立,研究方向主要包括材料/结构冲击性能与损伤机理、结构坠撞动力学分析与试验技术、起降装置冲击动力学分析与试验技术和离散源冲击分析与试验技术等,近年来又衍生了结构冲击动力学工具软件研发、仿生智能结构/材料研发与应用等新的研究方向。成立以来,实验室始终致力于航空结构冲击动力学领域的新技术、新方法研究,并打造系列化的冲击动力学专用试验测试条件,并紧密联合高等院校和其他科研机构开展学术研究工作,积极有效地发挥了重点实验室的创新平台作用。

收稿日期: 2019-12-13; 退修日期: 2019-12-30; 录用日期: 2020-01-10

\*通信作者. Tel.: 029-88268805 E-mail: liuxiaochuan@cae.ac.cn

引用格式: Liu Xiaochuan, Wang Binwen, Bai Chunyu, et al. Progress and prospect of aviation structure impact dynamics[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(03): 1-14. 刘小川, 王彬文, 白春玉, 等. 航空结构冲击动力学技术的发展与展望[J]. 航空科学技术, 2020, 31(03): 1-14.

本文梳理了航空结构冲击动力学专业的内涵,结合实验室的建设,介绍了近年来以实验室为代表的国内航空结构冲击动力学专业技术体系构成、冲击动力学重大试验能力的发展和关键技术的突破情况等,总结提炼了重要技术方向的发展趋势和主要研究热点,并对未来发展进行了展望。

## 1 航空结构冲击动力学技术体系

航空结构冲击动力学研究的主要方向或领域有多种划分维度。从冲击速度维度看,主要包括飞机正常着陆/非正

常着陆(冲击速度一般不超过 10m/s)、舰载机的弹射起飞/拦阻着舰(冲击速度一般在 60~80m/s)、飞鸟等离散源撞击(冲击速度一般在 50~300m/s)、发动机包容性(冲击速度一般在 500m/s 左右)和战斗损伤或客舱内安保问题(冲击速度可超过 1000m/s)等,如图 1 所示;从研究对象维度看,主要包括材料级的动态力学性能、元件级的动态连接失效和界面非连续动力学问题、结构件级的动态能量吸收与响应控制、整机级的动态载荷、应力波传递、能量耗散与动态响应等;从研究方法维度看,主要有理论建模方法、数值计算方法和试验研究方法等。

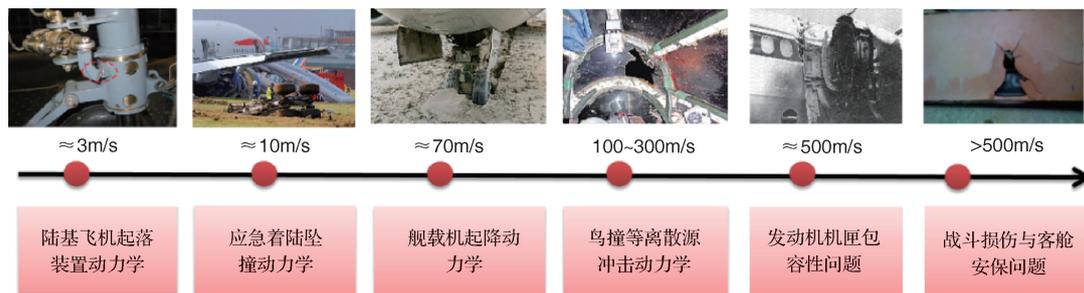


图 1 从速度维度划分的主要航空结构冲击动力学问题

Fig.1 The aviation impact dynamics research area by velocity dimension

航空结构冲击动力学技术体系构建的总体思路是基础技术共用化、专项能力特色化、载荷环境多样化。基础技术能力主要指动态测量技术、试验数据处理与大数据技术的应用、考虑动力学边界效应的试验夹具设计技术等;专项能力主要指材料/元件动态力学行为、鸟撞等离散源撞击动力学、坠撞动力学、飞机起降动力学等特色方向,以及冲击动力学工具软件研发和新型轻质材料/结构的冲击动力学行为研究等,核心是要突出航空特色;载荷环境多样化指的是要考虑冲击载荷与其他因素的相互关系问题,如极端气候、高温、复杂应力边界下的冲击动力学问题等,要充分考虑航空结构的运营和服役需求。技术架构框架见表 1。

## 2 材料动态性能与损伤机理研究

材料动态性能和损伤机理主要研究航空材料和典型结构的动态力学性能和损伤机理,其中,中低应变率( $10^{-1} \sim 10^3 \text{s}^{-1}$ )条件下材料的动态力学性能测试与表征技术是实验室的研究特色。已建成了由万能材料试验机、高速液压伺服材料试验机和霍普金森杆装置、非接触测试系统等组成的体系化材料动态力学性能试验设施(见图 2),具备的研究

表 1 航空结构冲击动力学技术架构

Table 1 Technology frame of aviation structure impact dynamics

研究方向	材料/结构冲击性能与损伤机理 结构坠撞动力学分析与试验技术 离散源冲击分析与试验技术 飞机起降冲击动力学分析与试验技术 结构冲击动力学工具软件 新型轻质材料与结构冲击动力学行为
基础技术	动态测量技术、数据处理与数据库、试验大数据挖掘、试验工装设计等
载荷环境	硬物撞击、软体撞击、冲击波、温度场、气候环境、应力环境等

能力包括:(1)宽应变率( $10^{-4} \sim 10^4 \text{s}^{-1}$ )范围下材料的动态力学性能试验与表征;(2)航空紧固件、典型连接结构动态失效试验与失效判据构建;(3)特殊环境下(高低温、复杂应力状态)材料/结构的动态力学性能试验与失效机理;(4)材料动态力学性能试验测试新方法应用与动态本构数据库构建等,如图 3、图 4 所示。

通过高速液压伺服材料试验机进行材料的中等应变率动态力学性能测试时,试验系统加载链的惯性效应和应力波效应引起动态载荷测试信号的振荡,掩盖了材料动态失效过程的真实载荷信号,通过材料拉伸载荷近端间接测试

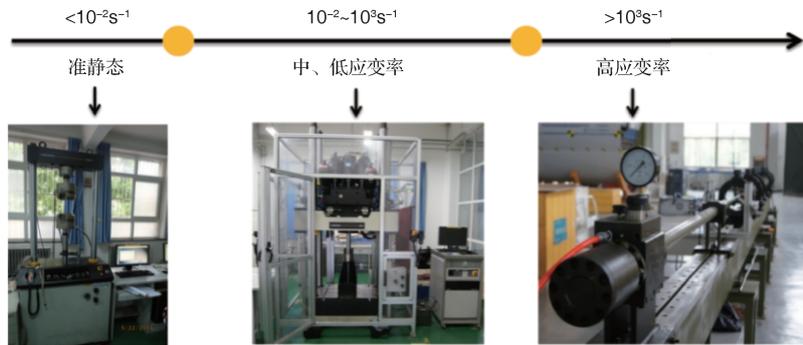


图2 材料动态性能试验设施

Fig.2 Experimental device for dynamic properties of materials

方法,有效地消除了试验加载的惯性影响,实现中低应变率范围内材料动拉伸载荷的精确测量<sup>[3]</sup>。针对材料动态拉伸应变场的测量问题,引入了非接触测试与分析手段,解决了由脆性到高韧性的材料动拉伸应变非接触测试问题。归纳了材料中低应变率动态本构模型,研发了材料中低应变率力学性能试验数据分析专用软件。

在航空材料动态力学性能研究方面,目前已获得了多

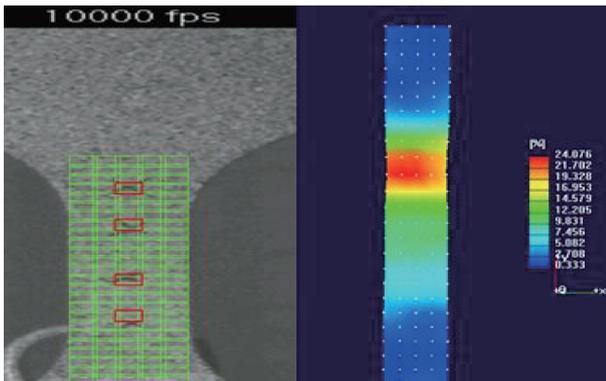


图3 动态拉伸应变非接触测试

Fig.3 Non-contact strain test

种典型航空材料<sup>[4-7]</sup>在中低应变率范围下的动态力学性能数据,结合材料的准静态和高应变率力学性能数据,建立了宽应变率范围下材料的动态本构关系,实现了材料与相关力学性能的完整表达<sup>[8]</sup>。该技术方向成果成功应用于多个军民机型号的机体材料选型,为各类结构的抗冲击评定提供了精确的材料动态力学性能数据。

在航空紧固件、连接结构的动态力学性能研究方面,在国内较早突破了航空紧固件、典型机械连接结构的动态复合加载试验技术研究<sup>[9]</sup>,建立了航空紧固件动态复合加载失效判据方程,并结合理论推导、数值仿真等手段,探索了冲击速度和

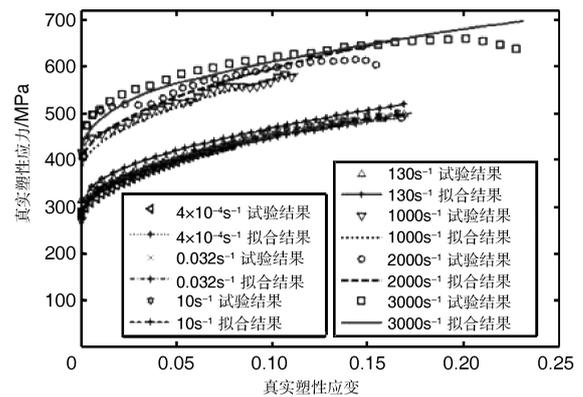


图4 2A16-T4 铝合金动态力学性能曲线

Fig.4 Dynamic mechanical property curve of 2A16-T4 aluminum alloy

拉-剪复合加载方式对紧固件失效模式和力学特性的影响规律<sup>[10-13]</sup>。高锁螺栓的动态复合加载失效特性如图5所示。

在点阵材料、含能材料等特殊材料的动态冲击性能研究方面,研制了专用的材料动态力学性能试验加载支持装置,基于高速液压伺服材料试验机,实现了适用于不同环境温度、不同加载状态的快速加载试验能力,在含能材料、点阵材料、蜂窝材料及负泊松比材料等特殊材料的动态力学性能研究中获得工程应用<sup>[14]</sup>。图6为连接结构的动态拉伸失效过程,图7为含能材料不同温度下的动态压缩结果。

国内西北工业大学、中国科学技术大学、宁波大学、中科院力学所等单位则在高应变率下材料动态性能与损伤机理方面开展了多年的研究工作,如西北工业大学在极端环境下材料/结构的力学行为研究方面开展了卓有成效的工作<sup>[15-18]</sup>。

材料动态性能与损伤机理领域的研究热点主要有:新型材料(如3D打印材料、形状记忆合金等)动态力学性能试验方法与失效物理机制<sup>[19-22]</sup>、复合材料机械连接结构复杂

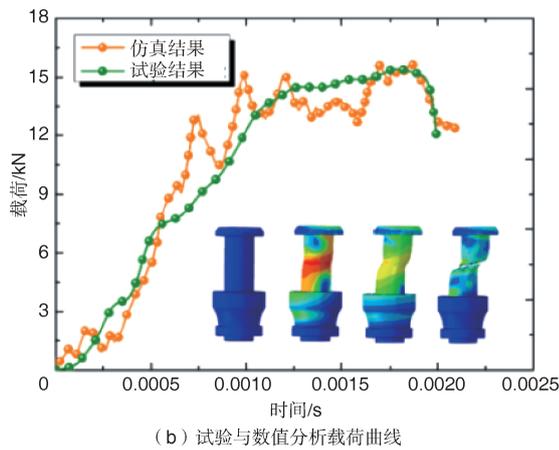
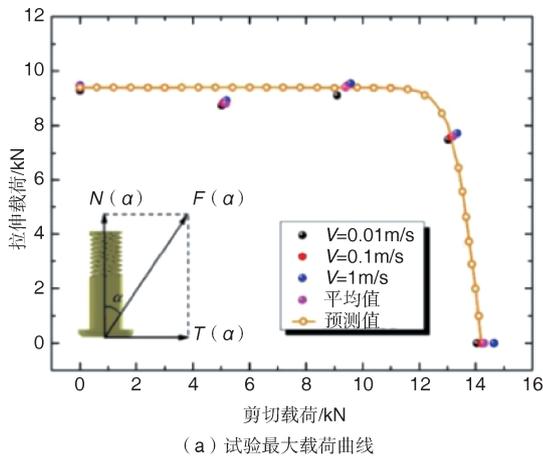


图5 高锁螺栓的动态复合加载失效特性

Fig.5 Dynamic loading failure characteristics of high lock bolt

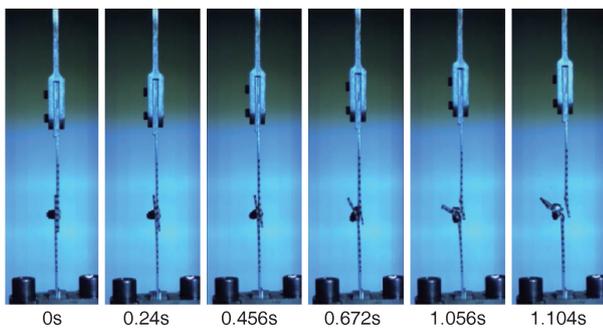


图6 连接结构的动态拉伸失效过程

Fig.6 Dynamic tensile failure process of connecting structure

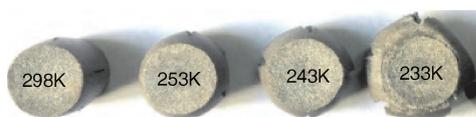


图7 含能材料不同温度下的动态压缩结果

Fig.7 Dynamic compression of energetic materials

动态加载失效模式<sup>[23,24]</sup>、多场耦合环境下材料的宽应变率动态力学行为<sup>[25]</sup>和金属/复合材料的动态力学性能试验规范与数据库构建<sup>[26,27]</sup>等。

### 3 结构坠撞动力学研究

结构坠撞动力学主要研究复杂边界下的航空结构能量吸收设计方法、大型复杂机体结构的冲击动力学建模与分析方法、坠撞环境下客舱安全综合分析与试验方法、应急脱离机构设计与试验方法、冲击动力学缩比理论与模型设计方法和大型全尺寸结构坠撞试验方法等。具备的试验能力包括：(1)能量吸收试验台,包括大质量跨度落锤试验台、大质量跌落试验台等；(2)客舱结构件/舱内设施冲击试验台,包括航空座椅动力学试验台、航空坐垫刚性座椅试验台、行李箱冲击试验台等；(3)机身段/全机坠撞试验系统等。配套有完备的接触/非接触动态测试能力,形成了从材料到整机的系列化、多层级能量吸收/坠撞动力学试验能力。

飞机在可生存的应急坠撞过程中,主要通过机身下部结构的变形和失效吸收冲击能量,减缓冲击载荷,通过合理的刚度和吸能特性设计,能保证在客舱地板下部结构吸收能量的同时保证机身客舱地板上部结构的完整性,给予乘员充足的应急坠撞生存空间<sup>[28]</sup>。实验室率先在国内开展民机结构应急坠撞动力学相关研究(见图8),结合物理试验与数值仿真相结合的研究手段,构建了覆盖“吸能元件—典型结构件—吸能组件—典型结构/系统—全尺寸机体结构”多层级的结构坠撞动力学研究分支。

实验室完成了一系列民机结构的坠撞试验,在2012年完成了国内首次机身框段坠撞试验,试验测试的数据包括地面撞击载荷、试验件的撞击速度及其变化情况、试验件动



图8 民机适坠性多层级研究技术体系

Fig.8 Multi-level research technology of civil aircraft crashworthiness

态破坏过程的姿态和模式变化、关键部位的应变和加速度、假人的加速度响应及肢体运动形态、安全带载荷等<sup>[29-31]</sup>。对比典型机身框段数值仿真和坠撞试验的结果,两者总体失效模式一致,坠撞峰值载荷分析结果与试验结果相比,误差在 $\pm 10\%$ 以内。图9为金属机身结构坠撞试验。

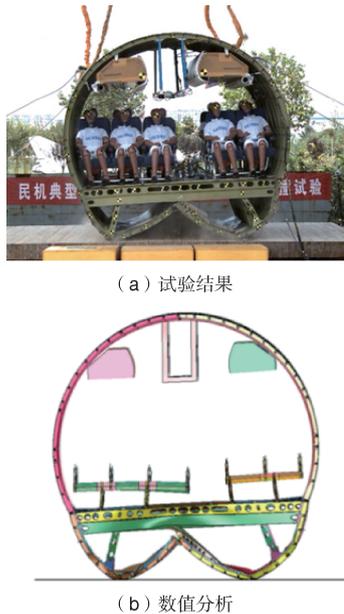


图9 典型金属机身结构坠撞试验

Fig.9 Typical fuselage section structure crash test

客舱安全是民机适坠性研究的重点,航空座椅作为客舱内的重要结构系统,在乘员安全和客舱安全方面起着重要的作用,实验室配套了高精度加速度试验台和航空假人,开展了系列弹性/刚性座椅<sup>[32]</sup>的动态冲击试验,构建了完善的航空座椅/假人及其约束系统动态冲击试验与评估体系(见图10)。另外,实验室还开展了航空座椅坐垫、靠垫的动力学性能表征方法研究,提出了航空座椅坐垫、靠垫的适航等效替换验证方法,研究成果支撑了系列国产化航空座椅的研制和适航审定,并在可替换航空座椅坐垫的研制中取得了实际的工程应用。

南京航空航天大学、北京航空航天大学、西北工业大学、中国民航大学等单位则主要在飞机结构抗坠撞分析与优化设计方面开展了多年的研究工作<sup>[33-36]</sup>。

结构坠撞动力学技术领域的研究热点主要有:先进吸能材料/结构的研发与抗坠撞应用<sup>[37]</sup>、面向民机适航的结构坠撞动力学分析评估方法<sup>[38-40]</sup>、考虑应急坠撞场景的人员应急撤离分析与试验方法<sup>[41-44]</sup>、冲击载荷下航空座椅/乘员耦合动力学分析与试验方法<sup>[45,46]</sup>、多层级的机体结构抗坠撞试验方法与高精度坠撞动力学评估等。



(a) 弹性座椅



(b) 刚性座椅

图10 航空座椅系统动态冲击试验

Fig.10 Dynamic impact test of aviation seat system

#### 4 离散源撞击动力学研究

离散源撞击动力学主要研究离散源撞击试验技术、创新的结构设计方法、高精度的数值计算方法和相关力学基础问题等,已建成了由D50/D30口径二级高速空气炮、D180/D80口径低速空气炮等组成的系列离散源撞击试验设施,具备的试验能力包括:(1)按军机规范和民机适航标准开展各种规格离散源(飞鸟、冰雹、轮胎碎片、碎石等)撞击试验能力;(2)轻小型无人机撞击试验能力,包括人员碰撞和各种地面财产碰撞;(3)军机作战场景下典型射弹、破片、杆条等高速撞击试验能力等。

在结构抗鸟撞研究中,为提高试验结果的重复性,更好地验证数值方法,研究中提出了可以用人工鸟替代飞鸟,实验室在国内率先研制成功了工程实用的人工鸟,其主要成分为明胶,是一种典型的多孔材料,在高速撞击条件下的动态力学特性与真实鸟体具有一定相似性,均呈现出流体的特性,可以用状态方程描述其动态本构关系<sup>[47]</sup>。在鸟撞过程中,影响撞击载荷或结构破坏模式的主要是鸟体的密度、速度、质量和撞击方向等,因此人工鸟研制的关键控制参数是其密度和质量分布,一般用长径比为2:1、两端半球中间圆柱的几何体描述等效鸟体。通过典型平板撞击试验,研究了人工鸟与真鸟的等效关系,试验表明人工鸟与真鸟平板撞击试验中的响应特征基本一致<sup>[48]</sup>,并通过试验数据的反演获得了鸟体的本构模型参数(见图11)。

随着轻小型无人机广泛地应用于个人娱乐和工业领

域,引发了公众对无人机碰撞安全的关注,监管部门也在探索实践轻小型无人机的安全管控问题。实验室率先提出了轻小型无人机碰撞被动安全特性的概念,并开展了轻小型无人机碰撞安全问题的相关研究工作(见图12)。无人机被动安全概念与无人机主动安全相对应。主动安全指的是通过电子围栏、主动避障、航路规划、航路等级划分等主动措施避免无人机与空域或地域内的其他物体发生碰撞;而被动安全则是无人机整体固有特性之一,类似于汽车的被动安全,其特性与无人机的结构材料、结构形式、质量分布等有关,表征了无人机在特定碰撞条件下不导致被撞物严重损伤的品质。民用轻小型无人机碰撞安全在学科上属于结构冲击动力学的研究领域,与鸟撞等离散源撞击问题等具有类似的技术背景,区别在于无人机具有可设计性,可以通过改变无人机的材料、结构等设计参数来降低被撞物的损伤程度。实验室已经率先开展了轻小型无人机碰撞人体、碰撞通航飞机风挡结构等的研究性试验<sup>[49]</sup>,取得了阶段性的研究成果。

对于燃油箱结构,水锤效应是一种严重的气-固-液耦合毁伤效应,实验室基于高速空气炮,开展了高速射弹冲击复合材料燃油箱结构的试验研究工作(见图13),获得了水锤效应对燃油箱结构损伤破坏的影响,基于仿生学概念,提出格栅式抗冲击燃油箱结构,设计了相关模拟件,开展了系列试验,并结合 SPH-FEM 方法开展了数值研究,评估了充液比例、射弹速度、液面压力以及流体黏性等对格栅式燃油

箱结构抗冲击性能的影响规律,发现射弹速度和液面压力对燃油箱结构损伤程度起主要作用,而充液比例和流体黏性影响较小<sup>[50]</sup>。

西北工业大学、南京航空航天大学等在鸟撞和战斗损伤等离散源撞击动力学方面也开展了多年的研究工作。

离散源撞击动力学领域的研究热点主要有:强非线性条件下的高精度动力学建模与分析方法<sup>[51]</sup>、结构动态变形/动态响应的高精度测试方法<sup>[52,53]</sup>、考虑冲击载荷的结构拓扑/几何优化方法<sup>[54]</sup>、界面不连续对冲击载荷传递与冲击能量耗散的影响、激光聚能武器对材料/结构热-力耦合毁伤模式影响<sup>[55-57]</sup>等。

## 5 飞机起降装置冲击动力学研究

飞机起降装置冲击动力学主要研究各种构型起落装置的缓冲性能优化与试验方法、边界突变条件起降装置动响应分析与试验方法、拦阻钩-甲板刚性碰-磨力学行为与试验方法、考虑升力影响的整机受控落震试验方法、起落架非线性摆振稳定性分析与试验方法、减摆器动力学特性预计与试验方法等。具备的试验能力包括:(1)系列起落架落震试验台,满足涵盖0.5~200t级飞机起落架落震试验要求;(2)起落架摆振试验台,配套齐备的扰动施加、响应测量、边界刚度模拟条件;(3)航空轮胎动力学特性试验台;(4)减摆器阻尼特性试验台;(5)起落架突伸/越障动力学特性试验台;(6)全机落震试验系统等。

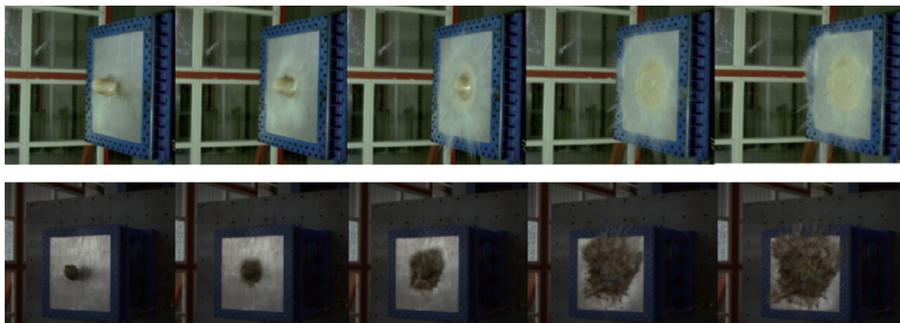


图11 真鸟与人工鸟撞击过程的动态变形对比

Fig.11 Dynamic deformation comparison between real bird and artificial bird



图12 小型无人机与鸟体撞击直升机风挡对比试验

Fig.12 The comparative of windshield impact test results between the small UAV and bird

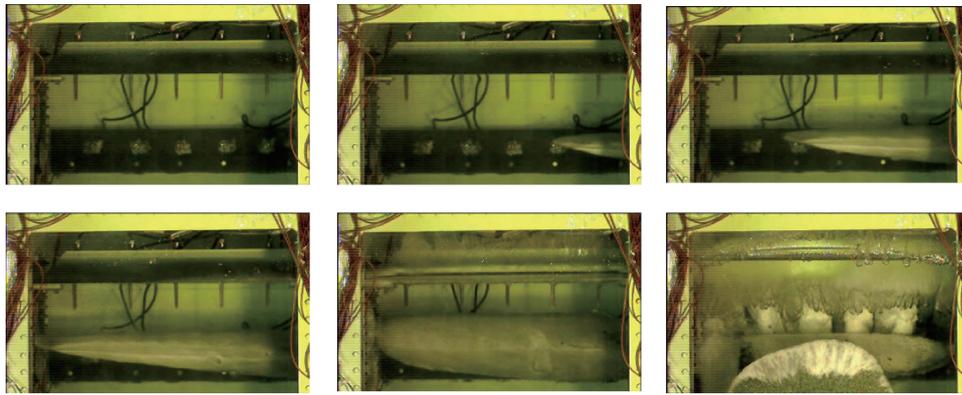


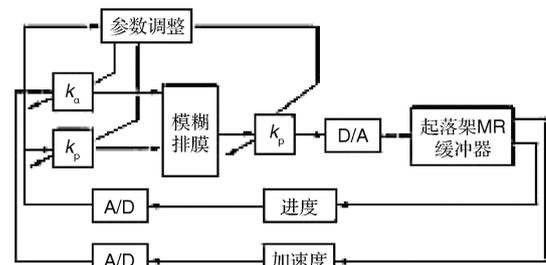
图 13 充液箱体高速冲击试验

Fig.13 High speed impact test of liquid filled box

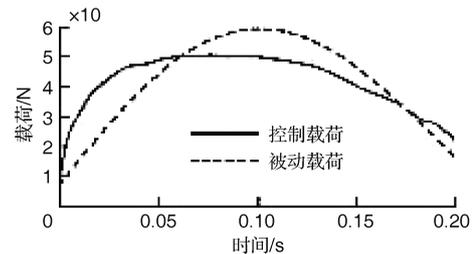
传统油气式缓冲器的缓冲效率和油液式减摆器的阻尼性能基本已挖掘到极限,磁流变液作为一种可控的介质,成为了领域内的研究热点。实验室开展了磁流变缓冲器和减摆器的研究工作,一方面开展流道的截面匹配,另一方面在磁场设计和反馈算法方面进行优化,融合了传统小孔阻尼和介质黏性可调的优点,并开展了原理件的能量吸收试验和阻尼特性试验,并进行了实际起落架结构的对比验证试验研究,试验证明磁流变介质的应用可以有效提升缓冲效率并实现阻尼的动态可调<sup>[58]</sup>,但还需要在控制系统的小型化和机载适应性、颗粒介质的动态密封、考虑温度—磁场—控制的载荷预计等方面进行深入研究。图 14 为磁流变缓冲器框图与控制效果。

轻小型无人机和通用飞机机体通过大量使用复合材料和新型轻质结构,结构效率有了明显提升,但起落装置依然延续了传统设计理念,一定程度上造成了起落架刚度与机体刚度的匹配难题,导致了一系列起落架摆振动力学问题,考虑机体局部连接刚度和整体机体动力特性的非线性摆振特性预计与试验方法成为研究热点。研究表明起落架与机体连接处局部刚度对起落架摆振稳定性影响比较明显;连接处局部刚度越小,系统所需临界阻尼越大,系统越不稳定,反之亦然;连接处局部刚度越小,系统摆振频率越小,反之亦然。在防摆设计时,应考虑起落架与机体连接处局部刚度与起落架侧向刚度之间的匹配关系<sup>[59]</sup>。图 15 为考虑局部刚度的摆振分析模型。

起落架突伸是舰载机起落架特有的动力学问题<sup>[60,61]</sup>,分为弹射突伸和离舰突伸两类,位移边界突变和载荷边界快速释放诱发的动响应会显著影响飞机的运动姿态,进而对飞机的安全性造成影响,需要与控制进行匹配,实验室提出了基于当量质量等效的前起落架突伸试验方法,设计了



(a) 控制原理



(b) 控制效果

图 14 磁流变缓冲器框图与控制效果

Fig.14 Block diagram and control effect of magnetorheological buffer

弹射突伸释放模拟装置和离舰突伸模拟装置,并建成了起落架突伸试验台。研究表明对于双气腔油气式起落架,起落架突伸性能提升会导致起落架缓冲效率降低和载荷增大。在弹射式舰载机起落架设计时,必须综合考虑突伸性能和缓冲性能<sup>[62,63]</sup>。图 16 为突伸状态起落架受力图。

舰载机全机落震试验是获得舰载机着舰动态载荷的直接手段<sup>[64]</sup>,也是国内外舰载机研制过程中必须要开展的整机性重大试验,美国先后开展了 10 余型舰载机的全机落震试验研究。实验室提出了整机落震试验的总体技术方案和实施路径,突破了飞机升力等效模拟方法与加载装置设计技术、多机轮高转速同步驱动与控制技术、多姿态协调控制与补偿方法以及

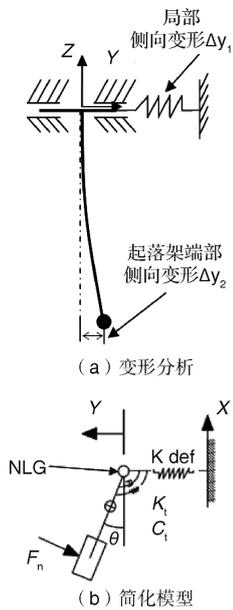


图15 考虑局部刚度的摆振分析模型

Fig.15 Shimmy analysis considering local stiffness

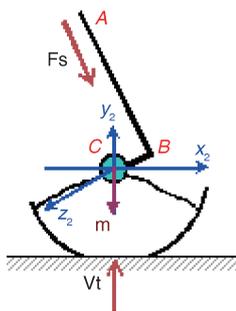


图16 突伸状态起落架受力图

Fig.16 Landing gear force function under sudden extension

多源异构动态数据高精度采集与实时处理技术<sup>[65]</sup>等难题,成功完成了整机级的全机落震试验(见图17)。后续还需要在升力模拟的影响评估、非对称落震试验方法等方面持续研究<sup>[66]</sup>。

南京航空航天大学、哈尔滨工程大学等单位在飞机起落架动力学设计、优化与验证方面开展了多年的研究工作<sup>[67-70]</sup>。

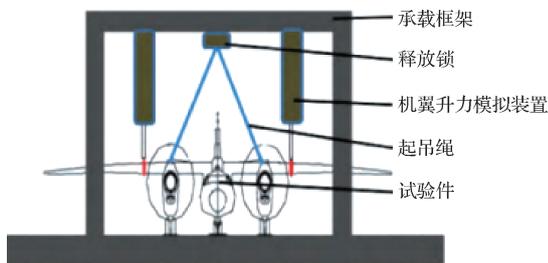


图17 全机落震试验示意图

Fig.17 Full-scale aircraft drop test

飞机起降装置动力学领域的研究热点主要有:考虑机体弹性效应的载荷高精度预计方法、极端环境下缓冲器/阻尼器的动力学特性预计与试验技术、航空轮胎高精度动态性建模与试验技术、起降装置的冲击疲劳特性评定技术、考虑舰面运动与甲板特性的滑跑稳定性分析与试验技术,以及新概念起落装置设计与性能评估方法等。

## 6 总结与展望

### 6.1 总结

航空结构冲击动力学研究以飞机服役/运营过程中可能遭遇的各种冲击动力学现象为关注重点,涉及诸多力学基础和前沿科学问题,如材料/结构的动态失效和损伤机理、能量的受控耗散、高效高精度数值计算方法、复杂冲击动力学过程的试验模拟等,越来越受到学术界和工程界的广泛关注,国内一批高校和科研院所均在领域内开展了卓有成效的研究工作,取得了丰硕的研究成果。

结构冲击动力学航空科技重点实验室始终专注于该领域,致力于新方法、新技术的研究工作,并充分发挥重点实验室的创新平台作用,紧密围绕学术前沿和工程需求,积极推动研究成果的应用。

实验室已建成了体系化的航空结构冲击动力学试验能力,包括一批填补国内空白的重大试验能力,如全机落震试验能力、整机/机身垂直段坠撞试验能力、可控波形冲击试验能力(大过载100g;大脉宽 $\leq 200\text{ms}$ ;大载荷 $\leq 400\text{t}$ ;多样化波形模拟等)、大质量跨度落锤试验台(2~200kg)以及系列化的起落架动力学试验能力(落震试验能力、摆振试验能力、突伸试验能力、拦阻钩碰撞试验能力、减摆器试验能力、轮胎动力学试验能力)等,有力地支撑了型号研制,也为学科的跨越发展奠定了坚实的基础。

在主要技术研究方向上,实验室与国内外相关高校和科研机构组成联合团队,开展了大量的基础研究,取得了丰硕的科技成果,特别是在软材料动态力学性能测试、含能材料动态压缩力学特性、连接件/结构动态失效、人工鸟动态力学特性、轮胎等效动力学建模与分析方法、起落架越障动力学建模与响应分析、新概念吸能结构设计与其特性表征等方面取得了技术突破,推动了航空结构冲击动力学技术的发展。

### 6.2 展望

冲击动力学问题是关系到飞机服役安全的关键结构强度问题,如何在确保安全性的前提下减轻结构质量、延长预期服役寿命和降低成本,是冲击动力学专业需要长期思考

的命题,包括冲击载荷如何转化为设计载荷、冲击损伤如何准确预计和维修、冲击事件如何监测与评估、非破坏冲击过程对疲劳的影响机理等都是需要重点关注的方向。

在基础研究方面,结合新材料、新工艺和新结构的发展,考虑实际服役条件(气候环境、载荷环境、作战场景等),在材料动态力学行为、复杂环境下的受控能量吸收与结构失效、新缓冲概念起落装置、环境不敏感缓冲介质开发等方面开展研究。

在试验技术研究方面,还要不断发展新的面向真实服役场景的综合试验验证能力,在冲击环境等效模拟方法、冲击过程的实验室再现等方面深入研究,并开发高精度的动态测试方法,提高试验过程的观测能力,并结合试验方法的研究,提供体系化的试验规范和试验指南。

在分析工具开发方面,结合大量的试验数据积累,基于工程研制需求,开发特色的航空结构冲击动力学专用分析软件,如起落架动力学分析软件系统等,并发展数据驱动的结构冲击动力学特性评估软件和工具。

AST

## 参考文献

- [1] 余同希,邱信明. 冲击动力学[M]. 北京:清华大学出版社,2011.  
Yu Tongxi, Qiu Xinming. Impact dynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.(in Chinese)
- [2] CCAR-25-R4 运输类飞机适航标准[S]. 中国民用航空局, 2011.  
CCAR-25-R4 Airworthiness standard of transport aircraft [S]. CAAC,2011.(in Chinese)
- [3] 白春玉,刘小川,周苏枫,等. 中应变率下材料动态拉伸关键参数测试方法[J]. 爆炸与冲击, 2015,35(4):507-512.  
Bai Chunyu, Liu Xiaochuan, Zhou Sufeng, et al. Material key parameters measurement method in the dynamic tensile testing at intermediate strain rate[J]. Explosion and Shock Waves, 2015,35(4):507-512.(in Chinese)
- [4] 惠旭龙,白春玉,葛宇静,等. 2A16铝合金中应变率力学性能研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(19):66-70.  
Xi Xulong, Bai Chunyu, Ge Yujing, et al. Dynamic properties of 2A16 aluminum alloy under intermediate strain rate[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(19): 66-70. (in Chinese)
- [5] 惠旭龙,牟让科,白春玉,等. TC4钛合金动态力学性能及本构模型研究[J]. 振动与冲击, 2016,35(22):161-168.  
Xi Xulong, Mu Rangke, Bai Chunyu, et al. Dynamic mechanical property and constitutive model for TC4 titanium alloy[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(22): 161-168. (in Chinese)
- [6] 惠旭龙,刘小川,白春玉,等. 碳纤维增强复合材料的中低应变率力学性能试验研究[J]. 装备环境工程, 2018,15(9):81-84.  
Xi Xulong, Liu Xiaochuan, Bai Chunyu, et al. Mechanical properties of carbon fiber reinforced composite materials under intermediate strain rate[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018,15(9):81-84.(in Chinese)
- [7] 葛宇静,白春玉,惠旭龙,等. 聚碳酸酯中低应变率范围下动态力学性能研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(9): 66-70.  
Ge Yujing, Bai Chunyu, Xi Xulong, et al. Dynamic mechanical property of polycarbonate under intermediate and low strain rates [J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(9): 66-70.(in Chinese)
- [8] 惠旭龙,白春玉,刘小川,等. 宽应变率范围下2A16-T4铝合金动态力学性能[J]. 爆炸与冲击, 2017, 35(5):1-8.  
Xi Xulong, Bai Chunyu, Liu Xiaochuan, et al. Dynamic mechanical properties of 2A16-T4 aluminum alloy at wide-ranging strain rates[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 35(5):1-8.(in Chinese)
- [9] 惠旭龙,刘小川,白春玉,等. 复合材料高锁螺栓连接元件动态失效测试方法[C]//第十二届全国爆炸力学学术会议, 2018. (in Chinese)  
Xi Xulong, Liu Xiaochuan, Bai Chunyu, et al. Dynamic failure test method of composite high lock bolt connection component [C]// The 12th National Conference on Explosive Mechanics, 2018.(in Chinese)
- [10] Liu Xiaochuan, Xi Xulong, Bai Chunyu, et al. Dynamic response and failure mechanism of Ti-6AL-4V hi-lock bolts under combined tensile-shear loading [J]. International Journal of Impact Engineer, 2019, 131: 140-151.
- [11] 惠旭龙,刘小川,白春玉,等. 复合材料结构用高锁螺栓的动态复合加载失效特性[J]. 兵工学报, 2019,40(10):2142-2150.  
Xi Xulong, Liu Xiaochuan, Bai Chunyu, et al. Failure characteristics of high-lock bolts for composite structures under dynamic combined loading[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(10):2142-2150.(in Chinese)
- [12] 解江,白春玉,舒挽,等. 航空铆钉动态加载失效试验[J]. 爆炸与冲击, 2017,37(5):879-886.

- Xie Jiang, Bai Chunyu, Shu Wan, et al. Dynamic loading failure experiment of aeronautic rivet[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017,37(5):879-886.(in Chinese)
- [13] 惠旭龙,牟让科,白春玉. 铆钉元件纯剪切失效特性研究[J]. *科学技术与工程*, 2015,15(27):146-151.
- Xi Xulong, Mu Rangke, Bai Chunyu. Study of the pure shear failure characteristics of the rivet[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(27): 146-151.(in Chinese)
- [14] 王哲君,强洪夫,王广,等. 中应变率下HTPB推进剂压缩力学性能和本构模型研究[J]. *推进技术*, 2016,37(4):776-782.
- Wang Zhejun, Qiang Hongfu, Wang Guang, et al. Mechanical properties and constitutive model for htpb propellant under intermediate strain rate compression[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016,37(4):776-782.(in Chinese)
- [15] 张超,索涛,谭伟力,等. 一种超高温动态力学行为测试及原位图像获取方法[J]. *高压物理学报*, 2018,32(01):100-106.
- Zhang Chao, Suo Tao, Tan Weili, et al. A method for testing dynamic mechanical behavior of materials at ultra-high temperature and in-situ observation[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2018,32(01):100-106.(in Chinese)
- [16] 王振,张超,王银茂,等. 飞机风挡无机玻璃在不同应变率下的力学行为[J]. *爆炸与冲击*, 2018,38(02):295-301.
- Wang Zhen, Zhang Chao, Wang Yinmao, et al. Mechanical behaviours of aeronautical inorganic glass at different strain rates[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018,38(02):295-301.(in Chinese)
- [17] 汪存显,高豪迈,龚煦,等. 航空铆钉连接件的抗冲击性能[J]. *航空学报*, 2019,40(01):289-301.
- Wang Cunxian, Gao Haomai, Gong Xu, et al. Impact response of aeronautic riveting structures[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019,40(01):289-301.(in Chinese)
- [18] 汪存显,索涛,李玉龙,等. 不同温度和应变速率下超细晶铝的力学行为[J]. *中国有色金属学报*, 2014,24(05):1200-1205.
- Wang Cunxian, Suo Tao, Li Yulong, et al. Mechanical behavior of ultra-fine grained aluminum at different temperatures and strain rates[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014,24(05):1200-1205.(in Chinese)
- [19] 高士友,黎宇航,周野飞,等. 熔融沉积(FDM) 3D打印成形件的力学性能试验研究[J]. *塑性工程学报*, 2017,24(01):200-206.
- Gao Shiyu, Li Yuhang, Zhou Yefei, et al. Mechanical properties experiment of 3D printing forming specimens with Fused Deposition Modeling (FDM) [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2017,24(01):200-206.(in Chinese)
- [20] 谭树杰,李多生,秦庆华,等. 激光3D打印80Ni20Cr合金的显微组织及力学性能[J]. *中国有色金属学报*, 2017,27(08):1572-1579.
- Tan Shujie, Li Duosheng, Qin Qinghua, et al. Microstructure and mechanical properties of 80Ni20Cr alloy manufactured by laser 3D printing technology[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(08): 1572-1579.(in Chinese)
- [21] 韩悌信,曾祥国,陈华燕,等. TiNi形状记忆合金动态力学性能测试[J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(S1):45-50.
- Han Tixin, Zeng Xiangguo, Chen Huayan, et al. Tests of dynamic mechanical properties for TiNi shape memory alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(S1):45-50. (in Chinese)
- [22] 杜义贤,李荣,徐明,等. 负泊松比微结构拓扑优化设计[J]. *工程设计学报*, 2018, 25(04):450-456.
- Du Yixian, Li Rong, Xu Ming, et al. Topology optimization design for negative Poisson's ratio microstructure[J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2018, 25(04):450-456.(in Chinese)
- [23] 刘通,许希武,林智育. 复合材料厚板单钉螺栓连接强度研究[J]. *机械强度*, 2017, 39(02):353-359.
- Liu Tong, Xu Xiwu, Lin Zhiyu. Reserach on the thick composite laminate bolt joint strength[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2017, 39(02):353-359.(in Chinese)
- [24] 赵丽滨,刘丰睿,黄伟,等. 复合材料螺栓连接失效分析研究进展[J]. *强度与环境*, 2017, 44(03):1-11.
- Zhao Libin, Liu Fengrui, Huang Wei, et al. Advances in failure analysis methods of bolted composite joints[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2017, 44(03):1-11.(in Chinese)
- [25] 靳昊扬. 密排六方晶体金属正交各向异性屈服行为的新表征[D]. 大连: 大连海事大学, 2018.
- Jin Haoyang. New characterization of orthotropic yield behavior of HCP metals[D]. Dalian: Dalian Maritim University, 2018. (in Chinese)
- [26] 秦庆华,张建勋,艾伟龙,等. 轻质金属泡沫夹芯曲板的抗爆炸冲击响应研究[J]. *固体力学学报*, 2017, 38(05):391-399.
- Qin Qinghua, Zhang Jianxun, Ai Weilong, et al. Study on resistance of lightweight sandwich curve plates with metal

- foam core to blast loadings[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2017, 38(05):391-399.(in Chinese)
- [27] 戎翔,邓安仲,李飞,等. 柱胞夹芯复合材料设计加工及吸性能研究现状[J]. 材料导报,2018, 32(05):822-827.  
Rong Xiang, Deng Anzhong, Li Fei, et al. Column cellular sandwich composite material: design, processing and energy absorption property[J]. Materials Review,2018,32(05):822-827. (in Chinese)
- [28] Liu Xiaochuan, Guo Jun, Bai Chunyu, et al. Drop test and crash simulation of a civil airplane fuselage section[J].Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(2):447-456.
- [29] 刘小川,郭军,孙侠生,等. 民机机身段和舱内设施坠撞试验及结构适坠性评估[J].航空学报,2013,34(9):2130-2140.  
Liu Xiaochuan, Guo Jun, Sun Xiasheng, et al. Drop test and structure crashworthiness evaluation of civil airplane fuselage section with cabin interiors[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(9): 2130-2140.(in Chinese)
- [30] 刘小川,周苏枫,马君峰,等. 民机客舱下部吸能结构分析与试验相关性研究[J]. 航空学报,2012,33(12):2202-2210.  
Liu Xiaochuan, Zhou Sufeng, Ma Junfeng, et al. Correlation study of crash analysis and test of civil airplane sub-cabin energy absorption structure[J].Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(12):2202-2210.(in Chinese)
- [31] 马君峰,刘小川,周苏枫,等. 民用飞机客舱地板下部吸能结构坠撞特性评估[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(2):269-273.  
Ma Junfeng, Liu Xiaochuan, Zhou Sufeng, et al. Crashworthiness of civil aircraft energy absorption sub-structure[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(2): 269-273.(in Chinese)
- [32] 杨欢,牟让科,王亚锋,等. 基于刚性座椅的航空可替代座椅垫动态冲击试验方法研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(19): 290-294.  
Yang Huan, Mu Rangke, Wang Yafeng, et al. Research on dynamic impact test methodology of the aircraft replaceable seat cushion based on rigid seat[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(19): 290-294.(in Chinese)
- [33] 马聪瑶. 大型飞机典型货舱地板下部结构坠撞吸能特性研究[D]. 天津: 中国民航大学,2018.  
Ma Congyao. Crash characteristic for the cargo subfloor structure of civil aircraft[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China,2018.(in Chinese)
- [34] 李思潭,万小鹏,王文智,等. 民机货舱支柱对机身段抗坠撞性能的影响[J]. 机械科学与技术,2016,35(12):1956-1960.  
Li Sitan, Wan Xiaopeng, Wang Wenzhi, et al. Effect of rigidity of strut on crashworthiness of civil aircraft[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016, 35 (12):1956-1960.(in Chinese)
- [35] 王跃全,朱书华,童明波,等. 含货舱门的大型民机机身段垂直坠撞仿真分析[J]. 机械科学与技术,2015,34(06):957-962.  
Wang Yuequan, Zhu Shuhua, Tong Mingbo, et al. Simulation and analysis on vertical crash of civil aircraft fuselage section with cargo door[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering,2015,34(06):957-962.(in Chinese)
- [36] 任毅如,向锦武,罗漳平,等. 飞行器机身结构耐撞性分析与设计[J]. 工程力学,2013,30(10):296-304.  
Ren Yiru, Xiang Jinwu, Luo Zhangping, et al. Crashworthiness analysis and design of aircraft fuselage structure[J]. Engineering Mechanics, 2013,30(10):296-304.(in Chinese)
- [37] 冯振宇,周建,张雪晗,等. 复合材料薄壁圆管压溃吸能机理分析及层叠壳建模方法研究[J]. 振动与冲击,2017, 36(23): 268-275.  
Feng Zhenyu, Zhou Jian, Zhang Xuehan, et al. Mechanism analysis and laminated shell modeling for crushing energy absorption of composite thin-walled circular tubes[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(23):268-275.(in Chinese)
- [38] 张晓敏,马聪瑶,霍雨佳,等. 宽体客机机身框段适坠性仿真分析与评估[J]. 中国民航大学学报,2017, 35(04):36-40.  
Zhang Xiaomin, Ma Congyao, Huo Yujia, et al. Crashworthiness simulation analysis and evaluation of wide-body aircraft fuselage section[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2017, 35(04):36-40.(in Chinese)
- [39] 解江,牟浩蕾,邹田春,等. 货舱载荷对复合材料机身框段适坠性影响分析[J]. 机械强度,2017, 39(01):100-105.  
Xie Jiang, Mu Haolei, Zou Tianchun, et al. Simulaton analysis of cargo loading on crashworthiness of compsite fuselage section[J]. Journal of Mechanical Strength, 2017, 39(01): 100-105.(in Chinese)
- [40] 葛锐,朱德轩,卞刚. 民用飞机管路系统适坠性仿真分析研究[J]. 科技视界,2017(05):303.  
Ge Rui, Zhu Dexuan, Bian Gang. Simulation analysis and

- research on the crashworthiness of civil aircraft pipeline system [J]. *Science & Technology Vision*, 2017(05):303.(in Chinese)
- [41] 吴义兵,纪乾,宋娜,等. 民机客舱危险状况下乘员应急撤离预测研究[J]. *装备制造技术*,2018(03):93-96.  
Wu Yibing, Ji Qian, Song Na, et al. Prediction of passenger emergency evacuation in civil aircraft cabin under dangerous conditions[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2018(03): 93-96.(in Chinese)
- [42] 毛天露,何相君,黄英凡,等. 应急撤离场景中群体信息交流行为建模[J]. *系统仿真学报*,2018, 30(07):2482-2488.  
Mao Tianlu, He Xiangjun, Huang Yingfan, et al. Modeling on information exchange behavior in emergency evacuation[J] *Journal of System Simulation*, 2018, 30(07): 2482-2488. (in Chinese)
- [43] 李涛,王晓强,黄艳平. 应急滑梯撤离速率数值模拟及试验验证[J]. *舰船电子工程*,2017, 37(10):75-79.  
Li Tao, Wang Xiaoqiang, Huang Yanping. Ship numerical simulation and test verification of the evacuation rate of the emergency evacuation slide[J]. *Electronic Engineering*, 2017, 37(10): 75-79. (in Chinese)
- [44] 张振伟,刘明. 民用飞机应急撤离地面演示试验构型研究[J]. *科技视界*,2016(17):279-280.  
Zhang Zhenwei, Liu Ming. Study on the configuration of emergency evacuation ground demonstration test of civil aircraft[J]. *Science & Technology Vision*, 2016(17): 279-280. (in Chinese)
- [45] 杨全,谭玉生. 基于Johnson-Cook模型某航空16g座椅滑轨冲击动力学分析[J]. *科学技术与工程*,2017, 17(08):312-316.  
Yang Quan, Tan Yusheng. Impact dynamics analysis of an aviation seat track based on johnson-cook model[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(08):312-316.(in Chinese)
- [46] 邓先来,王翔. 航空座椅抗坠毁环境模拟技术分析[J]. *直升机技术*,2017(04):23-28.  
Deng Xianlai, Wang Xiang. Study the simulation technique of anti-crash environment about airline seat[J]. *Helicopter Technique*, 2017(04):23-28.(in Chinese)
- [47] 王计真,刘小川. 鸟撞平板试验与鸟体本构参数识别方法[J]. *航空学报*, 2017, 38(S1):102-107.  
Wang Jizhen, Liu Xiaochuan. Test of bird striking on panel and identification method for bird constitutive parameters[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(S1): 102-107.(in Chinese)
- [48] 刘小川,郭军,孙侠生,等. 用于鸟撞试验的仿真鸟弹研究[J]. *试验力学*, 2012, 27(05):623-629.  
Liu Xiaochuan, Guo Jun, Sun Xiasheng, et al. Investigation on the artificial bird projectile used in bird strike test[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2012, 27(05):623-629.(in Chinese)
- [49] 刘继军,刘小川,郭军. 小型无人机和鸟体对飞机风挡冲击对比研究[C]//2016(第六届)中国国际无人驾驶航空器系统大会论文集,2016:73-78.  
Liu Jijun, Liu Xiaochuan, Guo Jun. Comparative study impact of aircraft windshield between small UAV and bird[C]//2016 (Sixth) China International Unmanned Aerial Vehicle System Conference Proceedings, 2016: 73-78.(in Chinese)
- [50] 张宇,王彬文,刘小川,等. 球形弹丸对不同构型充液油箱的毁伤效应[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(35): 26-32.  
Zhang Yu, Wang Binwen, Liu Xiaochuan, et al. Damage effects of spherical projectiles on different configuration fuel tanks[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(35): 26-32. (in Chinese)
- [51] 段永照,姚卫星,陈方. 面向纤维增强复合材料低速冲击损伤的非线性混合模型[J]. *南京航空航天大学学报*,2018, 50(01): 16-23.  
Duan Yongzhao, Yao Weixing, Chen Fang. A nonlinear mixed-mod model oriented low velocity impact damage of FRP[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2018, 50(01):16-23.(in Chinese)
- [52] 韩涛,吴衡. 基于立体视觉的直升机旋翼桨叶三维动态变形测量[J]. *科学技术与工程*,2018, 18(08):322-327.  
Han Tao, Wu Heng. 3D dynamic deformation measurement of helicopter rotor blades based on stereovision[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(08):322-327.(in Chinese)
- [53] 张红颖,陈晨,王韶彬,等. 三维散斑相关法在机翼变形动态测量中的应用[J]. *测控技术*,2016, 35(07):31-34.  
Zhang Hongying, Chen Chen, Wang Shaobin, et al. Application of 3D-DSCM in dynamic test on airplane wing's deformation[J]. *Measurement & Control Technology*, 2016, 35(07): 31-34. (in Chinese)
- [54] 吴一帆,郑百林,杨彪. 考虑鸟撞的航空发动机叶片动态拓扑优化设计[J]. *航空动力学报*,2018, 33(08):1923-1932.

- Wu Yifang, Zheng Bailin, Yang Biao. Topological optimization design of aero-engine blade considering bird strike[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(08):1923-1932.(in Chinese)
- [55] 李清源. 强激光对飞行器的毁伤效应[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2012.
- Li Qingyuan. Damage effect of vehicles irradiated by intense lasers[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2012. (in Chinese)
- [56] 王秋实, 庞博, 张亦卓, 等. 长短脉冲复合激光对铝材的损伤机制[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(10):212-216.
- Wang Qiushi, Pang Bo, Zhang Yizhuo, et al. Damage mechanism of aluminum by long-short composite pulsed laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10):212-216.(in Chinese)
- [57] 程勇, 朱孟真, 马云峰, 等. 激光复合损伤机理与效应研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11):35-41.
- Cheng Yong, Zhu Mengzhen, Ma Yunfeng, et al. Mechanism and effects of complex laser ablation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(11):35-41.(in Chinese)
- [58] 刘冲冲, 刘小川, 牟让科, 等. 起落架磁流变缓冲器与验证试验设计研究[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(12): 1821-1824.
- Liu Chongchong, Liu Xiaochuan, Mu Rangke, et al. Designs of landing gear magnetorheological damper and virtual test[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(12): 1821-1824.(in Chinese)
- [59] 刘胜利, 刘小川, 崔荣耀, 等. 机体连接处局部刚度对轻型飞机起落架摆振稳定性的影响研究[J]. 振动工程学报, 2017, 30(02):249-254.
- Liu Shengli, Liu Xiaochuan, Cui Rongyao, et al. The influence of the fuselage joint local stiffness on landing gear shimmy stabilization of the light aircraft[J]. Journal of Vibration Engineering, 2017, 30(02):249-254.(in Chinese)
- [60] 豆清波, 刘小川, 奚杨风光, 等. 舰载机全机落震试验机翼升力模拟方法研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(02):51-56.
- Dou Qingbo, Liu Xiaochuan, Xi Yangfengguang, et al. Wing lift simulation method during full scale carrier-based aircraft drop tests[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(02):51-56.(in Chinese)
- [61] MIL-A-8863C. Military specification airplane strength and rigidity ground loads for navy acquired airplanes[S].1993.
- [62] 刘冲冲, 崔荣耀. 舰载机前起落架突伸性能分析与验证[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(11):1686-1690.
- Liu Chongchong, Cui Rongyao. Analysis and test for extension performance of nose landing gear of carrier-based aircraft[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016, 35(11):1686-1690.(in Chinese)
- [63] 豆清波, 陈熠, 马小莉, 等. 舰载机前起落架突伸性能试验研究[J]. 振动工程学报, 2018, 31(01):102-109.
- Dou Qingbo, Chen Yi, Ma Xiaoli, et al. Experimental study on the sudden-extension performance of carrier-based aircraft landing gear[J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(01): 102-109.(in Chinese)
- [64] 姚念奎, 周栋. 固定翼舰载机的全机落震试验[J]. 飞机设计, 2014, 34(04):31-36.
- Yao Niankui, Zhou Dong. Full-scale drop test of fixed-wing carrier-based aircraft[J]. Aircraft Design, 2014, 34(04): 31-36. (in Chinese)
- [65] 豆清波, 杨智春, 刘小川, 等. 舰载机全机落震试验方法[J]. 航空学报, 2017, 38(03):175-183.
- Dou Qingbo, Yang Zhichun, Liu Xiaochuan, et al. Test method for full scale drop of carrier-based aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(03):175-183.(in Chinese)
- [66] 聂宏, 彭一明, 魏小辉, 等. 舰载飞机着舰拦阻动力学研究综述[J]. 航空学报, 2014, 35(01):1-12.
- Nie Hong, Peng Yiming, Wei Xiaohui, et al. Overview of carrier-based aircraft arrested deck-landing dynamics[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(01):1-12.(in Chinese)
- [67] 房兴波, 聂宏, 张钊, 等. 计及弹射滑车质量的某舰载无人机弹射动态响应分析[J]. 航空学报, 2018, 39(12):200-208.
- Fang Xingbo, Nie Hong, Zhang Zhao, et al. Dynamic response analysis on carrier-based UVA considering shuttle mass[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(12): 200-208. (in Chinese)
- [68] 杨晓, 聂宏, 魏小辉, 等. 某型复合材料扁簧式起落架落震性能研究[J]. 航空计算技术, 2018, 48(03):107-110.
- Yang Xiao, Nie Hong, Wei Xiaohui, et al. Study on cushion performance of certain leaf spring landing gear of composite material[J]. Aeronautical Computing Technique, 2018, 48(03): 107-110.(in Chinese)
- [69] 喻浩文, 陈大伟, 顾宏斌. 舰载机弹射起飞动力学建模研究[J]. 航空计算技术, 2018, 48(06):64-67.

Yu Haowen, Chen Dawei, Gu Hongbin. Dynamic modeling for carrier-based aircraft catapult takeoff[J]. Aeronautical Computing Technique, 2018, 48(06): 64-67. (in Chinese)

[70] 朱齐丹, 鲁鹏, 杨智博, 等. 舰载机弹射起飞过程弹射杆受力与安全性分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(05): 110-115.

Zhu Qidan, Lu Peng, Yang Zhibo, et al. Force and safety analysis of launch bar in process of catapult launch for carrier-based aircraft [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2019, 47(05): 110-115. (in Chinese) (责任编辑 王昕)

### 作者简介

刘小川(1983-)男, 博士, 研究员。主要研究方向: 结构动力学、结构冲击动力学。

Tel: 029-88268805 E-mail: liuxiaochuan@cae.ac.cn

王彬文(1974-)男, 博士, 研究员。主要研究方向: 结构振动、气动弹性、结构冲击动力学。

Tel: 029-88268810

E-mail: asri623@163.com

白春玉(1984-)男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 结构冲击动力学。

Tel: 15891753905 E-mail: baichunyu2006@163.com

惠旭龙(1989-)男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 材料/结构的动态力学行为。

Tel: 13028512013 E-mail: 742839400@qq.com

陈熠(1987-)男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 起落装置动力学。

Tel: 17392279780 E-mail: gracion@foxmail.com

张宇(1994-)男, 硕士, 助理工程师。主要研究方向: 离散源冲击动力学。

Tel: 18811370223 E-mail: 305869212@qq.com

## Progress and Prospect of Aviation Structure Impact Dynamics

Liu Xiaochuan<sup>2,\*</sup>, Wang Binwen<sup>2</sup>, Bai Chunyu<sup>1,2</sup>, Xi Xulong<sup>1,2</sup>, Chen Yi<sup>1,2</sup>, Zhang Yu<sup>1,2</sup>

1. Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China

2. Aviation Key Laboratory of Technology and Science on Structure Impact Dynamics, Xi'an 710065, China

**Abstract:** Aviation structure impact dynamic study mainly focuses on the typical impact problems of civil and military aircraft. Categorized by the impact velocity, it mainly includes the normal/emergence landing, discrete source impacting such as bird and hailstone strike, containment of engine, combating damage, low risk bomb location in cabin area, etc. For different structure objects, there are dynamic mechanic characteristic testing of materials, energy absorption and dynamic response of components, dynamic load and stress wave propagation. Related studies mainly concentrate on the moving, deformation and damage of structure under the impact loads, numerical methods of dynamic response prediction of the full-scale aviation structure, and designing methods to reduce or control the impact damage. By the way, developing experimental rigs and test methods to reproduce the impact phenomenon or verify the design methods. In this paper, the development of impact dynamic, and the recent technology achievements of Aviation Key Laboratory of Technology and Science Impact Dynamics are summarized, some study hot topics are recommended, and also key technical developing outlook is given.

**Key Words:** aviation structure; impact dynamics; crashworthiness; landing gear; discrete source

Received: 2019-12-13; Revised: 2019-12-30; Accepted: 2020-01-10

\*Corresponding author. Tel. : 029-88268805 E-mail: liuxiaochuan@cae.ac.cn